

Andīna SPRINCE

**METODOĻĢIJA ĪPAŠI SMALKGRAUDAINU CEMENTA
KOMPOZĪTU ILGLAICĪGO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI
UN PLAISU ATTĪSTĪBAS IZPĒTEI**

Promocijas darbs

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte
Materiālu un konstrukciju institūts

Andīna SPRINCE

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorante

**METODOLOĢIJA ĪPAŠI SMALKGRAUDAINU CEMENTA
KOMPOZĪTU ILGLAICĪGO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAI UN PLAISU
ATTĪSTĪBAS IZPĒTEI**

Promocijas darbs

Inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai Būvzinātnes nozarē,
Būvmateriālu un būvtehnoloģiju, būvkonstrukciju apakšnozarēs **(RTU P-06)**

Zinātniskie vadītāji

Dr. sc. ing., profesors **L. Pakrastiņš**

Dr. sc. ing., profesors **A. Korjakins**

Rīga 2015



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

PRIEKŠVārds

Promocijas darbs izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Materiālu un konstrukciju institūtā laika posmā no 2010. gada līdz 2015. gadam. Darba izstrāde līdzfinansēta no Eiropas Sociālā fonda (līguma Nr.: 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005).

Vēlos izteikt pateicību Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes Būvkonstrukciju, Būvmateriālu, Būvmehānikas, Kompozītu materiālu un konstrukciju katedru, kā arī Dānijas Tehniskās universitātes BYG mācībspēkiem un tehniķiem par atbalstu un tehnisko palīdzību.

Īpaši vēlos pateikties Dr. sc. ing. Leonīdam Pakrastiņam par uzaicinājumu, atbalstu, uzmundrinājumu un produktīvo sadarbību visu šo gadu laikā. Pateicos arī Dr.sc.ing. Aleksandram Korjakinam, Dr. sc. ing. Genādijam Šahmenko, Dr. sc. ing. Gregoram Fischeram, M. sc. ing. Ievai Paeglei, M. sc. ing. Ģirtam Būmanim, lab. vad. Jaroslavam Švecam, Dr. sc. ing. Līgai Gailei un Dr. sc. ing. Kasparam Kalniņam par atsaucību un sekmīgo sadarbošanos.

Vislielāko pateicību vēlos izteikt savai ģimenei – vīram Jānim, dēlam Bruno, mammai Ilītai Anitai, tētim Jurim, māsām Laurai, Elīnai, Sabīnei, Kristīnei, brālim Kristapam, vīra mammai Dzintrai, vīra mātai Leldei, radiem un draugiem par iedrošinājumu, atbalstu, sapratni, pacietību un visa veida palīdzību.

Andīna Sprince



2015. gada 27. janvārī, Rīgā

ANOTĀCIJA

Pēdējās desmitgadēs arvien vairāk tiek veidoti jauni, atšķirīgi konstruktīvie cementa kompozīti – sākot ar samazinātu cementa daudzumu, mazākiem pildvielu izmēriem, disperso stiegrojumu šķiedru veidā, ķīmiskajām piedevām un pazeminātu ūdens un cementa attiecību, veidojot betona matricas, kam ir uzlabotas fizikāli mehāniskās īpašības. Lai arī ietekme uz šīm īpašībām ir apzināta, tomēr pastāv vairāki šķēršļi, kas kavē šo jauno cementa kompozītu plašāku izmantošanu būvniecībā. Viens no galvenajiem kavēkļiem ir nepietiekama informācija par šādu uzlaboto cementa kompozītu ilglaicīgajiem un ilgizturības rādītājiem – šļūdi, rukumu un plaisām, kas būtiski var ietekmēt drošu un ilglaicīgu būvju ekspluatāciju. Minēto apgalvojumu papildina fakts, ka esošie īpašību noteikšanas standarti ir nepilnīgi un neviennozīmīgi. Eiropas reglamentējošo standartu sarakstā ir standarts EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”, kurā nav sniegta informācija, kā nosakāmas cementa kompozītu ilglaicīgās un ilgizturības īpašības – šļūdes, rukuma deformācijas, plaisu atvēruma lielums un to attīstības izpēte. Vēl viens būtisks šķērslis – projektēšanas normu ieviešanas aizkavēšanās. Jaunajiem cementa kompozītiem nav piemērojamas aprobētās aprēķina procedūras, kuras izmanto tradicionālajam, parastās stiprības betonam. Vērtības empīriskajās shēmās ir aptuvenas un vairumā gadījumu izmantojamas tikai maznozīmīgu būvju ilglaicīgo īpašību prognozēšanai, jo reālie cementa kompozītu sastāvi, izmantotās izejvielas, apkārtējās vides apstākļi, paraugu ģeometrija un vecums katrā individuālajā projektā var atšķirties no modeļos ievērtētajiem lielumiem. Ja nav lielas datu atbilstības, ir nekorekti izmatot izstrādātos modeļus, jo tādējādi tiktu radītas būtiskas neprecizitātes aprēķinos.

Darba teorētiskajā daļā apkopotas dažādas šļūdes, rukuma, plaisu noteikšanas metodikas un doti dažādi ilglaicīgo īpašību noteikšanas matemātiskie un empīriskie modeļi. Balstoties uz veikto literatūras analīzi, izveidota metodoloģija īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu (ISCK) (kam pildvielas lielākais ģeometriskais izmērs ≤ 5 mm) ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei. Veikta metodoloģijas eksperimentālā aprobācija un iegūto rezultātu analīze. Darba noslēgumā, pamatojoties uz veikto literatūras analīzi, jaunizveidoto metodoloģiju un tās aprobācijas gaitā iegūto eksperimentālo datu analīzi, izstrādātas rekomendācijas iegūto rezultātu praktiskai izmantošanai – standartu un projektēšanas normu pilnveidošanai.

Izveidotā metodoloģija ir vitāli nepieciešama, lai noteiktu mūsdienu jauno, atšķirīgo parastās, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu raksturīgās īpašības, kas nepieciešamas drošu un ilglaicīgu būvju projektēšanā, kā arī pie turpmākas racionālāku cementa kompozītu izveides, kuru izmantošana ļautu samazināt materiāla kopējo patēriņu, kā arī samazināt konstrukciju kopējo svaru, būvēt augstākas būves, izmantot būvelementus ar efektīvāku šķērsriezumu un projektēt graciozākas plānsieniņu konstrukcijas, realizējot jaunas, sarežģītākas formas. Cementa kompozīta uzlabotās īpašības padarīs to par izdevīgāku materiālu no ekonomiskā viedokļa un par iespējams vienīgo materiālu specializētās būvniecības jomā.

Jaunradītā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija nosaka cementa kompozītu sastāva, paraugu izgatavošanas un eksperimentālo pārbaužu veikšanas procedūru aprakstus, kā arī iegūto datu apstrādi un aparatūras izvēli. Metodoloģija lietojama materiālu mehānisko īpašību noteikšanas laboratorijās.

Metodoloģijas izstrādes gaitā pārveidots stends cementa kompozītu vienasīgās šļūdes deformāciju noteikšanai stiepē un adaptēts stends vienasīgās šļūdes deformāciju noteikšanai spiedē. Tāpat izveidots jauns stiepes vienasīgais pārbaudes stends, kas īpaši piemērots maza izmēra paraugu un stiepes plaisu izpētes veikšanai.

Metodoloģija aprobēta dažādiem parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem (15 sastāvjiem), dažādos vecumos (tai skaitā arī agrā), dažādās mitruma koncentrācijās (mitrā un gaissausā), dažādu ģeometrisko formu un izmēra paraugiem (kubiem, cilindriem, prizmām, plātņveida paraugiem). Eksperimentāli noteiktas dažādas minēto materiālu īpašības – spiedes un stiepes stiprība, elastības modulis, vienasīgās šļūdes un žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, noteikts šļūdes koeficients, īpatnējā šļūde, kā arī veikta plaisu rašanās, attīstības, rakstura, plaisu atvēruma lieluma izpēte un noteikts spriegumu intensitātes faktors, sprieguma lauks plaisas galā u.c.

Pamatojoties uz aprobācijas gaitā iegūto eksperimentālo datu statistisko apstrādi, var apgalvot, ka jaunizveidotā metodoloģija ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei ir lietojama dažādu cementa kompozītu raksturīgo īpašību noteikšanai. Darbā izstrādātas arī rekomendācijas iegūto rezultātu praktiskai izmantošanai – standartu un projektēšanas normu pilnveidošanai.

Darbs satur 172 lappuses, 92 attēlus, 8 tabulas, 158 literatūras avotus un 2 pielikumus.

ANOTATION

The last couple of decades have seen an increasing growth in the development of new, innovative and different structural cement composite materials, from reduced amount of cement and smaller dimensions of the aggregate, to disperse reinforcement in the form of fibers, chemical additives and a reduced water-cement ratio, creating cement composite matrixes with improved physical and mechanical properties. Although the influence on these properties has been conscious, there are obstacles that prevent a more widespread application of these new cement composites in construction. One of the main obstacles is the insufficient information about the long-term properties and the durability parameters — creep, shrinkage, and cracking — of these improved cement composites, although they are essential in ensuring safe and long exploitation of structures. The main problem is further complicated by the fact that the existing standards for determination of these properties are deficient and ambiguous. In Europe, the mandatory standards include standard EN 12390 “Testing hardened concrete”, which does not provide information on how to determine such long-term and durability-related properties as creep, shrinkage, research of crack development. Another major obstacle is the delay in the introduction of design standards. The calculation methods that have been tested in practice and are used for the traditional, normal-strength concretes are not applicable to the new cement composites. The values given in the empirical schemes are approximate and, for the most part, can be used mainly for predicting the long-term properties of conventional structures, because in each individual project the actual cement compositions, the raw materials used, the environmental conditions, the geometry and age of the specimens can differ from the ones taken into consideration in the models. Unless most of the parameters coincide, it is not permissible to use the developed models, as that would lead to major inaccuracies in the calculations.

The theoretical part of the work provides a description of the mechanical properties of cement composites, with focus on the research of long-term and durability-related phenomena. It summarizes different methodologies that can be used for the determination of long-term and durability-related properties and shows various mathematical and empirical models for establishing the long-term properties. Based on the performed literature analysis, a new methodology has been established for determining the long-term properties and crack development research in extra fine aggregate cement composites (with the largest aggregate dimension ≤ 5 mm). The methodology has been approbated experimentally, and the achieved results have been analyzed. Based on the literature analysis, the developed methodology, and the analysis of the experiment data, the conclusion of the thesis presents recommendations for practical application of these results, namely, for improvement of standards and design rules.

The developed methodology is of essential importance for the determination of the characteristic properties of the modern and different normal, high, and ultra-high-strength cement composites, which are necessary for the design of safe, durable structures. These properties are also vital for further development of more rational building materials, which

would allow reduction of the overall consumption of the material and the weight of the structure, to build higher structures, to use structural elements with more effective cross sections, as well as to design more graceful thin-walled structures by implementing new, more complex forms. The improved properties of the cement composite will make it the most viable choice from the financial point of view, and the only possible material in the field of specialized construction.

The newly developed methodology for the long-term properties and crack development research in EFACC describes the composition of the cement composites, the procedures for preparing the specimens and performing the experimental tests, as well as for the processing of the obtained data and the equipment selection.

Within the scope of the methodology development, a modified cement composite testing stand for the determination of uniaxial tensile creep strains, and a cement composite testing stand for the determination of uniaxial compression creep strains was successfully adopted. A new uniaxial tensile testing stand specifically suited for the research of cracks and small-sized specimens was also developed. The new methodology can be used for the determination of the mechanical properties of materials in laboratory conditions, and the obtained data can be used for the design of safe buildings and the improvement of the existing standards.

The methodology has been approbated for various normal, high, and ultra-high-strength cement composites (15 mixtures) at various ages (including early), with various humidity conditions (humid and air-dry), with specimens of various geometric shapes and dimensions (cubes, cylinders, prisms, plate-type); in total. Various properties of the materials were determined via experiments — compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, uniaxial creep and uniaxial drying shrinkage strains, creep coefficient, specific creep. Crack initiation, development, propagation, characteristics and the size of the crack mouth openings displacement were also determined, and the strain intensity factor, the strain field at the end of the crack and the toughness of the failure were established.

Based on the statistical processing of the experiment data obtained during the approbation phase, it can be stated that the new methodology for the determination of EFACC long-term properties and crack development research is stable and can be generally used for the determining the characteristics of various cement composites. Recommendations for the practical application of the obtained results have also been developed with the aim of improving the standards and design rules.

The thesis is presented on 172 pages and contains 92 figures, 8 tables, a list of references with 158 items, and 2 appendices.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS.....	11
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne.....	11
Darba mērķis.....	12
Darba uzdevumi.....	12
Pētījuma zinātniskā novitāte.....	13
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums.....	14
Pielietojamie materiāli un pētīšanas metodika.....	15
Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze.....	16
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas.....	16
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.....	17
Promocijas darba rezultātu aprobācija.....	17
Dalība starptautiskajās konferencēs.....	17
Publikācijas.....	19
Promocijas darba sastāvs un apjoms.....	20
1. LITERATŪRAS APSKATS, DARBA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS.....	21
Ievads.....	21
1.1 Šļūdes un rukuma īpašību noteikšanas un plaisu izpētes veikšanas pārbaudes metodes.....	30
1.2 Cementa kompozītu īpašību matemātiskie un empīriskie prognozēšanas modeļi.....	48
1.2.1. Šļūdes reoloģiskie modeļi.....	48
1.2.2. Šļūdes matemātiskie aprēķina modeļi.....	50
1.2.3. Šļūdes un rukuma deformāciju prognozēšanas empīriskie modeļi.....	52
1.2.4. Plaisu modeļi.....	56
1. nodaļas kopsavilkums.....	57
2. ILGLAICĪGO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAS UN PLAISU ATTĪSTĪBAS IZPĒTES METODOLOĢIJA.....	62
2.1. Eksperimentālo paraugu un pārbaudes gaitas izvēles pamatprincipi.....	64
2.2. Definīcijas.....	64
2.3. Paraugu gatavošana.....	70
2.3.1. Paraugu gatavošana šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai spiedē.....	70
2.3.2. Paraugu gatavošana žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai.....	71
2.3.3. Paraugu gatavošana vienasīgās stiepes slodzes un ilgizturības īpašību noteikšana, izmantojot koncentrētās stiepes paraugus.....	71
2.3.4. Paraugu gatavošana stiepes stiprības noteikšanai, izmantojot kuponveida paraugus.....	72
2.4. Eksperimentālās pārbaudes procedūras.....	73

2.4.1. Spiedes stiprības noteikšana	73
2.4.2. Elastības moduļa noteikšana	73
2.4.3. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana spiedē	74
2.4.4. Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju un mitruma zudumu noteikšana	75
2.4.5. Stiepes stiprības un plaisu atvēruma lieluma noteikšana	75
2.4.6. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, izmantojot jaunizveido to pārbaudes standu stiepē	76
2.4.7. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, kā arī plaisu rašanās, attīstības un rakstura izpēte	80
2.4.8. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana stiepē	81
2.5. Nosakāmie parametri	83
2.6. Iekārtu un mērierīču tehniskie dati	85
2.7. Datu apstrāde un parametru noteikšana	86
2. nodaļas kopsavilkums	91
3. JAUNIZVEIDOTĀS METODOLOĢIJAS EKSPERIMENTĀLĀ APROBĀCIJA	94
3.1. Materiālu izvēles pamatojums	94
3.2. Eksperimentālo sastāvu, paraugu izvēle un pārbaudes robežu noteikšana	95
3.3. Izmantotie sastāvi	96
3.4. Eksperimentālā sastāva pagatavošana	101
3.5. Paraugu gatavošana eksperimentālajām pārbaudēm	102
3.6. Eksperimenta gaita	106
3.6.1. Spiedes stiprības noteikšana	106
3.6.2. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana spiedē	106
3.6.3. Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšana	107
3.6.4. Stiepes stiprības noteikšana, izmantojot kuponveida paraugus	108
3.6.5. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma un plaisu rakstura noteikšana, izmantojot koncentrētas stiepes (CT) paraugus	109
3.6.6. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana stiepē	111
3. nodaļas kopsavilkums	111
4. GALVENIE METODOLOĢIJAS EKSPERIMENTĀLĀS APROBĀCIJAS REZULTĀTI UN TO ANALĪZE	113
4.1. Eksperimentālie pārbaudes rezultāti sevišķi augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas un nanosilikas piedevu un PVA šķiedru kokteili	113
4.1.1. Spiedes stiprība	113
4.1.2. Elastības modulis spiedē	115
4.1.3. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē	116

4.1.4. Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas un mitruma zudumi	118
4.1.5. Šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē	121
4.1.6. Šļūdes koeficients spiedē	121
4.1.7. Īpatnējā šļūde spiedē	123
4.1.8. Šļūdes modulis spiedē.....	123
4.1.9. Stiepes stiprība.....	124
4.1.10. Stiepes stiprība un plaisu atvēruma lielums, noteikts, izmantojot kuponveida paraugus...	126
4.1.11. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas stiepē	127
4.1.12. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lielums, noteikts, izmantojot koncentrētas stiepes (CT) paraugus.....	130
4.1.13. Spriegumu intensitātes faktors, spriegumu sadalījums plaisas galā	133
4.1.14. Plaisu sākšanās, attīstības un tālākās izplatības raksturs.....	134
4.2. Ilglaicīgo testu rezultāti un to analīze cementa kompozītu agrā vecumā	140
4.2.1. Spiedes stiprība	140
4.2.2. Elastības modulis spiedē	141
4.2.3. Kopējās relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē	142
4.2.4. Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas	143
4.2.5. Šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē	146
4.2.6. Šļūdes koeficients spiedē	146
4.2.7. Īpatnējā šļūde spiedē	147
4.3. Eksperimentālo datu statistiskā apstrāde.....	148
4. nodaļas kopsavilkums.....	151
5. REKOMENDĀCIJAS	161
5.1. Materiālu darbības aprakstošie modeļi	161
5.2. Rekomendācijas izmaiņām Eiropas standartā EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”” un Eiropas standartā EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”	161
5.3. Ietikumi jauno cementa kompozītu sastāvu izveidē un īpašību noteikšanā.....	163
SECINĀJUMI	164
LITERATŪRAS AVOTI.....	166
PIELIKUMI.....	173
Pielikums Nr. 1 Darbā izmantotie definējumi un teorētiskās pamatnostādnes	173
Pielikums Nr. 2 Dažādu cementa kompozītu apvienotie eksperimentālo pārbaūžu rezultāti	215

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne

Mūsdienās būvmateriālu industrija strauji attīstās, dominē tendence arvien vairāk izmantot augstas stiprības materiālus. Kopš 20. gadsimta sākuma zinātnieki un cementa kompozītu tehnologi strādā pie jaunu, atšķirīgu dažāda veida konstruktīvo daudz komponentu cementa kompozītu izstrādes – sākot ar samazinātu cementa daudzumu, samazinātiem pildvielu izmēriem, disperso stieģrojumu šķiedru veidā, ķīmiskajām piedevām un pazeminātu ūdens un cementa attiecību, kā arī daļu cementu aizvietojo ar otrreizējiem izejmateriāliem u.c. Jaunās cementu kompozītu matricas ir daudz stiprākas, izturīgākas, kā arī dabu saudzējošākas, jo augstas stiprības cementa kompozītu veidošanā tiek patērēts mazāk cementa – konstruktīvo elementu mazo izmēru dēļ, kā arī tādēļ, ka daļa cementa tiek aizstāta ar otrreiz izmantojamiem materiāliem, samazinot neatjaunojamo resursu un dabā nesadalīto materiālu daudzumu. Pielietojot jaunus materiālus kopumā tiktu veicināta ilgtspējīga un ekoloģiskāka būvniecība, dodot ieguldījumu pasaules globālā siltumnīcas efekta samazināšanā (Prisco *et al.*, 2009; Bajare *et al.*, 2012; Korjakins *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2010; Batayneh *et al.*, 2007; Mageswari, Vidivelli, 2010 u.c.). Šādu jauno, augstas stiprības konstruktīvo cementa kompozītu izmantošana būvniecībā ļautu samazināt arī materiāla kopējo patēriņu, kā arī būtiski samazināt konstrukciju kopējo svaru, būvēt augstākas būves, izmantot būvelementus ar efektīvāku šķērsriezumu un projektēt graciozākas plānsieniņu konstrukcijas, realizējot jaunas, sarežģītākas formas. Cementa kompozīta uzlabotās īpašības padarītu tos par izdevīgākiem materiāliem no ekonomiskā viedokļa un par iespējams vienīgajiem materiāliem specializētās būvniecības jomā.

Jaunizveidoto cementa kompozītu matricām vispārīgā gadījumā ir uzlabotas fizikālās īpašības, piemēram, mikrostruktūra – lielāku tilpumu aizņem cementa pasta, samazināta porainība, kā rezultātā cementa kompozītiem ir mazāka ūdensuzsūce un labāki salizturības rādītāji (Graybeal, 2006; Neville, Brooks, 2010; Gilbert, Ranzi, 2011; Justs, Shakhmenko, 2010 u.c.), kā arī uzlaboti materiālu pretestības rādītāji spiedes slodzījumā. Lai arī ietekme uz šīm īpašībām ir apzināta, tomēr pastāv šķēršļi, kas kavē šo jauno, savā ziņā moderno, augstas un sevišķi augstas stiprības un uzlaboto īpašību cementa kompozītu plašu izmantošanu būvniecībā. Viens no galvenajiem kavēkļiem ir nepietiekama informācija par šādu cementa kompozītu ilglaicīgajiem un ilgizturības rādītājiem, kas ir būtiski, lai garantētu drošu un ilgu būvju ekspluatāciju.

Pasaulē ir izstrādāti dažādi standarti betona šļūdes, rukuma īpašību eksperimentālai noteikšanai, bet, apskatot visus pieejamos standartus un modeļus jāsecina, ka sniegtā informācija nav viennozīmīga, ir nepilnīga Tāpat jāpiemin, ka pasaulē neeksistē standartizētas cementa kompozītu šļūdes noteikšanas metodes stiepi. Savukārt cementa kompozītu plaisu pētījumiem ir pieejami tikai plaisu atvēruma lieluma noteikšanas standarti, bet nav pieejamas standartizētas plaisu izpētes metodikas, kas sniegtu informāciju par plaisu un mikroplaisu rašanos, attīstību un raksturu. Diemžēl standarts, kas attiecas uz Eiropas reģionu – EN 12390

„Sacietējuša betona testēšana” – nesniedz informāciju par to, kā nosakāmas cementa kompozītu ilglaicīgās un ilgizturības īpašības – šļūde, rukums, plaisu izpēte.

Vēl viens būtisks šķērslis ir projektēšanas normu ieviešanas aizkavēšanās. Jaunajiem cementa kompozītiem nav piemērojamas aprobētās aprēķina procedūras, kuras izmanto tradicionālajam betonam. Esošie standarti un aprēķina modeļi dod iespēju novērtēt šļūdes un rukuma deformācijas tradicionālajam, parastas stiprības betonam, kas izmantojams klasiskajām konstrukcijām. Pielietotie cementu kompozītu sastāvi, izmantotās izejvielas, apkārtējās vides apstākļi, paraugu ģeometrija un vecums var ļoti atšķirties no modeļos ievērtētajiem faktoriem. Pie zemas datu lielas neatbilstības dēļ ir nekorekti izmatot šos iepriekš izstrādātos modeļus.

Lai jaunus cementa kompozītus varētu izmantot, projektējot drošas, efektīvāku šķērsgriezumu konstrukcijas, nepieciešams izstrādāt jaunu metodoloģiju, kurā būtu sniegta informācija par to, kā nosakāmas dažādu, īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu (kam pildvielas lielākais ģeometriskais izmērs ≤ 5 mm) raksturīgās īpašības. Iegūtās, ilglaicīgās īpašības un plaisu izpētes dati veicinātu arvien racionālāku, spriegumu laukiem atbilstošāku, jauno cementa kompozītu izveidošanu.

Darba mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt metodoloģiju īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu (ISCK) šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai, kā arī stiepes plaisu attīstības izpētei un analīzei.

Darba uzdevumi

Lai īstenotu darba mērķi, izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Izveidot metodoloģijas teorētisko un eksperimentālo pamatojumu. Veikt šļūdes, rukuma deformāciju un plaisu noteikšanas metodiku, modeļu apkopojumu, izpēti un analīzi.
2. Izstrādāt jaunu metodoloģiju, kas īpaši piemērota ISCK un ar kuras palīdzību var noteikt šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, kā arī veikt stiepes plaisu attīstības izpēti un noteikt to atvēruma lielumu.
3. Pārveidot standu cementa kompozītu šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un adaptēt esošo koka un polimērmateriālu šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas standu spiedē.
4. Izveidot jaunu stiepes pārbaudes standu, kas būtu atbilstošāks ISCK plaisu rašanās, attīstības, plaisu rakstura, plaisu atvēruma lieluma noteikšanai ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzesmetodiku.
5. Veikt īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanas, kā arī stiepes plaisu attīstības izpētes un analīzes metodoloģijas eksperimentālu aprobāciju.
6. Analizēt galvenos, eksperimentālo pārbaudīto aprobācijas rezultātus dažādiem – parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem ar borsilikāta spuldžu stikla,

montmorilonīta, mikro- un nanosilikas minerālo piedevu, polivinilalkohola (PVA) šķiedrām, kā arī atrast ISCK ilglaicīgo darbību aprakstošos vienādojumus.

7. Izstrādāt priekšlikumus normatīvo dokumentu EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana” un EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana” pilnveidošanai.

Pētījuma zinātniskā novitāte

- Izstrādāta metodoloģija īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu (ISCK) šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai un stiepes plaisu attīstības izpētei, kas dod iespēju laboratorijas apstākļos noteikt reālo parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības ISCK šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, kā arī stiepes plaisu atvēruma lieluma vērtības, kuras nav iespējams noteikt ar esošajām standartizētajām metodikām un modeļiem.
- Aprobācijas gaitā eksperimentāli iegūtas jauno, atšķirīgo, konstruktīvo cementa kompozītu spiedes un stiepes stiprības, elastības moduļu, šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē un spiedē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas un stiepes plaisu atvēruma lieluma vērtības, kā arī realizēta plaisu rašanās, attīstības un rakstura izpēte, kas līdz šim šiem materiāliem nav veikta. Metodoloģija aprobēta 15 dažādiem īpaši smalkgraudainiem (≤ 5 mm) parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, dažāda vecuma un dažādas ģeometriskās formas paraugiem, divās mitruma koncentrācijās, pie konstanta slogojuma.
- Pārveidots stends šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē (šobrīd pasaulē neeksistē standartizētas šļūdes deformāciju stiepē noteikšanas metodes) un adaptēts šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends spiedē, kurš ļauj izmantot paraugus (≤ 70 mm), kas vairāk raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu konstrukciju izmēriem. Izmantojot šos stendus, paraugiem iespējams pielikt konstantu slodzi un noturēt to nemainīgu ilgu laiku, turklāt eksperimentu laikā nav nepieciešama spriegumu līmeņa korekcija, kalibrēšanas līknes ir lineāras, netiek patērēti energoresursi, iespējams pārbaudīt cementa kompozītus, kam pildvielu maksimālais izmērs ≤ 5 mm, vienlaikus nodrošinot materiālu ietaupījumu.
- Piedāvāts šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē noteikt, izmantojot koncentrētas stiepes (CT) paraugus, kas dod iespēju samazināt eksperimentālo rezultātu izkliedi un ir īpaši piemērots ISCK deformāciju nolasišanai, izmantojot tikai vienu digitālo deformāciju mērītāju atšķirībā no citu autoru piedāvātajām metodēm, kurās izmanto divus vai vairāk deformāciju mērītājus.
- Atrisināts stiepes deformāciju noteikšanas jautājums ar precizitāti $\pm 0,1$ μm , izmantojot digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodi, jo cementa kompozītu stiepes radītās, absolūtās deformācijas ir 10–20 reizes mazākas par spiedes radītajām deformācijām un ir problemātiska šāda lieluma deformāciju reģistrēšana.
- Izveidots jauns, vienasīgais pārbaudes stends stiepē, kas nodrošina plaisu un mikroplaisu attīstības izpēti. Uz jaunā stenda eksperimentāli iegūtie spriegumu-deformāciju līkņu

raksturi ir atbilstošāki teorētiskajiem pieņēmumiem un citu autoru rezultātiem, kā arī uzrāda labu sakritību ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodikā iegūtajiem rezultātiem. Eksperimentālā aprobācija pierāda, ka jaunais pārbaudes stends ir atbilstošāks augstas un sevišķi augstas stiprības ISCK mazu izmēru paraugiem ($150 \times 150 \times 12$ un $100 \times 50 \times 12$ mm) salīdzinājumā ar universālajām pārbaudes iekārtām, kas nav piemērotas mazo izmēru paraugiem un lēnajam slogošanas ātrumam, radot iekārtas sākotnējo tukšgaitu, kā arī mikroplaisu izpētei, jo rada pārāk lielas kustības, tā liedzot iespēju iegūt asus augstas izšķirtspējas fotoattēlus.

- Piedāvāti ISCK kopējo, ilglaicīgo deformāciju un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju procesus aprakstošie modeļi – eksponentvienādojumi, kas dod vislabāko sakritību ar eksperimentālajiem datiem un ar kuru palīdzību var prognozēt no līdzīga materiāla veidotu konstrukciju elementu ilglaicīgo deformāciju lielumu. Piedāvāto modeļu determinācijas koeficients $R^2 = 0,993$, kas norāda uz ļoti augstu eksperimentālo datu un aprakstošās līknes sakrišanu. Pašreiz lietotie šļūdes un rukuma deformāciju aproksimējošie modeļi nav piemērojami un nekorekti apraksta jauno, atšķirīgo ISCK šļūdes vienasīgo un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju procesus, jo ir liela iekšējo un ārējo ietekmes faktoru nesakritība.
- Rekomendēts papildināt Eiropas reglamentēto standartu EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana” ar šļūdes deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām. Pierādīts, ka šļūdes deformāciju vienasīgā spiedē un stiepē noteikšanas metodes dod ticamus rezultātus ($V \leq 22\%$) un ir piemērotas dažādas stiprības cementa kompozītiem.

Promocijas darba praktiskais nozīmīgums

Darba nozīmīguma vērtējumā izdalāmi trīs galvenie iegūto rezultātu izmantošanas virzieni, kuros tos iespējams sekmīgi pielietot.

Piedāvāta un darbā aprobēta īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu (ISCK) šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanas un stiepes plaisu attīstības izpētes metodoloģija, kas dod iespēju laboratorijas apstākļos noteikt reālo parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības ISCK šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, stiepes plaisu atvēruma lieluma vērtības, kā arī veikt stiepes plaisu rašanās, attīstības un rakstura izpēti.

Metodoloģijas aprīkojumā ietilpst pārveidots šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends stiepē un adaptēts šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends spiedē, kā arī jauns pārbaudes stends stiepē – plaisu izpētei. Šļūdes deformācijas stiepē piedāvāts veikt, izmantojot koncentrētas stiepes (CT) paraugus.

Jaunradītā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija nosaka cementa kompozītu sastāva, paraugu izgatavošanas un eksperimentālo pārbaūžu veikšanas procedūru aprakstus, kā arī iegūto datu apstrādi un aparatūras izvēli.

Piedāvātā metodoloģija izmantojama mehānisko īpašību pārbaūžu laboratorijās, lai noteiktu šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, stiepes plaisu atvēruma lieluma vērtības, plaisu sākšanās, attīstības un rakstura

izpētes datus, kas nepieciešami jaunizveidoto, racionālo, ekoloģiskāko, konstruktīvo cementa kompozītu izveidei, kā arī inženieriem – drošu konstrukciju projektēšanā no šiem materiāliem. Dotas tehniskās rekomendācijas cementa kompozītu īpašību noteikšanai.

Izmantojamā digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metode ir piemērotākā stiepes radīto, mazo deformāciju, mikroplaisu un plaisu reģistrēšanai, kas ir būtiski specifiskas ekspluatācijas konstrukcijām.

Jaunā metodoloģija pastarpināti atstās arī labvēlīgu efektu uz pasaules ekoloģisko situāciju, jo, plašāk izmantojot jaunizveidotos ISCK un samazinoties konstrukciju šķērsriezuma izmēriem, tiks samazināts kopējais patērētā cementa daudzums un, aizstājot daļu cementa ar dažādām otrreizējām minerālajām piedevām, tiks samazināts dabā neatjaunojamo resursu un nesadalīto materiālu daudzums, kas kopumā veicinās ilgtspējīgu un ekoloģiskāku būvniecību, dodot ieguldījumu pasaules globālā siltumnīcas efekta samazināšanai.

Sniegti priekšlikumi izmaiņām standartos NE 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana” un EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”.

Promocijas darbā izstrādātie literatūras apkopojumi izmantojami stiegrbetona speckursa lekciju materiālu sagatavošanai par šļūdes un rukuma īpašību noteikšanu un plaisu attīstības izpēti dažādiem uz cementa bāzes veidotiem materiāliem.

Pielietotie materiāli un pētīšanas metodika

Metodoloģijas aprobācijai noteikti stiprības rādītāji, šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, stiepes plaisu rašanās, attīstība, plaisu raksturs un plaisu atvēruma lielums šādiem ISCK – ar borsilikāta spuldžu stiklu, ar montmorilonīta minerālo piedevu, ar mikro- un nanosilikas minerālajām piedevām un ar polivinilalkohola (PVA) šķiedrām un to kokteili.

Cementa kompozītu maisījumu izveidošanai izmantots divvārpstu laboratorijas mikseris (BHS, 3 kW, 20–100 apgr./min).

Paraugu spiedes stiprība noteikta spiedes iekārtā „Controls”, Mod. Nr. C56G2, ar precizitāti $\pm 1\%$ un iekārtas mērdiapazonu 0–3 kN; slogošanas ātrums 0,8 MPa/s.

Cementa kompozītu paraugu stiepes stiprība noteikta universālajā pārbaudes iekārtā „Instron 8516” ar mērdiapazonu 0–120 kN vai „MTS 858 Bionix Test System” ar mērdiapazonu 0–100 kN un slogošanas ātrumu 0,005 mm/s vai universālajā testa iekārtā „Instron E3000” ar mērdiapazonu 0–3 kN un slogošanas ātrumu 0,03 mm/s. Eksperimentālo datu reģistrēšanai izmantotas „WaveMaker” un „Instron” datorprogrammas.

Šļūdes stenda sviru pleca attiecība spiedē ir 1:40 un stiepē – 1:20. Atsvaru precizitāte spiedē – 1/100 kg jeb 0,01% un stiepē 1/10 000 kg jeb 0,0001%. Līdz ar to šļūdes sviru precizitāte spiedē ir $0,01 \times 40 = \pm 0,4$ kg un stiepē – $0,0001 \times 20 = \pm 0,002$ kg.

Deformāciju mērīšanai izmantoti Aistova sistēmas elektriskie tenzometri ar iedaļas vērtību 1 μm un maksimālo gājienu ± 5 mm, mehāniskie pulksteņa mērītāji „IČ” ar iedaļas vērtību 1/100 mm un maksimālo gājienu līdz 10 mm un digitālie deformāciju mērītāji HBM DD1

ar precizitāti $\pm 0,5 \mu\text{m}$ un maksimālo gājienu $\pm 2,5 \text{ mm}$, kā arī daudzkanālu reģistrēšanas iekārta (data logger) „Spider 8”. Mērinstrumentu kalibrēšana veikta izgatavotājrūpnīcās.

Paraugu svara izmaiņas noteiktas ar svāriem „Kern” ar precizitāti $\pm 0,001 \text{ kg}$.

Cementa kompozītu paraugu plaisu atvērumu lielumi noteikti universālajā pārbaudes iekārtā „Instron 5500R” ar mērdiapazonu 0–100 kN vai DTU jaunizveidotajā stiepes pārbaudes stendā ar sloģšanas ātrumu $\sim 5 \mu\text{m/s}$. Plaisu atvēruma mērīšanai izmantota digitālā deformāciju mērierīce „Instron extensometer” ar precizitāti $\pm 2,5 \mu\text{m}$ un maksimālo gājienu $\pm 25 \text{ mm}$.

Stiepes plaisas veidošanās, attīstība un raksturs novērots, izmantojot augstas izšķirtspējas digitālo fotokameru Nikon 3D ar 24 megapikseļu izšķirtspēju ar fiksēto makro objektīvu AF-S MICRO NIKKOR 60 MM 1:2:8G ED. Fotoobjektīva fokusa attālums – 60 mm. Plaisu novērošanā lietots gredzenveidīgais gaismas diožu prožektors Macro LED Ring Light.

Eksperimentāli iegūtie dati apstrādāti, izmantojot MS „Excel”, MathWork „Matlab”, GOM „Aramis”, Imetrum LTD „Imetrum”, HBM „CatMan”, Breeze systems „NKRemote”, Oakdale Engineering „DataFit” un „Time Stamp” datorprogrammas.

Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze

Promocijas darbs balstās uz šādām zinātņu nozarēm un apakšnozarēm.

- Būvmateriāli un būvtehnoloģija
- Būvmehānika
- Būvkonstrukcijas
- Materiālzinātne
- Materiālu mehānika un pretestība
- Materiālu fizika
- Optika
- Vides inženierzinātne

Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas

Izstrādātā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija ir spēkā, izpildoties šādiem nosacījumiem:

- pielietoto cementa kompozītu šļūdes deformāciju spiedē noteikšanas paraugu mazākais izmērs (b) ir ierobežots ar matricas lielākās pildvielas pieckāršu izmēru (\emptyset) – $b_{min} \geq 5 \emptyset$, bet lielākais izmērs (l) ir ierobežots ar stendā maksimāli iespējamo, ievietojamo parauga garumu;
- šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un vienasīgās žūšanas rukuma deformācijas nosakāmas, izvēloties vienotu parauga ģeometriju abām paralēli veicamajām pārbaudēm; ieteicams izmantot paraugus ar ģeometriskajiem izmēriem, kas atbilst nosacījumam $\frac{b}{l} \leq \frac{1}{4}$, kur b – parauga šķērsriezuma lielākais izmērs; l – parauga garums;

- stiepes stiprības un šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un plaisu attīstības izpētei ieteicams izmantot plātņveida paraugus ar iezāgējumu vienā vai abās parauga pusēs;
- šļūdes pārbaužu spriegumu līmenis, nosakot deformācijas lineārajā šļūdes posmā, atrodas robežās līdz 40% no graužošo spriegumu lieluma;
- slopojuma sākums un ilgums, kā arī atslodzes ilgums šļūdes pārbaudēs atkarīgs no izvirzītā mērķa un var būt neierobežots;
- ilglaicīgās pārbaudes var tikt veiktas paraugiem divās mitruma koncentrācijās – gaissausiem un mitriem;
- laboratorijā rekomendēts uzturēt pastāvīgus apkārtējās vides apstākļus (temperatūru un gaisa mitrumu).

Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti

- Metodoloģija, kas īpaši piemērota ISCK ilglaicīgo īpašību – šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju, kā arī stiepes plaisu attīstības izpētei un plaisu atvēruma lieluma noteikšanai.
- legūtas dažādu jaunu, atšķirīgu, konstruktīvo cementa kompozītu raksturīgās īpašības – šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, kā arī veikta stiepes radīto plaisu izpēte – plaisu rašanās, attīstība, raksturs un noteikts plaisu atvēruma lielums.
- Pārveidots stends šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un adaptēts stends šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai spiedē.
- Izveidots jauns pārbaudes stends vienasīgā stiepē, kas īpaši piemērots ISCK un nodrošina to plaisu un mikroplaisu attīstības izpēti.
- Eksponentvienādojumi ISCK kopējo, ilglaicīgo, vienasīgo deformāciju un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju prognozēšanai no līdzīga materiāla veidotu konstrukciju elementiem.
- Rekomendācijas Eiropas reglamentētā standarta EN 12390 „Societējuša betona testēšana” papildināšanai ar šļūdes deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām.

Promocijas darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti 15 starptautiskajās konferencēs.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 15 zinātniskajās publikācijās. Sešas no tām ir indeksētas Scopus datu bāzē. Citēto publikāciju skaits – 4, citētas 26 reizes, h-indeks – 4.

Dalība starptautiskajās konferencēs

1. The second International Conference on “Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM’ 14” of Institute of Research Engineers and Doctors, Birmingham, Great Britain, November 16–17, 2014 (Sprince A., Pakrastinsh L., Vatin N., Long-term Behaviour of Fibre Reinforced Cement Composites).

2. The 4th International Conference “Advanced Construction” of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, October 9–10, 2014 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Behaviour of Fibre Reinforced Cement Based Composites).
3. The 3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes ic-cmtp3, Miskolc – Lillafüred, Hungary, October 6–10, 2014 (Sprince A., Pakrastinsh L., Vatin N., Crack Formation in Cement Based Composites).
4. 11th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques”, Vilnius, Lithuania, May 16–17, 2013 (Gaile L., Sprince A., Pakrastinsh L. Specific Challenges of Adopting Eurocodes in Latvia).
5. The International Scientific Conference „Civil Engineering’13” of Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 16–17, 2013 (Sprince A., Pakrastinsh L., Creep Behavior of High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC)).
6. The 9th International Scientific and Practical Conference „Environment. Technology. Resources” of Rezekne University, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2013 (Sprince A., Pakrastinsh L., Case Study on Early Age Shrinkage of Cement–based Composites).
7. The 8th International Conference Concrete in the Low Carbon Era, Dundee, Great Britain, July 9–11, 2012 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Experimental creep tests on concrete made with montmorillonite nano particles).
8. XVII International conference on mechanics of composite materials Jurmala, Latvia, May 28 – June 1, 2012 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. Experimental Study on early age creep and shrinkage of PVA fiber reinforced high strength concrete).
9. The 3rd International conference HiPerMat2012 „Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials”, Kassel, Germany, March 7–9, 2012 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. Early age creep and shrinkage of high performance concrete).
10. The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University. Riga, Latvia, October 13, 2011 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G. Effect of Montmorillonite Nano Admixture on Long–term Deformations of Concrete).
11. The 7th European FIB Congress on Concrete Engineering CCC2011 „Innovative materials and technologies for concrete structures”, Balatonfüred, Hungary, September 22–23, 2011 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. Creep tests on concrete made of different active additives).
12. The 36th International Conference OW11 „Our world in concrete & structures” of Ci–Premier Pte Ltd, Singapore, Singapore, August 14–16, 2011 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Creep deformations on high strength concrete made of montmorillonite mineral nano particles).
13. The 8th International Scientific Conference „Environment. Technology. Resources” of Rezekne University, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2011 (Sprince A., Korjakins A., Pakrastinsh L. Creep behaviour of concrete with glass waste microfiller).

14. The International Scientific Conference „Civil Engineering’11” of Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 12–13, 2011 (Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Experimental study on creep of new concrete mixtures).
15. The 51th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Latvia, October 11–15, 2010 (Sprince A., Korjakins A., Pakrastinsh L. Eksperimental study of FRC beams in bending and shear).

Publikācijas

1. Sprince A., Pakrastinsh L., Vatin N., Crack Formation in Cement Based Composites // Proceeding of the 3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes ic-cmtp3, Miskolc – Lillafüred, Hungary, October 6–10, 2014. (Iesniegta publicēšanai).
2. Sprince A., Pakrastinsh L., Vatin N., Long-term Behaviour of Fibre Reinforced Cement Composites // Proceedings of the second International Conference on “Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering – CSM’ 14” of Institute of Research Engineers and Doctors, Birmingham, Great Britain, November 16–17, 2014, PP. 116–121. doi: 10.15224/ 978-1-63248-006-4-63 (tiks indeksēta SCOPUS datu bāzē).
3. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Behaviour of Fibre Reinforced Cement Based Composites // Proceedings of the 4th International Conference “Advanced Construction” of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, October 9–10, 2014, PP. 103–107 (tiks indeksēta SCOPUS datu bāzē).
4. Sprince A., Fischer G., Pakrastinsh L., Korjakins A. Crack Propagation in Concrete with Silica Particles // Advanced Materials Research Vol. 842 (2014) PP. 470–476. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/ AMR.842.470 (indeksēta SCOPUS datu bāzē).
5. Gaile L., Sprince A., Pakrastinsh L. Specific Challenges of Adopting Eurocodes in Latvia. Procedia Engineering, Volume 57, 2013, Pages 294–301, ISSN 1877–7058, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.04.040 (indeksēta ISI Web of Science un SCOPUS datu bāzē).
6. Sprince A., Korjakins A., Pakrastinsh L. Time-dependent Behavior of High Performance Fiber-reinforced Concrete // Advanced Materials Research Vol. 705 (2013) PP. 75–80. Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.705.75 (indeksēta SCOPUS datu bāzē).
7. Sprince A., Pakrastinsh L., Creep Behavior of High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC) // Proceedings of the International Scientific Conference „Civil Engineering’13” of Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 16–17, 2013. PP.1–4.
8. Sprince A., Pakrastinsh L., Case Study on Early Age Shrinkage of Cement-based Composites // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2013, Volume II, PP.79–84 (indeksēta SCOPUS datu bāzē).

9. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Experimental creep tests on concrete made with montmorillonite nano particles // Proceedings of the 8th International conference "Concrete in the Low Carbon Era", Dundee, Great Britain, July 9–11, 2012. PP.111–122.
10. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. Early age creep and shrinkage of high performance concrete // Proceedings of Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials 3rd International conference HiPerMat2012. Kassel, Germany, March 7–9, 2012. PP. 309. – 315.
11. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. Creep tests on concrete made of different active additives // Proceedings of the 7th European FIB Congress on Concrete Engineering CCC2011 „Innovative materials and technologies for concrete structures”, Balatonfured, Hungary, September 22–23, 2011. PP. 257–260.
12. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Creep deformations on high strength concrete made of montmorillonite mineral nano particle // Proceedings of the 36th International conference OW11 „Our world in concrete & structures”, Singapore, Singapore, August 14–16, 2011. Volume XXX (2011): PP. 397–406.
13. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Experimental study on creep of new concrete mixtures // Proceedings of the International Scientific Conference „Civil Engineering’11” of Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia, May 12–13, 2011. PP. 20–26 (indeksēta **SCOPUS** datu bāzē).
14. Sprince A., Korjakins A., Pakrastinsh L. Creep behaviour of concrete with glass waste microfiller // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2011, Volume II, PP. 125–131 (indeksēta **SCOPUS** datu bāzē).
15. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Shakhmenko G. Effect of Montmorillonite Nano Admixture on Long-term Deformations of Concrete // Scientific Journal of Riga Technical University, Construction Science, vol.12, Riga 2011, PP. 52–58.

Promocijas darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no anotācijas, ievada, piecām galvenajām nodaļām, kas sadalītas apakšnodaļās, secinājumiem, literatūras avotiem un diviem pielikumiem.

Darbs satur 172 lappuses, 92 attēlus, 8 tabulas, 158 literatūras avotus un 2 pielikumus.

Pirmajā nodaļā dots esošo metodiku apkopojums un analīze, kā arī to galvenās priekšrocības un trūkumi. Precizēts darba mērķis un uzdevumi.

Otrajā nodaļā piedāvāta jaunizveidotā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija.

Trešajā nodaļā veikta jaunizveidotās metodoloģijas eksperimentālā aprobācija.

Ceturtajā nodaļā atspoguļoti un analizēti galvenie eksperimentālās aprobācijas rezultāti.

Piektajā nodaļā apkopotas un izstrādātas rekomendācijas darba rezultātu praktiskai izmantošanai, kā arī standartu un projektēšanas normu pilnveidošanai. Noslēgumā izteikti darba galvenie secinājumi.

1. LITERATŪRAS APSKATS, DARBA TEORĒTISKAIS UN EKSPERIMENTĀLAIS PAMATOJUMS

Ievads

Mūsdienās (20.–21. gs.) pasaules līmeņa problēma ir globālā sasilšana, ko izraisa siltumnīcas efektu veicinošo gāzu koncentrācijas pieaugums atmosfērā, kas galvenokārt rodas no izplūdes gāzēm un dažādiem izmešiem. Neko nemainot, arī turpmāk tiek prognozēta Zemes vidējās temperatūras strauja paaugstināšanās, kas iespaidos pasaules klimatu, veicinot arvien augstāku jūras līmeņa celšanos, izraisot neprognozējamus vētras, plūdus utt.

Eiropas Savienība ir izvēlējusies klimata pārmaiņas par jomu, kam pievēršama īpaša uzmanība. Viena no tautsaimniecības apakšnozarēm, saistītām ar klimata pārmaiņām, ir ekoloģiskā būvniecība, kas visā pasaulē ir izpelņījusies lielu uzmanību un atbalstu.

Būvniecībā iesaistītajiem cilvēkiem jāapzinās, ka jebkura ēka, katra apdzīvotā vieta, tāpat kā autotransports vai rūpnieciskās iekārtas, arī piesārņo apkārtējo vidi. Gan būvmateriālu ražošana un transportēšana, gan pats celtniecības process un turpmākā ēkas ekspluatācija rada izejvielu un enerģijas patēriņu, gaisa un ūdens piesārņojumu, troksni, atkritumus, mikroklimata un apkārtējās vides izmaiņas. Visas ēkas un apdzīvotās vietas kopumā būtiski samazina neatjaunojamus dabas resursus un noslogo vidi (Kruše, 1995).

Ekoloģiskās būvniecības uzdevums ir saimniekot un iztikt ar atjaunojamajiem dabas resursiem, līdz minimumam ierobežojot neatjaunojamo dabas bagātību izmantošanu. Ekoloģiskā būvniecība ietver virkni nosacījumu, tai skaitā atbilstošu būvmateriālu izvēli, neatjaunojamo izejvielu patēriņu, kā arī atkritumu daudzuma samazināšanu u.c. (Bokalders, Bloka, 2013). Viens no ekoloģiskās būvniecības virzieniem ir ilgtspējīga būvniecība, kuras pamatā ir būvniecība bez atkritumiem. Arī Latvijā 2008. gadā ir uzsākts darbs ilgtspējīgas būvniecības normatīvo aktu izstrādē. 2010. gadā tika dibināta Latvijas Ilgtspējīgas būvniecības padome, kuras uzdevumos ir sabiedrības izglītošana un ilgtspējīgas būvniecības popularizācija, darbs, saistīts ar ilgtspējīgu projektu ieviešanu un novērtēšanu u.c. (Latvijas Ilgtspējīgas būvniecības padome, 2015).

Domājot par pasaules ekoloģisko stāvokli, šobrīd īpaši aktuāla ir atkārtoti, otrreiz lietojamo materiālu izmantošana, jo katru gadu atkritumu apjoms pasaulē strauji pieaug (~5% gadā; Taylor *et al.*, 2006). Eiropas kopiena vien rada aptuveni 200 miljonus tonnu sadzīves atkritumu gadā (Vilciņa, 2010). Izmantojot alternatīvus, otrreiz izmantojamus, reciklētos izejmateriālus, tiktu samazināts ne tikai atkritumu apjoms, bet arī šobrīd lietojamo izejmateriālu ražošanas apjoms, tādējādi samazinot arī CO₂ izplūdes daudzumu atmosfērā, kas rodas dažādu būvniecībā izmantojamo izejmateriālu izgatavošanā. Piemēram, katru gadu cementa ražošanas procesā dabā izplūst līdz 10% no kopējā ogļskābās gāzes daudzuma, kas veicina globālo sasilšanu. Latvijā ik gadus tiek savākts arī 300–500 tonnu stikla, kas, kā zināms, dabā laika gaitā nenoārdās (Korjakins, 2011).

Cementa kompozīti ir svarīgi konstruktīvie materiāli, kas tiek izmantoti visā pasaulē – gan virszemes konstrukcijās, gan ūdenī, gan pazemē (sk. att. 1.1.), veidojot dažāda tipa konstrukcijas. Mūsdienās klienti ir kļuvuši prasīgāki, savukārt arhitekti drosmīgāki, piedāvājot

arvien sarežģītākas formas būves, plānojot konstrukcijas, kam ir aizvien lielāki laidumi un augstums, lielākas pārkares. Nereti šādām būvēm nepieciešams izmantot nesošās konstrukcijas, kam ir samazināts, plānāks, reizēm arī sarežģītākas formas šķērsriezums, piemēram, mainīga augstuma laidumi utt., līdz ar to aizvien lielāka uzmanība tiek pievērsta ne tikai cementa kompozītu stiprības, bet arī deformatīvajām, ilglaicīgajām, ilgizturības īpašībām un to izraisītajām sekām, veicinot drošu konstrukciju projektēšanu un ekspluatāciju. Darbā turpmāk izmantotos definējumus un teorētiskās pamatnostādnes skatīt pielikumā Nr. 1.



1.1. att. Pieaugošā cementa kompozītu konstrukciju sarežģītība (autores fotoattēli)

Cementa kompozīti ir mākslīgi, akmensveida kompozīti, cementa/pildvielu būvmateriāli, kam ir tādas laikā mainīgas īpašības kā rukums, šļūde un ar tām saistīto plaisu veidošanās un attīstība, kas būtiski ietekmē konstrukciju spēju veikt tām izvirzītos uzdevumus. Šļūde cementa kompozītā attēlo materiāla dimensionālās izmaiņas laikā pastāvīgas un mainīgas slodzes iespaidā. Papildus šļūdei, neatkarīgi no tā, vai cementa kompozīts tiek slogots vai nē, žūstot tajā rodas rukuma deformācijas. Rukumu definē kā neslogota cementa kompozīta tilpuma samazinājumu, nemainoties temperatūrai. Pat pēc cementa kompozīta sacietēšanas rukuma deformācijas turpina attīstīties.

Attiecībā uz laika ietekmi cementa kompozītu deformācijas var iedalīt divās kategorijās: no laika neatkarīgās deformācijās un no laika atkarīgās deformācijās, savukārt attiecībā uz slodzes ietekmi cementa kompozītu deformācijas var iedalīt no slodzes atkarīgās deformācijās un no slodzes neatkarīgās deformācijās.

Cementa kompozīta šļūdes procesu mehānismi ir sarežģīti un joprojām nav līdz galam izpētīti. Joprojām nav vienotas, universālas cementa kompozītu šļūdes un rukuma procesus

izskaidrojošas teorijas, kas būtu apstiprināta ar to atbalstošiem eksperimentālajiem pētījumiem. Neviena no ierosinātajām teorijām nav līdz galam attiecināma uz visiem iegūtajiem šļūdes un rukuma novērojumu rezultātiem. Iespējams, ka šļūde vienlaikus ietver sevī divus vai vairāk mehānismus, tomēr vēl nav iegūti eksperimentālie pierādījumi arī šādai kombinētai teorijai. Jāatzīmē, ka šļūdes pētījumi galvenokārt ir empīriski. Iegūto datu interpretāciju analītisku modeļu formā ievērojami apgrūtinā fakts, ka, mainot vienu parametru, cementa kompozīta maisījumā vienmēr mainās vēl vismaz viens.

Šļūdes deformāciju lielums galvenokārt ir atkarīgs no slodzes lieluma, kā arī no cementa kompozīta stiprības. Šļūdes un rukuma īpašības tāpat ietekmē arī liels skaits dažādu citu faktoru, piemēram, cementa kompozīta sastāvs (hidratētās cementa pastas apjoms cementa kompozītā, pildvielu veids, apjoms, to ģeometrija un īpašības, ķīmiskās piedevas, šķiedru veids, daudzums un ģeometrija), apkārtējās vides apstākļi (mitrums, temperatūra), kā arī elementa ģeometriskā forma un izmēri.

Daudzu vadošo pētnieku (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch, Александровский u.c.) eksperimentālie pētījumi pierādījuši, ka parastas stiprības cementa kompozītiem šļūdes deformācijas var būt vairākas reizes lielākas nekā sākotnējās – acumirkīgās deformācijas. Tāpat arī to, ka apmēram 50% no šļūdes gala vērtības veidojas pirmajos 2–3 mēnešos kopš slogojuma sākuma un apmēram 90% – pirmo 2–3 gadu laikā, bet savu gala vērtību tā sasniedz aptuveni pēc 10 gadiem (pieņemts praktiskiem nolūkiem), bet teorētiskajos aprēķinos pieņem, ka šļūde savu gala vērtību sasniedz aptuveni pēc 30 gadiem. Savukārt rukuma deformācijas tāpat kā šļūdes deformācijas strauji pieaug pirmajās 2–4 nedēļās, pēc tam rukuma deformāciju pieaugums laikā ir neliels un savu gala vērtību rukuma deformācijas sasniedz aptuveni pēc gada.

Noņemot slodzi ilgstoši slogotam cementa kompozīta elementam, norisinās elastīgs deformāciju atgriezeniskums, kam 2 līdz 3 nedēļu laikā seko pakāpenisks šļūdes deformāciju atgriezeniskums (~20%), lielākā daļa no šļūdes deformācijām (~80%) ir paliekošas un neatgriezeniskas (Theryo, Parson, 2011 u.c.).

Šļūde un rukums ievērojami iespaido cementa kompozītu konstrukciju darbību un ietekmē to ilgmūžību, izturību un stabilitāti. Praksē pieņemts, ka šļūde un rukums ir viena otru papildinošas parādības, kuru ietekmē var rasties un turpināties tāda nevēlama parādība kā plaisu veidošanās. Tādējādi no laika atkarīgo deformāciju lieluma un attīstības ātrumam ir būtiska nozīme, veicot projektēšanu.

Projektējot cementa kompozītu konstrukcijas, tās veido ekonomiskas un racionālas, turklāt konstrukcijām jāatbilst to paredzētajiem darba apstākļiem un ilgmūžības prasībām. Lai apmierinātu šos kritērijus, tiek ņemtas vērā ne tikai deformācijas, kas rodas uzreiz pēc slodzes pielikšanas, t.i. elastīgās deformācijas, bet arī deformācijas, kuras attīstās slogošanas laikā, t.i., šļūdes deformācijas.

Ja šīs īpašības nav zināmas vai netiek ievērotas normās dotās, pieļaujamās vērtības, visbiežāk konstrukcijas un to elementi, galvenokārt tieši šļūdes un rukuma ietekmē, pārmērīgi

izliecas, nevienmērīgi maina savus ģeometriskos izmērus, kļūst nestabili, nepieļaujami daudz plaisā. Ilglaicīgās deformācijas var radīt iepriekš saspriegto konstrukciju sasprieguma zudumus, iekšējo spriegumu pārdalīšanos vai reakciju pārdalīšanos statistiski nenosakāmos locekļos, kas var dramatiski samazināt slodzes uzņemšanas spēju un novest pie ekonomiskiem zaudējumiem un nedrošas konstrukciju tālākas ekspluatācijas. Tāpat ilglaicīgās deformācijas – šļūde un rukums – var radīt ne vien būvju atsevišķo daļu un elementu, bet arī visas būves nevienmērīgu kopējo deformēšanos – atšķirīgo betonēšanas laiku, mainīgo apkārtējās vides apstākļu un konstruktīvo elementu dažādo, ģeometrisko izmēru dēļ. Ja nepilnības pamana laikus, tad visbiežāk tās tiek savlaicīgi novērstas, bet, ja bojājumus nepamana vai ignorē, tie var novest pie konstrukciju bojāejas. Bieži šādas konstrukcijas tiek likvidētas ilgi pirms paredzētā kalpošanas laika beigām (Ping, 1992; Rusch, 1983; Neville, 1983, 2002; Bazant, Wittmann, 1983; Bazant, Murphy, 1992; Branson, 1977; Gilbert, 1988 u.c.).

Gan spiedes, gan stiepes slodzes radītā šļūde ir būtiska, ilglaicīga konstrukcijas īpašība. Šļūdes deformāciju spiedē nevēlamās sekas ir minētas iepriekš. Stiepes izraisītā šļūde ir nozīmīga, lai novērtētu plaisu rašanās risku, īpaši cementa kompozītu agrā vecumā, kā arī novērtējot cementa kompozītu pretestību rukuma un temperatūras spriegumu izraisītai plaisāšanai, kas tālāk var izsaukt pārmērīgu izlieci. Šļūdes deformāciju lielums stiepē jāzina arī, aprēķinot stiepes spriegumus iepriekš saspriegtās sijās, projektējot ūdeni aizmurošas konstrukcijas, ķīmisko vielu rezervuāros u.c. (Westman, 1995; Neville *et al.*, 1983; Marangon *et al.*, 2012; Kovler *et al.*, 1999; Bissonnette, Pigeon, 1995; Atrushi, 2003; Guomin, 2008; Østergaarda *et al.*, 2001, Langeb *et al.*, 2001 u.c.).

Kā zināms, plaisas cementa kompozītu elementos veidojas galvenokārt stiepes spriegumu dēļ, tādēļ ir svarīgi konstrukciju noslodzes laikā prognozēt konstrukciju elementu darbību, izsaukto reakciju un iespējamo seku attīstību. Tā kā cementa kompozītu šļūde un rukums ir maz atgriezeniski procesi, tad vairumā gadījumu tos, tāpat kā plaisas, var pieskatīt konstrukciju darbību pasliktinošām, palielošajām sekām.

Plaisāšana jebkura veida cementa kompozītam ir būtisks trūkums. Plaisu dēļ cementa kompozīts kļūst neviendabīgs, samazinās tā stiprība un ilgizturība. Spriegumu-deformāciju sakarība tiešā veidā ir saistīta ar mikroplaisu attīstību, jo tās ir plaisas, kas veidojas cementa kompozīta saistīšanās procesa laikā (saistes plaisas) un izplatās apkārt esošajā javā. Kā atzīst pētnieki (Winteretal., 1963, 1966, 1969; Slate, Matheus, 1967; Shah, Chandra, 1970; Shah, Slate, 1968; Darwinetal., 1997; ACI-Committee-224, 2001; Reinhardt, Naaman, 1992; Naaman, Reinhardt, 2003, u.c.), mikroplaisām ir būtiska ietekme uz cementa kompozīta darbību un sabrukuma raksturlielumiem. Viens no veidiem, kā ierobežot šo trūkumu, ir dažāda veida un materiāla šķiedru izmantošana, kuras palīdz pārdalīt spriegumus, veidojot šķiedru tiltus starp cementa kompozīta plaisu malām, tādējādi samazinot plaisu kopējo daudzumu, to veidošanās ātrumu un attīstību, plaisu atvēruma lielumu, kā arī mainot plaisu raksturu (Li, Liang, 1986; Fischer, Li, 2007; Pereira, 2012; Hillerborg *et al.*, 1976; Karihaloo, 1995; Bažant, Oh, 1983; Stang *et al.*, 2006; Bazant, 2001, 2008, u.c.).

Pēdējās desmitgadēs arvien vairāk tiek veidoti jauni, atšķirīgi cementa kompozīti, sākot ar samazinātu cementa daudzumu, samazinātiem pildvielu izmēriem, disperso stiegrajumu šķiedru veidā, ķīmiskajām piedevām un pazeminātu ūdens un cementa attiecību u.c., veidojot cementa kompozītu matricas, kas ir daudz stiprākas, izturīgākas un dabu saudzējošākas, jo tiek samazināts cementa patēriņš un izmantoti otrreiz pārstrādātie materiāli, piemēram, borsilikāta spuldžu stikls (Prisco *et al.*, 2009; Bajare *et al.*, 2012; Korjakins *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2010; Batayneh *et al.*, 2007; Mageswari, Vidivelli, 2010, u.c.). Viens no perspektīvākajiem virzieniem ir augstas stiprības cementa kompozītu (*High Strength Cement Composite – HSCC*), augstu īpašību cementa kompozītu (*High Performance Cement Composite – HPCC*) un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu (*Ultra High Strength Cement Composite – UHSCC*) izstrāde un izmantošana.

Pirmo reizi termins „augstas stiprības cementa kompozīts” tika izmantots 1929. gadā ASV augstceltņu būvniecībā (Ковлер, *et al.*, 2005). Spiedes stiprība jaunās paaudzes augstas stiprības cementa kompozītiem ir 40 – 250 MPa. Augstas stiprības cementa kompozīts apzīmē uz cementa bāzes veidotu kompozītmateriālu ar augstu mehānisko stiprību un zemu caurlaidību. Augstas stiprības cementa kompozīts izskatās kā parastas stiprības cementa kompozīts, bet tas atšķiras ar tā augstāko makro- un mikrostrukturālas blīvumu. Augstas stiprības cementa kompozīta neatņemama komponente ir augstas klases portlandcements, proporcionāli paaugstināts cementa daudzums cementa kompozīta sastāvā, samazināts ūdens daudzums, pucolāna piedevas - mikrosilīcija izmantošana un jaunākās paaudzes superplastifikatori un smalkas frakcijas augstvērtīgas pildvielas. Visas šīs komponentes ir vienlīdz svarīgas un izslēdzot kādu no šīm komponentēm iegūtais rezultāts būs neatbilstošs. Lai iegūtu cementa kompozītu ar augstu stiprību nepieciešams samazināt kapilāro poru daudzumu, kas ir iespējams: a) lietojot zemu ū/c attiecību, kas nodrošina ūdens segregācijas izslēgšanu; b) lietojot plastificējošas piedevas, kas nodrošina nepieciešamo cementa kompozīta konsistenci, veicinot brīvā gaisa izspiešanu no cementa kompozīta masas; c) balansējot granulometrisku sastāvu, īpaši mikro- daļiņu līmenī, ko nodrošina, piemēram, mikrosilīcijs un citas smalki maltas minerālās piedevas. Iegūtais cementa kompozīta maisījums atšķiras no tradicionālā cementa kompozīta ar minēto komponentu proporcijām, kā arī kopumā daļiņu izmēri ir daudz mazāki, salīdzinot ar tradicionālo, parastas stiprības cementa kompozītu. Jaunie, augstas stiprības, smalkgraudainie cementa kompozīta veidi ietver sevī augstus spiedes stiprības rādītājus, ilgizturību, atvieglotu iestrādājamību un ļauj paātrināt elementu izgatavošanu straujās cietēšanas rezultātā (Naaman, 1996; Graybeal, 2006; Brandt, 2008; Metha, 2005; Neville, 1998 u.c.).

Papildus šīm priekšrocībām ir atklātas un novērtētas ir vēl daudz citas jauno augstas stiprības cementa kompozītu pozitīvās īpašības un pielietojumu virzieni (Walraven, Shen, 1993; Mehta, 2004; Gilbert, Ranzi, 2011; Toutanji *et al.*, 2010 u.c.):

- augsta agrā spiedes stiprība;
- cementa kompozīta maisījuma plasticitāte un plūstamība;
- pretestība pret nodilumu, nolietojumu, sadrupšanu;

- paaugstināta izturība pret koroziju;
- paaugstināta gāzes un ūdens necaurlaidība;
- augsta pretestība pret ķīmisko vielu (u.c. agresīvo vielu) caurlaidību; u.c.

Tomēr lietojot šādus jaunās paaudzes cementa kompozītus, jāņem vērā pastāvošie riski, kas saistīti ar to izmantošanu – paaugstināta jutība pret plaisu rašanos, īpaši cementa kompozītam agrā vecumā, autogēnā un žūšanas rukuma deformāciju pieaugums, cementa kompozīta trauslums. Lai cementa kompozītu izmantošana sniegtu iespējami lielāku ieguvumu un, lai spētu izvairīties no defektiem, nepareizas darbības rezultātā, ir jāveic pareizi, tehnoloģiski pasākumi cementa kompozītu iestrādāšanas un aprūpes – cietēšanas periodā. Cementa kompozīts agrā vecumā ir nepārtraukti mainīgs kompozītmateriāls ar laikā mainīgām mehāniskajām īpašībām. Cementa kompozīta cietēšanas laikā notiek hidratācijas process, kā rezultātā paaugstinās cementa kompozīta temperatūra. Hidratācijas temperatūras pieauguma rezultātā cementa kompozītā notiek straujas tilpuma izmaiņas, ko papildus pavada rukums. Kā rezultātā cementa kompozītā rodas ievērojami iekšējie spriegumi, kas var novest pie plaisu rašanās (Naaman, Reinhardt, 2003).

Šādu, jauno, augstas stiprības cementa kompozītu izmantošana būvniecībā dotu iespēju samazināt materiālu patēriņu, kā arī konstrukciju kopējo svaru, būvēt augstākas būves, izmantot mazāku, efektīvāku šķērsriezumu būvelementus un projektēt graciozākas plānsieniņu konstrukcijas, kā arī realizēt jaunas, sarežģītākas formas. Cementa kompozīta uzlabotās īpašības padarītu tos par izdevīgākajiem materiālu no ekonomiskā viedokļa un par iespējams vienīgajiem materiāliem specializētās būvniecības jomā.

Šobrīd daudz tiek pētītas šādu jaunizveidotu materiālu fizikālās un stiprības īpašības. Pārbaudīts, ka tie nodrošina augstākas pakāpes mehāniskās īpašības – spiedes stiprību un ilgmūžību, bet to darbība pielikto spriegumu ietekmē var atšķirties no tradicionālā, parastas stiprības betona darbības. Lai arī dažādu faktoru ietekme uz šīm īpašībām ir apzināta, pieaugošais jauno cementa kompozītu izmantošanas apjoms tiek ierobežots, jo pastāv šķēršļi, kas kavē šo jauno, savā ziņā moderno, augstas un sevišķi augstas stiprības un uzlaboto īpašību cementa kompozītu plašu izmantošanu būvniecībā (Graybeal, 2006; Neville, Brooks, 2010; Gilbert, Ranzi, 2011; Justs, Shakhmenko, 2010 u.c.). Viens no galvenajiem kavēkļiem ir pagaidām nepietiekamā informācija par šādu cementa kompozītu ilglaicības rādītājiem un iespējami palielināto jutīgumu pret plaisāšanu. Šāda, nepietiekama ilglaicīgo un ilgizturības īpašību izpēte var būtiski ietekmēt drošu un ilgu būvju ekspluatāciju. Tāpat jāmin, ka nav izveidoti būvnormatīvi, kas atbilstu konstrukciju projektēšanai no šādiem, uzlabotiem cementa kompozītiem.

Cementa kompozītu konstrukcijās šļūde vienlaikus ir gan vēlama, gan nevēlama parādība. No vienas puses tā ir vēlama, jo nodrošina cementa kompozītam nepieciešamo elastības pakāpi, samazinot ārējās slodzes izraisītos spriegumus un novēršot spriegumu koncentrāciju, bet no otras puses – šļūdes deformācijas darba slodžu iedarbībā bieži vien izraisa pārmērīgu izlieci, kas savukārt var izraisīt nestabilitāti (piem., arkās), plaisāšanu, garu kolonnu izliekšanos, iepriekš saspriegtai konstrukcijai sasprieguma zudumu un iekšējo spriegumu un

reakciju pārdalīšanos statistiski nenosakāmos locekļos. Ja konstrukcija ir nestabila, šļūdes un rukuma deformācijas var dramatiski samazināt slodzes uzņemšanas spēju. Tādēļ ir svarīgi noteikt maksimālo deformāciju palielinājumu laikā. Šļūdes un rukuma deformāciju lieluma prognozēšanai ir būtiska nozīme, lai novērtētu cementa kompozīta konstrukciju noturību pret plaisām un nepieļaujami lielu izlieci.

Šļūdes lielums, kas nepieciešams konstrukciju aprēķinos, var tikt novērtēts dažādās pakāpēs. Pakāpe ir atkarīga no aprēķināmās konstrukcijas tipa un aprēķinam pieejamo datu kvalitātes. Gadījumos, kad nepieciešams tikai aptuvens šļūdes deformāciju novērtējums, paredzamās šļūdes deformācijas ir iespējams novērtēt balstoties tikai uz pāris parametriem, – tādiem kā relatīvais gaisa mitrums, cementa kompozīta vecums un elementa ģeometriskie izmēri. Otra galējība ir deformāciju jutīgas konstrukcijas. Šajā gadījumā šļūdes deformāciju novērtējums tiek balstīts uz apjomīgu, laboratorijā iegūtu rezultātu apkopojumu un datoranalīzi (Fanourakis, Ballim, 2003). Ideālā variantā tiek meklēts kompromiss starp vienkāršu rezultātu prognozēšanu un laboratorijā iegūtu datu precizitāti.

Šļūdes iedarbība uz konstrukcijām, galvenokārt, jāņem vērā lietojamības robežstāvokļa pārbaudēs. Cementa kompozīta konstrukciju lietojamības defekti, piemēram, pārmērīga plaisāšana un/vai pārāk liela izliece, ir bieži sastopami. Nestspējas robežstāvoklī šļūdes efekti jāapskata tikai gadījumos, kad tie ir ārkārtīgi lieli, piemēram, pārbaudot nestspējas robežstāvokļa stabilitāti, kad svarīgi ir arī otrās kārtas efekti (otrās kārtas efekti ir papildu iedarbības efekti, ko rada konstrukciju deformācijas).

Vispārpieņemts uzskatīt, ka dzelzsbetona konstrukcijās spiedes spriegumus, parasti, uzņem cementa kompozīts, bet stiepes spriegumus – tērauda stiegrojums. Tas arī izskaidro faktu, ka visa veida zinātniskajā literatūrā šobrīd iespējams atrast plašu informāciju par šļūdi spiedē, bet šļūde stiepē ir pētīta nepietiekami, ko pastiprina arī tas, ka pasaulē nav atrodams neviens standarts, kas nosacītu, kā eksperimentāli noteikt ilglaicīgo parametru vērtības stiepē. Tāpat būtiski atzīmēt, ka tikai tradicionālajam, parastās stiprības betonam ir veikti plaši, eksperimentālie pētījumi un ilglaicīgo parametru (spiedes sloojuma) vērtības ir atrodamas dažādos standartos un empīrisko datu bibliotēkās.

Pasaulē ir izstrādāti dažādi standarti betona ilglaicīgo īpašību eksperimentālai noteikšanai, bet, apskatot visus pieejamos standartus un modeļus šļūdes deformāciju noteikšanai spiedē, jāsecina, ka sniegtā informācija nav viennozīmīga, ir nepilnīga un izstrādātās metodikas vairāk atbilstošas parastās stiprības betonu ilglaicīgo īpašību prognozēšanai. Šļūdes deformācijas spiedē, galvenokārt, ir ieteikts noteikt, izmantojot cilindriskus paraugus, piedāvātās paraugu ģeometriju attiecības svārstās no $l/2$ līdz $l/4$, tāpat ir standarti, kas iesaka lietot prizmatiskas formas paraugus. Deformācijas tiek ieteikts noteikt, paraugus, galvenokārt, ievietojot atsperu vai hidropneimatiskajos stendos, bet šiem stendiem ir būtiski trūkumi – paraugus nav iespējams pakļaut nemainīgai slodzei neierobežoti ilgu laiku, jo uzspriegums atsperē ar laiku samazinās un eksperimentu laikā nepieciešamas veikt spriegumu līmeņa korekcijas. Hidropneimatisko stendu galvenais trūkums ir to atkarība no elektriskās strāvas, līdz

ar to slopojuma vienmērīgums var svārstīties atkarībā no elektriskās strāvas stipruma, turklāt ir papildus izdevumi par elektroenerģijas patēriņu. Tāpat esošie standarti nav piemēroti mazu izmēru paraugiem, kādi tieši raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem. Lielākā daļa standartu paredz, ka paralēli šļūdes pārbaudēm jānosaka arī žūšanas rukuma deformācijas, tomēr nav dota viennozīmīga informācija par rukuma paraugu ģeometriju, kā arī nav norādīts, kurā parauga daļā šīs deformācijas nosakāmas. Savukārt cementa kompozītu plaisu pētījumiem ir pieejami tikai plaisu atvēruma lieluma noteikšanas standarti, bet nav pieejamas standartizētas plaisu izpētes metodikas, kas sniegtu informāciju par plaisu un mikroplaisu rašanos, attīstību un raksturu.

Diemžēl standarts EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”, kas attiecas uz Eiropas reģionu nesniedz informāciju par to, kā nosakāmas betona ilglaicīgās un ilgzturības īpašības – šļūde, rukums un plaisu izpēte. Uz Eiropas reģionu var tikt attiecināti arī standarti ISO 1920-9:2009 „Testing of concrete – Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression”, kurā sniegta informācija par to, kā nosakāmas tikai šļūdes deformācijas spiedē, un ISO 1920-8:2009 „Testing of concrete – Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory”, kurā savukārt aprakstīts, kā nosakāmas žūšanas rukuma deformācijas. Būtiski pieminēt, ka nekur pasaulē nav izstrādāts standarts cementa kompozīta šļūdes deformāciju stiepē noteikšanai. Līdz šim tikai daži autori ir veikuši šādus eksperimentus, izmantojot pašu izveidotu metodiku un iekārtas.

Cementa kompozīta plaisu pētījumiem ir pieejami tikai plaisu atvēruma lieluma noteikšanas standarti, tai skaitā arī aizgūtie un adaptētie standarti no citu materiālu testēšanas metodikām, kā, piemēram, no metāla testēšanas standarta (ASTM-Standard E399). Līdz šim nav izstrādātas, standartizētas plaisu izpētes metodikas, kas sniegtu informāciju par plaisu un mikroplaisu rašanos, attīstību un raksturu. Galvenais princips visām plaisu noturības testu metodikām ir iepriekš izveidots iezāgējums, kas pastiprina spriegumu koncentrāciju, un pieliekot slodzi stimulē un ļauj precīzi prognozēt plaisas attīstības vietu un virzienu. Pie šādiem, iepriekš izveidotiem nosacījumiem, ir iespējams novērtēt materiāla spēju pretoties stiepes spēkam un novērot galveno plaisas attīstību un plaisu atvēruma lielumu.

Cementa kompozīta šļūdes un rukuma testi ir laikietilpīgi un iepriekš pastiprināta uzmanība jāpievērš funkcijas izvēlei, kas tiks izmatota eksperimentāli iegūtās līknes piedzīšanai. Pēc relatīvi ātrajos šļūdes testos iegūtajām funkcijām, jāparedz deformācijas ļoti ilgā laika periodā.

Eksistē ļoti daudz dažādu empīrisku šļūdes spiedē un žūšanas rukuma prognozēšanas aprēķina modeļu, kas paredzēti parastas stiprības betoniem un, kas balstīti uz plašiem eksperimentāliem cementa kompozīta šļūdes un rukuma datiem, kas iegūti, apkopojot daudzu pasaules pētnieku veikto eksperimentu rezultātus. Jebkurš matemātiskais vai empīriskais prognozēšanas modelis dod aptuvenu ilglaicīgo īpašību vērtību, jo katrā no tiem ir ievērtēta tikai daļa būtisko cementa kompozīta īpašību ietekmējošos faktoru. Lielākajā daļā empīrisku modeļu tiek ievērtēts cementa tips, spiedes stiprības lielums, cementa kompozīta parauga

vecums, efektīvais parauga biežums, relatīvais gaisa mitrums, bet citi, būtiski ilglaicīgo parametru ietekmes faktori, kā piemēram, cementa un granulometriskais pildvielu daudzums, ū/c attiecība, gaisa daudzums, granulometrijas veids, cementa kompozīta cietēšanas paņēmiens, pirms slogošanas žūšanas ilgums, slodzes raksturus, slogojuma ilgumus, cementa kompozīta forma, gaisa temperatūru ievērtēti nepilnīgi. Literatūrā kopā minēti ~30 dažādi iekšējie un ārējie ilglaicīgo īpašību ietekmējošie faktori. Vispilnīgāk, t.i., 21 faktoru no tiem, pielieto modelis RILEM Model B3 (1995), bet tas, tāpat kā lielākā daļa modeļu, stingri rekomendēts tikai parastas stiprības betoniem.

Tāpat jāatzīmē, ka, apskatot dažādos modeļus, ko piedāvā autori visā pasaulē, konstatēts, ka to vērtības empīriskajās shēmās ir ļoti aptuvenas un izmantojamas lielākoties mazsvarīgu būvju ilglaicīgo parādību prognozēšanai, jo reālie cementu kompozītu sastāvi, izmantotās izejvielas, apkārtējās vides apstākļi, paraugu ģeometrija un vecums var ļoti atšķirties no modeļos ievērtētajiem parametriem. Ja nav lielas parametru sakritības, ir nekorekti izmatot šos iepriekš izstrādātos modeļus, jo tādējādi var rasties neprecizitātes aprēķinos.

Vēl viens būtisks šķērslis ir projektēšanas normu ieviešanas aizkavēšanās. Jaunajiem cementa kompozītiem nav piemērojamas aprobētās aprēķina procedūras, kuras izmanto tradicionālajam betonam. Augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem ir atšķirīga spiedes stiprība un elastības modulis – galvenie faktori, kurus ievērtē projektēšanā. Cementa kompozītu stiprību ievērtē nestspējas robežstāvokļa aprēķinos, savukārt to elastību un deformējamību – galvenokārt, lietojamības robežstāvokļa noteikšanā. Esošie standarti un aprēķina modeļi dod iespēju novērtēt šļūdes un rukuma deformācijas tradicionālajam, parastas stiprības betonam, kas izmantojams klasiskajām konstrukcijām.

Eiropā šobrīd noteiktais būvkonstrukciju projektēšanas standarts ir EN 1992-1-1:2005 Betona konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”, kura 3.1.1. nodaļas (1) punktā minēts, ka šis standarts lietojams normālas un augstas izturības betonam, kura kubiskā stiprība nav augstāka par 105 MPa (atsaucoties uz standarta 3.1. tabulu). Tāpat EN 1992-1-1:2005 3.1.4. nodaļas (2) punktā minēts, ka standarta 3.1. att. dotās šļūdes koeficienta vērtības ir izmantojamas tikai gadījumos, kad netiek prasīta augsta precizitāte un kad betona cilindriskā stiprība nepārsniedz 90 MPa, bet nav norādīts, kā rīkoties, ja projektā tiek prasīta augstāka precizitāte un tiek izmantoti augstākas stiprības cementa kompozīti.

Eiropas reģionam attiecināmais standarts EN 1992-1-1:2005 dod šļūdes koeficientu vērtības, kuras ir nekorekti lietot no modeļa atšķirīgam cementa kompozītam un konstrukciju aprēķiniem. Lai dotie EN 1992-1-1:2005 šļūdes koeficienti būtu izmantojami konstrukciju aprēķinos, ir nepieciešams atrast un pielieto būtisko ietekmes faktoru pārejas koeficientus. Bet, lai tos noteiktu, ir jāveic plaši eksperimentāli pētījumi dažādu veidu parastas un augstas stiprības cementu kompozītiem.

Standarta ACI 209R-92 1997. gadā pārāpstiprinātajā pielikumā (ACI 209R-92 “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”) ir apkopoti

dažādi šļūdes un rukuma deformāciju ietekmējošo faktoru koeficienti. Šis standarta pielikums ir vienīgais šāda veida inženieraprēķinu palīgmateriāls, kur apkopots liels skaits dažādu autoru eksperimentālo datu rezultāti (no 1937.–1979. gadam). Šie, atrastie dažādu faktoru ietekmes koeficienti izmantojami tikai parastas stiprības cementa kompozītam. Nav korekti tos pielietot mūsdienu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, atšķirīgo iekšējo un ārējo faktoru dēļ.

Mūsdienās nav veikts jauno, atšķirīgo cementa kompozīta sastāvu un uzlaboto īpašību cementa kompozītu eksperimentālo, ilglaicīgo parametru apkopojums – nav izveidota eksperimentālo datu bibliotēka un nav atrasti dažādu iekšējo un ārējo, šļūdes un rukuma ietekmējošo faktoru koeficienti, kas būtu pielietojami konstrukciju aprēķinos un, kas atvieglotu konstrukciju projektēšanu.

Lai jaunus cementa kompozītus varētu izmantot, projektējot drošas konstrukcijas, nepieciešams izstrādāt jaunu metodoloģiju, kurā būtu sniegta informācija kā nosakāmi dažādi materiālu raksturojošie parametri.

1.1. Šļūdes un rukuma īpašību noteikšanas un plaisu izpētes veikšanas pārbaudes metodes

Konstrukciju modelēšana un darbības prognozēšana nav iespējama bez informācijas par atsevišķo komponentu īpašībām.

Eksperimentāli šļūdes raksturlielumus spiedē var noteikt, izmantojot kādu no cementa kompozīta testēšanas standartiem:

- ISO 1920-9:2009 Testing of concrete - Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression, published 04/01/2009 by International Organization for Standardization
- ASTM C512/C512M-10 Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, published 12/01/2010 by ASTM International
- RILEM TC 107-CSP: Creep and shrinkage prediction models: principles of their formation. Measurement of time-dependent strains of concrete. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 31, October 1998
- ACI 209R-92(R1997) Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, published 01/01/1992 by American Concrete Institute.
- JIS A 1157:2010 Method of test for compressive creep of concrete, published 01/01/2010 by Japanese Industrial Standard / Japanese Standards Association
- AS 1012.16-1996 Methods of testing concrete - Determination of creep of concrete cylinders in compression, published 01/01/1996 by Standards Australia
- EN 13584:2003 Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of creep in compression for repair products, published 08/16/2004 by British-Adopted European Standard.
- EN 1355:1997 Determination of creep strains under compression of autoclaved aerated concrete or lightweight aggregate concrete with open structure, published 10/15/1997 by British-Adopted European Standard.

- RILEM TC 129-MHT: test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Recommendations: Part 7: Transient Creep for service and accident conditions. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 31, June 1998, pp 290-295.

- ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести.

Apskatot standartus, kas var tikt attiecināti uz Eiropas reģionu (ASTM C512/C512M-10, ISO 1920-9:2009 un RILEM TC 107-CSP) un, kas paredzēti šļūdes spiedes deformāciju noteikšanai, jāsecina, ka visos ieteikts šļūdes deformācijas spiedē noteikt ar cilindrisku formu paraugiem, tos ieliekot atsperu vai hidropneimatiskajos sloģojuma stendos, un pakļaujot konstantai spiedes slodzei ($\leq 0,4$ graujošās slodzes, lai tiktu apskatīts lineārās šļūdes posms), un nosakot deformācijas ilgstošā laika periodā. Vienlaikus, identiskos apkārtējās vides apstākļos un identiskas formas paraugam, tiek ieteikts mērīt bez slodzes deformācijas, t.i., žūšanas rukumu. Lai iegūtu šļūdes deformācijas no kopējām deformācijām ir jāatņem žūšanas rukuma deformācijas un elastīgās deformācijas.

Atsevišķos standartos dota informācija, kā nosakāmas abas kopējās šļūdes komponentes - pamatšļūde un žūstošā šļūde. Nosakot pamatšļūdes lielumu, jāpanāk, lai žūšanas rukums neietekmē rezultātus, t.i., jāpanāk paraugu izolēšana, lai paraugā nenotiek mitruma pārvietošanās no tā iekšpuses uz apkārtējo vidi, piemēram, ietinot tos divās kārtās folijas.

Tāpat ir izdoti papildus standarti, kas izmantojumu šļūdes un rukuma deformāciju prognozēšanai:

- ACI 209.2R-08 Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete, published 01/01/2008 by American Concrete Institute.
- ACI 209.1R-05 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete, published 01/01/2005 by American Concrete Institute.

Eksperimentāli rukuma raksturlielumus var noteikt, izmantojot kādu no šiem papildus cementa kompozīta testēšanas standartiem:

- ISO 1920-8:2009 Testing of concrete - Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory, published 04/01/2009 by International Organization for Standardization.
- ASTM C878/C878M-09 Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete, published 06/15/2009 by ASTM International.
- ASTM C531-00(2012) Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, published 08/01/2012 by ASTM International.
- ASTM C426-10 Standard Test Method for Linear Drying Shrinkage of Concrete Masonry Units, published 12/01/2010 by ASTM International.
- ASTM C1579-13 Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert), published 04/01/2013 by ASTM International

- BS EN 680:2005 Determination of the drying shrinkage of autoclaved aerated concrete, published 01/16/2006 by British-Adopted European Standard
- ACI 223R-10 Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete, published by American Concrete Institute.
- AS 1012.13-1992 Methods of testing concrete – Determination of the drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory

Slodzes radītu plaisu noteikšanai izmanto daudz un dažādas metodes. Dažas no tām ir aizgūtas no citu materiālu testēšanas metodikām, kā, piemēram, no metāla testēšanas standarta (ASTM—Standard E399) vai citiem standartiem ASTM E647 (ASTM-E647, 2005). Laika gaitā aizgūtās metodikas ir interpretētas, piemēram, tiek mainīti paraugu ģeometriskie parametri, lai iegūtu pēc iespējas atbilstošākus paraugus un korektākus datus tieši cementa kompozītiem.

Galvenais princips visās testa metodikās ir iepriekš izveidots iezāģējums, kas pastiprina spriegumu koncentrāciju, un pieliekot slodzi stimulē plaisas attīstību, tā galā, kas ļauj precīzi paredzēt plaisas attīstības vietu un virzienu. Pie šādiem, iepriekš izveidotiem nosacījumiem, pie noteiktām slodzēm ir iespējams skaidri novērot plaisas attīstību un veikt to izpēti. Veicot padziļinātāku izpēti un datu analīzi, iespējams noteikt materiāla trauslumu raksturojošo parametrus, piemēram, lūzuma izturību. Šie testi tiek pielietoti, lai novērtētu materiāla spēju pretoties stiepes spēkam un novērstu plaisu rašanos un attīstību.

Eksperimentāli plaisu noturības raksturlielumus var noteikt, izmantojot kādu no cementa kompozīta testēšanas standartiem:

- ASTM C1581/C1581M-09a Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage, published 07/01/2009 by ASTM International.
- ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures, published 01/01/2001 by American Concrete Institute.
- ACI 224.1R-07 Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures, published 03/01/2007 by American Concrete Institute.
- ACI 446.1 R-91 (Reapproved 1999) Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties, Reported by ACI Committee 446, Fracture Mechanic

Diemžēl standarts EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”, kas attiecas uz Eiropas reģionu nesniedz informāciju, kā nosakāmas cementa kompozīta ilglaicīgās un ilgizturības īpašības – šļūde, rukums, plaisu izpēte. Eiropas reģionam var tikt attiecināti arī standarti ISO 1920-9:2009 „Testing of concrete – Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression”, kurā sniegta informācija, kā nosakāmas tikai šļūdes deformācijas spiedē un ISO 1920-8:2009 „Testing of concrete -- Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory”, kurā aprakstīts kā nosakāmas žūšanas rukuma deformācijas, bet šie standarti nav sasaistāmi. Būtiski pieminēt, ka nekur pasaulē nav

izstrādāts cementa kompozīta šļūdes deformāciju stiepē noteikšanas standarts. Līdz šim tikai daži autori ir veikuši šādus eksperimentus uz pašu izveidotu metodiku un iekārtu bāzes.

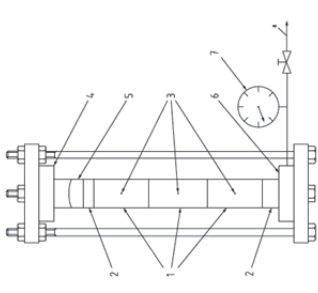
Apskatot visus pieejamos ilglaicīgo un ilgzturīgo īpašību noteikšanas standartus, sk. tab. 1.1., jāsecina, ka informācija nav viennozīmīga, nepilnīga.

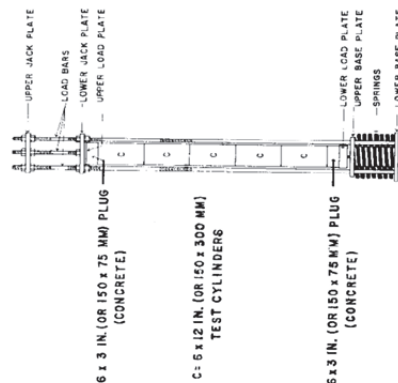
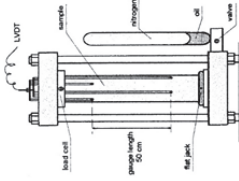
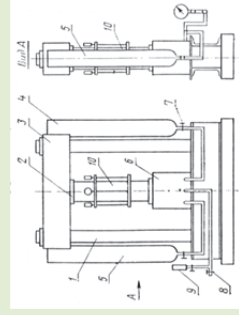
Šļūdes deformācijas spiedē, galvenokārt, ieteikts noteikt ar cilindriskiem paraugiem, piedāvāto paraugu ģeometriju attiecības svārstās no $l/2$ līdz $l/4$, tāpat ir standarti, kas iesaka lietot prizmatiskas formas paraugus. Tāpat standartos piedāvāti atšķirīgi testa stendi. Šļūdes deformācijas spiedē, galvenokārt, tiek ieteikts noteikt paraugus ievietojot atsperu vai hidropneimatiskajos stendos. Bet šiem stendiem ir būtiski trūkumi, paraugus nav iespējams pakļaut nemainīgai slodzei neierobežoti ilgu laiku, jo uzspriegums atsperē ar laiku samazinās un eksperimentālo pārbaūžu laikā ir nepieciešams veikt spriegumu līmeņa korekcijas. Hidropneimatisko stendu galvenais trūkums ir to atkarība no elektriskās strāvas, līdz ar to slodzes vienmērīgums var svārstīties, atkarībā no elektriskās strāvas stipruma. Papildus izdevumi par elektroenerģijas patēriņu. Tāpat šie standarti nav izmantojami mazu izmēru paraugiem, kas raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem. Standarti vairāk piemēroti parastas stiprības betonu ilglaicīgo deformāciju noteikšanai. Lielākā daļa standartu apraksta, ka paralēli šļūdes pārbaudēm jānosaka žūšanas rukuma deformācijas, bet nav dota viennozīmīga informācija par paraugu ģeometriju un, kurā parauga daļā šīs deformācijas nosakāmas.

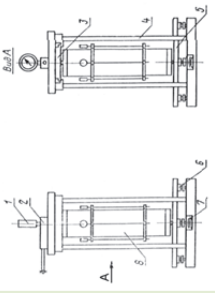
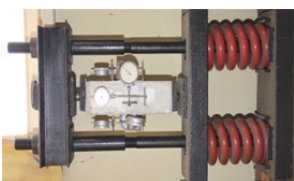
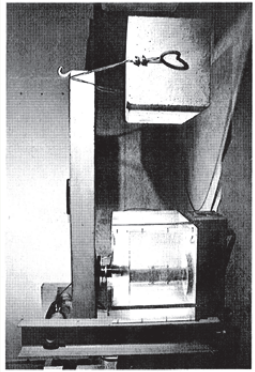
Augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu stiepes stiprība ir salīdzinoši maza (~5–10% no spiedes stiprības) un ir problemātiski piemērlēt testa iekārtas, kas būtu piemērotas mazām slodzēm un, kuru darbības laikā iekārtā nerastos nepieļaujami lielas kustības, lai tās būtu piemērojamas arī maza izmēra paraugu plaisu izpētes pārbaudēm.


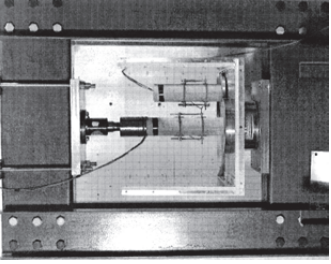
1.1. tabula

Šūdes, rukuma deformāciju noteikšanas un plaisu izpētes veikšanas pārbaudes apkopotās metodes

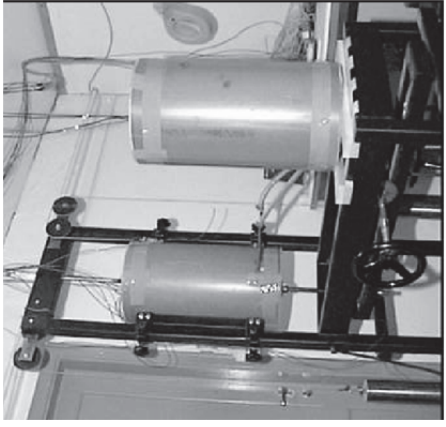
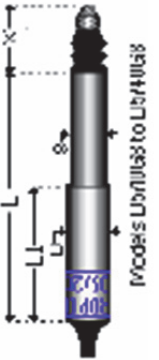
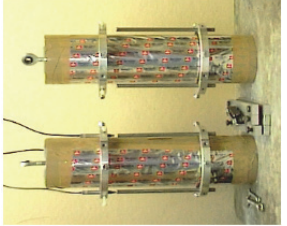


Standarts/ autors	Iekārta	Parauga ģeometrija un skaits	Mērierīces, to bāze un skaits	Cementa kompozīta sastāvs un vecums (testa sākumā)	Spriegumu līmenis
Šūdes deformāciju spiedē noteikšanas metodikas					
ISO 1920-9:2009 „Testing of concrete – Part 9: determination of creep of concrete cylinders in compression”	<ul style="list-style-type: none"> Atsperu slodzes iekārta;  <ul style="list-style-type: none"> hidrauliskā slodzes iekārta; kapsulas iekārta 	<p>Parauga forma – cilindrs;</p> <p>Paraugu ģeometrija - \varnothing 100mm;</p> <p>Paraugu izmērs tiek ierobežots ar maksimālo pildvielas izmēru, sk. ISO 1920-3-2005;</p> <p>Paraugu skaits – min 3 gab;</p>	<p>mērierīces novietot parauga vidusdaļā; mērierīču bāze \geq lielākās pildvielas trīskāršs izmērs;</p> <p>≤ 260 mm lieliem paraugiem bez gala plātnes</p> <p>≤ 160 mm maziem paraugiem bez gala plātnes</p> <p>≤ 150 mm lieliem paraugiem, sasniedzot gala plātņi</p> <p>≤ 100 mm maziem paraugiem, sasniedzot gala plātņi;</p> <p>Min 3 mērierīces vienam paraugam;</p>	<p>Lielajiem paraugiem ar pildvielu izmēru ≥ 25 mm, mazajiem paraugiem ≤ 25 mm;</p>	<p>$\sigma \leq 30\%$ no graujošās slodzes</p>
ASTM C 512-02 „Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression” (2002)	<ul style="list-style-type: none"> Atsperu slodzes iekārta 	<p>Parauga forma – cilindrs;</p> <p>Rekomendē paraugu ar izmēriem: $\varnothing 150 \pm 6$ mm un / 292 mm;</p> <p>Paraugu skaits – min 6 gab;</p> <p>Ja nosaka pamatšļūdi, tad paraugus ietīt folijā.</p>	<p>Deformāciju iekārtas bāze min 3 lielākas pildvielas diametri</p>	<p>Metode derīga betonam ar maksimālo pildvielas izmēru 50 mm;</p> <p>Ja tiek salīdzināti dažādu cementa kompozīta sastāvu šļūdētspēja, tad cementa komp. paraugus sāk slogot 28 dienu vecumā;</p>	<p>$\sigma = 0 \div 40\%$ no graujošās slodzes</p>




<p>Rilem TC 107-CSP: Creep and shrinkage prediction models: Principles of their formation „Measurement of time-dependent strain of concrete” (1998)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Atsperu slodzes iekārta  <ul style="list-style-type: none"> • Hidropneimatiskā slodzes iekārta 	<p>Parauga forma – cilindrs; Parauga ģeometrija diametrs/ garumu veido attiecību 1/4; Diametrs ≥ 5 max. pildvielas izmēri; Rekomendē cilindra diametru: $\varnothing = 75, 10, 150, 200, 250$ mm un garumu atbilstoši: $L = 300, 400, 600, 800, 1000$ mm; Paraugu skaits vienam testam – min. 6 gab;</p>	<p>Mērierīču izvietoējums no parauga galiem $\geq 1,5$ no parauga \varnothing; Mērierīču bāze \geq par parauga \varnothing;</p>	<p>Metode derīga vieglbetonam, normālam un smagajam betonam ar maksimālo pildvielas izmēru 50 mm</p>	<p>$\sigma = 20; 40;$ 60% no graujošās slodzes</p>
<p>ГОСТ 24544-81 „Методы определения деформаций усадки и ползучести”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pneimohidrauliskā iekārta  <ul style="list-style-type: none"> • Hidrauliskā atsperu iekārta 	<p>Rekomendētā parauga forma – prizma Paraugu izmēri šļūdei: $70 \times 70 \times 280$ mm; $100 \times 100 \times 400$ mm; $150 \times 150 \times 600$ mm; $200 \times 200 \times 800$ mm;</p>			


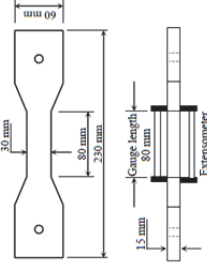
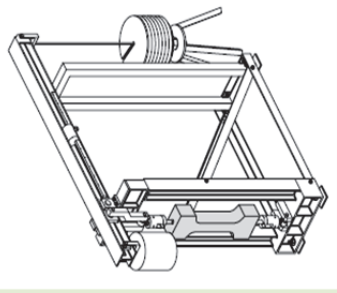
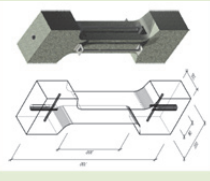
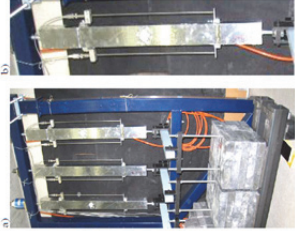
	 <ul style="list-style-type: none"> • Atsperu iekārta 				
R. Eizenšmits (1983)	 <p>(Eizenšmits, 1983)</p>	<p>Sijas 60 x 100 x 900 mm Prizmas 100 x 100 x 100 mm 71 x 71 x 284 mm</p>	<p>Deformāciju mērītājs ar bāzi 150 mm, precizitāte c = 0,001 mm</p>	<p>Šķiedrbetons</p>	
Westman (1999)	 <p>(Westman, 1999)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø80 x 300 mm, paraugs šļūdes sloģojuma laikā atrodas ūdenī</p>	<p>LVDT deformāciju mērītāji</p>	<p>HPC 13-168 h vecumā</p>	<p>20% no graužošanas slodzes</p>

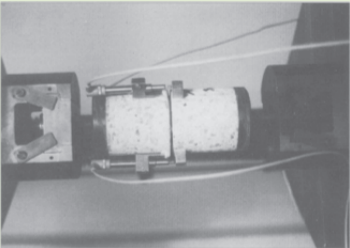
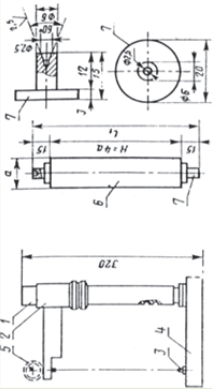
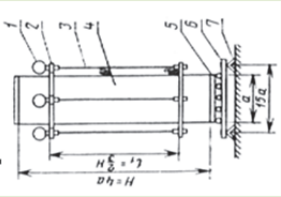
<p>P.Sabulis (1974)</p>		<p>Kārbas 80 x 80 x 280 mm, sienu biezums 20 mm; Prizmas 70,7 x 70,7 x 280,3 mm; Paraugu skaits: 5 partijas, katrā 12 prizmas</p>		<p>Dažādi stiegrbetona sastāvi: 1:1,5; 1:1,75; 1:1,2 ū/c attiecība 0,41 un 0,45 cementa daudzums 660, 720, 770 kg/m³ Paraugu vecums 28 un 90 dienas</p>	<p>Spriegumu līmenis 0,4–0,6 no graujošās slodzes; paraugi zem slodzes turēti 120–360 dienas un atslogojot, bez slodzes 20–120 dienas</p>
<p>Šķūdes deformāciju noteikšanas gredzens ar spiediena akumulatoriem Dawood S.Atrushi (2003)</p>	 <p>(Atrushi, 2003)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø150 x 300 mm 2 šķūdes paraugi 1 rukuma paraugs</p>	<p>TLM elektriskie deformāciju mērītāji (PL-60-11) (3 gab.) LVDT (Linear Variable Differential Transformer) – deformāciju mērītāji</p>	<p>Pārbaudes veiktas betonu 2 dienu vecumā</p>	
<p>Westman (1999)</p>	 <p>(Westman, 1999)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø80 x 300 mm gaissausi</p>	<p>LVDT deformāciju mērītāji</p>	<p>HPC 13-168 h vecumā</p>	<p>20% no graujošās slodzes</p>

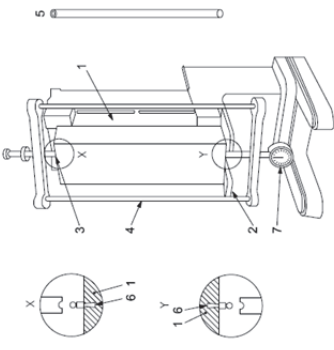

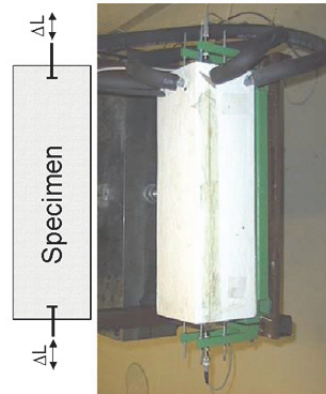
Šķūdes deformāciju stiepē noteikšana testi



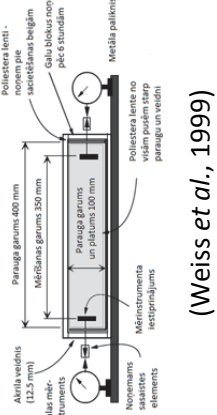
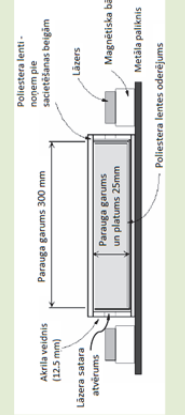


<p>Šķūdes deformāciju noteikšanas gredzens ar spiedienu akumulatoriem</p>	 <p>(Atrushi, 2003)</p>	<p>Paraugs – cilindrs $\varnothing 103 \times 425$ mm 1 paraugs šķūdes def. 1 paraugs rukuma def.</p>	<p>LVDT</p> 		<p>Paraugu vecums 1,2 gadi un 90 dienas</p>	<p>Trīs spriegumu līmeņi $\geq 65\%$ $35 \div 65\%$ $\leq 35\%$ % no graužošanas slodzes</p>
<p><i>Stress Rig (TSTM) and Dilatation Rig</i> – adaptēts šķūdes deformāciju noteikšanai Atrushi (2003), Guomin Ji (2008)</p>	 <p>(Atrushi, 2003)</p>	<p>Paraugs – „Zivtiņa” $90 \times 100 \times 1000$ mm 2 paraugi</p>		<p>Paraugu vecums 1,2 gadi un 90 dienas</p>	<p>Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar mikro un makro kokvilnas šķiedrām (Spiedes stiprība 192MPa)</p> <p>Parauga vecums 7 dienas</p>	<p>Trīs spriegumu līmeņi $\geq 65\%$ $35 \div 65\%$ $\leq 35\%$ % no graužošanas slodzes</p>
<p>A. Kamen Ē E. Denarie' Ē H. Sadouki Ē E. Bruhwiler (2009)</p>	 <p>(Kamen <i>et al.</i>, 2009)</p>	<p>Paraugs – „Zivtiņa” Vidējais šķērsriezuma izmērs 50×100 mm</p>	<p>LVDT ar bāzi 750 mm</p>			<p>Trīs spriegumu līmeņi $\geq 65\%$ $35 \div 65\%$ $\leq 35\%$ % no graužošanas slodzes</p>

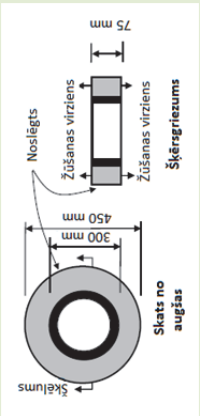
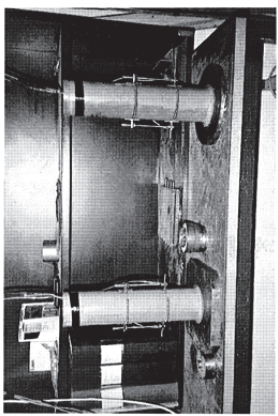

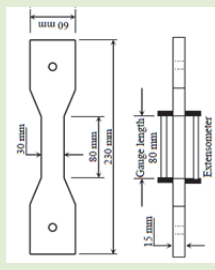
<p>Tia, Liu, Brown, (2005)</p>	 <p>(Tia <i>et al.</i>, 2005)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø150 × 300 mm</p>		<p>40 un 50% no graujošās slodzes</p>
<p>E. Marangon, R.D. Toledo Filho, and E.M.R Fairbairn (2012)</p>	 <p>(Marangon <i>et al.</i>, 2012)</p>	<p>Paraugs – prizma 100 × 50 × 400 mm. 4 paraugi</p>	<p>Šķiedrbetons ar <i>hooked</i> tērauda šķiedrām; šķiedru daudzums 1% un 1,25% max.pieldvielas izmērs 19 mm; Paraugi slogoti 28 dienu vecumā;</p>	<p>40% no graujošās slodzes Stiepes stiprība noteikta ar paraugiem 100 × 100 × 400 mm</p>
<p>Salah Altoubat (2010)</p>	 <p>(Altoubat, 2010)</p>	<p>Paraugs – „Zivtiņa” 76x76x1000 mm</p>	<p>Parastas un augstas stiprības cementa kompozīti Paraugu vecums 25 h</p>	<p>40% no graujošās slodzes</p>

<p>William P. Boshoff and Gideon P. A. G. van Zijl (2005)</p>	 <p>(Boshoff, Zijl 2005)</p>	<p>Parauga forma – „Zivtīņa” 230 x 60 x 15 mm Min 3 gab</p> 	<p>HBM dd1 deformāciju mēritājs ar bāzi 80 mm</p>	<p>Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA REC15-12 šķiedrām (2%) PARAUGA VECUMS 14 dienas</p>	<p>50% no graujošās slodzes Stiepes stiprība noteikta ar tādas pašas formas paraugiem</p>
<p>Hans-Wolf Reinhardt; Tassilo Rinder (2006)</p>	 <p>(Reinhardt, Rinder, 2006)</p>	<p>Parauga forma – „Zivtīņa” 300 x 80 x 100 mm; ārējā ģeometrija - 700 x 200 x 100 mm;</p> 	<p>LVDT deformāciju mēritāji</p>	<p>Augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozīti (spiedes stiprība 80–108 MPa)</p>	<p>Četri spriegumu līmeņi 80%; 85%; 90%; 95% no graujošās slodzes</p>
<p>Agnieszka Switek, Emmanuel Denarie, Eugen Bruehwiler (2010)</p>	 <p>(Switek et al., 2010)</p>	<p>Paraugs – prizma 70 x 40 x 100 mm 4 paraugi katram spriegumu līmenim 3 paraugi rukumam</p>	<p>LVDT deformāciju mēritāji ar bāzi 600 mm</p>	<p>Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar ļoti augstu tērauda šķiedru daudzumu 9%</p>	<p>Trīs spriegumu līmeņi 29%; 55%; 85% no graujošās slodzes</p>

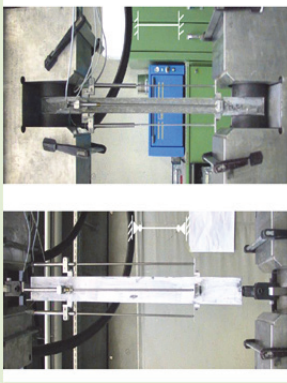

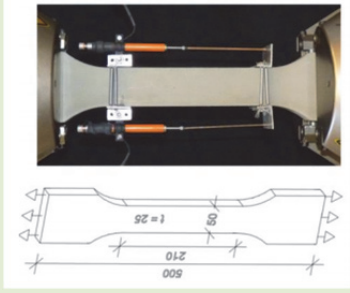
<p>A. Carpinteri, S. Valente, F. P. Zhou, G. Ferrata, G. Melchiorri (1997)</p>	 <p>(Carpinteri et al., 1997)</p>	<p>Paraugs – cilindrs $\varnothing 100 \times 200$ mm ariezāgējumu 10 mm</p>	<p>LVDT def.mērītājs</p>	<p>Parastas stiprības cementa kompozīts, spiedes stiprība 42 MPa</p> <p>Paraugu vecums ~6 mēneši</p>	<p>95% 90% 80% 70% no graujošās slodzes.</p>
<p>Rukuma deformāciju noteikšanas testi</p>					
<p>ГОСТ 24544-81 „Методы определения деформаций усадки и ползучести”</p>	<p>Rukuma def. noteikšanas iekārtas: paraugiem ar šķēsgriezuma izmēriem 40 x 40 mm</p>  <p>Paraugiem ar šķēsgriezuma izmēriem >40 x 40 mm</p> 	<p>Paraugs – prizma 40 x 40 x 160 mm;</p>			

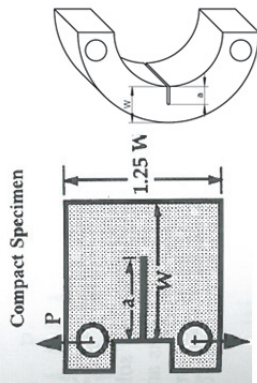
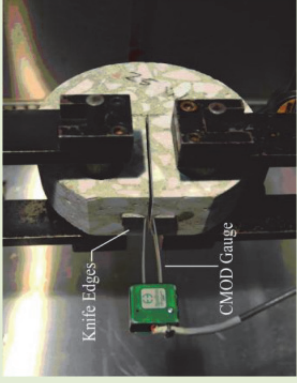
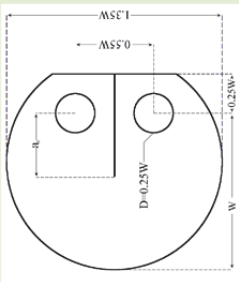
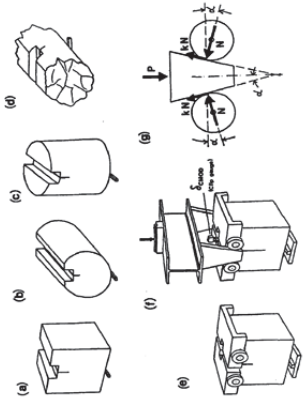
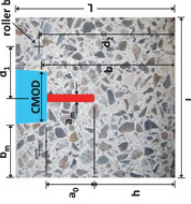
<p>ISO 1920-8 Testing of concrete — Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory Altoubat (2010)</p>		<p>Paraugs – prizma 75 x 75 x 280 mm 100 x 100 x 400 mm</p>	<p>Parastas un augstas stiprības cementa kompozīti Paraugu vecums 25 h veci</p>	
<p>Dilation Rig</p>	 <p>(Altoubat, 2010)</p>	<p>Parauga forma – „Zivtiņa” 76 x 76 x 1000 mm</p>		
	 <p>(Guomin, 2008)</p>	<p>Paraugs – prizma 100 x 100 x 500 mm 2 paraugi</p>		

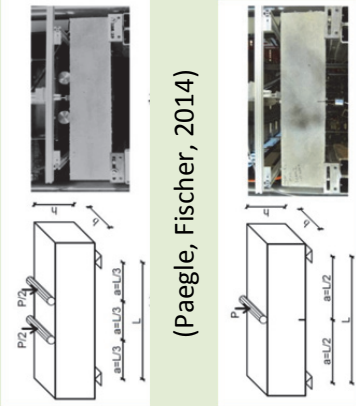
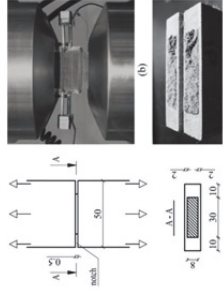

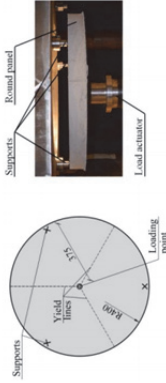
<p>Whittemore gauge</p>		<p>Paraugs – cilindrs Ø150 x 300 mm</p> 		
<p>Dial Gage Method, balstās uz ASTM C 403-99</p>	 <p>(Weiss et al., 1999)</p>	<p>Paraugs – prizma 25 x 25 x 300 mm</p>	<p>LabView™ programmatūru datu iegūšanai</p>	
<p>Non-Contact Laser Specimen Geometry</p>		<p>Paraugs – prizma Paraugs tiek iestrādāts (25 x 25 x 300 mm) metāla veidnī</p>	<p>Attālums no lāzera avota līdz cementa kompozīta parauga virsmai nepārtraukti tiek izmērīts un piefiksēts, izmantojot LabView™ programmatūru datu</p>	
<p>Modificēts rukuma deformāciju mēritājs</p>	 <p>(Pease, 2005)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø12,5 x 87 mm</p> 		

<p>Gredzena tests</p>	 <p>(Hossain, Weiss, 2002)</p>	<p>Paraugs – gredzenveida Gredzena veidņa ārējais diametrs ir 450 mm, augstumu 75 mm, bet iekšējais diametrs ir 300 mm</p>			
<p>Westman (1999)</p>	 <p>(Westman, 1999)</p>	<p>Paraugs – cilindrs Ø80 x 300 mm</p>	<p>LVDT deformāciju mērtāji</p>	<p>HPC parauga vecums 13–168 h</p>	
<p>William P. Boshoff and Gideon P. A. G. van Zijl (2005)</p>	 <p>(Boshoff, Zijl, 2005)</p>	<p>Parauga forma – „zīvītina” 230 x 60 x 15 mm min. 3 gab.</p> 	<p>HBM dd1 deformāciju mērtājs ar bāzi 80 mm</p>	<p>Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA REC15-12 šķiedrām (2%) parauga vecums 14 dienas</p>	

Stiepes plaisu noteikšanas testi

<p>Agnieszka Switek, Emmanuel Denarie, Eugen Bruehwiler (2010)</p>	 <p style="text-align: center;">(Switek <i>et al.</i>, 2010)</p>	<p>Paraugs – prizma 70 × 40 × 100 mm</p> <p>Divi balstījuma veidi: 4 paraugi katram balstījuma veidam</p>	<p>LVDT deformāciju mērītāji ar 600 mm bāzi</p>	<p>Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar ļoti augstu tērauda šķiedru daudzumu 9%</p>	<p>29-85% no grujošās slodzes</p>
<p>Digitālā deformāciju mērīšana ar fotoattēlu apstrādi datorprogrammās GOM „Aramis”, MathWorks „MatLab” Pereira <i>et al.</i> (2010)</p>	 <p style="text-align: center;">(Pereira, 2012)</p>	<p>Parauga forma – „zivtiņa”, Kuponveida val CT</p> <p>150 × 150 × 12 mm 100 × 50 × 12 mm</p>			
<p>„Asakas” tests (Direct tensile tests of dog-bone) ASTM "Standard test method for tensile properties of polymer matrix composites materials," D3039/D3039M, 2000</p>	 <p style="text-align: center;">(Paegle, Fischer, 2014)</p>	<p>Parauga forma – „zivtiņa”, 500 × 90 × 25 mm</p>			

<p>Konkrētās stiepes tests (Compact Tension test (CT)) ASTM-E647, 2005</p>	 <p>(ECCC-Recommendations, 2005)</p>	<p>Parauga forma – CT</p> <p>150 x 125 x 12 mm</p>	<p>Cementa pasta, parastās stiprības cementa kompozīts, šķiedrbetons</p>	
<p>Diskveida koncentrētās stiepes (DCT) tests ASTM-D7313-07, 2007</p>	 <p>(Amirkhanian et al., 2009)</p>	<p>Parauga forma – DCT</p> 	<p>Cementa kompozīts, kurā pildviela izmantots neapstrādāta kaļķakmens pildviela (LCA) vai pārstrādāta cementa kompozīta pildviela (RCA)</p>	
<p>Ķīļveida sadalīšanas tests (Wedge splitting test)</p>	 <p>(Bažant, Murphy, 1992)</p>	<p>Parauga forma – CT u.c.</p> <p>100 x 100 x 100 mm ar 30 mm x 32 mm x 100 mm centrētu ķīļveida iedzīlējumu parauga augšā</p>  <p>(Pease, 2005)</p>		

<p>Četrpunktu liece (Four-point bending test) ASTM C1609, DBV - Guide to Good Practice, JCI-S-003-2007 Trīspunktu liece (Three-point bending test) EN 14651, RILEM TC-162 TDF, JCI-S-002-2003</p>	 <p>(Paegle, Fischer, 2014)</p> <p>(Paegle, Fischer, 2014)</p>	<p>Parauga forma – sija</p>		<p>FRC</p>	
<p>Vienas plaisas stiepes tests (Single crack notched coupon test) ASTM D3039</p>	 <p>(Paegle, Fischer, 2014)</p>	<p>Parauga forma – kuponveida</p>		<p>FRC</p>	
<p>Centriskās plaisas tests (Center Cracked; Middle Tension)</p>	 <p>Center Cracked Tension (CCT)</p>	<p>Parauga forma – prizma</p>			
<p>Apajā panela tests (Round panel test) ASTM C1550-10</p>	 <p>(Paegle, Fischer, 2014)</p>	<p>Parauga forma – apajais panelis</p>		<p>FRC</p>	

1.2. Cementa kompozītu īpašību matemātiskie un empīriskie prognozēšanas modeļi

1.2.1. Šļūdes reoloģiskie modeļi

Vienkāršākais veids, kā aprakstīt betona viskozi elastīgo uzvedību, ir reoloģiskais modelis. Šis modelis ir lineāru atsperu (*Hookean*) un lineāru virzuļu (*Newtonian*) apvienojums, dažkārt tiek pievienots berzes elements, bet sarežģītākos modeļos – lietoti elementu apvienojumi.

Atsperes elements var tikt aprakstīts ar Huka likumu (sk. izteiksmi (1.1)):

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1.1)$$

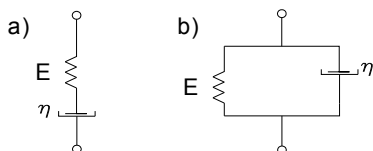
kur virzulis ir ideāls viskozs elements un var tikt aprakstīts ar izteiksmi (1.2)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\eta} \quad (1.2)$$

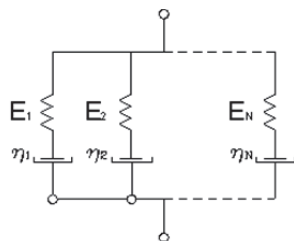
kur

η ir virzuļa viskozitātes koeficients.

Maksvela elements sastāv no atsperes un virzuļa virknē, bet Kelvina elements ir atsperes un virzuļa paralēls apvienojums (sk. att. 1.2.). Parastie Maksvela un Kelvina/ Voigota modeļi neprecīzi nosaka materiālu uzvedību, bet apvienojot vairākus Maksvela un Kelvina/ Voigota elementus virknē vai liktot paralēli, tiek panākta lielāka atbilstība eksperimentālajiem datiem. Vispārīgais Kelvina/ Voigota modelis ir piemērots šļūdes datiem, bet Maksvela modelis (sk. att. 1.3.) relaksācijas datiem (Neville *et al.*, 1983).



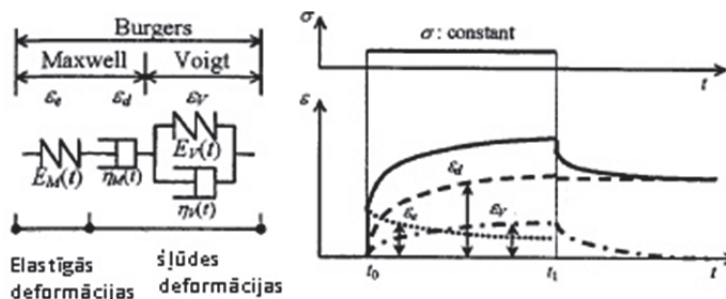
1.2. att. Vienkāršie reoloģiskie elementi: a) Maksvela; b) Kelvina/ Voigota (Neville *et al.*, 1983)



1.3. att. Vispārējais Maksvela modelis (Neville *et al.*, 1983)

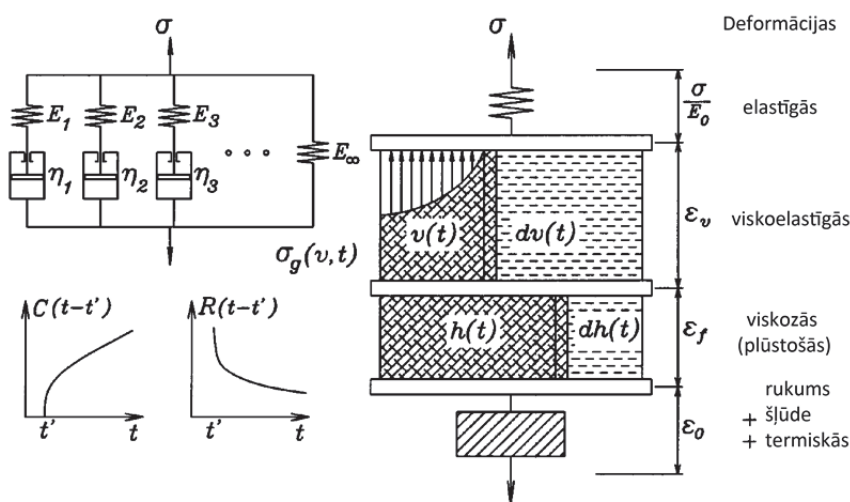
Burģera reoloģiskais modelis ir Kelvina/ Voigota un Maksvela elementu summa, sk. att. 1.4. Burģera modelim pieliekot slodzi parādās acumirkīgās deformācijas, kurām seko no laika atkarīgās deformācijas. Burģera modelis piemērots betonam, jo ar Burģera modeli var simulēt sprieguma–deformāciju uzvedību betonā proporcionalitātes robežās.

Šis modelis simulē arī atgriezenisko, acumirklīgo deformāciju (ϵ_e), aizkavēto, atgriezenisko elastīgo deformāciju (ϵ_v) un neatgriezenisko, no laika-atkarīgo deformāciju (ϵ_d) virzuļos. Šī modeļa nepilnība, ka cementa kompozīts turpina deformēties ar vienādu ātrumu tik ilgi, kamēr slodze ir ilgstoša. Ar Maksvela virzuli –šļūde ar laiku sasniedz robežvērtību, kas nav īsti raksturīgi betonam.



1.4. att. Reoloģiskais modelis, kas atspoguļo apvienoto Maksvela un Kelvina/ Voigota modeli, kas nosaukts par Burgera reoloģiskās analīzes metodi (Hagihara *et al.*, 2002)

Z. P. Bažant un S. Presanna izstrādājis sacietēšanas teoriju, kas izveidota, lai novērstu trūkumus pie iepriekšējo betona novecošanās efektu formulējumiem. Z. P. Bažant un S. Presanna reoloģiskais modelis, (sk. att. 1.5.), apraksta novecošanos, kā sacietējušo, hidratētās cementa pastas daļu, kas ir saistīta ar viskoelastīgajām un viskozajām deformācijām.



1.5. att. Reoloģiskais modelis, kas atspoguļo uzkrājošās deformācijas – elastīgās, šļūdes un hidrotermālās deformācijas (Bažant, Presanna, 1989; Leimaitre, 1992)

1.2.2. Šļūdes matemātiskie aprēķina modeļi

Jāatzīmē, ka šļūdes pētījumi, galvenokārt, ir empīriski. Iegūto datu interpretēšana analītisku modeļu formā, ievērojami apgrūtinā fakts, ka cementa kompozīta maisījumā, mainot vienu parametru, vienmēr izmainās vēl vismaz viens. Šļūdes parādības matemātiskie pētījumi ir aizsākušies pagājušā gs. sākumā un turpinās vēl jo projām (Balevičius, Marčiukaitis, 2013; Bazant *et al.*, 2013; Buyukozturk, 2004; Lorman, 1940; Bentz, 2008 u.c.).

Cementa kompozīta šļūdes testi ir laukietilpīgi un pastiprināta uzmanība jāpievērš funkcijas izvēlei, kas izmatota eksperimentāli iegūtās līknes piedzīšanai. Pēc relatīvi ātrajos šļūdes testos iegūtajām funkcijām jāparedz deformācijas ļoti ilgā laika periodā. Agrāk līknes funkcijas matemātiskā piedzīšana tika veikta manuāli, pētniekiem bija jāizmanto intuīcija un pieredze vienkāršu un atbilstošu funkciju izvēlē. Mūsdienā "datoru laikmetā", kad līknes piedzīšanu var veikt teju uz jebkura personālā datora, iespējams iegūt ievērojami sarežģītākas funkcijas. Šļūdes līknes piedzīšanas funkciju vispārīgās sakarības (Westman, 1999; Boshoff, 2007; Betten, 2008):

Dotajam cementa kompozīta vecums slogošanas brīdī, šļūdes funkcija ir monotoni augoša funkcija laikā t , sk. izteiksmi (1.3):

$$\frac{\delta\Phi(t, t_0)}{\delta t} \geq 0 \quad (1.3)$$

Taču šļūdes pieauguma paātrinājums vienmēr ir negatīvs, sk. izteiksmi (1.4):

$$\frac{\delta^2\Phi(t, t_0)}{\delta t^2} \leq 0 \quad (1.4)$$

Slogošanas ilgumam pieaugot, betona novecošana izraisa šļūdes samazinājumu, sk. izteiksmi (1.5):

$$\left(\frac{\delta\Phi(t, t_0)}{\delta t} \right)_{(t-t_0)} \leq 0 \quad (1.5)$$

Šļūdei piemīt asimptotiska vērtība, sk. izteiksmi (1.6):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Phi_{(t-t_0)} \leq M \quad (1.6)$$

Daudzos aprēķinu modeļos funkciju $\Phi(t, t_0)$ sadala momentānajā un aizkavētajā komponentē, sk. izteiksmi (1.7):

$$\Phi(t, t_0) = \frac{1}{E(t_0)} + C(t, t_0) \quad (1.7)$$

Ja šļūdes aprēķinā ievērtē cementa kompozīta novecošanos, tad īpatnējās šļūdes funkciju $C(t, t_0)$, sk. izteiksmē (1.8):

$$C(t, t_0) = F(t_0) \cdot f(t - t_0) \quad (1.8)$$

Rakstot $C(t, t_0)$ šādā formā tiek norādīts, ka dotajā laikā cementa kompozītu ietekmē ne tikai iedarbe, kurai tas ir pakļauts kopš vecuma, ko reprezentē $f(t - t_0)$, bet arī paša materiāla stāvoklis vecumā t_0 , ko reprezentē $F(t_0)$. Tādējādi ar $F(t_0)$ raksturo betona novecošanos.

Pēdējā izteiksme tradicionāli izmantota, prognozējot ilglaicīgās deformācijas, izmantojot ātro šļūdes testu rezultātus.

Matemātisko modeļu attīstība

Funkciju $f(t - t_0)$ aprakstošās izteiksmes:

Logaritmiskā izteiksme: "The U.S. Bureau of Reclamation" pielietojama masīviem cementa kompozītu izstrādājumiem, kam spriegumu-deformāciju attiecība nepārsniedz 0,4, sk. izteiksmi (1.9):

$$f(t - t_0) = a + b \cdot \log(1 + (t - t_0)) \quad (1.9)$$

Konstantes a un b ir viegli nosakāmas, datus attēlojot pus-logaritmiskā grafikā (t.i., uz vienas ass logaritmiskā skalā). Slodzes iedarbības ilgums ($t - t_0$) mērāms dienās. Vienādojums sākotnēji izstrādāts, lai prognozētu pamatšļūdi (*basic creep*) lielajiem dambjiem. Izteiksme nav ierobežota un ilgākā laika periodā parasti šļūdi pārvērtē.

Kāpinātāja izteiksme: vispārīgo izteiksmi (1.9) dod sekojošā formā:

$$f(t - t_0) = a(t - t_0)^m \quad (1.10)$$

Konstantes a un m viegli nosakāmas logaritmiskajā grafikā (uz abām asīm vērības attēlotas logaritmiskajā skalā), kur izteiksme dod taisnu līniju. Izteiksme precīzi ievērtē sākotnējo šļūdi, taču pārvērtē vēlāko, jo netiek ierobežota.

Hiperboliskā izteiksme: A.D. Ross piedāvā sekojošu hiperbolisko izteiksmi (1.11):

$$f(t - t_0) = \frac{(t - t_0)}{a + b \cdot (t - t_0)} \quad (1.11)$$

Šis vienādojums limitē šļūdes galīgo vērtību ar $1/b$. Vienādojums nenovērtē sākotnējo šļūdi, taču piedāvā ticamu vēlās šļūdes vērtību. Šis šļūdes vienādojums ir izmantots ACI noteikumos.

Eksponenciālā izteiksme: limitē galīgo šļūdes vērtību un tās vienkāršākais formulējums dots sekojoši, sk. izteiksmi (1.12):

$$f(t - t_0) = a(1 - e^{-b(t - t_0)}) \quad (1.12)$$

Aprēķinu veikšanai tiek izmantoti papildus termini. Izteiksme piedāvā labu sakritību ar eksperimentālajām vērtībām.

Funkciju $F(t_0)$ aprakstošās izteiksmes

Šī funkcija ievērtē betona novecošanos, tādēļ tai vajadzētu būt ar monotoni samazinošos raksturu. Kamēr funkcijas $f(t - t_0)$ izteiksmes (1.13) izstrādātas pēdējo 70 gadu laikā, izteiksmes priekš $F(\tau)$ izteiktas daudz nesenāk.

Kāpinātāja izteiksme: sk. (1.13):

$$F(\tau) = a + b \cdot \tau^{-c} \quad (1.13)$$

Eksponenciālā izteiksme: sk. (1.14):

$$F(\tau) = a + b \cdot e^{-c \cdot \tau} \quad (1.14)$$

1.2.3. Šļūdes un rukuma deformāciju prognozēšanas empīriskie modeļi

Lai prognozētu cementa kompozīta konstrukciju stiprību un deformējamību, inženieriem nepieciešams zināt sacietējuša materiāla raksturīgo, mehānisko un ilglaicīgo īpašību parametrus. Šļūdes un rukuma lieluma prognozēšanai ir būtiska nozīme, lai novērtētu cementa kompozīta konstrukciju plaisu noturību un pieļaujamo izlieci. Iepriekš veiktie, daudzu zinātnieku eksperimentālie rezultāti sniedz daudz informācijas par šļūdi spiedē un rukumu, bet informācija par atgrīzenisko šļūdi un šļūdi stiepē ir nepietiekama (ACI 209.2R-08, 2008).

Jebkurš matemātiskais vai empīriskais prognozēšanas modelis dod tikai aptuvenas ilglaicīgo īpašību vērtības, jo katrā no tiem ir ievērtēta tikai daļa būtisko cementa kompozīta īpašību ietekmējošos faktoros.

Eksistē ļoti daudz dažādu, empīrisku šļūdes spiedē un rukuma deformāciju prognozēšanas modeļu, kas balstīti uz plašiem, eksperimentāliem parastas stiprības cementa kompozītu šļūdes un rukuma pārbažu datiem, kas iegūti no dažādu pētīnieku veiktajiem eksperimentiem visa pasaulē:

- FIP 2010/ Model Code 2010 (2012) – Eiropa
- EC 2 (2004) / EN 1992-1-1 (2004) – Eiropa
- GL 2000/ Garden and Lockman (2004)
- NCHRP Report 196 (2003)
- FDOT / Florida LRFD guidelines (2002) – Amerikas savienotās valstis
- AASHTO – LRFD (2000)
- RILEM Model B3/ Bazant – Baweja B3 (1995)
- SABS 0100 (1992) – Dienvidāfrika
- ACI 209R -92 (1992) – Amerikas savienotās valstis
- CEB MC90-99/ CEB FIP (1990) – Eiropa
- AS 3600 (1988) – Austrālija
- BS 8110 (1985) – Anglija
- Bazant – Panula BP
- SAKATA – SAK 93
- AFREM

Biežāk lietotie modeļi minēti un apskatīti tab. 1.2. Modeļi ir izstrādāti dažādos laika periodos un līdz ar to tie veidoti un atbilstoši tā laika perioda cementa kompozīta materiāla veidam un aktualitātei. Modeļiem ir atšķirīga precizitāte un sarežģītības pakāpe. Katra modeļa autors/i parasti sniedz informāciju kādiem cementa kompozītiem tas ir pielietojams. Izvēloties deformāciju prognozēšanas modeli, svarīgi piemeklēt visatbilstošāko modeli pēc ģeogrāfiskā novietojuma, jo attiecīgajā reģionā lieto noteikta tipa cementa kompozītus, kuru izveidē maksimāli izmanto vietējās izejvielas, tādējādi varētu tikt garantēta paaugstināta iegūto

rezultātu precizitāte. Ilglaicīgo deformāciju prognozēšanai katrs modelis ievērtē daudz dažādus iekšējos un ārējos, mainīgos faktoros. Lielā daļa empīrisku modeļu ievērtēti tikai, galvenokārt, cementa tips, spiedes stiprība, cementa kompozīta parauga vecums, efektīvais parauga biezums, relatīvo gaisa mitrums, bet citus būtiskus ilglaicīgo īpašību faktoros, kā piemēram, cementa un garulometrisku sastāvdaļu daudzumu, ū/c attiecību, gaisa daudzumu, granulometrijas veidu, cementa kompozīta cietēšanas paņēmienu, žūšanas ilgumu, slodzes raksturu, slogojuma ilgumu, cementa kompozīta formu, gaisa temperatūru tiek ievērtēti nepilnīgi, katrs modelis papildus ievērtē tikai kādu no šiem būtiskajiem faktoriem. Literatūrā kopā minēti ~30 dažādi iekšējie un ārējie ilglaicīgo īpašību faktori. Kā min virkne autoru (Jirasek, Dobrusky, 2012; Fanourakis, Ballim, 2003; Mola, Pellegrini, 2012; Usibe *et al.*, 2012; Mucambe, Zijl, 2010; Omar *et al.*, 2008; Fanourakis, 2014; Goel, Kumar, Paul, 2007 u.c.) vistīcāmākais un precīzākais modelis ir RILEM Model B3 (1995). Jo tajā ievērtēti visvairāk ietekmes faktoru un to pielietošanai jāzina 21 dažādi iekšēji un ārēji ietekmes faktori (sīkāk sk. tab. 1.2.).

Kā min iepriekš minētie autori, tad visvienkāršākais modelis, kas var tikt izmantots tikai mazsvarīgu būvju aprēķinos un tikai, lai aptuveni prognozētu gala šļūdes lielumu, ir modelis ACI 209 (1992). Standartam ACI 209R-92 ir pieejams 1997. gadā pārāpstiprinātais pielikums (ACI 209R-92 "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures"), kur apkopoti dažādi šļūdes un rukuma deformāciju ietekmējošo faktoru koeficienti. Šis standarta pielikums ir vienīgais šāda veida inženieraprēķinu palīgmateriāls, apkopojot lielu skaitu eksperimentālos datus (no 1937.–1979. gadam), turklāt šie koeficienti izmantojami tikai parastās stiprības betonam un šie koeficienti nebūtu korekti lietojami mūsdienu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, atšķirīgo iekšējo un ārējo faktoru dēļ.

Eiropas reģionam attiecināmais standarts EN 1992-1-1:2005 dod šļūdes koeficientu vērtības, kuras nekorekti lietot no modeļa atšķirīgam cementa kompozītam un konstrukciju aprēķiniem. Lai dotie EN 1992-1-1:2005 šļūdes koeficienti būtu izmantojami, būtu jāpielieto būtisko ietekmes faktoru pārejas koeficienti. Bet, lai tos noteiktu, ir jāveic plaši eksperimentāli pētījumi dažādu veidu parastās un augstas stiprības cementu kompozītiem.

Diemžēl mūsdienās vēl jo projām nav veikts jauno, atšķirīgo cementa kompozīta sastāvu un uzlaboto īpašību cementa kompozītu eksperimentālo, ilglaicīgo parametru apkopojums – nav izveidota eksperimentālo datu bibliotēka un nav atrasti dažādu iekšējo un ārējo, šļūdes un rukuma ietekmējošo faktoru koeficienti, kas būtu jāpielieto konstrukciju aprēķinos, jo trūkst augstas stiprības un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanas metodoloģijas.

1.2. tabula

Izplatītākie šļūdes un rukuma deformāciju prognozēšanas, empīriskie modeļi un to ievērtētie iekšējie, ārējie, mainīgie ietekmes faktori

Mainīgie	Metode																	
	FIP (2010)		EC 2 (2004)		GL 2000 (2004)		RILEM Model B3 (1995)		SABS 0100 (1992)		ACI 209 (1992)		CEB FIP (1990)		AS 3600 (1988)		BS 8110 (1985)	
	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R
Iekšējie faktori	spiedes stiprība	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	E - modulis	v		v														
	cementa daudzums																	
	cementa tips	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	betona blīvumu																	
	konusa nosēdus																	
	granulometrijas daudzums							v										
	granulometrijas veids								v									
	g/c * attiecība							v										
	Smalko pildv. daudzums (%)										v	v						
	smalkās/kopējo gran.attiecība										v	v						
	gaisa daudzums										v	v						
	ūdens daudzums																	
	ū/c attiecība							v			v							

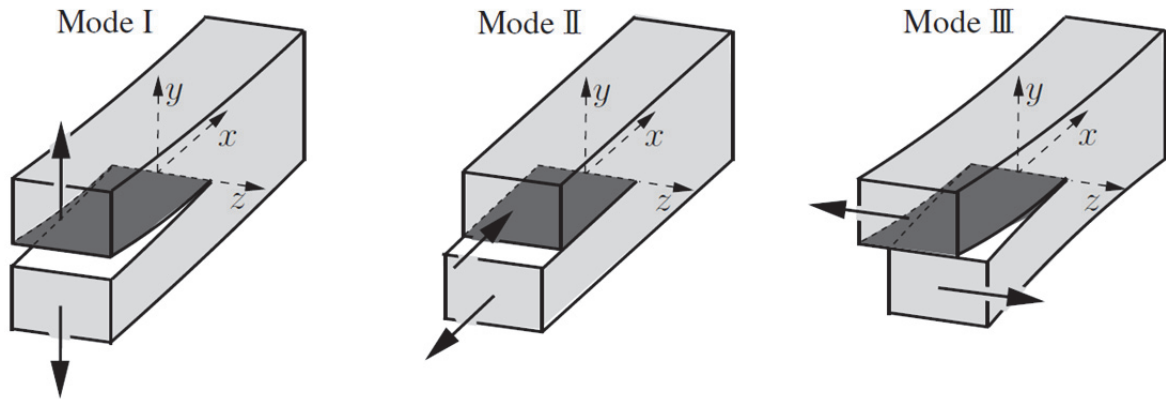
Mainīgie	Metode																	
	FIP (2010)		EC 2 (2004)		GL 2000		RILEM		SABS 0100		ACI 209		CEB FIP		AS 3600		BS 8110	
	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R	Š	R
Bet. parauga vecums		v					v											
Bet. parauga vecums pirmajās slogojuma dienā			v				v		v				v				v	
Bet. parauga cietināšanas paņēmieni							v					v						
Bet. parauga vecums, kad sākas žušana		v					v					v						
parauga cietēšanas ilgums pirms slogošanas		v					v					v						
pieliktais spriegums							v		v			v					v	
slodzes raksturs									v									v
parauga šķērsriez. forma							v											
slogojuma ilgums	v						v					v						
efektīvais biežums	v						v					v						v
E - mod. slogojuma laikā							v											v
Relatīvais mitrums		v					v					v						v
Gaisa temperatūra	v						v					v						v
iesākuma laiks							v											
Modeli apskata pamata šļūdi un žūstošo																		
Modelis paredzēts betonam ar f_{cm}	v						v											
	≤140MPa		≤105MPa		≤82MPa						≤60MPa							

Ārejie faktori

g/c* - granulometrijas/ cementa attiecība

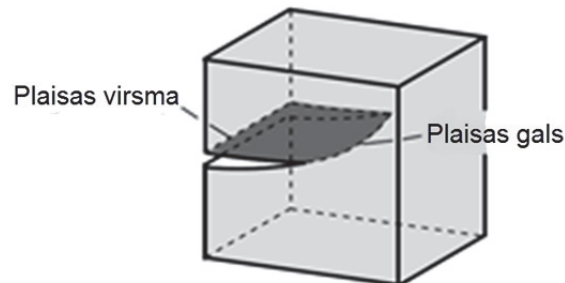
1.2.4. Plaisu modeļi

Plaisu izpētes eksperimentālās pārbaudes, atkarībā no elementa sloojuma veida, var tikt veiktas, pielietojot atšķirīgus plaisu modeļus. Vispārīgi plaisas galā esošos spriegumus iespējams sadalīt trīs komponentēs, kuras sauc Mode I, Mode II, Mode III, kā parādīts att. 1.6.



1.6. att. Plaisu iespējamie modeļi

No makroskopiska, nepārtrauktās mehāniskas skatupunkta, plaisas tiek uztvertas kā iegriezumus ķermenī. No abām pusēm to ierobežo plaisas virsma, ko arī mēdz saukt par plaisas "seju" (*crack face*). Plaisa beidzas plaisas galā (*crack front*) (sk. att. 1.7.).



1.7. att. Plaisas apzīmējumi

Izmantojot Mode I, plaisa atvērta ortogonāli, lokālajā plaisas virsmā. Plaisā parādās stiepes vai spiedes spriegumi (pie atvēruma leņķa $\theta = 0$ un ar normālvектора $n = e_2$). Izmantojot Mode II, plaisas virsmai slīdēs relatīvi viena pret otru, radot bīdes spriegumus plaisas virzienā. Bet pielietojot Mode III, plaisas virsmas slīdēs relatīvi viena pret otru sānu virzienā, radot bīdes spriegumus plaisas virzienā.

Nozīmīga loma ir plaisas gala laukumam, t.i., spriegumiem un deformācijām tuvu plaisas galam (Gross, Seelig, 2011).

1. nodaļas kopsavilkums

Cementa kompozīts ir mākslīgs, akmens veida kompozīts, cementa/pildvielu būvmateriāls, kam ir tādas laikā mainīgas īpašības kā rukums, šļūde un ar tām saistīto plaisu veidošanās un attīstība, kas būtiski ietekmē konstrukciju spēju veikt tām izvirzītos uzdevumus (darbā izmantotos definējumus un teorētiskās pamatnostādnes skatīt pielikumā Nr. 1.).

Projektējot konstrukcijas, nepieciešams paredzēt kopējo, paliekošo deformāciju lielumu, neatdalot šļūdes deformācijas no rukuma deformācijām. Praksē pieņemts, ka šļūde un rukums ir viena otru papildinošas parādības, kuru ietekmē var rasties un turpināties tāda nevēlama parādība kā plaisu veidošanās.

Cementa kompozīta plaisāšanai ir nozīmīga loma, īpaši, ja uz to iedarbojas slodze – gan spiedes, gan stiepes. Plaisu dēļ cementa kompozīts kļūst nevienmērīgs, samazinās tā stiprība un ilgzturība. Spriegumu-deformāciju sakarība tiešā veidā ir saistīta ar mikroplaisu attīstību, jo tās ir plaisas, kas veidojas cementa kompozīta saistīšanās procesā (saistes plaisas) un izplatās apkārt esošajā javā. Kā atzīst pētnieki (Winter *et al.*, 1963, 1966, 1969; Slate, Matheus, 1967; Shah, Chandra, 1970; Shah, Slate, 1968; Darwin *et al.*, 1997; ACI-Committee-224, 2001; Reinhardt, Naaman, 1992; Naaman, Reinhardt, 2003 u.c.), mikroplaisu ietekme uz cementa kompozīta darbību un sabrukuma raksturlielumiem ir vitāli būtiska (detalizētāki sk. pielikumā Nr. 1.).

Šļūdes deformāciju lielums galvenokārt ir atkarīgs no slodzes lieluma, kā arī no cementa kompozīta stiprības, bet cementa kompozīta šļūdes un rukuma īpašības tāpat ietekmē arī liels skaits citu faktoru, piemēram, tā sastāvs (hidratētas cementa pastas apjoms cementa kompozītā; pildvielu veids, apjoms, ģeometrija un īpašības; ķīmiskās piedevas; šķiedru veids, daudzums un ģeometrija), apkārtējās vides apstākļi (mitrums, temperatūra), kā arī cementa kompozīta elementa ģeometriskā forma un izmēri.

Daudzu vadošo pētnieku (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch, Persson, Александровский u.c.) eksperimentālie pētījumi pierādījuši, ka parastas stiprības cementa kompozītiem šļūdes deformācijas var būt vairākas reizes lielākas par sākotnējām – acumirklīgajām deformācijām. Tāpat arī to, ka apmēram 50% no šļūdes gala vērtības veidojas pirmajos 2–3 mēnešos kopš slogojuma sākuma un apmēram 90% – pirmo 2–3 gadu laikā, savu gala vērtību sasniedzot aptuveni pēc 10 gadiem (pieņemts praktiskiem nolūkiem), bet teorētiskajos aprēķinos pieņem, ka šļūde savu gala vērtību sasniedz aptuveni pēc 30 gadiem. Savukārt rukuma deformācijas tāpat kā šļūdes deformācijas strauji pieaug pirmajās 2–4 nedēļās, pēc tam rukuma deformāciju pieaugums laikā ir neliels un savu gala vērtību rukuma deformācijas sasniedz aptuveni pēc gada.

Noņemot slodzi, ilgstoši slogotam cementa kompozīta elementam, norisinās elastīgs deformāciju atgriezeniskums, kam 2 līdz 3 nedēļu laikā seko pakāpenisks šļūdes deformāciju atgriezeniskums (~20%), bet lielākā daļa no šļūdes deformācijām (~80%) ir paliekošas un neatgriezeniskas (Theryo, Parson, 2011).

Joprojām nav izveidotas, vienotas, universālas cementa kompozītu šļūdes un rukuma procesus izskaidrojošas teorijas, kas būtu apstiprināta ar atbilstošiem eksperimentālajiem pētījumiem. Neviena no līdz šim ierosinātajām teorijām nav līdz galam attiecināma uz visiem iegūtajiem šļūdes un rukuma novērojumu rezultātiem. Iespējams, ka šļūde vienlaikus ietver sevī divus vai vairāk mehānismus, tomēr vēl nav iegūti eksperimentālie pierādījumi arī šādai kombinētai teorijai. Tāpat kā šļūdes un rukuma mehānismu teorijas, arī deformāciju aprēķina metodes ir vairākas, bet neviena no tām nenodrošina pilnīgi precīzus aprēķinus.

Zinātniskajā literatūrā šobrīd iespējams atrast plašu informāciju par šļūdes deformācijām spiedē, toties šļūdes deformācijas stiepē ir pētītas nepietiekoši, ko apstiprina arī fakts, ka nav neviena standarta, kas nosacītu, kā eksperimentāli noteikt ilglaicīgo parametru vērtības stiepē. Tāpat būtiski pieminēt, ka tikai tradicionālajam, parastas stiprības betonam ir veikti plaši eksperimentālie pētījumi un ilglaicīgo parametru (spiedes sloojuma) vērtības ir atrodamas dažādos standartos un eksperimentālo datu bibliotēkās.

Pēdējās desmitgadēs arvien vairāk tiek veidoti jauni, atšķirīgi cementa kompozīti, sākot ar samazinātu cementa daudzumu, samazinātiem pildvielu izmēriem, disperso stiegrojumu šķiedru veidā, ķīmiskajām piedevām un pazeminātu ūdens un cementa attiecību utt., veidojot cementa kompozītu matricas, kas ir daudz stiprākas, izturīgākas un dabu saudzējošākas, jo tiek samazināts cementa patēriņš un izmantoti otrreiz pārstrādātie materiāli, piemēram, borsilikāta spuldžu stikls.

Iegūto cementa kompozītu matricām, salīdzinājumā ar tradicionālo betonu, ir uzlabotas fizikāli mehāniskās īpašības, bet šo cementa kompozītu izturēšanās pielikto spriegumu ietekmē var atšķirties no tradicionālā, parastas stiprības betona izturēšanās. Jaunajiem cementa kompozītiem piemīt lielāka ilgmūžība un augstākas pakāpes mehāniskās īpašības, jo, kā piemēram, to mikrostruktūru – tilpumu vairāk veido cementa pasta, līdz ar to mazāka ir šo materiālu porainība, kā rezultātā šādiem cementa kompozītiem ir mazāka ūdensuzsūce, labāki salizturības u.c. rādītāji.

Lai arī dažādu faktoru ietekme uz šīm īpašībām ir apzināta, pieaugošais jauno cementa kompozītu izmantošanas apjoms tiek ierobežots un pastāv šķēršļi, kas kavē šo jauno, savā ziņā moderno, augstas un sevišķi augstas stiprības un uzlaboto īpašību cementa kompozītu plašu izmantošanu būvniecībā.

Viens no galvenajiem kavēkļiem ir pagaidām nepietiekamā informācija par šādu cementa kompozītu ilglaicības rādītājiem un iespējamo palielināto jutīgumu pret plaisāšanu – šāda nepietiekama ilgizturības īpašību izpēte būtiski var ietekmēt drošu un ilglaicīgu būvju ekspluatāciju. Tāpat nav izveidoti būvnormatīvi, kas atbilstu konstrukciju projektēšanai no šādiem, uzlabotiem cementa kompozītiem.

Konstrukcijās cementa kompozīta šļūde vienlaikus ir gan vēlama, gan nevēlama parādība. No vienas puses – tā ir vēlama, jo nodrošina cementa kompozītam nepieciešamo elastības pakāpi, samazinot ārējās slodzes izraisītos spriegumus un novēršot spriegumu koncentrāciju, bet no otras puses – šļūdes deformācijas darba slodžu iedarbībā bieži vien izraisa

pārmērīgu izlieci, kas savukārt var izraisīt nestabilitāti (piem., arkās), plaisāšanu, garu kolonnu izliekšanos, iepriekš saspriegtā konstrukciju sasprieguma zudumu un iekšējo spriegumu un reakciju pārdalīšanos statistiski nenosakāmos locekļos. Ja konstrukcija ir nestabila, šļūdes un rukuma deformācijas var dramatiski samazināt tās slodzes uzņemšanas spēju. Tādēļ ir svarīgi noteikt maksimālo deformāciju palielinājumu laikā.

Šļūdes un rukuma deformāciju lieluma prognozēšanai ir būtiska nozīme, lai novērtētu cementa kompozīta konstrukciju noturību pret plaisām un nepieļaujami lielu izlieci. Eksistē ļoti daudz dažādu šļūdes spiedē un žūšanas rukuma prognozēšanas empīrisku aprēķina modeļu, kas paredzēti parastās stiprības betonam ir balstīti uz plašiem eksperimentāliem cementa kompozīta šļūdes un rukuma datiem, kuri iegūti, apkopojot dažādu pasaules pētnieku veikto eksperimentu rezultātus.

Ilglaicīgo deformāciju eksperimentālai noteikšanai pasaulē ir izstrādāti dažādi standarti, bet diemžēl standarts EN 12390 „Societējuša betona testēšana”, kas attiecas uz Eiropas reģionu, nesniedz informāciju par to, kā nosakāmas betona ilglaicīgās un ilgizturības īpašības – šļūde, rukums, plaisu izpēte un plaisu noturība. Uz Eiropas reģionu var tikt attiecināti arī standarti ISO 1920-9:2009 „Testing of concrete – Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression”, kurā sniegta informācija par to, kā nosakāmas tikai šļūdes deformācijas spiedē, un ISO 1920-8:2009 „Testing of concrete – Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for samples prepared in the field or in the laboratory”, kurā savukārt aprakstīts, kā nosakāmas žūšanas rukuma deformācijas. Būtiski pieminēt, ka nekur pasaulē nav izstrādāts standarts betona šļūdes deformāciju stiepē noteikšanai. Līdz šim tikai daži autori ir veikuši šādus eksperimentus, izmantojot pašu izveidotu metodiku un iekārtas.

Apskatot visus pieejamos standartus šļūdes deformāciju noteikšanai spiedē, jāsecina, ka informācija ir neviennozīmīga, nepilnīga un izstrādātās metodikas vairāk piemērotas parastās stiprības betoniem, tāpat esošie modeļi nav piemēroti paraugiem ar samazinātiem šķērsriezuma izmēriem, kādi raksturīgi, izgatavojot tās no augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem. Šļūdes deformācijas spiedē, galvenokārt, ieteikts noteikt, izmantojot cilindriskus paraugus, piedāvāto paraugu ģeometriju attiecības svārstās no $1/2$ līdz $1/4$, tāpat ir standarti, kas iesaka lietot prizmatiskas formas paraugus. Standartos piedāvāts lietot dažādus, atšķirīgus testa standus. Šļūdes deformācijas spiedē, galvenokārt, tiek ieteikts noteikt, ieliekot paraugus atsperu vai hidropneimatiskajos standos, tomēr šiem stendiem ir būtiski trūkumi, kā piemēram, paraugus nav iespējams pakļaut nemainīgai slodzei neierobežoti ilgu laika posmu, jo uzspriegums atsperē ar laiku samazinās, tāpēc eksperimentālo pārbaužu laikā nepieciešams veikt sprieguma līmeņa korekcijas. Savukārt hidropneimatisko standu galvenais trūkums ir to atkarība no elektriskās strāvas stipruma, līdz ar to sloģojuma vienmērīgums var svārstīties atkarībā no elektriskās strāvas stipruma, ir arī papildizdevumi par elektroenerģijas patēriņu. Tāpat šie standarti nav piemēroti mazu izmēru paraugiem, kas raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem. Lielākā daļa standartu nosaka, ka paralēli šļūdes

pārbaudēm jānoteic arī žūšanas rukuma deformācijas, bet nav viennozīmīgas informācijas, kādiem paraugiem un kurā parauga daļā šīs deformācijas nosakāmas.

Cementa kompozīta plaisu pētījumiem ir pieejami tikai plaisu atvēruma lieluma noteikšanas standarti, tai skaitā arī no citu materiālu testēšanas metodikām aizgūtie un adaptētie standarti, piemēram, no metāla testēšanas standarta ASTM-Standard E399. Līdz šim nav izstrādātas standartizētas plaisu izpētes metodikas, kas sniegtu informāciju par plaisu un mikroplaisu rašanos, attīstību un raksturu.

Galvenais princips visās plaisu noturības testu metodikās ir iepriekš izveidots iezāgējums, kas pastiprina spriegumu koncentrāciju un, pieliekot slodzi, stimulē un dod iespēju precīzi prognozēt plaisas attīstības vietu un virzienu. Šādu iepriekš izveidotu nosacījumu gadījumā iespējams novērtēt materiāla spēju pretoties stiepes spēkam un novērot galveno plaisu attīstību un to atvēruma lielumu.

Jebkurš matemātiskais vai empīriskais prognozēšanas modelis dod aptuvenas cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību vērtības, jo katrā no tiem ir ievērtēta tikai daļa būtisko šo kompozītu īpašības ietekmējošo faktoru. Lielākajā daļā empīrisko modeļu tiek ievērtēti tikai daļa būtisko faktoru - cementa tips, spiedes stiprība, cementa kompozīta parauga vecums, efektīvais parauga biezums, relatīvais gaisa mitrums, savukārt citus būtiskus, ilglaicīgās īpašības ietekmējošos faktorus, piemēram, cementa un granulometrisku sastāvdaļu daudzumu, ū/c attiecību, gaisa daudzumu, granulometrijas veidu, cementa kompozīta cietēšanas paņēmienu, žūšanas ilgumu, slodzes raksturu, slogojuma ilgumu, cementa kompozīta paraugu formu, kā arī gaisa temperatūru ievērtē nepilnīgi. Literatūrā kopā minēti ~30 dažādi iekšējie un ārējie cementa kompozītu ilglaicīgās īpašības ietekmējošie faktori. Vispilnīgāk, t.i., 21 faktoru ievērtē modelis RILEM Model B3 (1995), bet tas, tāpat kā lielākā daļa no šiem modeļiem, stingri rekomendēts tikai parastas stiprības betoniem.

Uz Eiropas reģionu attiecināmais standarts EN 1992-1-1:2005 dod šļūdes koeficientu vērtības, kuras nekorekti lietot no modeļa atšķirīgiem cementa kompozītiem un konstrukciju aprēķiniem. Lai standartā EN 1992-1-1:2005 dotie šļūdes koeficienti būtu lietojami, būtu jāizmanto būtisko ietekmes faktoru pārejas koeficienti. Bet, lai tos noteiktu, jāveic dažāda veida parastas un augstas stiprības cementu kompozītu plaši eksperimentālie pētījumi.

Standarta ACI 209R-92 1997. gadā pārāpstiprinātajā pielikumā (ACI 209R-92 "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures"), apkopoti dažādi šļūdes un rukuma deformāciju ietekmējošo faktoru koeficienti. Šis standarta pielikums ir vienīgais šāda veida inženieraprēķinu palīgmateriāls, kas veikts, apkopojot lielu skaitu dažādu autoru eksperimentālos datus (no 1937. līdz 1979. Gadam). Dažādu faktoru ietekmes koeficienti izmantojami tikai parastas stiprības betoniem, un šos koeficientus nebūtu korekti lietot mūsdienu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem atšķirīgo iekšējo un ārējo faktoru dēļ.

Mūsdienās nav veikts jauno, atšķirīgo cementa kompozīta sastāvu un uzlaboto īpašību cementa kompozītu eksperimentālo ilglaicīgo parametru apkopojums – nav izveidota

eksperimentālo datu bibliotēka un nav atrasti dažādu iekšējo un ārējo, šļūdi un rukumu ietekmējošo faktoru koeficienti, kas būtu lietojami konstrukciju aprēķinos un atvieglotu inženieru darbu.

Lai jaunus cementa kompozītus varētu izmantot, projektējot drošas konstrukcijas, nepieciešams izstrādāt jaunu metodoloģiju, kurā būtu sniegta informācija par to, kā nosakāmi dažādi šos materiālus raksturojošie parametri.

2. ILGLAICĪGO ĪPAŠĪBU NOTEIKŠANAS UN PLAISU ATTĪSTĪBAS IZPĒTES METODOLOĢIJA

Konstrukciju vai to modeļu eksperimentālo pārbaūžu rezultātā var uzzināt cementa kompozītu reālos dažādu īpašību raksturlielumus, piemēram, vertikālos pārvietojumus, plaisu atvēršanās platumu u.c. Ar eksperimentālo pārbaūžu metodikām var novērtēt dažādu faktoru ietekmi uz konstrukcijām, ko ne vienmēr iespējams novērtēt ar teorētiskiem aprēķiniem; dažādu konstrukciju kopdarbības efektivitāti, kā arī atsevišķa elementa ietekmi uz elementu kopējo darbību; tāpat eksperimentālajās pārbaudēs var iegūt izejas datus konstruktīvo materiālu salīdzināšanai vai arī novērtēt esošo konstrukciju stāvokli, kā arī veicot konstrukciju pastiprināšanu vai arī konstrukciju slodzes palielināšanu (veicot būvju pārbūvi vai funkcijas maiņu), kā arī pārbaudīt teorētisko aprēķinu precizitāti.

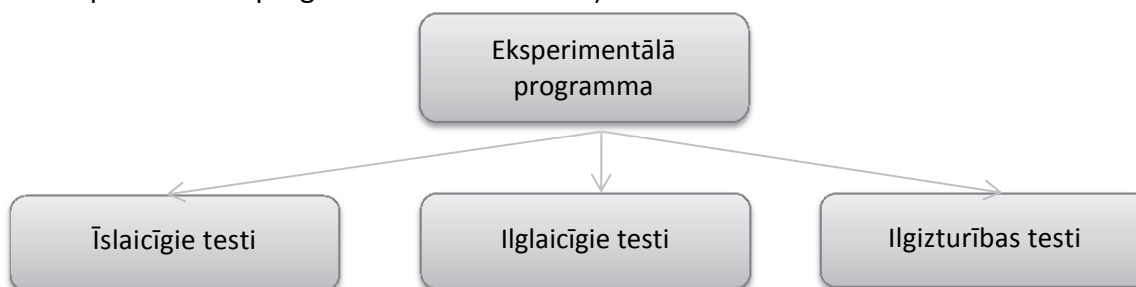
Laboratorijā veicamie eksperimenti dod iespēju iegūt augstākas precizitātes rezultātus, tomēr ne vienmēr laboratorijas apstākļos var radīt reālos konstrukcijas darba apstākļus. Tāpat ne vienmēr ir iespējams konstrukcijas vai to daļas nogādāt uz laboratoriju, šādā gadījumā jāveido konstrukciju idealizēts modelis, ko pārbauda laboratorijā, apkārtējās vides un ekspluatācijas slogojuma apstākļus maksimāli tuvinot reālajiem konstrukciju apstākļiem.

Konstrukciju modelēšana un darbības prognozēšana nav iespējama bez informācijas par atsevišķo komponentu īpašībām. Lai rastu iespēju noteikt cementa kompozītu īpašību raksturojošos parametrus, ir izstrādātā jauna ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija, kas ir izmantojama mehānisko īpašību pārbaudes laboratorijās.

Metodoloģija vispārīgā gadījumā iedalāma trīs daļās: pirmā – materiāla un paraugu gatavošanas apraksts; otrā – dažāda veida eksperimentālo testu procedūru apraksts, un trešā – iegūto datu apstrāde un meklējamo parametru noteikšana. Metodoloģija ietver tehnisko pamatojumu, definīcijas, iekārtu un mērierīču izvēles pamatprincipus, kā arī reģistrējamo parametru sarakstu.

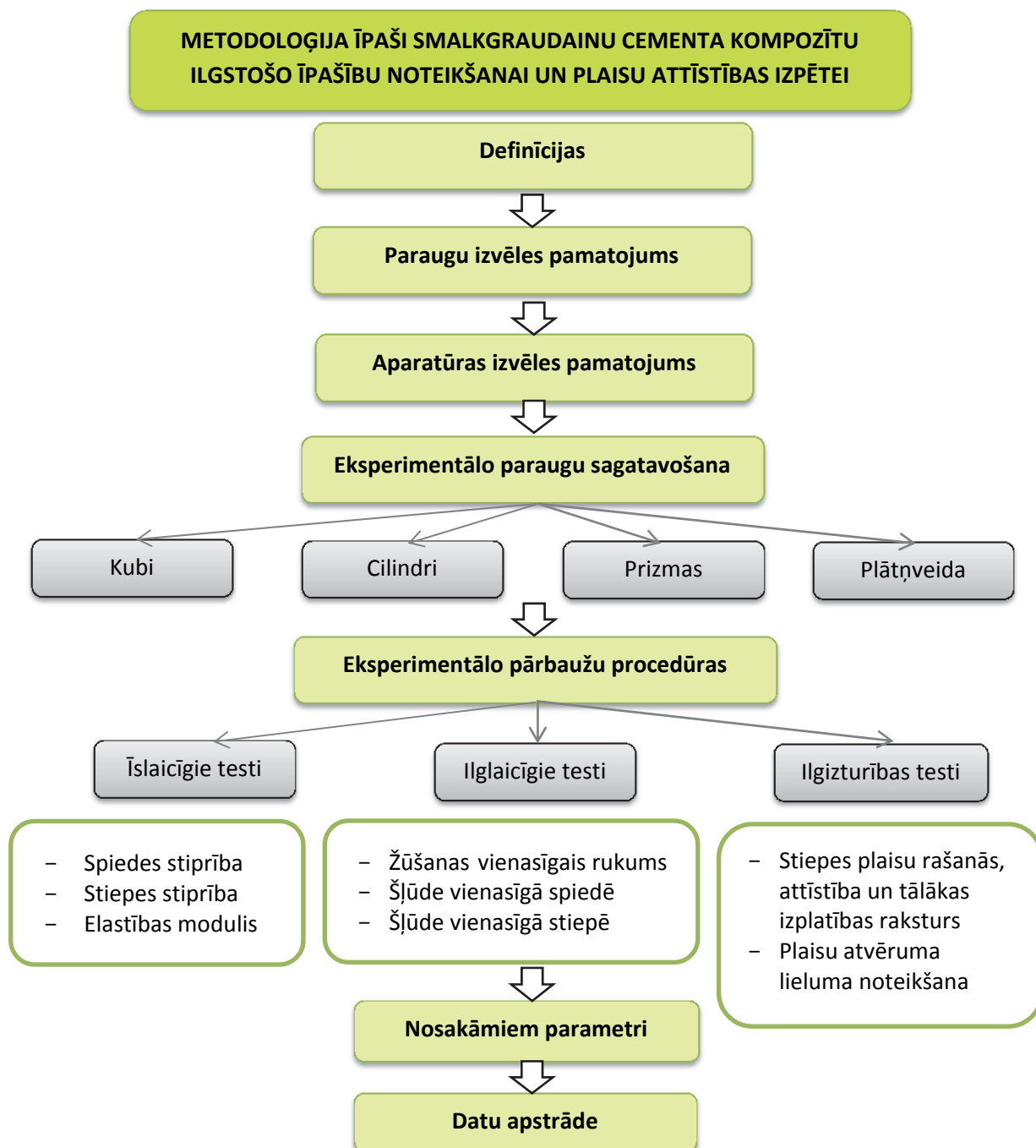
Pirmajā daļā veic dažādu cementa kompozītu sastāvu projektēšanu, sastāvdaļu sagatavošanu, daudzumu noteikšanu un sajaukšanu, veidņu sagatavošanu un nepieciešamo formu eksperimentālo paraugu betonēšanu, kā arī paraugu pirmapstrādi pēc atveidņošanas un tālāku sagatavošanu eksperimentālajām pārbaudēm (sīkāku informāciju sk. 2.2. apakšnodaļā). Otrajā daļā tiek veikta pārbaudes iekārtu sagatavošana un eksperimentālās pārbaudes, savukārt trešajā daļā tiek veikta datu detalizēta apstrāde (sīkāku informāciju sk. 2.3. apakšnodaļā).

Eksperimentālā programma iedalās trīs daļās:



Pirmajā daļā veic īslaicīgos testus un nosaka cementa kompozīta stiprības rādītājus – spiedes un stiepes stiprību, kā arī elastības moduli. Cementa kompozīta stiprības rādītāji nepieciešami, lai tālāk noteiktu slodžu līmeni, kas savukārt nepieciešams otrās daļas ilgstošajos testos. Otrajā daļā nosaka cementa kompozīta ilglaicīgos rādītājus ar un bez slodzes pielikšanas, atbilstoši arī šļūdes deformācijas spiedē un stiepē un rukuma deformācijas. Trešajā daļā veic cementa kompozīta īslaicīgos ilgzturības testus (plaisu veidošanās un tālākās attīstības pārbaudes).

Metodoloģija strukturizēti parādīta shēmā, sk. 2.1. att.



2.1. att. Īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģijas shēma

2.1. Eksperimentālo paraugu un pārbaudes gaitas izvēles pamatprincipi

Izstrādātā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija ir pielietojama, izpildoties šādiem nosacījumiem:

- pielietoto cementa kompozītu šļūdes vienasīgās deformāciju spiedē noteikšanas paraugu mazākais izmērs (b) ir ierobežots ar matricas lielākās pildvielas pieckāršu izmēru (\emptyset) – $b_{min} \geq 5 \emptyset$ (RILEM TC 107-CSP, 1998); bet lielākais izmērs (l) ir ierobežots ar stendā maksimāli iespējamo, ievotājamo parauga garumu – $l \leq 200$ mm;
- šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas nosakāmas, izvēloties vienotu parauga ģeometriju abām paralēli veicamajām pārbaudēm; ieteikts izmantot paraugus ar ģeometriskajiem izmēriem, kas atbilst nosacījumam $\frac{b}{l} \leq \frac{1}{4}$, kur b – parauga šķērsriezuma lielākais izmērs; l – parauga garums (RILEM TC 107-CSP, 1998);
- stiepes stiprības un šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un plaisu attīstības izpētei ieteikts izmantot plātņveida paraugi ar iezāgējumu vienā vai abās parauga pusēs;
- šļūdes pārbaūžu spriegumu līmenis, nosakot deformācijas lineārajā šļūdes posmā, atrodas robežās līdz 40% no graujošo spriegumu lieluma;
- slopojuma sākums un ilgums, kā arī atslodzes ilgums šļūdes pārbaudēs atkarīgs no izvirzītā mērķa un var būt neierobežots;
- ilglaicīgās pārbaudes var tikt veiktas paraugiem divās mitruma koncentrācijās – gaissausiem un mitriem;
- laboratorijā rekomendēts uzturēt pastāvīgus apkārtējās vides apstākļus (temperatūru un gaisa mitrumu).

2.2. Definīcijas

Parastas stiprības cementa kompozīts (Normal Strength Cement Composite (NSCC)) – ir mākslīgs, akmens veida kompozīts, cementa/ pildvielu daudzfāžu būvmateriāls, kas sastāv no rupjo un smalko pildvielu daļām, kuras ir iestrādātas cementa pastā ($\bar{u}/c \geq 0.45$; $f_{ck28} \approx 12$ –40 MPa) (Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Šķiedrbetons (Fibre Reinforced Concrete (FRC)) – parastas stiprības cementa kompozīts, kas pastiprināts ar mazām, vienmērīgi izkliedētām šķiedrām, kas orientētas haotiski. Tādā veidā izveidojot mākslīgu, izotropisku materiālu, kas raksturojas ar paaugstinātu pēc plaisu stiepes stiprību jeb stingrību, kas izskaidrojams ar šķiedru darbību, kas aizkavē plaisāšanu un novērš pēkšņu materiāla sabruku (Prisco *et al.*, 2009 u.c.).

Cementa inženierkompozīts (Engineered Cementitious Composites (ECC)) – parastas stiprības cementa kompozīts, kas pieder pie šķiedrbetonu tipa cementa kompozītiem, bet raksturojas ar augstāku stiepes izturību un daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*) pie stiepes sprieguma palielināšanās. Cementa kompozīta sastāvs ir mikromehāniski veidots no smalkiem pelniem (*fly ash*), smiltīm (ar maksimālo izmēru 0,18 mm), kvarca pulvera, cementa

un ūdens. Sastāvam ar šķiedrām ir pievienots 2 % PVA šķiedras ($\bar{u}/c \leq 0.4$; $f_{ck28} \approx 40$ MPa) (Shunzhi, Li, 2007; Naaman, Reinhardt, 2003 u.c.).

Augstas stiprības cementa kompozīts (High Strength Cement Composite (HSCC)) – ir uz cementa bāzes veidots kompozītmateriāls ar augstu mehānisko stiprību un zemu caurlaidību ($\bar{u}/c \leq 0.4$; $f_{ck28} \approx 40\text{--}120$ MPa) (Neville, 1998; Naaman, Reinhardt, 2003).

Sevišķi augsta stiprības cementa kompozīts (Ultra High Strength Cement Composite (UHSCC)) – uz cementa bāzes veidots kompozītmateriāls ar sevišķi augstu mehānisko stiprību un zemu caurlaidību ($\bar{u}/c \geq 0.2$; $\max f_{ck28} \approx 120\text{--}400$ MPa) (Naaman, Reinhardt, 2003; Graybeal, 2006).

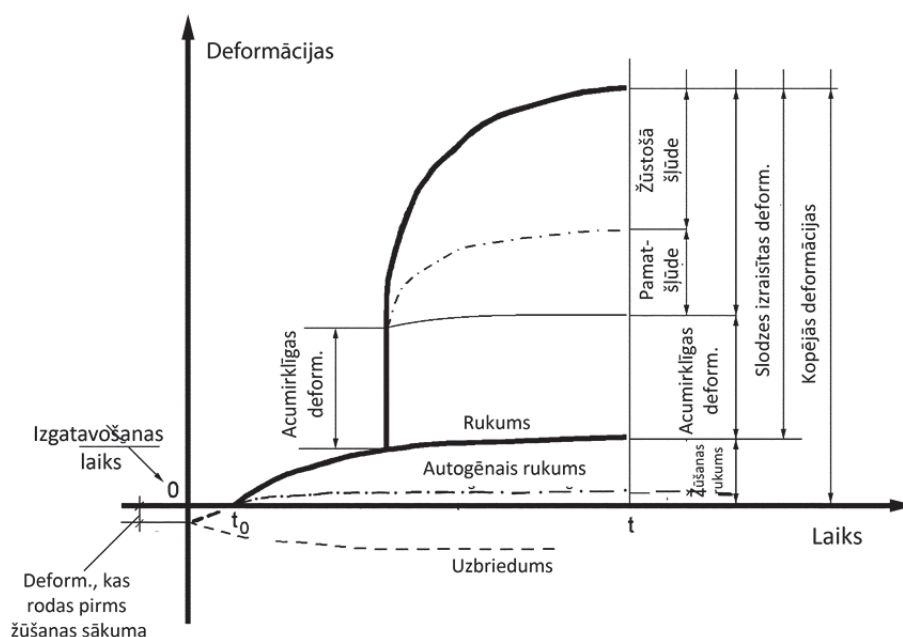
Cementa kompozīts – cementa bāzes daudz komponentu kompozīts veidots izmantojot dažādas minerālās piedevas, ar un bez dispersā stiebrojuma šķiedru veidā.

Īpaši smalkgraudains cementa kompozīts – daudz komponentu cementa kompozīts, kam lielākais pildvielu izmērs ir ≤ 5 mm.

Cementa kompozīta agrais vecums (early age) – jēdziens agrs vecums var tikt izmantots, lai raksturotu pirmās stundas, dienas vai pat nedēļas no cementa kompozīta iejaukšanas brīža līdz pilnībā sacietējušai fāzei. Eksperimentālajā pētījumā agrs vecums ir attiecināms uz cementa kompozīta cieto fāzi pirmajās dienās pēc betonēšanas (Umehara, Uehara, 1995; Bissonnette, Pigeon, 1995 u.c.).

Deformācijas (strain; deformation) – ir konstruktīvo elementu malējo šķiedru pagarinājumu (stiepē) vai saīsinājums (spiedē) (ACI 209.1R–05 2005).

Kopējā deformācija (total strain) – kopējā elementa garuma vienības izmaiņa, kas noteikta cementa kompozīta paraugam, to slogojot ar nemainīgu slodzi patstāvīgos apkārtējās vides (temperatūras un mitruma) apstākļos (ACI 209.1R–05 2005).



2.2. att. Deformāciju iedalījums (ACI 209.1R–05, 2005)

Pēc slodzes pielikšanas deformācijas pieaug momentāni līdz noteiktai vērtībai, bet pēc tam turpina pieaugt laikā – parādās šļūdes deformācijas (Bulavs, Radins, 2006; ACI 209.1R-05 2005 u.c.). Kopējā deformācija sevī ietver arī no slodzes neatkarīgo deformāciju – rukumu.

Rukums (shrinkage) – no slodzes neatkarīgā deformācija, cementa kompozīta tilpuma samazinājums, kas saistīts ar mitruma zaudēšanu (sk. att. 2.2. un 2.3.) (ACI 209.1R-05 2005; Gilbert, Ranzi, 2011; Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Kopējās rukuma deformācijas sastāv no vairākām rukuma komponentēm, no kurām galvenās ir autogēnais rukums un žūšanas rukums (sk. att. 2.2. un 2.3.) (Kovler, 1997; Neville, *et al.*, 1983; Neville, 1995 u.c.).

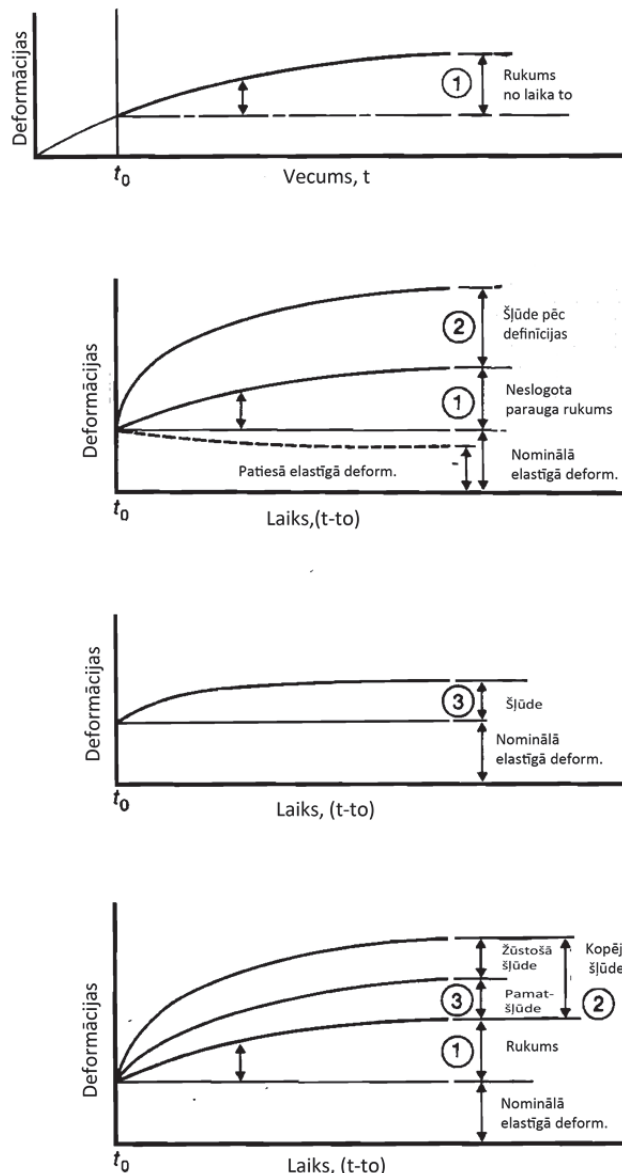
Žūšanas rukums (drying shrinkage) – no slodzes neatkarīgā deformācija, kas veidojas paraugos, kas pakļauti apkārtējās vides apstākļiem ar iespējamu mitruma izmaiņu un pieļaujamu izžūšanu (sk. att. 2.2. un 2.3.). Žūšanas rukums atkarīgs no paraugu formas un izmēriem (ACI 209.1R-05, 2005; Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Slodzes izraisītās deformācijas (load-induced strain) – ir no laika atkarīgās deformācijas, kas veidojas paraugu slogojot ar konstantu slodzi, kas pielikta vecumā t' (sk. att. 2.2. un 2.3.). Slodzes izraisītās deformācijas tiek iedalītas – sākuma/ acumirkīgās un no laika atkarīgās/ šļūdes deformācijas. Eksperimentāli tās tiek noteiktas no kopējām deformācijām atņemot rukuma deformācijas, kas noteiktas tāda paša sastāva, formas un izmēru paraugiem (ACI 209.1R-05, 2005; Neville *et al.*, 1983; Neville, 1995 u.c.).

Slogojuma sākotnējās/ acumirkīgās deformācijas vai nominālās elastīgās deformācijas (initial stain at loading or nominal elastic strain) – īslaicīgās deformācijas, kas rodas slogošanas momentā (sk. att. 2.2., 2.3. un 2.4.). Tās ir atkarīgas no slodzes pielikšanas un deformāciju nolasīšanas procedūras. Elastīgās deformācijas jānosaka 0.01 dienā, t.i., ~15 minūšu laikā no slodzes pielikšanas brīža. Tālāk no šīm deformācijām var tikt aprēķināts elastības modulis (EC2, 2005; ACI 209.1R-05, 2005; Neville *et al.*, 1983; Gilbert, Ranzi, 2011 u.c.).

Elastības modulis (modulus of elasticity) – konstruktīvo materiālu fizikāla konstante, kas raksturo materiāla elastīgās īpašības stiepes un spiedes deformāciju gadījumā jeb materiāla stingrību un tā spēju pretoties elastīgām formas un izmēru izmaiņām, kas rodas materiālam pieliekot ārējus spēkus. Cementa kompozīta elastības modulis ir atkarīgs no tā sastāvdaļu elastības moduļiem (ACI 209r-92; Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Šļūdes deformācijas (creep strain) – dimensionālās, neelastīgās izmaiņas laikā, ilgstošas slodzes iespaidā, kas norisinās pēc sākotnējām, acumirkīgajām deformācijām. Šļūdes deformācijas var tikt iedalītas nežūstošajā un žūstošajā komponentē, t.i., attiecīgi pamatšļūdes un žūšanas šļūdes deformācijās (sk. att. 2.2., 2.3. un 2.4.). Šļūdes deformācijas varbūt vairākas reizes lielākas par sākotnējām deformācijām. Ilglaicīgās deformācijas vērtība raksturo materiāla šļūdētspēju (Bulavs, Radiņš, 2006; ACI 209.1R-05, 2005; Neville *et al.*, 1983 u.c.).

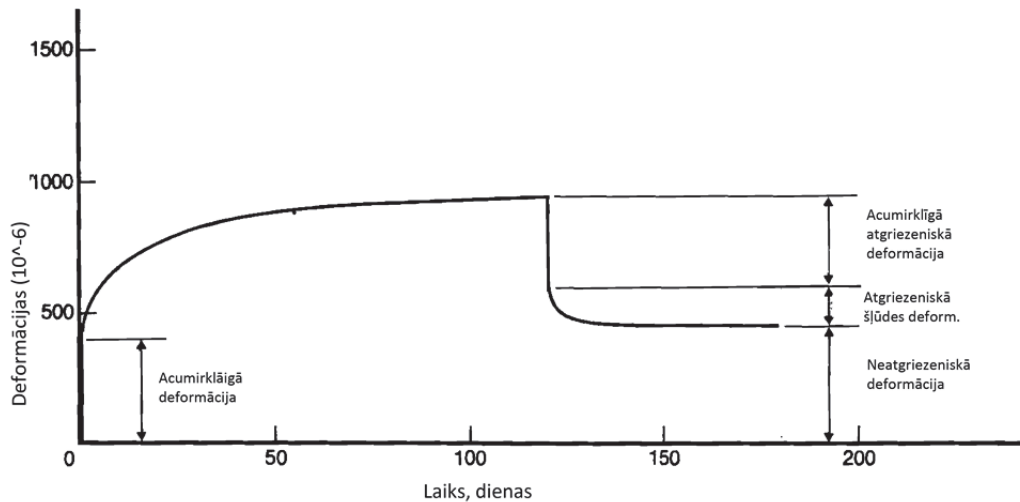


2.3. att. Deformāciju attīstība laikā cementa kompozītam, kurš pakļauts pastāvīgai slodzei, kur t_0 ir cementa kompozīta slogošanas sākums (Neville, 1995)

Pamatšļūde (basic creep) – deformāciju pieaugums laikā zem vienmērīgas, konstantas vai cikliskas, mainīgas slodzes ar ierobežotu, izolētu mitruma apmaiņu paraugos (sk. att. 2.2., 2.3. un 2.4.). Tā parāda šļūdes deformāciju lielumu konstantā mitrumā bez mitruma kustības caur materiālu. Nemainīgo mitruma apstākļu nodrošināšanai, paraugi ir aizsargāti pret mitruma izmaiņu ar speciālu pārklājumu vai ietīti divas kārtās folijas. Deformāciju pieaugums norit ilgstoši daudzu gadu garumā. Deformāciju lielums salīdzinājumā ar žūšanas šļūdi ir mazāks. Parauga forma un izmēri būtiski neietekmē deformāciju lielumu (ACI 209.1R–05, 2005; Neville *et al.*, 1983; Neville, 1995 u.c.).

Žūšanas šļūde (drying creep) – papildus šļūdes deformāciju daļa, kuru ierosina cementa kompozīta žūšana un, kas noteikta paraugiem slogotiem ar vienmērīgu, konstantu vai ciklisku, mainīgu slodzi, kas atrodas apkārtējās vides apstākļos un paraugiem ir pieļaujama žūšanas un

mitruma sākotnējā izmaiņa (sk. att. 2.2., 2.3. un 2.4.). Deformācijas pieaugums ierobežotā laikā sasniedz gala vērtību. Deformāciju lielums salīdzinājumā ar pamatšļūdi ir lielāks. Parauga forma un izmērs būtiski ietekmē deformāciju lielumu (ACI 209.1R–05, 2005; Neville, *et al.*, 1983; Neville, 1995 u.c.).



2.4. att. Atgriezeniskās un neatgriezeniskās deformācijas (Neville *et al.* 1983).

Atgriezeniskā šļūde jeb aizkavētā elastīgā deformācija (creep recovery or delayed elastic) – materiāla uzvedība pēc ilgstoša slogojuma noņemšanas vai cementa kompozīta samitrināšanās, kurā izpaužas šļūdes atgriezeniskās – momentānās īpašības (sk. att. 2.4.) (Neville *et al.* 1983; Bulavs, Radins, 2006 u.c.). Atgriezeniskums sasniedz savu galīgo vērtību īsā laika posmā, 2–3 nedēļās.

Neatgriezeniskā deformācija (residual deformation) – materiāla uzvedība pēc ilgstoša slogojuma noņemšanas vai cementa kompozīta samitrināšanās, kurā izpaužas šļūdes neatgriezeniskās īpašības (sk. att. 2.4.). Tiek uzskatīts, ka neatgriezeniskās šļūdes daļa rodas žūšanas rukuma rezultātā, veidojoties ķīmiskām saitēm C–S–H struktūrā (Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Šļūdes koeficients (creep coefficient) – šļūdes un momentāno, elastīgo deformāciju attiecība. Šļūdes koeficients ir bezdimensionāls lielums, kas parasti ir robežās no 0–5. Tas parāda materiāla šļūdētspēju un to izmanto, lai aprēķinātu konstruktīvo elementu pārvietojumus un iepriekš saspriegto konstrukciju sasprieguma zudumus. Šļūdes koeficientu ietekmē dažādi faktori, kā piem., slodžu līmenis, cementa kompozīta vecums u.c. (ACI 209.1R–05, 2005; Neville *et al.*, 1983; Gilbert, Ranzi, 2011 u.c.).

Īpatnējā šļūde (specific creep) – šļūdes deformācijas attiecība uz pieliktās slodzes vienību. Laika intervālā šļūde mainās atkarībā no pielikto spriegumu līmeņa, īpatnējā šļūde raksturo šļūdes lielumu uz sprieguma līmeņa vienību. Šis ir visobjektīvākais ilglaicīgo īpašību parametrs, kas izmantojams, salīdzinot dažādu materiālu šļūdētspēju, izslēdzot atšķirīgos, materiāliem pieliktos spriegumu līmeņus (ACI 209.1R–05 2005; Gilbert, Ranzi, 2011; Neville *et al.*, 1983 u.c.).

Īpatnēja elastīgā deformācija (specific elastic strain) – elastīgās deformācijas attiecība uz pieliktās slodzes vienību (William, Callister, 1997 u.c.). Šis parametrs raksturo elastīgo deformāciju lielumu uz sprieguma līmeņa vienību. Tas izmantojams, lai noteiktu šļūdes funkciju.

Šļūdes funkcija (creep function) – īpatnējās elastīgās un īpatnējās šļūdes deformāciju summa (Neville *et al.*, 1983; Omar *et al.*, 2008; Gutsch, 2001; 2002 u.c.). Tā parāda ilglaicīgās deformācijas lielumu laikā t , kas noteiktas pie konstanta sprieguma, kas pielikts laikā t_0 .

Šļūdes modulis (creep modulus) – pieliktā sprieguma un šļūdes deformāciju attiecība (ASTM International Designation: D 2990 – 01, 2001). To izmanto pārvietojumu prognozēšanai pēc ilga laika perioda (gadiem).

Spriegumi (stress) – spiedes un stiepes slogojumā ir pieliktās slodzes un sākotnējā šķērsriezuma laukuma attiecība (ACI 209.1R–05, 2005 u.c.) jeb arī iekšējais spēks uz vienu laukuma vienību.

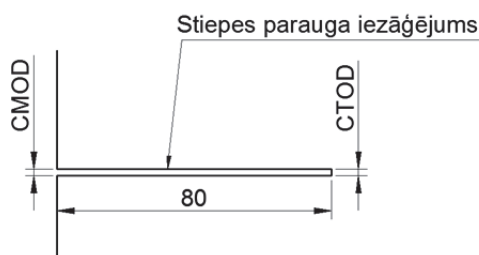
Spiests (stiepts) elements (compression; tension element) – ir konstrukcijas daļa, kurai ārējie spēki pielikti tās galos un tie ir vērsti garenass virzienā (ACI 209.1R–05, 2005 u.c.).

Superpozīcijas princips (superposition law) – dažādu sprieguma līmeņu pieauguma izraisīto deformāciju summa, kas pielikts laikā t_0 (ACI 209.1R–05, 2005 u.c.).

Plaisas (crack, fracture) – materiāla bojājums, kas saistīts ar materiāla sadalīšanos divās vai vairākās daļās, kādu iekšēju vai ārēju spēku iedarbībā, sagraujot saites starp pildvielu un cementa pastas kontaktvirsmām (ACI–Committee–224, 2001 u.c.).

CMOD (crack mouth opening displacement) – iezāgējuma (*notch*) atvēruma lielums pārvietojums, sk. att. 2.5. (ACI–Committee–224, 2001 u.c.).

CTOD (crack tip opening displacement) – iezāgējuma gala pārvietojums; sk. att. 2.5. (ACI–Committee–224, 2001 u.c.).



2.5. att. CMOD un CTOD shematisks attēlojums

Kritiskais spriegums (critical stress) – spriegums, pie kura sākas plaisu augšana (Jenq, Shah, 1987 u.c.).

Sprieguma intensitātes faktors (stress – intensity factor) – plaisas gala deformāciju un sabrukuma raksturotājs, kas saistīts ar slogošanu un slogošanas ģeometriju (Zehnder, 2010). Tā ir funkcija no plaisu ģeometrijas un sprieguma (ACI–Committee–224, 2001 u.c.).

Lūzuma stingrība (fracture toughness) – materiāla raksturlielums, kurš raksturo materiāla spēju pretoties plaisām, K_{IC} (Zehnder, 2010 u.c.). Plaisa aug pie nosacījuma, sk. izteiksmi (2.2), ka

$$K_I \geq K_{IC} \quad (2.2)$$

kur

K_I – spriegumu intensitātes faktors, MPa $\sqrt{\text{mm}}$

K_{IC} – kritiskais spriegumu intensitātes faktors, MPa $\sqrt{\text{mm}}$

Enerģijas izdalīšanās ātrums (energy release rate) – ārēji pieliktā slodze veic darbu un plaisas galā izdala deformāciju enerģiju ar katru laukuma vienību no jaunas plaisas virsmas līdz ar to plaisa elementā aug. Tas ir alternatīvs kritērijs plaisāšanai (Zehnder, 2010 u.c.).

Lai sāktos plaisu izplatīšanās, jāizpildās izteiksmei (2.3)

$$G \geq G_C \quad (2.3)$$

kur

G – iespējamais enerģijas izdalīšanas ātrums, N/m

G_C – materiāla izturība jeb enerģija uz laukuma vienību, lai sāktos plaisas izplatīšanās, N/m

2.3. Paraugu gatavošana

Cementa kompozīta sastāvu izgatavo atbilstoši projektēšanas nosacījumiem, iepilda iepriekš sagatavotos veidņos un ievieto standartā noteiktos cietēšanas apstākļos (20 ± 2 °C, RH > 95 ± 5%). Pēc 24–48 h paraugus atveidņo, veic paraugu pirmapstrādi un visus paraugus pirms pārbaudēm marķē ar šifru, sk. att. 3.5. Tālāk paraugus atkal ievieto standartā cietēšanas apstākļos (20 ± 2 °C, RH > 95 ± 5 %) līdz atbilstošo pārbaudžu veikšanai. Pēc noteiktā cementa kompozīta paraugu aprūpes laika (cietināšanas), tos izņem no ūdens un sagatavo eksperimentālajām pārbaudēm. Pirms tam visus paraugus nosver un pārbauda to izmēru atbilstību, sk. att. 3.6.

2.3.1. Paraugu gatavošana šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai spiedē

Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai spiedē izmanto cilindriskos paraugus ar izmēriem $\emptyset 47 \times 190$ mm vai prizmatiskos paraugus ar izmēriem $40 \times 40 \times 160$ mm (sk. att. 3.11.). Deformācijas var tikt noteiktas arī uz citu ģeometrisko izmēru paraugiem. Lai izslēgtu galu efektu ietekmi uz pārbaudes rezultātiem, paraugu ģeometriskajiem izmēriem jāizpildās nosacījumam (2.1).

Visiem šļūdes paraugiem uz sānu virsmām uzlīmē alumīnija plāksnes (10×15 mm), kas izvietotas centriski un simetriski, lai nodrošinātu deformāciju mērinstrumentu „nažu” stabilu novietojumu. Līmējot plāksnes, ir jānodrošina, ka „naža” asmens pilnībā saskartos ar plāksni un varētu nolasīt korektus pārvietojumus. Vienam cilindriskam paraugam uzlīmē sešas, bet prizmatiskajam paraugam – četras plāksnes. Attālums starp divu alumīnija plāksņu centriem ir 50 mm (sk. att. 3.7.).

Pamatšļūdes vērtības noteikšanai, daļu paraugu ietin divās kārtās alumīnija folijas (sk. att. 3.7.), tādējādi nodrošinot, ka neiestāsies žūšanas process un tajos norisināsies tikai galvenā šļūde, bet, lai noteiktu žūšanas šļūdi, daļu paraugu atstāj neietītus, tādā veidā pieļaujot paraugu žūšanu, ka arī žūšanas rukumu.

2.3.2. Paraugu gatavošana žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai

Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai var tikt izmantotas divas metodes. Pirmā, kad rukuma deformācijas mēra parauga garākās malas galos, izmantojot rukuma skavu vai arī mērot deformācijas paraugu vidusdaļā, tāpat kā šļūdes deformācijas, sk. att. 3.12.

Izmantojot pirmo metodi, visiem rukuma paraugiem to galos pielīmē divus pus sfēriskus metāla reperus, kas ir izvietoti pēc iespējas precīzi paraugu galu centrā, lai fiksētu precīzu stāvokli nolasišanas brīdī (sk. att. 3.7.). Otrā metodei paraugus sagatavo tāpat kā šļūdes testam ar sešām vai četrām alumīnijā plāksnēm uz paraugu sānu virsmām (detalizētāki sk. šļūdes paraugu gatavošana).

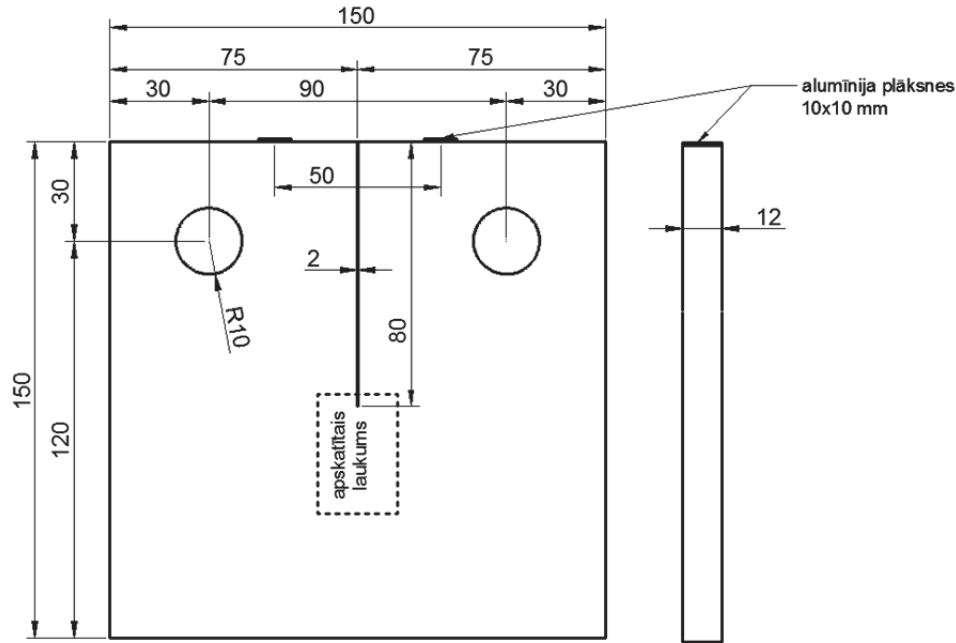
Lai noteiktu korektas šļūdes vienasīgās deformācijas, tad žūšanas rukuma pārbaudēm sagatavo identiska sastāva un identisku izmēru paraugus kā šļūdes pārbaudēm.

Ja nepieciešams noteikt pamatšļūdi un žūšanas šļūdi, tad atbilstoši jāsgatavo arī daļa rukuma paraugu, ietinot divās kārtās alumīnija folijas, lai nodrošinātu, ka neiestāsies žūšanas process, bet daļu paraugu atstāj neietītus, pieļaujot tajos žūšanas procesu.

2.3.3. Paraugu gatavošana vienasīgās stiepes slodzes un ilgizturības īpašību noteikšana, izmantojot koncentrētās stiepes paraugus

Prizmu 150 × 150 × 600 mm sazāgē ar dimanta griezējdisku 12 ± 1 mm biezās plāksnēs, izveidojot koncentrētās stiepes paraugus (*Compact Tension (CT)*) (ASTM-E647, 2005) ar gala izmēriem 150 × 150 × 12 mm (sk. att. 2.6. un 3.8.). Stiepes spriegumu intensitātes palielināšanai, stiepes paraugus veido iespējami plānus. Lai skaidri varētu novērot plaisu veidošanos, attīstību un raksturu, ir būtiski, lai parauga virsma būtu līdzena. Pirms testiem parauga virsma jāapskata, lai atrastu vislabāko plaisu novērošanas vietu un atbilstoši tai ar dimanta kroņurbi izurbj divus Ø20 mm caurumus (sk. att. 2.6. un 3.8.). Caur tiem un testa satvērējžokliem tiek izbīdīti divi tērauda stieņi – Ø20 mm, aiz kuriem paraugs tiek stiepts.

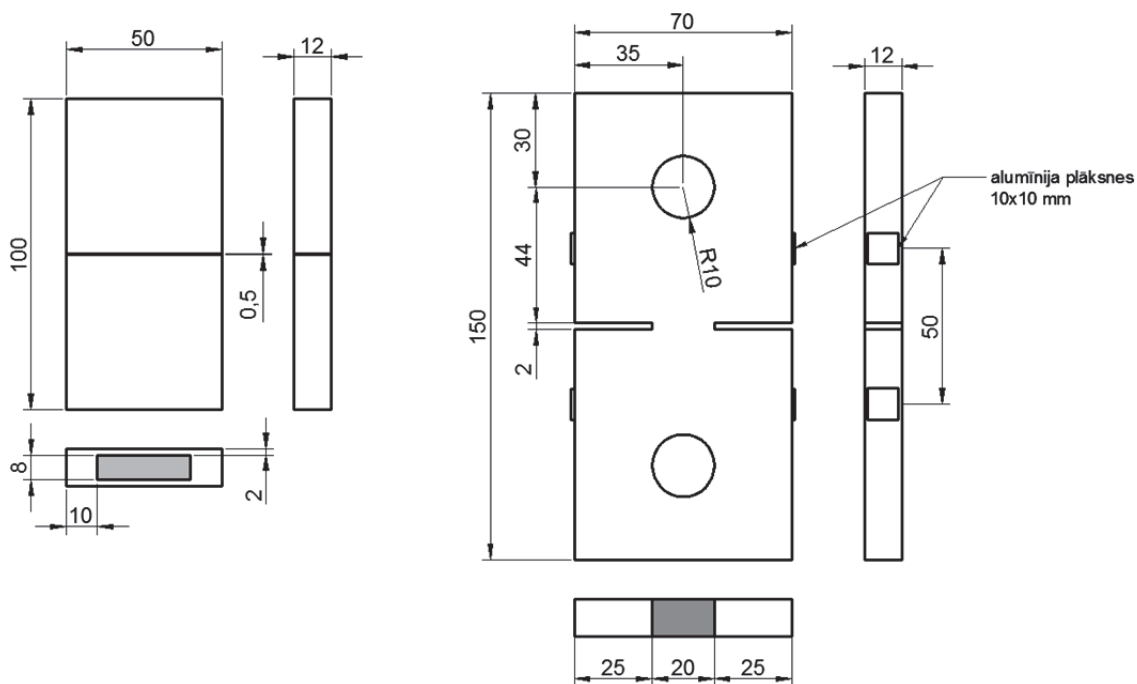
Plaisas parasti parādās maksimālo spriegumu zonā. Lai plīsums būtu prognozējams un tiku konkrētizēta plaisas parādīšanās vieta (tas ir arī ar fotoobjektīvu apskatāmais laukums), tad paraugam ar „Proxxon 27172 MICRO” MBS 240/E dimanta lentsāgi (lentsāga izmēri 1065 × 3,0 × 0,3 mm) iezāgē 80 mm garu un 0,5–2 mm šauru iezāgējumu (*notch*), kura galā stiepes slogojuma laikā koncentrēsies maksimālie spriegumi, šaurais iezāgējums papildus palielina spriegumu intensitāti. Attālums no parauga malas līdz slodzes pielikšanas asij ir 30 mm un attālums starp slodzes pielikšanas caurumu centriem ir 90 mm (Pereira *et al.*, 2010; 2012). Parauga ģeometriju sk. att. 2.6. Pirms eksperimentālajām pārbaudēm simetriski iezāgējumam pielīmē divas alumīnija plāksnes (10 × 10 mm) (sk. att. 2.6.).



2.6. att. Koncentrētās stiepes (CT) paraugu ģeometrija

2.3.4. Paraugu gatavošana stiepes stiprības noteikšanai, izmantojot kuponveida paraugus

Prizmu $150 \times 150 \times 600$ mm sazāgē 12 ± 1 mm biežās plāksnēs, izveidojot kuponveida (*Coupon*) paraugus ar gala izmēriem $100 \times 50 \times 12$ mm un $150 \times 70 \times 12$ mm (sk. att. 2.7. un 3.9.). Stiepes spriegumu intensitātes palielināšanai, paraugus veido iespējami plānus. Lai parauga plīsums būtu prognozējams, tad paraugam $100 \times 50 \times 12$ mm ar „Proxxon 38070 FKS/E” dimanta zāģi ($\varnothing 50 \times 0,5$ mm) paralēli parauga īsākajai malai, pa centrālo ass līnijas perimetru, iezāgē vispirms 2 mm un, tad 10 mm (parauga īsākā šķērsizmēra virzienā) dziļus iezāgējumus (sk. att. 2.7. un 3.9.), turklāt dziļāko iezāgējumu iegūst, zāģējot rievu aptuveni trīs piegājienos (Paegle, Fischer, 2011, 2013; Pereira *et al.*, 2012). Savukārt paraugam $150 \times 70 \times 12$ mm ar dimanta griezējdisku iezāgē 20 mm garu un 2 mm šaurus iezāgējumus abās parauga pusēs. Atkarībā no satvērējzokļa tipa, paraugiem pirms iezāgējumu veikšanas ar lentzāģi, izurbj divus $\varnothing 20$ mm caurumus, sk. att. 2.7. un 3.8. Attālums no parauga malas līdz slodzes pielikšanas caurumu centriem ir 30 mm un attālums starp slodzes pielikšanas caurumu centriem ir 90 mm (Pereira *et al.*, 2010; 2012). Parauga detalizētu ģeometriju sk. att. 2.7. Pirms pārbaudēm paraugiem simetriski un centriski iezāgējumam pielīmē četras alumīnija plāksnes (sk. att. 2.7.).



2.7. att. Kuponveida paraugu ģeometrija

2.4. Eksperimentālās pārbaudes procedūras

2.4.1. Spiedes stiprības noteikšana

Spiedes stiprības noteikšanai izmanto kubus – $100 \times 100 \times 100$ mm; prizmas – $40 \times 40 \times 160$ mm; cilindrus ar $\text{Ø}47 \times 190$ mm. Pielietojot pārejas koeficientus, stiprības noteikšanai var tikt izmantoti arī citu izmēru paraugi. Slogošanas ātrums paraugiem 0,8 MPa/s (atbilstoši EN 12390–3:2002 standartam). Eksperimentāli kubiskā, cilindriskā vai prizmatiskā spiedes stiprība nosakāma atbilstoši ilglaicīgo slodzes testu sākuma dienai, jo, izejot no graužošanās slodzes lieluma, tiek aprēķināts slodzes lielums, kas jāpieliek šūdei pakļautajiem paraugiem.

Paraugus, spiedes iekārtā, novieto maksimāli centriski starp spiedes plāknēm. Lai iegūtu korektus datus, paraugu malām jābūt paralēlām un gludām.

Cementa kompozītu spiedes stiprību nosaka pārbaudot, minimums trīs vienāda izmēra un sastāva paraugus, pakļaujot spiedes testam un, kā graužošo spiedes stiprību pieņem vidējo vērtību, bet pie noteikuma, ka atsevišķo spiedes stiprību atšķirības nedrīkst nepārsniedz 20% no vidējās vērtības.

Nosakot cementa kompozītu stiprības pieaugumu laikā pēc ilglaicīgo testu beigām, šūdes un rukuma pārbaudēm izmantotus paraugus atkārtoti nosver un sagrauj spiedē.

2.4.2. Elastības moduļa noteikšana

Elastības moduli nosaka no elastīgajām deformācijām, kas norisinās šūdes pārbaudes sākumā. Šūdes paraugu slogošanu veic iespējami ātri (~15 min laikā), lai precīzi nodalītu elastīgās un šūdes deformācijas. Nepieciešamo slodzi (cementa kompozīta darbības elastīgajā

apgabalā) paraugiem pieliek pakāpeniski piecos piegājienu, katrā pakāpē pieliekot vienādu slodzes lielumu, kas ir vienāda ar ~20 % no kopējās slodzes lieluma, un pēc katra posma nosaka acumirkīgās deformācijas vērtības, kuras ievieto Huka likuma vispārējā izteiksmē un izsaka elastības moduli.

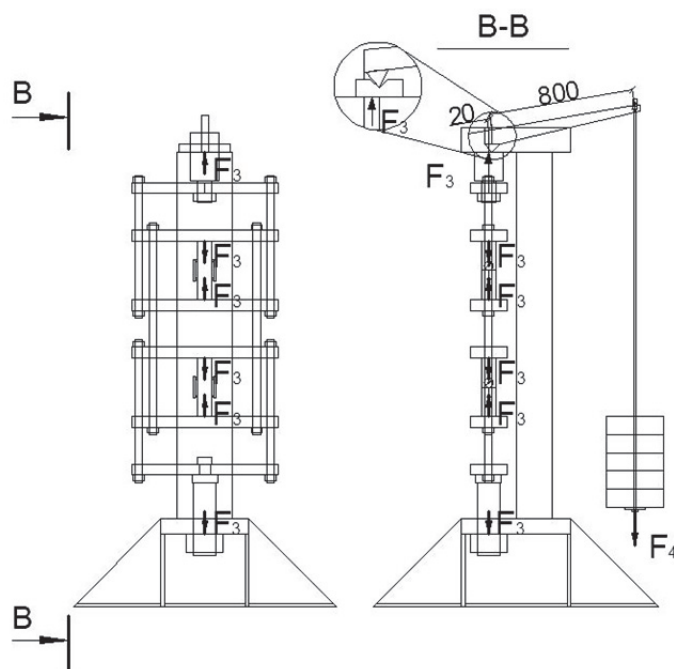
2.4.3. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana spiedē

Šļūdes vienasīgās deformācijām spiedē noteikšanai sagatavo paraugus, kā norādīts 2.2.1. apakšnodaļā. Visiem paraugiem, pirms tos ievieto šļūdes sviru stendā, uz sānu virsmām piestiprina deformāciju mērierīces – tenzometrus (*strain gauge*). Prizmatiskajiem paraugiem – divus, bet cilindriskajiem paraugiem trīs, kas izvietoti vienādos attālumos cits no cita. Tenzometru „nažus” ievieto uz pielīmētajām plāksnēm, tenzometru bāze – 50 mm. Tenzometrus paraugiem piestiprina ar elastīgām gumijām vai metāla skavām, sk. att. 3.11.

Šļūdes parādības eksperimentālai pētīšanai paraugus ar tenzometriem ievieto šļūdes sviru stendos maksimāli centriski starp spiedes plaknēm, pa diviem paraugiem katrā stendā (sk. att. 3.11.). Šļūdes sviru stenda darbības principu sk. att. 2.8.

Cementa kompozīta paraugu vecums slogošanas sākumā, spriegumu līmenis, slogošanas ilgums, atslodze atkarīgi no datu tālākās izmantošanas.

Visus paraugus slogo ar konstantu, vienmērīgu, statisku slodzi. Paraugus atkārtoti slogo un atslogo divas reizes un katra slogojuma iegūtos deformāciju nolasījumus salīdzina, lai pārbaudītu vai slogojums ir centrisks, lai izpildītos šis nosacījums katra nolasījuma starpības nevar pārsniegt 20 % no vidējās aritmētiskās vērtības, kas iegūta no visiem rādījumiem.



2.8. att. Vienasīgais šļūdes spiedē sviru stends ($F_3 = F_4 \times \text{sviru plecs}$)

Pirmajā dienā pēc paraugu noslogošanas, nolasījumus reģistrē ik pēc dažām stundām, tad pirmo nedēļu tos turpina reģistrēt vienu reizi dienā. Pēc pirmās nedēļas nolasījumus reģistrē ar 2–3 dienu intervālu līdz apmēram 30 dienām kopš slogošanas sākuma, pēc pirmā mēneša nolasījumus reģistrē reizi nedēļā. Ja tests tiek turpināts arī, sasniedzot 90 dienas, tad tālāk reģistrēšanu veic vienu reizi mēnesī. Sasniedzot eksperimenta interesējošo slogojuma ilgumu, slodzi pakāpeniski noņem un pie katras slodzes pakāpes, tāpat kā testa sākumā, nolasa deformāciju lielums, iegūstot tūlītējās jeb acumirklīgās, atgriezeniskās deformācijas. Slodzes noņemšanas pakāpes ir vienādas ar slodzes pielikšanas pakāpēm. Kad paraugs atslogots, to nemainīgi atstāj šļūdes sviru stendā, lai noteiktu atgriezeniskās deformācijas laikā. Deformāciju atgriezeniskuma mērījumu nolasīšanai, datus reģistrē nepieciešami ilgā periodā un reģistrēšanas biežumu veic tāpat, kā noslogojot paraugus.

Testu laikā paralēli deformāciju nolasījumiem reģistrē arī telpas apkārtējās vides mitrumu un temperatūru.

2.4.4. Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju un mitruma zudumu noteikšana

Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai var tikt izmantotas divas metodes. Pirmā, kad rukuma deformācijas mēra parauga garākās malas galos, izmantojot rukuma skavu, vai mērot deformācijas paraugu vidusdaļā, līdzīgi kā šļūdes paraugus, sk. att. 3.12.

Ja žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas izmantoto, lai noteiktu korektu šļūdes vienasīgo deformāciju lielumu, tad rukuma testam sagatavo identiska sastāva un identisku izmēru paraugus kā šļūdes pārbaudēm un deformācijas mēra identiskos apkārtējās vides apstākļos, vēlams blakus, paralēli šļūdes deformācijām. Paraugu sagatavošanu sk. 2.2.2. apakšnodaļā.

Pirmā metode: deformācijas mēra ar rukuma skavu (sk. att. 3.12.), novietojot to uz horizontālas, taisnas virsmas un sagatavotos paraugus ievietojot rukuma skavā. Nolasījumu veikšanas brīdī sekot, lai mērinstrumenta kontaktvirsmas cieši pieguļ un atrodas centrā tieši pret pussfērisko metāla reperu centriem. Paralēli reģistrē parauga mitruma (svara) izmaiņas.

Otrā metode: deformācijas mēra, tenzometrus pievienojot centriski paraugu sānu skaldnēm (tāpat kā šļūdes paraugiem). Paraugus novieto uz horizontālas, līdzenas virsmas, atstājot nekustīgi visas pārbaudes laikā (sk. att. 3.12.) un fiksējot tenzometru mērījumu izmaiņas.

2.4.5. Stiepes stiprības un plaisu atvēruma lieluma noteikšana

Stiepes stiprību nosaka, izmantojot kuponveida (*Coupon*) formas paraugus. Paraugu sagatavošanu sk. 2.2.4. apakšnodaļā. Pirms eksperimentālajām pārbaudēm, paraugiem abās pusēs, centriski un simetriski iezāģējumam, pieliek divus deformāciju mērītājus, kas reģistrē stiepes pārvietojumus – plaisas atvērumu (*crack mouth opening displacement (CMOD)*). Paraugus kopā ar deformāciju mērītājiem centriski ieliek stiepes iekārtas satvērējžokļos (sk. att. 3.13. un 3.14.) un slogo ar ātrumu 0,3 mm/min, stiepjot līdz sagraušanai (Paegle, Fischer 2011; Pereira *et al.*, 2010, 2011, 2012).

2.4.6. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana

Cementa kompozīta stiepes slodzi un CMOD var noteikt, izmantojot arī koncentrētas stiepes paraugus (CT). CT formas paraugi ir adaptēti no metāla plaisu testa standarta ASTM–E647 2005. CT paraugu sagatavošanu sk. 2.2.3. apakšnodaļā.

Pirms eksperimentālajām pārbaudēm, paraugam centriski un simetriski iezāgējumam pieliek vienu deformāciju mērītāju, kas sloģošanas laikā fiksē parauga iezāgējuma atvērumu – CMOD (sk. att. 2.5.). Paraugu kopā ar deformāciju mērītāju centriski ieliek stiepes iekārtas satvērējžokļos (sk. att. 3.15.) Paraugu sloģo pakāpeniski līdz sagraušanai ar aptuveno ātrumu $\sim 5 \mu\text{m/s}$ (Pereira *et al.*, 2011, 2012).

2.4.6.1. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, izmantojot jaunizveidoto pārbaudes stendu stiepē

Lai reģistrētu plaisu un mikroplaisu rašanos, attīstību, to raksturu, kā arī noteiktu plaisu atvēruma lielumu ar makro objektīvu vai zem mikroskopa un iegūtu precīzākas materiālu darbības aprakstošās līknes, kā arī lai eksperimentāli pārbaudītu plaisu jūtīgākus cementa kompozīta sastāvus, tika izveidots jauns, eksperimentālais vienasīgās stiepes stends, sk. att. 2.9. un 2.10. Stenda autori G.Fischer un A.Sprince.

Viens no veidiem, kā novērot cementa kompozītā esošo mikroplaisu rašanos un attīstību, ka arī mērīt to lielumu, ir izmantot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodes – sistēmu GOM „Aramis” un Imetrum LTD „Imetrum”, no kurām mikroplaisu mērīšanai atbilstošāka un precīzāka ir bezkontakta mērīšanas sistēma GOM „Aramis”. Tās pamatā ir augstas izšķirtspējas attēlu apstrāde. Lai uzņemtu labas izšķirtspējas fotoattēlus, kas tālāk izmantojami deformāciju noteikšanai, ļoti būtiski ir saglabāt visus virsmas punktus fokusā, bet fokuss var tikt zaudēts punktu kustības dēļ. Izmantojot fiksēto standartfotoobjektīvu, testa iekārtas svārstības ir nebūtiskas un virsmas punktu fokuss netiek zaudēts, un tiek iegūti pietiekoši augstas kvalitātes fotoattēli. Bet kā parāda eksperimentāli veiktie pētījumi, ar parasto, fiksēto objektīvu, nav iespējams novērot mikroplaisu parādīšanos un attīstību, tāpēc šādam nolūkam izmantojami makro objektīvi vai mikroskops. Eksperimentālie pētījumi apliecina, ka universālā pārbaudes iekārta “Instron” ir neatbilstoša mikroplaisu novērojumiem un plaisu atvērumu mērījumiem, jo pat pie ļoti maza iekārtas darbības ātruma – $\sim 5 \mu\text{m/s}$, pārbaudāmajā paraugā rodas pārāk lielas svārstības/ kustības un nav iespējams iegūt augstas izšķirtspējas fotoattēlus. Bet pārbaudžu laikā mikroplaisu novērošanai izmantotais makro objektīvs, ar aci neredzamo svārstību dēļ, zaudē fokusā esošos parauga virsmas punktus un nespēj uzņemt pietiekoši kvalitatīvus fotoattēlus, kurus tālāk spētu apstrādāt sistēma GOM „Aramis”.

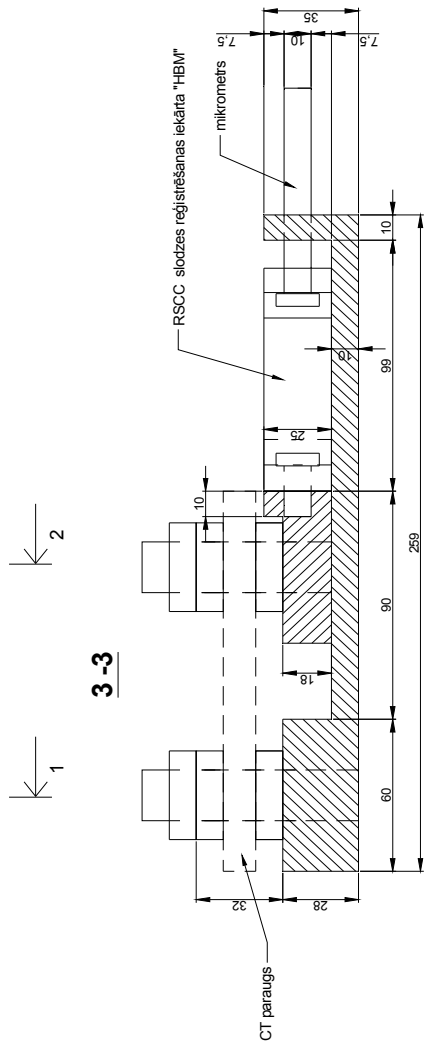
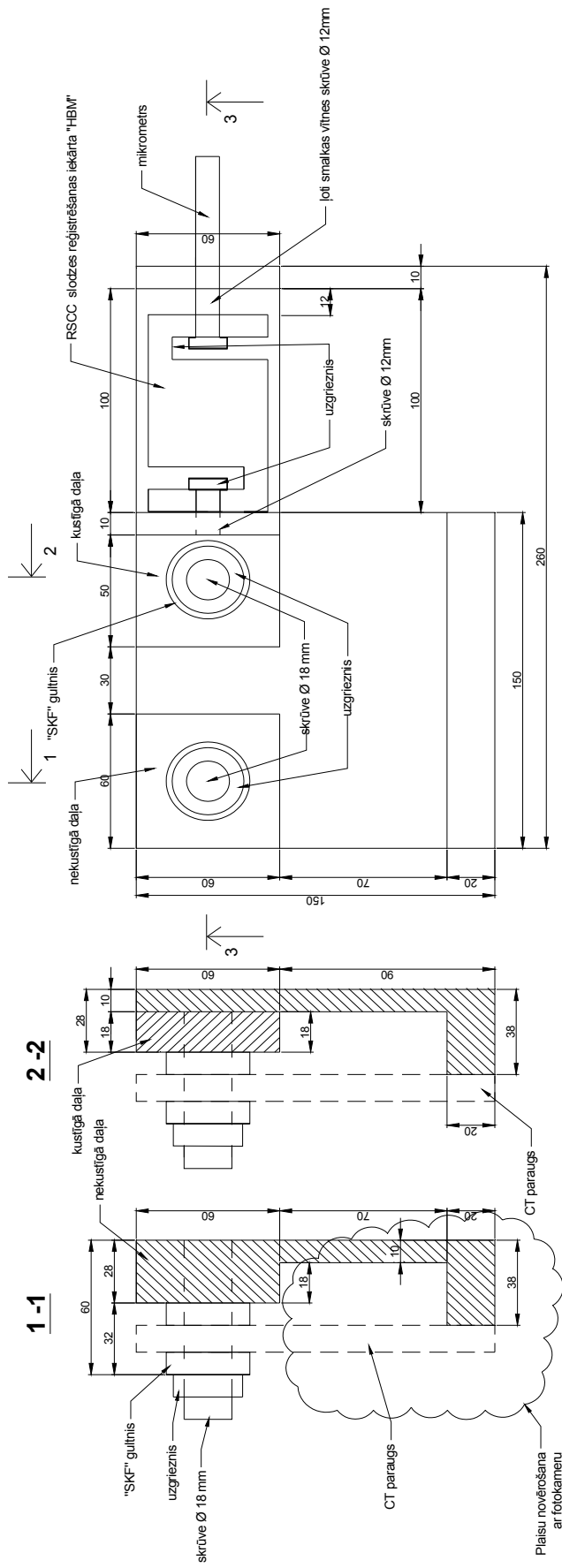
Cementa kompozīta stiepes stiprība ir salīdzinoši maza ($\sim 5\text{--}10\%$ no spiedes stiprības) un ir problemātiski piemēklēt testa iekārtas, kas būtu piemērotas šādām slodzēm un, kuru darbības laikā iekārtā nerastos svārstības, tāpēc tika izveidots jauns pārbaudes stends, kas speciāli projektēts un ir piemērots mazām stiepes slodzēm un ir precīzāks, strādājot ar nelieliem

pārvietojumiem. Eksperimentāli pārbaudīts, ka izmantojot šo iekārtu ir iespējams iegūt precīzāk aprakstošās materiālu līknes un tā ir izmantojama mikroplaisu novērošanai un mērīšanai. Šīs iekārtas vienīgais trūkums, ka tā izmantojama paraugiem ar fiksētu attālumu starp slodzes pielikšanas caurumu centriem, t.i., 90 mm. Paraugu sagatavošanu, pirms pārbaūžu apstrādi sk. 2.2.3. apakšnodaļā.

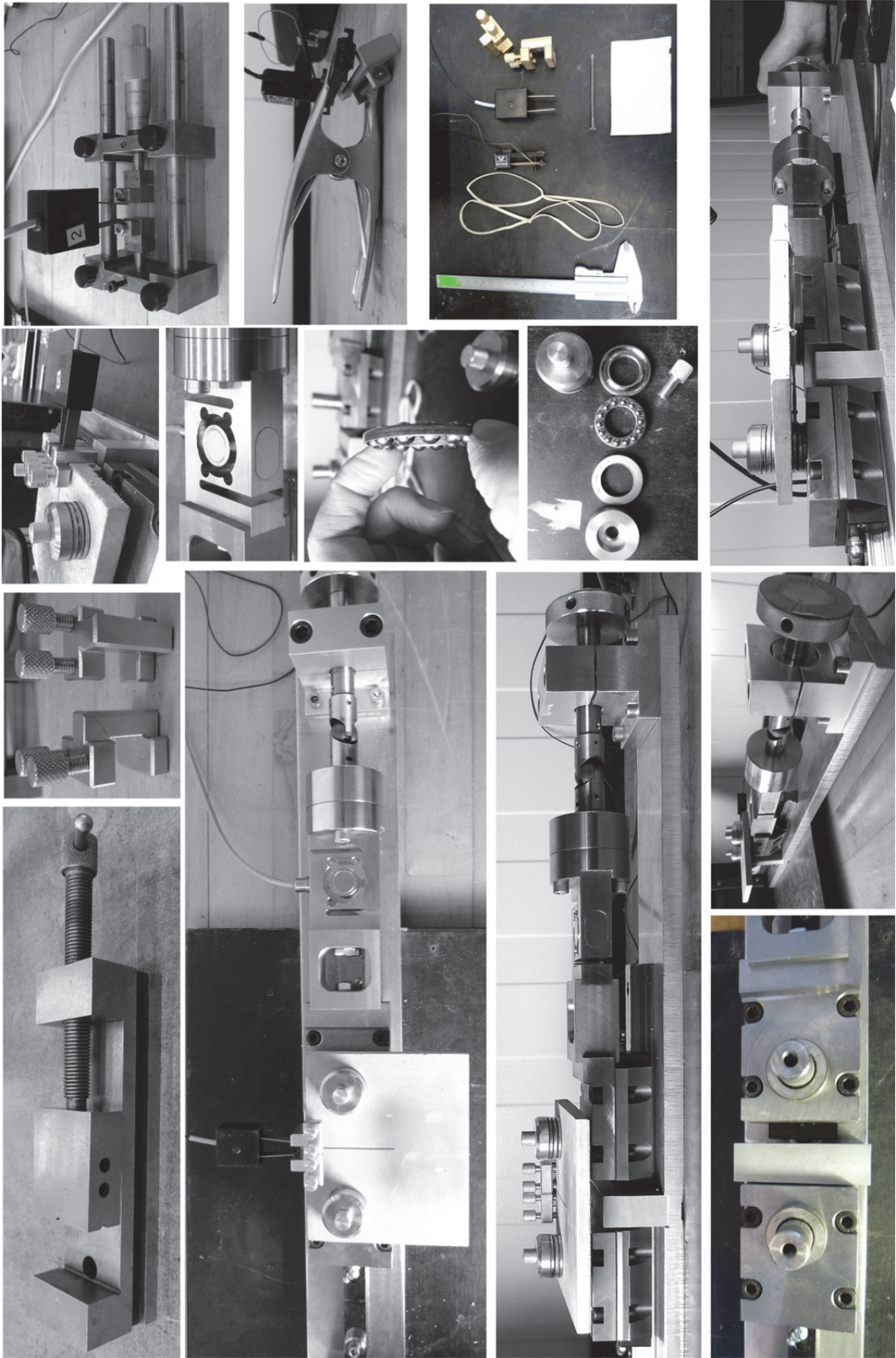
Pārbaudes stenda izveide un apraksts

Pārbaudes stenda darbības princips idejiski paņemts no skrūvspīles darbības, sk. att. 2.9. Sākotnēji izvirzītas rāmja minimālās ģeometriskās un testam stabilās prasības: rāmis veidots ar minimāli zemu kopējo augstumu, lai to vajadzības gadījumā varētu palikt zem mikroskopa; tas ir izgatavots no masīva materiāla, lai testa laikā to nevarētu viegli izkustināt, bet tai pat laikā, lai tas būtu pārvietojams bez papildus cilvēkresursiem.

Iekārtas pamatā ir stabils, nerūsošā tērauda rāmis, kas sastāv no kustīgās un nekustīgās daļas. Tā ģeometriju un izmērus skatīties, sk. att. 2.9. Rāmis veidots tā, ka slogošanas laikā tikai kustīgā daļa horizontāli pārvietojas pa iepriekš izfrēzētām sliežu vietām. Abās daļās tika ievietotas skrūves – $\varnothing 18$ mm, $l = 80$ mm, kas paredzētas, lai uz tām varētu uzlikt CT paraugu. Lai paraugs slogojuma laikā brīvi varētu pagriezties, tad zem un virs parauga uz skrūvēm uzlikti SKF gultņi un noslēdzoši uzskrūvēti uzgriežņi, sk. att. 2.9. un 2.10. Stiepes spēka reģistrēšanai pie rāmja kustīgās daļas ar $\varnothing 12$ mm skrūvi tika pieskrūvēts nerūsošā tērauda S-tipa stiepes slodzes dinamometrs HBM RSCC ar mērdiapazonu 0–1000 N. Dinamometrs tika saslēgts ar datu reģistrēšanas iekārtu, sk. att. 3.15. Dinamometra otrs gals, caur ļoti smalkas vītnes skrūvi ar $\varnothing 12$ mm, kas iziet caur stenda rāmi, tika pieskrūvēts pie mikrometra. Mikrometra gals griežams ar rokas vadību. Lai varētu kontrolēt pagriezienu leņķi, mikrometra galā izveidota skala, ar iedaļas vērtību 2° . Mikrometrs griezt ar ātrumu $\sim 5 \mu\text{k/s}$, un ik pēc viena pagriezienu (\sim par vienu iedaļu) uzņemt vienu fotoattēlu.



2.9. att. DTU jaunizveidotā pārbaudes stenda stiepē rasējums



2.10. att. DTU jaunizveidotā pārbaudes stenda stiepē izveidošana

2.4.7. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, kā arī plaisu rašanās, attīstības un rakstura izpēte

Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, kā arī plaisu rašanās, attīstības (*initiation and propagation of cracking*) un tālākas izplatības raksturu paralēli var noteikt, stiepes testa laikā, plaisas uzņemot ar augstas izšķirtspējas digitālo fotokameru, izmantojot kuponveida vai koncentrētās stiepes (CT) formas paraugus. CT formas paraugi ir adaptēti no metāla plaisu testa standarta ASTM–E647 2005.

Testā izmanto, fiksēto objektīvu ar fokusa attālumu 60 mm. Testa veikšanai izmantot fotoaparāta uzstādījumus – diafragma F11, ekspozīcija 1/30, ISO 200. Ik sekundi uzņemt vienu fotoattēlu ar 24 megapikseļu izšķirtspēju. Pirms testa uzsākšanas fotokameru novietot uz statīva un nolīmeņot, lai fotoaparāta matrica būtu paralēla parauga virsmai un lai maksimāli visi redzamies virsmas punkti būtu fokusā. Virsmas un matricas paralēlumu (t.i., skatu meklētājā redzamo virsmas visu punktu asumu) kontrolē, fotokameru sinhronizējot kopā ar datoru un izmanto nekomerciālo datorprogrammu Breeze systems „NK Remote“, lai uz datora ekrāna redzētu to pašu, ko fotoaparāta skatu meklētājā. Attālumam starp fotokameras matricu un parauga virsmu ir jābūt 175 mm, fiksējot 36 × 24 mm lielu virsmas laukumu (sk. att. 2.6.). Testa veikšanai izmantot tālvadības pulti un fotokamerā iebūvēto automātisko fotoattēlu uzņemšanas taimeru ar laika intervālu – 1 sekunde. Pirms slogojuma pielikšanas, uzņemt vienu fotoattēlu bez slodzes un vienu fotoattēlu kopā ar pie plaisas pieliktu lineālu vai milimetru papīru.

Visi slogojuma laikā iegūtie fotoattēli, kā arī pirmie, tiek izmantoti tālākai deformāciju interpolācijai sistēmā GOM „Aramis“, kas ir plaša pielietojuma optiskā, digitālo attēlu apstrādes datorprogramma, kas arvien vairāk tiek izmantota kā efektīvs rīks dažādu materiālu un konstrukciju pārvietojumu mērīšanai (Berfield, 2007 u.c.). Lai datorprogrammā GOM „Aramis“ no fotoattēliem veiksmīgi nolasītu pārvietojumus jeb virsmas punktu attālināšanos, tad pirms testa parauga virsmu apsmidzināt ar minikompresoru un aeroogrāfu (*airbrush*) ar smalkiem, melnas krāsas putekļiem.

Universālās pārbaudes iekārtā „Instron“ iegūtos slodzes datus sinhronizē kopā ar datorprogrammu GOM „Aramis“, papildus izmantojot datorprogrammas Mathworks „MatLAB“ un „Time stamp“.

Lai iegūtu augstas kvalitātes fotoattēlus, testa laikā paraugus apgaismot ar intensīvas gaismas prožektoriem, kas novietoti tā, lai gaisma uz parauga virsmas būtu vienmērīga un neradītu ēnas.

Plaisu veidošanos un attīstību, kā arī plaisu atvērumu var noteikt arī ar digitālo pārvietojumu noteikšanas aparatūras komplektu „Imetrum“. Šīs metodes laikā paraugs ar speciālas videokameras palīdzību pārbaudes laikā tiek nepārtraukti filmēts, mērot divu vai vairāku punktu attālumu izmaiņas – pārvietojumus. Ar „Imetrum“ aparatūras komplektu, līdzīgi kā ar fotoattēlu apstrādes metodi GOM „Aramis“, pārvietojumus var noteikt dažādos parauga apgabalos. Šajā metodē, universālās pārbaudes iekārtas „Instron“ slodzes dati uzreiz sinhronizējas ar „Imetrum“ datorprogrammas veiktajiem nolasījumiem. Izmantojot šo metodi,

paraugi iepriekš nav jāapsmidzina ar melnas krāsas punktiem. „Imetrum” videokameru pirms testa nolīmeņa, noregulē asu fokusu uz interesējošo apgabalu – tur, kur veidosies plaisa un parauga virsmu apgaismo ar intensīvu gaismu.

2.4.8. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana stiepē

Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē izmantojami kuponveida vai CT formas paraugi. Paraugu sagatavošanu sk. 2.2.3. un 2.2.4. apakšnodaļās.

Visiem paraugiem, simetriski iezāgējumam, piestiprina deformāciju noteikšanas mērierīci – Aistova tenzometru vai HBM DD1 digitālos deformāciju mērītājus, tā, lai to “naži” atrastos uz pielīmētajām plāksnēm, tenzometru bāze 50 mm (sk. att. 2.13. un 3.17.). Tenzometri pie paraugiem piestiprināti ar elastīgām gumijām. Paraugus ar pievienotiem deformāciju mērītājiem ievieto šļūdes stiepē sviru stendos (sk. att. 2.11. un 2.12.), pa vienam paraugam katrā stendā. HBM DD1 deformāciju mērījumus caur daudz kanālu reģistrēšanas iekārtu (*data logger*) HBM „Spider 8”, reģistrē datorā, izmantojot datorprogrammu HBM „CatMan”.

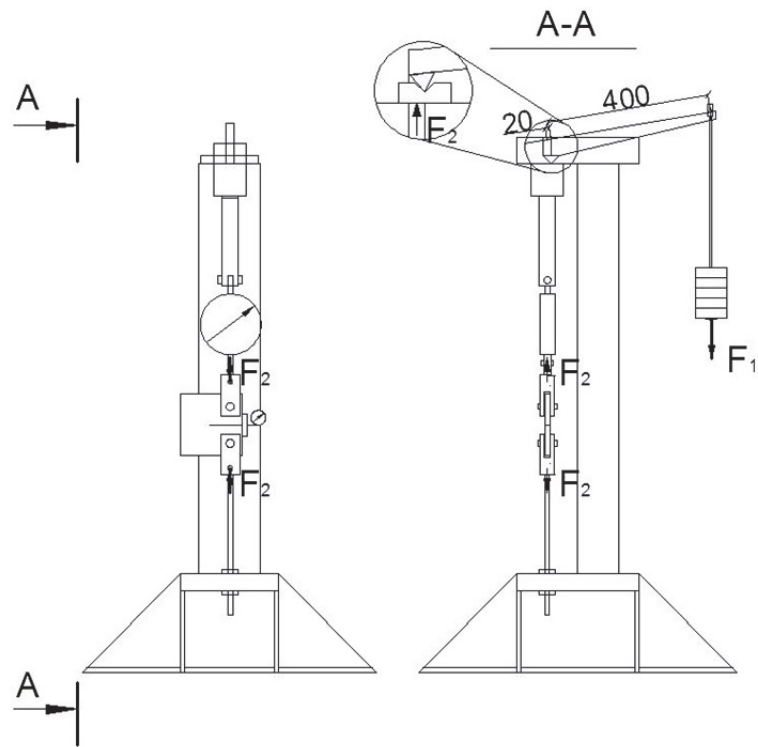
Cementa kompozīta paraugu vecums slogošanas sākumā, spriegumu līmenis, slogošanas ilgums, atslodze varbūt mainīgi, atkarībā no atbilstošā testa nepieciešamības. Lai precīzi nodalītu elastīgās un šļūdes deformācijas, šļūdes paraugu slogošanu, veic iespējami ātri. Paraugiem nepieciešamo slodzi pieliek pakāpeniski – vismaz piecās pakāpēs, pēc katra posma nosakot acumirkliģo deformāciju vērtību, zinot elastīgās deformācijas var aprēķināt elastības moduli stiepē. Lai novērtētu deformāciju mērierīču korektu darbību, paraugi stendos atkārtoti tiek slogoti un atslogoti divas reizes un iegūtie deformāciju nolasījumi tiek salīdzināti, lai to starpības nepārsniedz 20 %. Šļūdes paraugi stiepē ilgstoši tiek slogoti ar nemainīgu, statistisku slodzi (~20–40% no graužošajiem spriegumiem, nepārsniedzot cementa kompozīta darbības lineāro posmu).

Pirmajā dienā pēc paraugu noslogošanas nolasījumus veic ik pēc stundas, tad pirmo nedēļu tos reģistrē vienu reizi dienā. Pēc pirmās nedēļas nolasījumus veic ar 2–3 dienu intervālu līdz apmēram 30. dienai kopš slogošanas sākuma, pēc tam nolasījumus veic reizi nedēļā. Ja tests tiek turpināts, sasniedzot 90 dienas, tad turpmāk nolasījumus veic vienu reizi mēnesī. Sasniedzot eksperimentam interesējošo slogojuma ilgumu, slodzi pakāpeniski noņem un pie katras slodzes pakāpes, tāpat kā testa sākumā, nolasa deformāciju lielums, iegūstot tūlītējās jeb acumirkliģās atgriezeniskās deformācijas. Slodzes noņemšanas pakāpes ir vienādas ar slodzes pielikšanas pakāpēm. Kad paraugs atslogots, to atstāj nemainīgi šļūdes sviru stendā, lai noteiktu atgriezeniskās deformācijas laikā. Deformāciju atgriezeniskuma mērījumu nolasīšanai, datus reģistrē nepieciešami ilgā periodā.

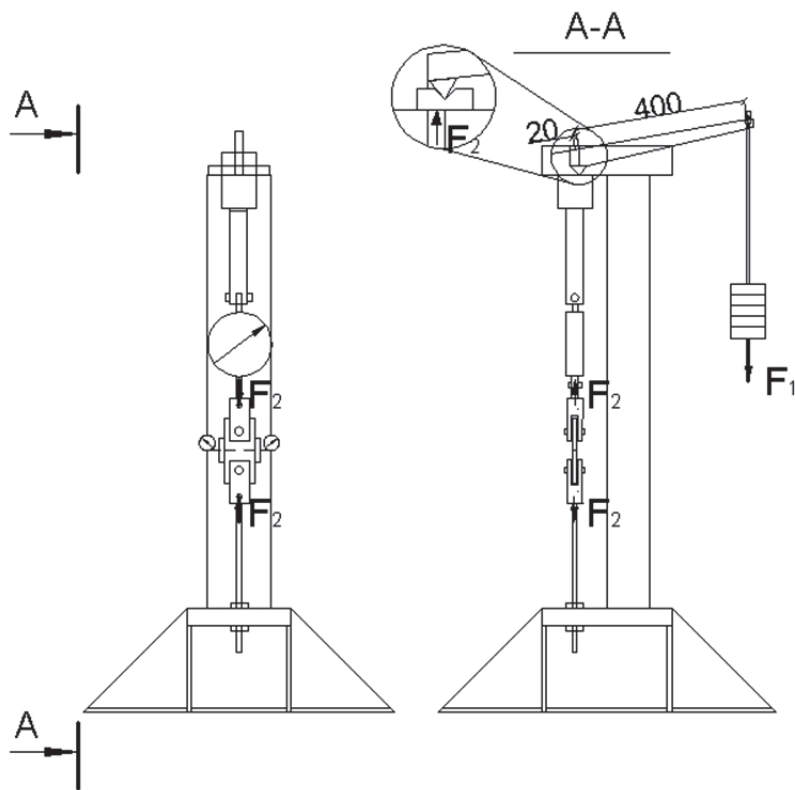
Testu laikā reģistrē arī telpas apkārtējās vides mitrumu un temperatūru.

Pārbaudes stenda izveide un apraksts

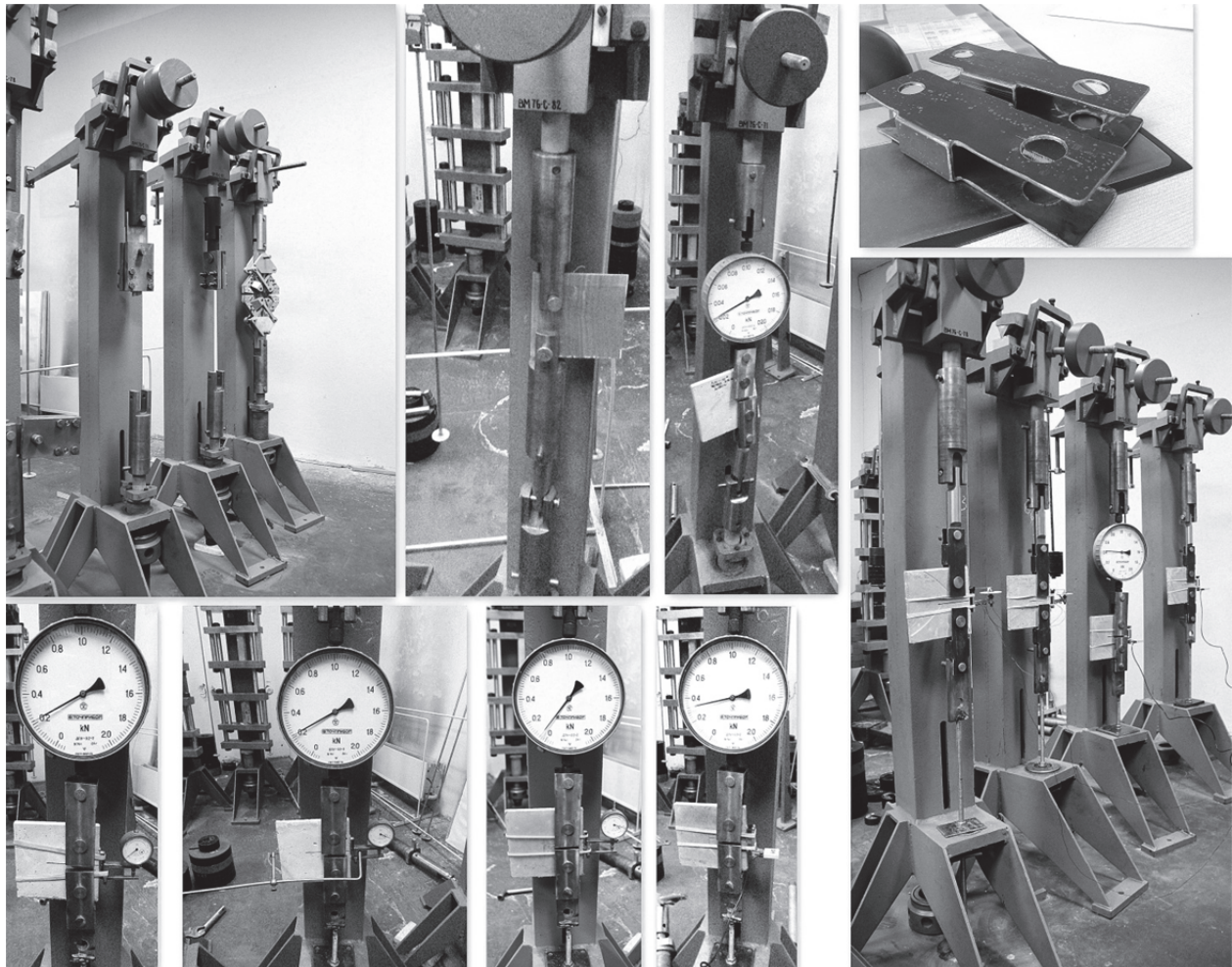
Pārveidotais, vienasīgais šļūdes deformāciju noteikšanas sviru stends stiepē izveidots uz adaptēta kompozītmateriālu stiepes sviru stenda bāzes, sk. att. 2.11., 2.12. un 2.13.



2.11. att. Vienasīgās šļūdes stiepē sviru stends kopā ar CT paraugu ($F_2 = F_1 \times \text{sviru plecs}$)



2.12. att. Vienasīgās šļūdes stiepē sviru stends kopā ar kuponveida paraugu ($F_2 = F_1 \times \text{sviru plecs}$)



2.13. att. Vienasīgās šļūdes stiepē sviru stenda veidošanas process

No sākotnējā stenda atstāts nesošais, nekustīgais rāmis ar 400 mm garo sviru. Stenda augšdaļā iekārts slodzes pārnese elements, kam pieļaujama rotācijas kustība. Stenda apakšdaļā izveidots stings elements. Stenda slodzes pārnese elementu galos ar $\varnothing 12$ mm skrūvēm tika pievienoti stiprināšanas adapteri, kas nepieciešami, lai stendā varētu ievietot paraugu (sk. att. 2.13.). Adapteri un paraugs tiek savienoti ar $\varnothing 20$ mm stieņiem. Kad paraugs ir ievietots stendā, tad stenda apakšējās elements ar uzgriežņa palīdzību tiek noregulēts, lai iztaisnotu paraugu. Paraugi tiek slogoti ar atsvaru palīdzību, liekot tos uz sviras gala iekārtā stieņa. Pieliktā slodze reģistrēta un kontrolēta ar dinamometra palīdzību. Absolūtās šļūdes deformācijas stiepē ir aptuveni 10-20 reizes mazākas kā šļūdes deformācijas spiedē un to reģistrēšanai rekomendē lietot digitālos deformāciju mērītājus, kas ir pietiekoši jūtīgi un spēj uztvert mikrodeformācijas. Šļūdes sviru stends nemainīgu slodzi notur neierobežoti ilgu laika posmu.

2.5. Nosakāmie parametri

Pirms eksperimentālajām pārbaudēm un eksperimentālo pārbaudžu laikā, paralēli reģistrē sekojošus datus:

Pārbaudes veids un izmantojamā aparatūra:

- pārbaudes nosaukums;
Testa iekārta:
- izmantotās pārbaudes iekārtas nosaukums, slogotspēja, slogošanas diapazons;
Mērinstrumenti:
- mērinstrumentu nosaukums, precizitāte, bāze, skaits, rūpnīcas numurs, izvietojums.
Apkārtējās vides apstākļi (reģistrē vienreiz vai atkārtoti, atkarībā no pārbaudes veida):
- mitrums;
- temperatūra;
Materiāla un paraugu raksturojums:
- materiāla sastāvdaļas un to raksturojums; ū/c attiecība;
- materiāla izgatavošanas procedūra;
- paraugu sagatavošana;
- paraugu cietēšanas apstākļi (temperatūra un mitrums);
- paraugu atveidņošanas laiks un marķēšana ar šifru, kas satur materiāla apzīmējumu un kārtas skaitli (piem. BS –1 (cementa kompozīts ar stikla piedevu, pirmais paraugs)).
Paraugu pārbaūžu raksturojums:
- paraugu forma un ģeometriskie izmēri;
- parauga svars;
- paraugu izgatavošanas diena;
- cementa kompozīta vecums, kad paraugs sācis žūt;
- parauga vecums testa sākumā un testa beigās.
Šļūdes testu parametri:
 - spiedes, stiepes stiprība;
 - sprieguma līmenis; slodžu lielums;
 - slogojuma un atslogojuma ilgums;
 - slogojuma pakāpe;
 - mērierīču nolasījumi; vidējotie rādījumi.
- Rukuma testu parametri:
 - mērierīču nolasījumi; vidējotie rādījumi;
 - svara izmaiņas, mitruma zudumi.
- Plaisu testu parametri:
 - stiepes stiprība;
 - plaisu sākšanās, augšana, plaisu daudzums, plaisu atvēruma lielums (CMOD), sabrukums;
 - plaisu raksturs, attīstība.
- Aprēķināmie parametri:
 - cementa kompozīta blīvums;
 - relatīvā deformācija;
 - kopējās, ilglaicīgās deformācijas;
 - elastīgās un šļūdes deformācijas;

- elastības un šļūdes modulis;
- šļūdes koeficients;
- īpatnējā elastīgā un īpatnējā šļūdes deformācija;
- šļūdes funkcija;
- sprieguma lauks plaisas galā;
- sprieguma intensitātes faktors;
- enerģijas izdalīšanās ātrums;
- neelastīgo zonas lielums plaisas galā;
- izturības indekss;
- galējā proporcionalitātes izturība.

2.6. Iekārtu un mērierīču tehniskie dati

Cementa kompozītu sastāvu izveidošanai izmantot divvārpstu laboratorijas mikseri (BHS, 3 kW jauda, 20–100 apgr./min).

Paraugu spiedes stiprību noteikt spiedes iekārtā „Controls”, Mod.Nr C56G2 ar precizitāti $\pm 1\%$ un iekārtas mērdiapazonu 0–3kN; slogošanas ātrums 0,8 MPa/s.

Cementa kompozītu paraugu stiepes stiprību noteikt universālajā pārbaudes iekārtā „Instron 8516” ar mērdiapazonu 0–120 kN vai „MTS 858 Bionix Test System” ar mērdiapazonu 0–100 kN un slogošanas ātrumu 0,005 mm/s vai universālajā testa iekārtā „Instron E3000” ar mērdiapazonu no 0 līdz 3 kN un slogošanas ātrumu 0,03 mm/s. Eksperimentālo datu reģistrēšanai izmantot „Wave Maker” un „Instron” datorprogrammas.

Šļūdes stenda sviru pleca attiecība spiedē ir 1:40 un stiepē – 1:20. Atsvaru precizitāte spiedē – 1/100 kg jeb 0,01% un stiepē 1/10 000 kg jeb 0,0001%. Līdz ar to šļūdes sviru precizitāte spiedē ir $0,01 \times 40 = \pm 0,4$ kg un stiepē – $0,0001 \times 20 = \pm 0,002$ kg.

Deformāciju mērīšanai izmantot tenzometrus – Aistova sistēmas elektriskos tenzometrus ar iedaļas vērtību 1 μm un maksimālo gājienu 5 mm, mehāniskos pulksteņa mērītājus ar iedaļas vērtību 10 μm un maksimālo gājienu līdz 10 mm un digitālos deformāciju mērītājus HBM DD1 ar precizitāti $\pm 0,5$ μm un maksimālo gājienu $\pm 2,5$ mm, kā arī daudzkanālu reģistrēšanas iekārtu (*data logger*) „Spider 8”. Mērinstrumentu kalibrēšana veikta izgatavotājrūpnīcās.

Paraugu svara izmaiņas noteikt uz svariem „Kern” ar precizitāti $\pm 0,001$ kg.

Cementa kompozītu paraugu plaisu atvērumu lielumu noteikt universālajā pārbaudes iekārtā „Instron 5500R” ar mērdiapazonu 0–100 kN vai uz DTU jaunizveidotajā stiepes rāmja un slogošanas ātrumu 5 $\mu\text{m/s}$. Plaisu atvēruma mērīšanai izmantot digitālo deformāciju mērierīci „Instron extensometer” ar precizitāti $\pm 2,5$ μm un maksimālo gājienu ± 25 mm.

Stiepes plaisas veidošanos, attīstību un raksturu novērot, izmantojot augstas izšķirtspējas digitālo fotokameru Nikon 3D ar 24 megapikseļu izšķirtspēju ar fiksēto makro objektīvu AF-S MICRO NIKKOR 60 MM 1:2:8G ED. Fotoobjektīva fokusa attālums – 60 mm.

Fotoaparāta uzstādījumi – diafragma F11, ekspozīcija 1/30 s, ISO 200. Plaisu novērošanā izmantot gredzenveidīgo gaismas diožu prožektoru Macro LED Ring Light.

Eksperimentāli iegūtos datus apstrādāt, izmantojot MS „Excel”, MathWork „Matlab”, GOM „Aramis”, Imetrum LTD „Imetrum”, HBM „CatMan”, Breeze systems „NKRemote” un „Time Stamp” datorprogrammas.

2.7. Datu apstrāde un parametru noteikšana

Datu apstrāde un parametru noteikšana notiek pēc standartvienādojumiem (ACI 209.1R–05 2005; Gilbert, Ranzi, 2011; Neville *et al.*, 1983; William, Callister, 1997; EN 1992–1-1, 2005 u.c.):

Deformācijas no tenzometra, nosaka pēc izteiksmes (2.4):

$$\Delta n_{1,2} = n_n - n_0 \quad (2.4)$$

kur

$\Delta n_{1,2}$ – deformācija no tenzometra, mm;

n_n – nolasījums no tenzometra, kad pielikta slodze [mm]; Elastīgajā daļā nolasījumu veic pie katras sloojuma pakāpes;

n_0 – pirmais nolasījums no tenzometra, pirms slodzes pielikšanas, mm;

Vidējā eksperimentālā deformācija, nosaka pēc izteiksmes (2.5):

$$n_{eksp} = \frac{\Delta n_i + \Delta n_{i+1}}{x} \quad (2.5)$$

kur

n_{eksp} – vidējā eksperimentālā deformācija, mm;

Δn_i – nolasījumu vērtības, mm;

x – nolasījumu skaits;

Relatīvo deformāciju, nosaka pēc izteiksmes (2.6):

$$\varepsilon = \frac{n_{eksp}}{l_{(T)}} \quad (2.6)$$

kur

ε – relatīvā deformācija, mm/mm;

$l_{(T)}$ – tenzometra bāze, mm;

Eksperimentālo normālspriegumu (spiestos un stieptos elementos), nosaka pēc izteiksmes (2.7):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

kur

σ – normālspriegums, MPa;

F – pieliktā slodze, N;

A – slogotais laukums, mm²;

Elastības moduli, nosaka pēc izteiksmes (2.8):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el}} \quad (2.8)$$

kur

E – elastības modulis, GPa;

σ – normālspriegums, MPa;

ε_{el} – relatīvā deformācija, elastīgajā daļā, mm/mm;

Parauga svara izmaiņas, nosaka pēc izteiksmes (2.9):

$$m = \Delta M \cdot 100 / M_0 \quad (2.9)$$

kur

m – parauga svara izmaiņas, %;

ΔM – mitruma zudums, g;

M_0 – sākotnējais svars, g;

Kopējās, ilglaicīgās deformācijas, nosaka pēc izteiksmes (2.10). Kopējo deformāciju līkni un aprakstošos līknes posmu vienādojumus, sk. att. 2.14:

$$\varepsilon_{kop}(t) = \varepsilon_{el}(t_0) + \varepsilon_{sl}(t, t_0) + \varepsilon_{ruk}(t) = \frac{\sigma}{E(t_0)} + \frac{\sigma}{E(t_0)} \cdot \varphi_{sl}(t, t_0) + \varepsilon_{ruk}(t) \quad (2.10)$$

kur

t_0 – slodzes pielikšanas brīdis;

t – jebkurš laika moments pie konstantas ārējās slodzes;

$\varepsilon_{kop}(t)$ – kopējās ilglaicīgās deformācijas pie nemainīgas temperatūras laika momentā t ;

$\varepsilon_{el}(t_0)$ – relatīvās, elastīgās deformācijas slogošanas brīdī t_0 ;

$\varepsilon_{sl}(t, t_0)$ – šļūdes deformācijas laika momentā t ;

$\varepsilon_{ruk}(t)$ – rukuma deformācijas laika momentā t ;

$E(t_0)$ – cementa kompozīta elastības modulis slogošanas brīdī, GPa;

$\varphi_{\dot{s}l}(t, t_0)$ – šļūdes koeficients laika momentā t ;

Kopējās rukuma deformācijas; nosaka pēc izteiksmes (2.11):

$$\varepsilon_{kop.ruk}(t) = \varepsilon_{\dot{z}.ruk}(t) + \varepsilon_{aut.ruk}(t) \quad (2.11)$$

kur

$\varepsilon_{kop.ruk}(t)$ – kopīgā rukuma deformācijas laika momentā t ;

$\varepsilon_{\dot{z}.ruk}(t)$ – kopīgā rukuma deformācijas laika momentā t ;

$\varepsilon_{aut.ruk}(t)$ – kopīgā rukuma deformācijas laika momentā t ;

Šļūdes deformācijas, nosaka pēc izteiksmes (2.12):

$$\varepsilon_{\dot{s}l}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{kop}(t)}{\varepsilon_{el}(t, t_0)} = \varphi_{\dot{s}l}(t, t_0) \cdot \varepsilon_{el}(t, t_0) = \varphi_{\dot{s}l}(t, t_0) \cdot \frac{\sigma}{E(t_0)} = \chi_{\dot{s}l}(t, t_0) \cdot \sigma = \varepsilon_{kop}(t) - \varepsilon_{ruk}(t) - \varepsilon_{el}(t, t_0) \quad (2.12)$$

kur

$\chi_{\dot{s}l}(t, t_0)$ – īpatnējā šļūde laika momentā t , mm/mm /MPa;

Šļūdes koeficients, nosaka pēc izteiksmes (2.13):

$$\varphi_{\dot{s}l}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{\dot{s}l}(t, t_0)}{\varepsilon_{el}(t, t_0)} = \varepsilon_{\dot{s}l}(t, t_0) \cdot \frac{E(t_0)}{\sigma} = \chi_{\dot{s}l}(t, t_0) \cdot E(t_0) \quad (2.13)$$

Īpatnējā šļūde, nosaka pēc izteiksmes (2.14):

$$\chi_{\dot{s}l}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{\dot{s}l}(t, t_0)}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{kop}(t) - \varepsilon_{ruk}(t) - \varepsilon_{el}(t, t_0)}{\sigma} = \frac{1}{E_{\dot{s}l}(t, t_0)} \quad (2.14)$$

Īpatnējā elastīgā deformācija, nosaka pēc izteiksmes (2.15):

$$\chi_{el}(t_0) = \frac{\varepsilon_{el}(t, t_0)}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{kop}(t) - \varepsilon_{ruk}(t) - \varepsilon_{\dot{s}l}(t, t_0)}{\sigma} = \frac{1}{E(t_0)} \quad (2.15)$$

kur

$\chi_{el}(t_0)$ – īpatnējā elastīgā deformācija slogošanas brīdī t_0 , mm/mm /MPa;

Šļūdes modulis (adaptēts no plastmasa standarta - ASTM International Designation: D 2990 – 01, 2001) nosaka pēc izteiksmes (2.16):

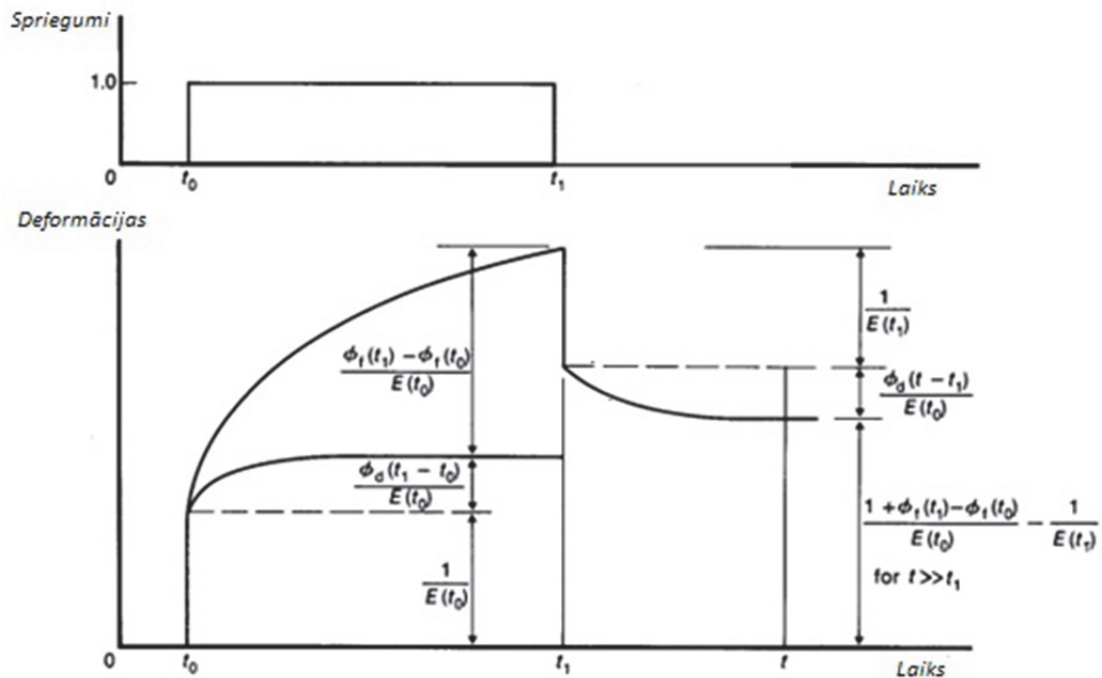
$$E_{s\dot{l}}(t, t_0) = \frac{\sigma}{\varepsilon_{s\dot{l}}(t, t_0)} \quad (2.16)$$

kur

$E_{s\dot{l}}(t, t_0)$ – šļūdes modulis laika momentā t , GPa;

Šļūdes funkcija, nosaka pēc izteiksmes (2.17):

$$\phi(t, t_0) = \chi_{el}(t_0) + \chi_{s\dot{l}}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{el}(t_0)}{\sigma} + \frac{\varepsilon_{s\dot{l}}(t, t_0)}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} [\varepsilon_{el}(t_0) + \varepsilon_{s\dot{l}}(t, t_0)] = \frac{1}{E(t_0)} + \frac{1}{E_{s\dot{l}}(t, t_0)} \quad (2.17)$$



2.14. att. Deformācijas spriegumu ietekmē laikā t_0 un t (Dilger, 1982)

Spriegumu lauks plaisas gala σ , nosaka pēc izteiksmes (2.18), sk. att. 2.15.:

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f(\theta) \quad (2.18)$$

kur

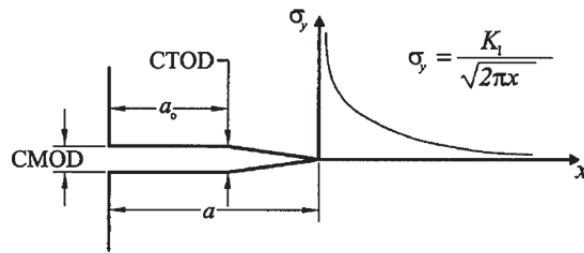
K_I – spriegumu intensitātes faktors;

r – rādiuss, kādā atrodas stiepes spriegumi; spriegumi atrodas robežās starp diviem apļveida apgabaliem ar vienu centru, kur ārējā apļa rādiuss ir $r > r_p$ un iekšējā apļa rādiuss ir $r \ll a$;

a – izveidotā iezāģējuma garums;

r_p – neelastīgās zonas lielumu plaisas galā („plastiskā zona” vai „norises zona”);

$f(\theta)$ – polārās koordinātu sistēmas funkcija;



2.15. att. Grffita plaisa – sprieguma lauks plaisas galā (ACI 224R-01, 2001; Jenq, Shah, 1987)

Spriegumu intensitātes faktoru K_I , CT paraugos; nosaka pēc izteiksmes (2.19):

$$K_I = 1.12 \sigma_a \sqrt{\pi a} \quad (2.19)$$

kur

σ_a – pieliktais stiepes spriegums;

Ja nav zināmi spriegumu plaisas galā, spriegumu intensitātes faktoru var noteikt izmantojot izteiksmi (2.20) (Zehnder, 2010).

$$K_I = \frac{P}{WB} \sqrt{a} F(a/W) \quad (2.20)$$

kur

P – pieliktā slodze, N

B – parauga biezums, mm

W – parauga platums, mm

a – izveidotās plaisas garums, mm

$F(a/W)$ – koeficients, to izsaka ar izteiksmi (2.21)

$$F(a/W) = 29,6 - 185,5(a/W) + 655,7(a/W)^2 + 1017(a/W)^3 + 6389(a/W)^4 \quad (2.21)$$

Neelastīgās zonas lielumu plaisas galā („plastisko zonu” vai „norises zonu”) r_p ; nosaka pēc izteiksmes (2.22):

$$r_p \sim \frac{K_I^2}{\sigma_0^2} \quad (2.22)$$

kur

σ_0 – stiepes spriegums pie kura sākas neelastīgas deformācijas;

Energijas izdalīšanas ātrumu G , nosaka pēc izteiksmes (2.23):

$$G = \frac{K_I^2}{E'}$$

(2.23)

kur

$E'=E$ – plaknes spriegumi;

$E'=E/(1-\nu^2)$ – plaknes deformācijas;

E – materiāla Junga modulis;

ν – Puasona koeficients;

2. nodaļas kopsavilkums

Konstrukciju modelēšana un to darbības prognozēšana nav iespējama bez informācijas par atsevišķo komponentu īpašībām. Ar mērķi noteikt jauno, atšķirīgo cementa kompozītu īpašību raksturojošos parametrus, ir izstrādātā jauna ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija, kas izmantojama mehānisko īpašību pārbaudes laboratorijās.

Metodoloģija nosaka materiāla un paraugu izgatavošanas un eksperimentālo pārbaūžu veikšanas procedūru aprakstus, iegūto datu apstrādi un aparatūras izvēli.

Izveidotā metodoloģija vitāli nepieciešama, lai noteiktu mūsdienu jauno, atšķirīgo parastās, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu raksturīgās īpašības – šļūdes, rukuma deformācijas, kā arī plaisu izpēti – plaisu rašanos, attīstību, raksturu un plaisu atvēruma lielumu, kas ir noteicošie nestspējas un lietojamības robežstāvoklī un nepieciešami drošu konstrukciju projektēšanai, kā arī turpmākai racionālu būvmateriālu izveidei.

Veicot literatūras izpēti, tai skaitā analizējot pieejamās īpašību noteikšanas un pārbaūžu metodikas un iekārtas, konstatēts, ka esošās īpašību noteikšanas metodikas ir neviennozīmīga, nepilnīga un metodikas piemērotas parastās stiprības cementa kompozītu īpašību pārbaudei, tāpat konstatēts, ka pasaulē neeksistē betona šļūdes stiepē noteikšanas standarts. Līdz ar to tiek kavēta arī projektēšanas normu ieviešana, jo jaunajiem cementa kompozītiem nav piemērojamas aprobētās aprēķina procedūras, kas tiek izmantotas tradicionālajam, parastās stiprības betonam. Līdz ar to tie pagaidām šie materiāli nav izmantojami būvju projektēšanā un praktiskajā būvniecībā.

Metodoloģijas izstrādes gaitā pārveidots cementa kompozīta šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends stiepē un adaptēts šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends spiedē. Atšķirībā no atsperu un pneimatiskajām iekārtām šļūdes sviru stendos ir iespējams uzlikt konstantu slodzi un stabili noturēt to nemainīgu ilgu laika posmu (mēnešiem, gadiem), kā arī eksperimentu laikā nav nepieciešamas spriegumu līmeņa korekcijas (atšķirībā no atsperu sloojuma veida, jo tajā uzspriegums ar laiku samazinās, un pneimatiskā sloojuma veida gadījumos, kad notiek elektriskās strāvas pārtraukums). Tāpat nav nepieciešami papildresursi, lai iekārta strādātu – papildizdevumi par elektroenerģijas patēriņu (atšķirībā no pneimatiskajiem šļūdes stendiem). Šļūdes stendi ir pietiekoši droši, jo to kalibrēšanas līknes ir lineāras (atšķirībā no atsperu stendiem, kam tās ir nelineāras). Stendos ievietojami mazāku izmēru paraugi (biezums ≤ 70 mm), kas ir tuvināti reālo konstrukciju izmēriem un vairāk

raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem to blīvās mikrostruktūras un lielās stiprības dēļ, tādējādi radot materiālu ietaupījumu (atšķirībā no standartos minēto paraugu izmēriem). Šļūdes sviru stendos iespējams pārbaudīt cementa kompozītus, kuriem lielākais granulometriskais izmērs ≤ 5 mm.

Viens no veidiem, kā cementa kompozītā novērot mikroplaisu rašanos un attīstību, kā arī mērīt to lielumu, ir izmantot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodes, kas veicamas paralēli kādai, standartizētai stiepes stiprības noteikšanas metodei. Jaunajā metodoloģijā ietvertas divas no tām – GOM „Aramis” un „Imetrum”, no kurām mikroplaisu un plaisu izpētei un mērīšanai atbilstošāka un precīzāka ir bezkontakta mērīšanas sistēma GOM „Aramis”. Ar šīs sistēmas uzņemto un datorprogrammas apstrādāto digitālo fotoattēlu palīdzību var fiksēt plaisas attīstību ar 1 s intervālu, iegūstot plašus un detalizētus datus par plaisu rašanos, stabilizēšanos, tālāko attīstību, atvēršanos un rakstura veidošanos, zarojumu, mikroplaisu atvēršanos un aizvēršanos dažādos slogojuma posmos, kā arī precīzus plaisu atvēruma lieluma datus. Programmas pamatā ir augstas izšķirtspējas attēlu apstrāde. Lai uzņemtu labas izšķirtspējas fotoattēlus, kas būtu tālāk izmantojami pārvietojumu noteikšanai, ļoti būtiski ir visus virsmas punktus saglabāt objektīva fokusā, kas var neizdoties punktu kustības dēļ. Eksperimentāli veiktie pētījumi parāda, ka ar parasto, fiksēto objektīvu nav iespējams novērot mikroplaisu parādīšanos un attīstību, tāpēc būtu jāizmanto makro objektīvs vai mikroskops. Eksperimentālie pētījumi arī apliecina, ka universālā pārbaudes iekārta “Instron” ir neatbilstoša mikroplaisu novērojumiem un plaisu atvēruma mērījumiem, jo pat ļoti maza iekārtas darbības ātruma gadījumā – $\approx 5 \mu\text{m/s}$ – pārbaudāmajā paraugā rodas pārāk lielas svārstības/ kustības un nav iespējams iegūt asus augstas izšķirtspējas fotoattēlus. Bet pārbaužu laikā mikroplaisu novērošanai izmantotais makro objektīvs, ar aci neredzamo svārstību dēļ, zaudē pirms tam fokusā esošos parauga virsmas punktus un nespēj uzņemt pietiekoši kvalitatīvus fotoattēlus, kurus tālāk būtu iespējams apstrādāt ar GOM „Aramis” datorprogrammu.

Digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metožu priekšrocība salīdzinājumā ar standartizētajām mehāniskajām metodēm un mehānisko digitālo mērinstrumentu noteiktajām deformācijām ir tā, ka ar to palīdzību slogojuma laikā var precīzi noteikt plaisu rašanās, augšanas, zarošanās, mazo plaisu apvienošanās, stabilizēšanās un atvēršanās posmus, kā arī mikroplaisu atvēršanos un aizvēršanos un mērīt pārvietojums vienlaikus neierobežota daudzuma vietās un dažādā attālumā no plaisas gala.

Eksperimentāli noskaidrots, ka galvenā plaisa aizsākas, stiepes spriegumiem sasniedzot 60–80% no graužošo spriegumu vērtības, tālāk notiek tās augšana, zarošanās, stabilizēšanās un, sasniedzot graužošo spriegumu vērtību, galvenā plaisa turpina strauji augt un paralēli sāk atvērties līdz parauga sabrukumam.

Tāpat ar šo metodiku palīdzību ērti un precīzi var noteikt cementa kompozītu Puasona koeficientu, jo deformācijas ir viegli mērāmas abos virzienos (horizontāli un vertikāli), bet to var

būt apgrūtināti izdarīt ar klasiskajām deformāciju noteikšanas metodēm, kā arī noteikt gadījumus, kad neizpildās plakano šķēlumu (Bernulli) hipotēze.

Augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu stiepes stiprība ir salīdzinoši maza (~5–10% no spiedes stiprības), un ir problemātiski piemērotas testa iekārtas, kas būtu piemērotas šādām mazām slodzēm un kuru darbības laikā iekārtā nerastos nepieļaujami lielas svārstības, tāpēc metodoloģijas izstrādes gaitā izveidots jauns pārbaudes stends vienasīgā stiepē, kas speciāli projektēts un piemērots mazām stiepes slodzēm un ir precīzāks, strādājot ar nelieliem pārvietojumiem. Eksperimentāli pārbaudīts, ka, izmantojot šo iekārtu, ir iespējams iegūt precīzākas aprakstošās materiālu līknes un tā ir izmantojama mikroplaisu novērošanai un mērīšanai. Šīs iekārtas vienīgais trūkums – tā ir izmantojama paraugiem ar fiksētu attālumu starp slodzes pielikšanas caurumu centriem, t.i., 90 mm.

Eksperimentālās aprobācijas rezultāti pierāda, ka jaunais, vienasīgais stiepes slodzes pārbaudes stends ir precīzāks un atbilstošāks ISCK un maza izmēra (150 × 150 × 12 mm; 100 × 50 × 12 mm) paraugu plaisu izpētes pārbaudēm nekā universālās, liela mērdiapazona iekārtas. Veicot iekārtas eksperimentālo aprobāciju un salīdzinot iegūtās stiepes slodzes – plaisu atvēruma lieluma līknes ar līknēm, kas iegūtas ar universālo testēšanas iekārtu, iegūts, ka stiepes graužošo spēku rezultātu atšķirība ir 4–8%, kas uzskatāma par nebūtisku, bet, salīdzinot iegūtos līkņu raksturus, to atšķirība ir būtiska. Tas izskaidrojams ar universālās iekārtas rupjajiem, paraugu mazajiem izmēriem neatbilstošajiem satvērējzokļiem, iekārtai nepiemēroto mazo sloģošanas ātrumu, kā arī iekārtas sākotnējo tukšgaitu. Kopumā ņemot, ar jauno stiepes stendu eksperimentāli iegūto slodzes – plaisu atvēruma lieluma līkņu raksturs ir precīzāks un labāk atbilst cementa kompozīta stiepes stiprības – deformāciju diagrammu līkņu raksturam. Tāpat jaunās iekārtas aprobāciju papildus apstiprina tas, ka ar jauno stiepes stendu iegūtie dati uzrāda labu sakritību ar datiem, kas iegūti ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodiku.

3. JAUNIZVEIDOTĀS METODOLOĢIJAS EKSPERIMENTĀLĀ APROBĀCIJA

3.1. Materiālu izvēles pamatojums

Cementa kompozīts ir viens no galvenajiem, plaši izmantotajiem, konstruktīvajiem materiāliem pasaulē. Cementa kompozīta īpašības tiek nepārtraukti pētītas un pilnveidotas, uzlabojot tā struktūru, padarot to dabai draudzīgāku, kā arī uzlabojot tā fizikāli mehāniskās īpašības, tai skaitā stiprību un izturību, kā arī deformatīvās īpašības, kas dod iespēju veidot lielāku laidumu, plānākas, ģeometriski sarežģītākas un ilgoturīgākas konstrukcijas. Cementa kompozīta fizikāli mehāniskās īpašības var būt mainīgas, jo tās ir atkarīgas no dažādiem ārējiem faktoriem, piemēram, apkārtējās vides apstākļiem – temperatūras un mitruma, sloģošanas veida un ātruma, kā arī no iekšējiem faktoriem, piemēram, cementa kompozīta sastāvdaļām, to īpašībām, proporcijas u.c.

Viens no veidiem, kā uzlabot cementa kompozīta īpašības, ir pilnveidot tā sastāvu, izmantojot dažāda veida piedevas un pildvielas un tādējādi uzlabojot tā struktūru un īpašības. Mūsdienās arvien aktuālāks kļūst ekoloģiskās būvniecības jautājums, kas nozīmē dabai draudzīgāku būvmateriālu izmantošanu, tā ne vien saglabājot neatjaunojamus dabas resursus un būvmateriālu ražošanā, izmantojot otrreiz pārstrādātas izejvielas, bet arī samazinot globālo sasilšanu un ozona cauruma palielināšanos stratosfērā.

Pieaugot pieprasījumam pēc aizvien jauniem, uzlabotiem, konstruktīvajiem materiāliem, pēdējos gadu desmitos zinātnieki un cementa kompozītu tehnologi daudz pūļu veltī jaunu, uzlabotu īpašību cementa kompozītu izstrādei. Viens no perspektīvākajiem virzieniem cementa kompozīta attīstībā ir ar šķiedrām (fibrām) pastiprināta augstas un sevišķi augstas stiprības, un augsto īpašību cementa kompozīts (*FRHPCC – Fiber Reinforced High Performance Cement Composite*). Šis cementa kompozīta veids apvieno sevī gan augstas stiprības cementa kompozīta (*HSC – High Strength Cement Composite*), gan arī augsto īpašību cementa kompozīta (*HPC – High Performance Cement Composite*) īpašības. Cementa kompozītam papildus pievienotās dažāda materiāla un veida šķiedras nodrošina cementa kompozītam uzlabotas mehāniskās un fizikālās īpašības. Ar šķiedrām pastiprinātam cementa kompozītam ir lielāka plaisāšanas noturība, kas ir ļoti svarīga īpašība augstas un sevišķi augstas stiprības un augsto īpašību cementa kompozītiem, jo šādiem cementa kompozīta veidiem raksturīgs palielināts cementa daudzums to sastāvā, zema ūdens un cementa attiecība, kas izraisa palielinātus deformatīvos procesus cementa kompozīta cietēšanas sākumā.

Cementa kompozīti ir daudz komponentu materiāli, kas sastāv no dažāda granulometriskā izmēra materiāliem, kuru izmēri svārstās plašā amplitūdā. Šo izmēru savstarpējās proporcijas un lielums ietekmē gan svaiga cementa kompozīta maisījuma īpašības (piem., iestrādājamību), gan sacietējuša cementa kompozīta īpašības – stiprību, izturību u.c. Lai uzlabotu cementa kompozīta izturēšanos slodzes iedarbībā, mūsdienu būvniecībā tiek pilnveidota cementa kompozīta mikrostruktūra, palielinot cementa kompozīta sastāvdaļu izmēru amplitūdu.

Cementa kompozīta īpašības var tikt uzlabotas izmantojot dažādu veidu piedevas, no kurām vispopulārākā ir mikrosilika. Cementa kompozītā mikrosilika darbojās divos veidos: pirmais ir ķīmiskais efekts – tā reakcijā ar cementu rodas vairāk CSH gela, otrais ir fizikālais – mikrosilikas daļiņas ir simts reizes mazākas nekā cementa un tā aizpilda spraugas cementa pastā, palielinot cementa kompozīta blīvumu. Mikrosilikas izmantošana uzlabo cementa kompozīta īpašības un samazina cementa izmantošanas daudzumu (aptuveni 1 kg mikrosilikas samazina cementa daudzumu par 4 kg) un tas savukārt ir pozitīvs devums ekoloģijai.

3.2. Eksperimentālo sastāvu, paraugu izvēle un pārbaudes robežu noteikšana

Izstrādātā ISCK ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija ir aprobēta, izpildoties šādiem nosacījumiem:

- ISKC matricu pildvielu granulometriskais izmērs ≤ 5 mm;
- ū/c attiecība 0,2–0,75;
- kubiskā spiedes stiprība 30–150 MPa;
- cementa kompozīta blīvums 2100–2500 kg/m³;
- paraugu cietēšanas apstākļi ($+20 \pm 2^\circ\text{C}$, RH > 95 %);
- rekomendējamie paraugu ģeometriskie izmēri:
 - spiedes stiprības noteikšanai – kubi $50 \times 50 \times 50 \pm 1$ mm; $100 \times 100 \times 100 \pm 1$ mm; prizmas – $40 \times 40 \times 160 \pm 1$ mm; cilindri – $\varnothing 40 \times 160 \pm 1$ mm; $\varnothing 47 \times 190 \pm 1$ mm; $\varnothing 72 \times 190 \pm 1$ mm; $\varnothing 72 \times 300 \pm 1$ mm;
 - šļūdei vienasīgo deformāciju spiedē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai – cilindri $\varnothing 47 \times 190 \pm 1$ mm; $\varnothing 40 \times 160 \pm 1$ mm; $\varnothing 72 \times 190 \pm 1$ mm; $\varnothing 72 \times 300 \pm 1$ mm; prizmas – $40 \times 40 \times 160 \pm 1$ mm;
- Stiprība un deformācijas vispārīgi var tikt noteiktas arī uz citu ģeometrisku izmēru paraugiem, lietojot atbilstošus pārejas koeficientus;
- Šļūdes un rukuma deformācijas nosakāmas, izvēloties vienotu parauga ģeometriju abām paralēli veicamām pārbaudēm. Lai izslēgtu galu ietekmi uz nosakāmajiem, ilglaicīgajām slodzes deformācijām, paraugu ģeometriskajiem izmēriem jāizpildās nosacījumam $\frac{b}{l} \leq \frac{1}{4}$, kur b – parauga šķērsriezuma lielākais izmērs; l – parauga garums; izvēloties paraugu garumu, tas jāaskaņo ar iekārtā maksimāli iespējamo, ievietojamo paraugu garumu;
- stiepes stiprības, šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un plaisu attīstības izpētes pētīšanai izmantot plātņveida paraugus – $150 \times 150 \times 12 \pm 1$ mm; $150 \times 70 \times 12 \pm 1$ mm; $100 \times 50 \times 12 \pm 1$ mm ar iezāģējumu vienā vai abās parauga pusēs;
- šļūdes pārbažu spriegumu līmenis atrodas robežās 20–40% no graužošo sprieguma lieluma; atbilstošo testu graužošo slodžu noteikšanai, izmantot paraugus, kam ir atbilstoši ģeometriskie izmēri;
- slogojumu veic piecās pakāpēs, slogojuma pakāpe ir vienāda ar ~20 % no graužošajiem spriegumiem;

- slopojuma ilgums agrājam, ilglaicīgajam pārbaudēm ir no 1 līdz 28 dienām; cementa kompozīta standartvecuma ilglaicīgajam pārbaudēm - no 28 līdz 90 dienām;
- atslodzes ilgums pēc šļūdes pārbaudēm – no 1 līdz 40 dienām;
- cementa kompozītu vecums var mainīties atkarībā no iegūstamo rezultātu mērķa un pielietojuma;
- ilglaicīgās pārbaudes var tikt veiktas paraugiem ar divās mitruma koncentrācijās – gaissausiem un mitriem; par mitriem paraugiem uzskata tādus, kuri ir izolēti no žūšanas un tajos nenotiek mitruma apmaiņa. To var panākt paraugu, piemēram, ietinot divās kārtās folijā;
- laboratorijā rekomendēts uzturēt pastāvīgus apkārtējās vides apstākļus: temperatūru 21 ± 3 °C un gaisa mitrumu $30 \pm 3\%$; šļūdes un rukuma deformāciju noteikšanas pārbaudes veicamas vienādos apkārtējās vides apstākļos.

3.3. Izmantotie sastāvi

Parastas un augstas stiprības cementa kompozītu sastāvi izgatavoti un iebetonēti, paraugu gatavošana un eksperimentālās pārbaudes veiktas Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātes (BIF) Būvmateriālu un Būvizstrādājumu (B_m un B_i), Būvkonstrukciju (BK), Būvmehānikas (B_M) katedru un Dānijas Tehniskās universitātes Civilo inženieru fakultātes (BYG) laboratorijās.

Kopumā izveidoti un pārbaudīti šādi augstas stiprības cementa kompozītu sastāvi:

- augstas stiprības cementa kompozīts, kur kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma izmantots 20 % un 40 % borsilikāta spuldžu stikla mikro izmēra daļiņu pulveris, kas iegūts no otrreiz pārstrādāta spuldžu stikla. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā 55–63 MPa. Cementa kompozīta sastāvu sk. tab. 3.1.

3.1. tabula

Augstas stiprības cementa kompozīta sastāvs ar borsilikāta spuldžu stikla mikropiedevu

Cementa kompozīta sastāvdaļas	Daļa	kg/ m ³	g/ maisījumu		
			Etalons	S 20%	S 40%
Cements Kundas CEM I 42.5N	1	444,4	2222,2	1777,8	1333,3
Gravel 2–5 mm	0,45	753,9	3769,4	3769,4	3769,4
Smiltis 0–4 mm	0,4	682,8	3413,8	3413,8	3413,8
Smiltis 0–0.5 mm	0,15	256,0	1280,2	1280,2	1280,2
Malts borsilikāta spuldžu stikla pulveris			0,0	444,4	888,9
Ūdens	0,45	200,0	1000,0	1000,0	1000,0
Superplastifikators	1,25	5,6	27,7	27,7	27,7
	kopā	2341,6	11713,3	11713,3	11713,3
	ū/c	0,45	0,45	0,5625	0,75

- ECC (ECC PVA) – cementa inženierkompozīts (*Engineered Cementitious Composites*) – parastas stiprības cementa kompozīts, kas pieder pie šķiedrbetonu tipa cementa kompozītiem, bet raksturojas ar augstāku stiepes izturību un daudz plaisu veidošanās

(*multiple cracking*) pie stiepes sprieguma palielināšanās. Cementa kompozīta sastāvs ir mikromehāniski veidots no smalkiem pelniem (*fly ash*), smiltīm (ar maksimālo izmēru 0,18 mm), kvarca pulvera, cementa un ūdens. Sastāvam ar pilivinilalkohola (PVA) šķiedrām, kas ir pievienotas 2 % apmērā. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ir 40–47 MPa.

- Augstas augstas stiprības cementa kompozīts, kur kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma izmantots 1 % montmorilonīta minerālu nano izmēra daļiņas, kas būtībā ir ļoti smalks, speciāli apstrādātu, māla daļiņu pulveris. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā attiecīgi 55–103 MPa. Cementa kompozīta sastāvu sk. tab. 3.2.

3.2. tabula

Augstas stiprības cementa kompozīta sastāvs ar montmorilonīta minerālo piedevu

Cementa kompozīta sastāvdaļas	kg/ m ³	
	Etalons	MNP
Portlandcements Kunda CEM I 42.5 N	792,2	788,0
Diabaz 2–5 mm	316,9	315,2
Diabaz 0–5 mm	316,9	315,2
Smiltis 0,3–2,5 mm (Saulkalne)	316,9	315,2
Smiltis 0–0,5 mm (Saulkalne)	316,9	315,2
Mikrosilika	118,8	118,2
Montmorilonīta māla pulveris		7,9
Ūdens	216,6	215,5
Superplastifikators Sika HE30	14,9	19,7
ū/c	0,27	0,27
Kona nosēdums (cm)	18	20

- Augstas stiprības cementa kompozīts agrā vecumā, kam pievienotas 0,6% pilivinilalkohola šķiedras (PVA). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~78 MPa. Cementa kompozīta sastāvu sk. tab. 3.3. un PVA šķiedru parametrus sk. tab. 3.6.

3.3. tabula

Augstas stiprības cementa kompozīta sastāvs ar PVA šķiedrām

Cementa kompozīta sastāvdaļas	kg/ m ³	
	Etalons	PVA –1
Cements I 42.5 N	675	675
Cements I 52.5 N	225	225
Smiltis 0/1 Saulkalne	300	300
Smiltis 0/2.5 Saulkalne	300	300
Diabazs 0/5	200	200
Diabazs 2/5	200	200
Kvarcs maltais 8 min.	100	100
Mikrosilika 920 D	100	100
Ūdens	200	200
Superplast. HE–30	24	24
PVA šķiedras	0	5
ū/c	0,22	0,22

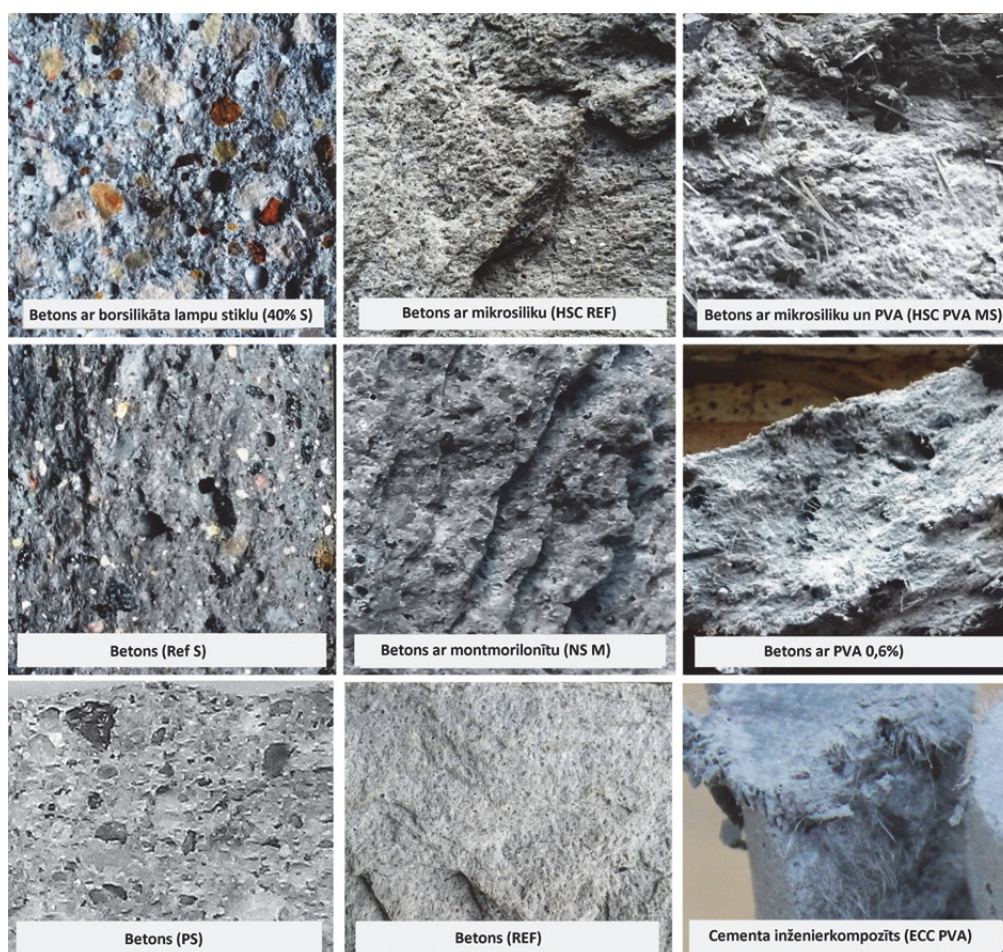
- Augstas stiprības cementa kompozīts, kam pievienotas 2 % PVA šķiedru kokteilis un kā piedevas, kas uzlabo svaiga cementa kompozīta iestrādājamību un sacietējuša cementa kompozīta daļiņu pakojumu, izmantota mikro- un nanosilika. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā 103–128 MPa. Cementa kompozīta sastāvu sk. tab. 3.5. un PVA šķiedru parametrus sk. tab. 3.6.
- Parastas stiprības betona sastāvs, izgatavots DTU, sk. tab. 3.4. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā 30 MPa.

3.4. tabula

Parastas stiprības betona sastāvs

Betona sastāvdaļas	g
Cements	660
Ūdens	289
Smiltis (0 – 4 mm)	1341
ū/c	0,44

Attēlā 3.1. redzami dažādi sagrautie cementa kompozītu sastāvi.



3.1.att. Dažādi sagrautie cementa kompozītu sastāvi (RTU, DTU)

Šajā nodaļā turpmāk uzskatāmi un detalizēti aprakstīts un apskatīt viens augstas stiprības cementa kompozīts ar 2 % PVA šķiedru kokteili un mikro- un nanosilikas minerālo piedevu, kam ir veikti visplašākie dažādo īpašību noteikšanas pētījumi.

Materiāla apraksts

Mūsdienās ir aktuāla nanotehnoloģiju izmantošana materiālu īpašību uzlabošanā, tās tiek pielietotas arī cementa kompozīta maisījumos. Viens no šādiem plašāk izmantotajiem nanotehnoloģiju veidiem ir nanosilikas piedeva, kuru daļiņas izmēri ir <300 nm. Nanosilika pēc savas darbības veida ir līdzīga mikrosilikai, taču tās daļiņu izmēri ir ievērojami mazāki. Tiek prognozēts, ka tā vēl vairāk kā mikrosilika, samazina nepieciešamā cementa daudzuma izmantošanu, kā arī samazina porainību un uzlabos saisti starp cementa matricu un pildvielām. Sīkāko daļiņu izmērs vairāk uzlabos cementa kompozīta pakojumu. Balstoties uz iepriekš aprakstīto tiek prognozēts, ka nanosilika izmantošana paaugstina cementa kompozīta stiprību un izturību, tomēr nav skaidrs nanosilikas iespaids uz deformējamības un ilgizturības raksturlielumiem – šļūdi un rukumu, plaisām. Ilglaicīgo, deformatīvo īpašību noteikšanai ir nozīmīga loma noturīgu un ilgizturīgu būvju projektēšanā.

Eksperimentālais pētījums vērsts uz jaunizveidotā sevišķi augstas stiprības, šķiedrbetona mehānisko, deformatīvo, ilglaicīgo un ilgizturības īpašību izpēti.

Veidojot augstas stiprības šķiedrbetona sastāvu vērā ņemti sekojoši faktori:

- Izmantoti vietējie, komerciāli iegūstami izejmateriāli;
- Izmantota vismazākā, iespējamā ū/c attiecība;
- Cementa kompozīta sastāvdaļām jābūt sajaucamām uz vietas RTU B_m un B_i laboratorijas cementa kompozīta mikserī;
- Cementa kompozītam jābūt ar augstu plūstamību, lai to būtu viegli iepildīt veidņos;
- Pieļaujamies maksimālais graudu lielums <1 mm ($D_{max} = 1$ mm);
- Cementa javas tilpums (~65 %), lai būtu pieļaujams izmantot lielu šķiedru daudzumu;
- Izmantot PVA FIB Energy šķiedru kokteili (no MC 40/8 un MC 200/12);
- Minimizēt materiālu patēriņa un izgatavošanas cenu.

Izmantoti šādi izejmateriāli

- Kā pildviela izmantotas Latvijas, vietējās („Saulkalnes”) trīs dažādu raupjumu dabīgās *kvarca smiltis* – attīrītas, mazgātas un žāvētas, iejauktas dažādās proporcijās (Saulkalnes, 2012) (sk. att. 3.2.);
- Maisījumos izmantots labākais, komerciāli pieejamais *portlandcements* Latvijā ar augstu agro stiprību – Aalborg Portland cements CEM I 52.5 R, kura deklarētais stiprības intervāls 2 dienu vecumā ir 33–41 MPa un 28 dienu vecumā 70–79 MPa (Aalborg Portland, 2012), (sk. att. 3.2.);
- *Superplastifikators* Sikament 56 ir augsti efektīva, ūdens daudzumu samazinoša un superplastificējoša cementa kompozīta piedeva, kas piešķir cementa kompozīta masai labu iestrādājamību un stiprības attīstību (Sika, 2008). Sikament 56 tika pievienots 0,3 %

apmērā no cementa svara, kas ietilpst ražotāju norādītajā daudzuma intervālā 0,1–2,0 %.

- *Mikrosilika* ir viens no minerālo piedevu veidiem, smalki malts, kas pievienota cementa kompozīta maisījumam, lai panāktu lielāku maisījuma plasticitāti (sk. att. 3.2.). Mikrosilikas pievienošana samazina cementa kompozīta maisījuma pagatavošanai nepieciešamo ūdens daudzumu, līdz ar to arī ū/c attiecību. Mikrosilika Elkem 971 U ir pulverveida un nesablīvēta līdz ar to tas atvieglo tās iestrādi maisījumā, un tās blīvuma intervāls ir 250–350 kg/m³ (Elkem, 2012). Literatūra rekomendēts izmantot 15 % Elkem Microsilica 971 U no kopējā cementa daudzuma.

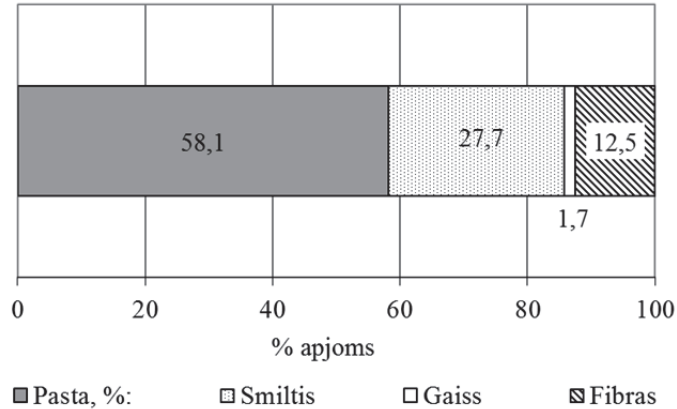


3.2.att. Cementa kompozītu izejmateriāli

- *Nanosilika* ir jaunās paaudzes materiāls, kuru izmanto cementa kompozīta maisījumos, lai paaugstinātu tā īpašības – stiprību, izturību u.c. Nanosilika, tāpat kā mikrosilika, tiek ražota no silikas pelniem un to daļiņu izmērs ir <300 nm. Ar tās mazo izmēru palīdzību, nanosilika palīdz cementa kompozītam kļūt „kompaktākam” – tā aizpilda tukšumus starp pārējām pildvielām (Elkem, 2010). Maisījumā izmantoti 2 % Elkem nanosilika no kopējā cementa daudzuma.
- Augstas stiprības cementa kompozītu trūkums ir paaugstināts trauslums. Lai uzlabotu cementa kompozīta pēc lūzuma izturēšanos, pielieto dažāda veida šķiedras. Šķiedru izmantošana palīdz sasniegt augstu lieces–stiepes stiprību, uzlabotu kopējo darbību stiepē. *PVA šķiedras* ir augstas stiprības un augsta elastības moduļa sintētisko polimēru šķiedras (sk. att.3.2.).

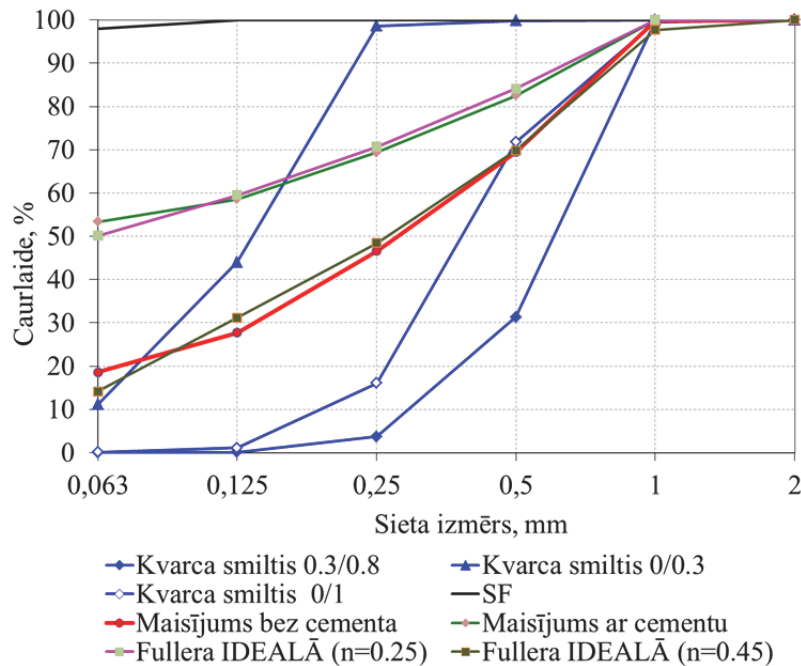
3.4. Eksperimentālā sastāva pagatavošana

Augsta stiprības šķiedrbetona sastāva proporcijas (sk. att. 3.3.), tās ir izvēlētas ņemot vērā iepriekšējo augstas stiprības cementa kompozītu izgatavošanas pieredzi (Justs *et al.*, 2011).



3.3. att. Augstas stiprības šķiedrbetona sastāvdaļu proporcijas

Sastāva izveidošana balstīta uz ideālās granulometriskās līknes metodi, lai iegūtu graudu blīvu pakojumu un labu nesacietējušā cementa kompozīta plūstamību. Graudu optimālās proporcijas tika sarēķinātas tā, lai iegūtu kompozīciju, kas maksimāli tuvu atbilstu ideālajai līknei. Kā ideālā līkne izmantota Fullera paraboliskā sakarība starp graudu lielumu (t.i. sieta caurumu lielumu) un sastāva (graudu+ cementa) gadījuma vērtību: $Y_i = (D_i/D_{max})^n \cdot 100$, $n = 0,25$. Līknes apkopotas att. 3.4. (Justs *et al.*, 2011).



3.4.att. Granulometriskās līknes, daļiņu lieluma sadalījums

Cementa kompozīta sastāva pagatavošanas secība:

Granulometrisko izejmateriālu un cementa dozēšana, sajaukšana ilgst ~1 min (ar 30 apg./min), tad 70 % ūdens daudzuma pievienošana, sajaukšana ~5 min (ar 30–70 apg./min), tam seko 25 % ūdens un superplastifikatora pievienošana, sajaukšana ~5 min (ar 50–70 apg./min) un, tad PVA šķiedru pievienošana un atlikušā 5 % ūdens pievienošana, sajaukšana ~5 min (ar 50–70 apg./min).

Detalizētu cementa kompozīta sastāvu un šķiedru īpašības sk. tab. 3.5. un 3.6.

3.5. tabula

Augstas stiprības cementa kompozīta sastāvs

Komponente	[kg/m ³]	
	MS	NS
Cements Aalborg white CEM I 52.5R	1000	1000
Kvarca smiltis (Saulkalne) 0–1mm	260	260
Kvarca smiltis (Saulkalne) 0.3–0.8mm	400	400
Kvarca smiltis (Saulkalne) 0–0.3mm	300	300
Mikrosilika Elkem 971 U	150	150
Plastifikators Sikament 56	30	30
Nanosilika	0	20
Ūdens	195	195
PVA šķiedras MC 40/8	10	10
PVA šķiedras MC 200/12	10	10
ū/c	0,19	0,19

3.6. tabula

PVA šķiedru raksturojums

Šķiedru tips	Ø [µm]	L [mm]	ft [GPa]	E [GPa]
MC 40/8	40	8	1,6	42
MC 200/12	80	12	1	30

3.5. Paraugu gatavošana eksperimentālajām pārbaudēm

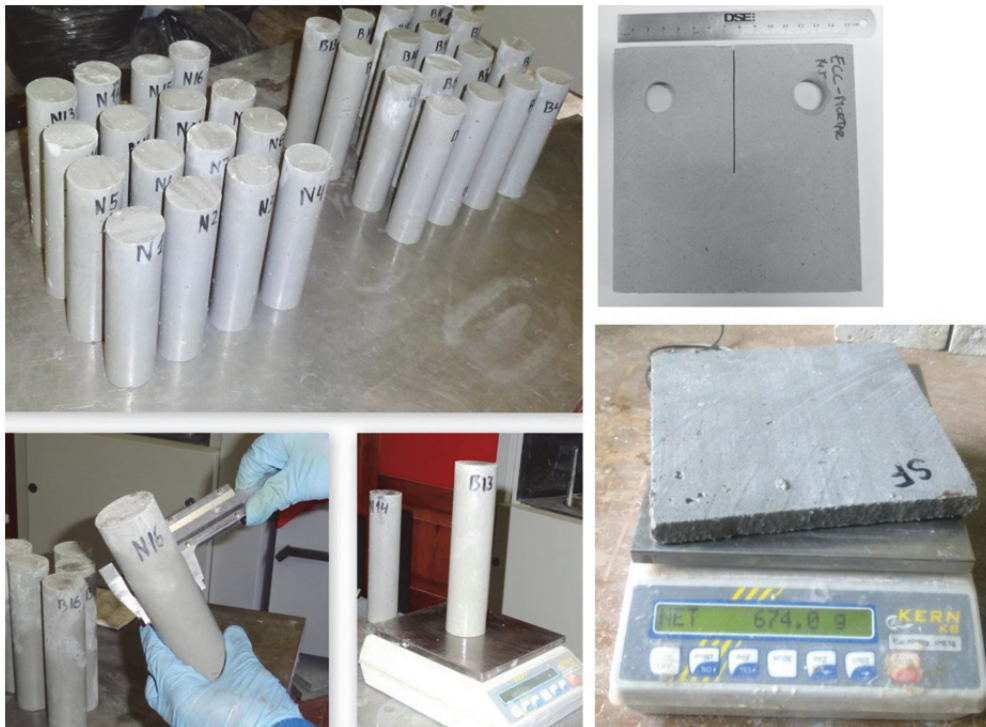
Paraugu gatavošana un eksperimentālie testi veikti Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) un Dānijas Tehniskās universitātes (DTU) laboratorijās pēc 2. nodaļā aprakstītās metodoloģijas.

Sagatavotais augstas stiprības cementa kompozīta maisījumus (bez piespiedu vibrācijas izmantošanas) iepildīts ieeļļotos veidņos un atstāts cietēšanai (sk. att. 3.5.). Cementa kompozīta paraugi cietināti standartā noteiktos cietēšanas apstākļos (20 ± 2 °C, RH > 95 ± 5%) līdz atbilstošo pārbaūžu veikšanai. Pēc 24–48 stundu cietēšanas ūdenī, paraugi atveidnoti, marķēti ar šifru un tad tie pakļauti dažāda ilguma aprūpei. Šajā eksperimentu sērijā kopā izgatavoti 9 kubi ar izmēriem 100 × 100 × 100 mm, 6 kubi ar izmēru 50 × 50 × 50 mm, 2 prizmas ar izmēriem 150 × 150 × 600 mm, 18 prizmas ar izmēriem 40 × 40 × 160 mm, 43 cilindri

Ø47 × 190 mm, 18 cilindri Ø72 × 190 mm; Ø72 × 300 mm. Sērijas apzīmējumi: ar nanosiliku – burts *N* (turpmāk tekstā NS) savukārt paraugus bez nanosilikas apzīmēja ar *B* (turpmāk MS).



3.5. att. Cementa kompozīta sastāva, paraugu gatavošana (RTU laboratorija)



3.6. att. Paraugu atveidņošana, marķēšana, dimensionālā pārbaude un svēršana (RTU laboratorija)

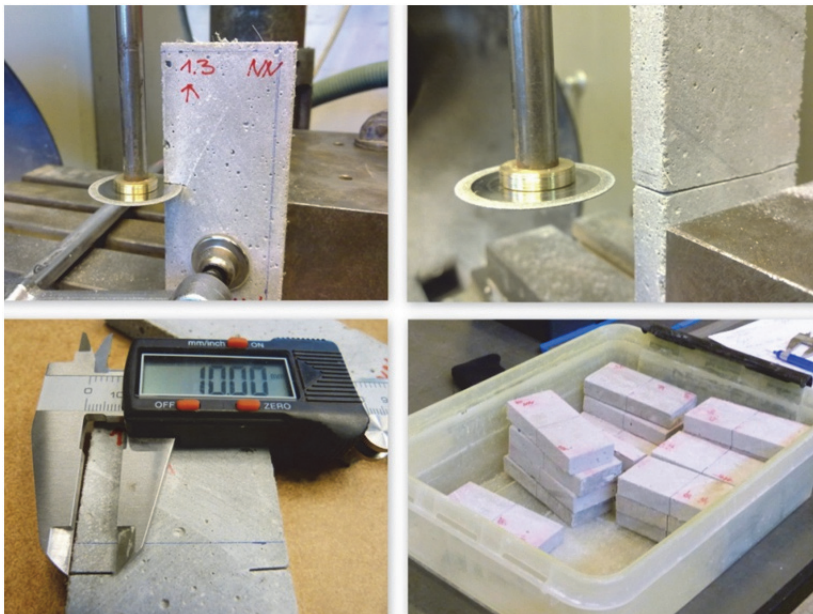
Pēc 7 un 28 dienu cietēšanas, cementa kompozīta paraugi tika izņemti no ūdens un sagatavoti eksperimentālajām pārbaudēm. Visi paraugi tika nosvērti un pārbaudītas to izmēru atbilstība paredzētajiem izmēriem, sk. att. 3.6. Šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju pārbaudēm tika sagatavoti cilindru paraugi ar izmēriem $\text{Ø}47 \times 190 \text{ mm}$, no katra cementa kompozīta sastāva. Daļu paraugu tika ietīti divās kārtās alumīnija folijā, lai nodrošinātu, ka neiestāsies žūšanas process un daļu paraugu atstāti neietīti, tiem tika pieļauts žūšanas rukums un žūšanas šļūde, sk. att. 3.7. Daļa prizmu tika sazāģētas 12 mm biezās plāksnēs, iegūstot 42 paraugus ar izmēriem $150 \times 150 \times 12 \text{ mm}$ no katra cementa kompozīta sastāva. Atlikusī daļa prizmu tika sazāģētas tā, lai iegūtu 12 paraugus ar izmēriem $100 \times 50 \times 12 \text{ mm}$ un 12 paraugus ar izmēriem $150 \times 70 \times 12 \text{ mm}$ no katra cementa kompozīta sastāva, sk. att. 3.8. un 3.9.



3.7. att. Paraugu sagatavošana (RTU laboratorija)



3.8. att. Koncentrētas stiepes (CT) paraugu gatavošana ilglaicīgajām un stiepes plaisu izpētes pārbaudēm (DTU, RTU laboratorija)



3.9. att. Kuponveida paraugu gatavošana (DTU laboratorija)

3.6. Eksperimenta gaita

3.6.1. Spiedes stiprības noteikšana

Eksperimentāli kubu spiedes stiprība noteikta 28. dienā pēc cementa kompozīta sastāva izgatavošanas un cietēšanas, sk. att. 3.10., bet tā kā tika izmantots cementa kompozīts ar augstu agro stiprību, tad daļai paraugu spiedes stiprības pārbaude veikta arī 7. dienā. Lai noteiktu cementa kompozītu cilindrisko spiedes stiprību 28 dienu vecumā, trīs cilindriskā paraugi, no katras sastāva, tika pakļauti spiedes testam. Vidējā, graujošā, cilindriskā spiedes stiprības vērtība tika izmantota, lai aprēķinātu paredzamo slodzes lielumu spiedes šļūdes paraugiem.

Pēc šļūdes paraugu atgriezeniskuma pārbaudes termiņa beigām, šļūdes cilindriskie paraugi no stendiem tika izņemti, atkārtoti nosvērti un pēc tam kopā ar rukuma paraugiem sagrauti spiedē, lai uzzinātu spiedes stiprības pieaugumu laikā ar un bez slodzes ietekmes.



3.10. att. Dažādu paraugu sagraušana spiedē (RTU laboratorija)

3.6.2. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana spiedē

Sagatavotie šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē noteikšanas paraugi kopā ar uzliktiem tenzometriem tiek ievietoti šļūdes sviru stendos un noslogoti, sk. att. 3.11.



3.11. att. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana spiedē (RTU laboratorija)

Cementa kompozīta paraugu vecums šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē noteikšanai slogošanas sākumā bija 30 dienas. Šļūdes pārbaužu sākumā visi paraugi slogoti ar konstantu sprieguma līmeni, kas bija 20 % no graužošanas slodzes attiecīgā cementa kompozīta vecumā. Šļūdes paraugi zem nemainīgas slodzes atstāti 90 dienas, sk. att. 3.11. Šajā laika posmā regulāri veikti deformāciju nolasījumi, reģistrēts telpas apkārtējās vides mitrums un temperatūra. Sasniedzot 90 dienas pēc slogošanas sākuma, slodze no standu atsvariem tika pakāpeniski noņemta un tika nolasīti deformāciju atgriezeniskuma mērījumi pie katras pakāpes. Slodzes noņemšanas pakāpes bija vienādas ar slodzes pielikšanas pakāpēm. Paraugus bez slodzes atstāja vēl 30 dienas.

3.6.3. Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšana

Paralēli šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē noteikšanai spiedē pārbaudēm, tajās pašas telpās, vienādos temperatūras un mitruma apstākļos, tika veiktas arī žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju pārbaudes, pielietojot abas rukuma noteikšanas metodes, regulāri reģistrējot neslogoto žūstošo un nežūstošo (ietītu) paraugu garuma un svara izmaiņas, sk. att. 3.12. Eksperimenta laikā gaisa temperatūra telpā bija 20 ± 1 °C un RH $48 \pm 3\%$.

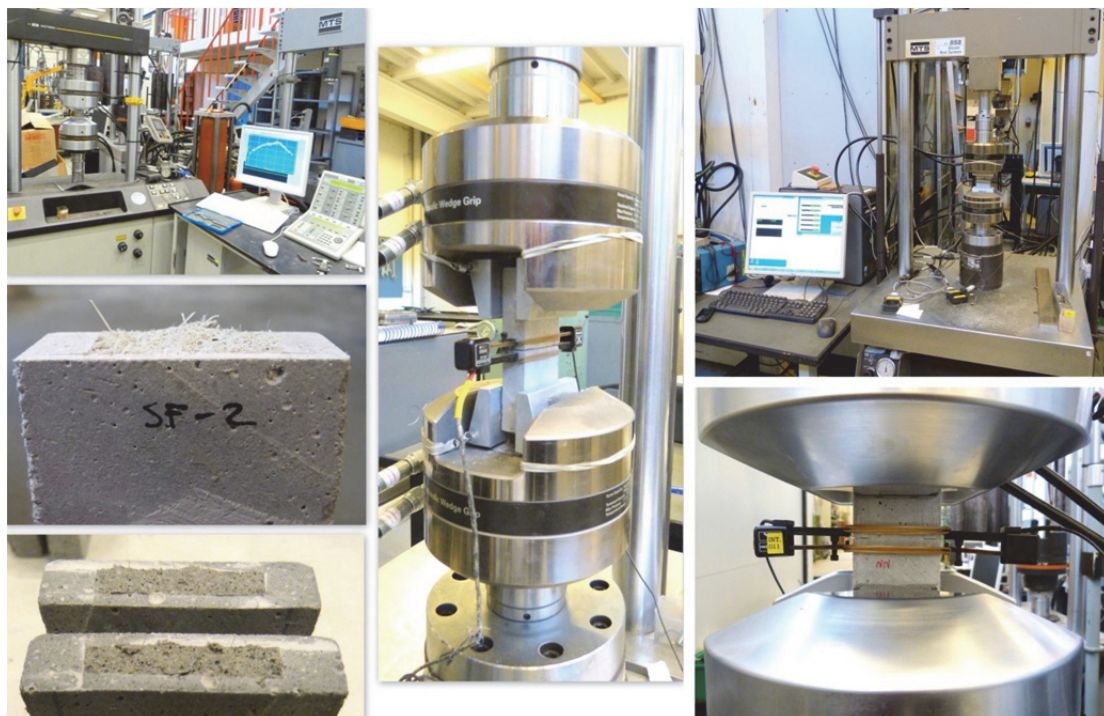


3.12. att. Žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšana pēc divām metodikām (RTU laboratorija)

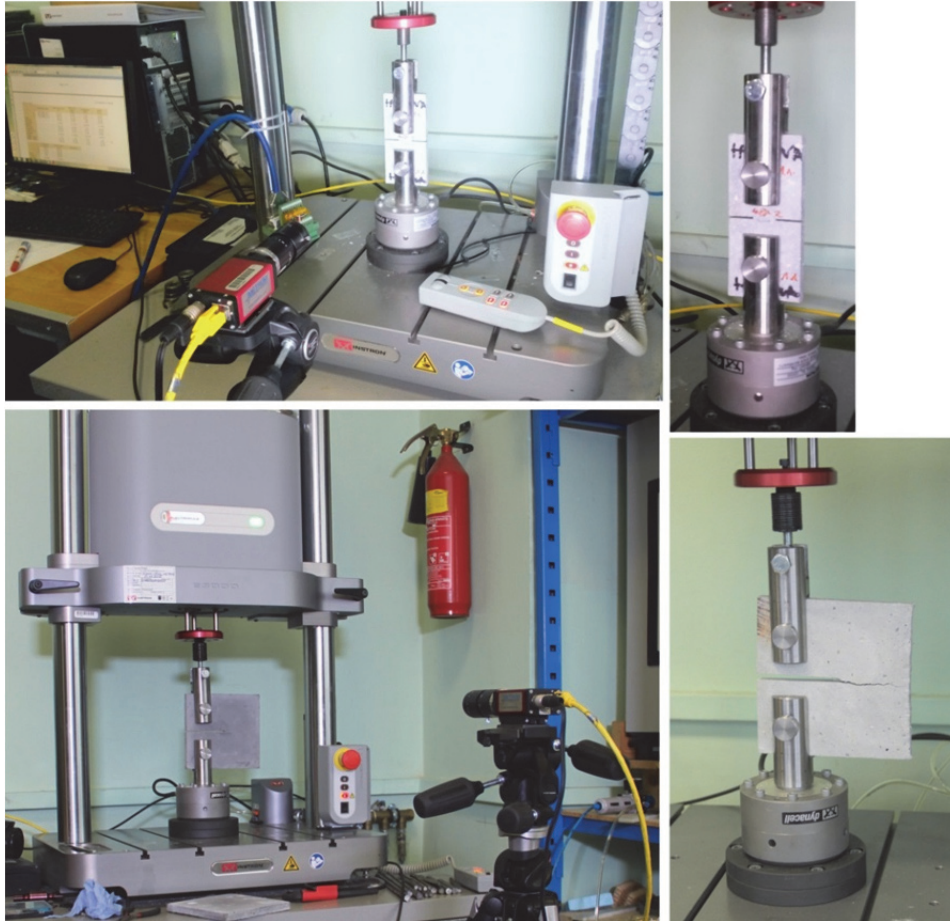
3.6.4. Stiepes stiprības noteikšana, izmantojot kuponveida paraugus

Sevišķi augstas stiprības stiepes stiprības testi un plaisu atvēruma noteikšanas testi veikti DTU laboratorijā, izmantojot kuponveida testa paraugus $100 \times 50 \times 12$ mm ar iezāgējumu parauga vidusdaļā, ievietojot universālā testa iekārtā “MTS 858 Biomix” paraugus, sk. att. 3.13.

Stiepes stiprība noteikta arī RTU laboratorijā, sk. att. 3.14. uz paraugiem $150 \times 70 \times 12$ mm ar iezāgējumiem, paraugus ievietojot universālajā testa iekārtā “Instron E3000”. Sloģšanas ātrums 0,03 mm/s.



3.13. att. Stiepes stiprības un plaisu atvēruma lieluma noteikšana ar kuponveida paraugiem (DTU laboratorija)



3.14. att. Stiepes stiprības, stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana ar kuponveida un koncentrētas stiepes paraugiem ar bezkontakta digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes sistēmu „Imetrum” (RTU laboratorija)

3.6.5. Stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma un plaisu rakstura noteikšana, izmantojot koncentrētas stiepes (CT) paraugus

Plaisu novērošana veikta DTU laboratorijā, stiepjot CT iezāģētus stiepes formas paraugus, kas kopā ar deformāciju mērītāju ievietoti universālajā testa iekārtā “Instron 8516” vai DTU jaunizveidotajā testa iekārtā un slogojot ar ātrumu 0,005 mm/s, sk. att. 3.15. un 3.16. Cementa kompozīta vecums testu laikā ~130 dienas.

Paralēli veikta plaisu sākšanās, attīstības un plaisu atvēruma lieluma noteikšana ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodiku, detalizēts metodes apraksts dots 2.4.7. apakšnodaļā.

Tāpat veikts eksperimentāls tests plaisu raksturu rašanos, nosakot ar divām fotokamerām, vienai no tām izmantots fiksētais objektīvs ar fokusa attālumu 60 mm, bet otrai makro objektīvs.



3.15. att. Plaisu rašanās un tālākas attīstības noteikšana ar bezkontakta digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes sistēmu GOM „Aramis” (DTU laboratorija)



3.16. att. Plaisu rašanās un tālākas attīstības noteikšana uz jaunizveidotā, vienasīgā pārbaudes stenda stiprē ar bezkontakta digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes sistēmu GOM „Aramis” (DTU laboratorija)

3.6.6. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana stiepē

Cementa kompozīta paraugu vecums šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stiepē pārbaudu slogošanas sākumā bija ~60 dienas, sk. att. 3.17. Šļūdes pārbaudu sākumā visi paraugi slogoti ar konstantu sprieguma līmeni, kas bija 20 % no graužošās slodzes attiecīgā cementa kompozīta vecumā. Graužošā slodze noteikta atbilstošā vecumā ar CT; kuponveida paraugiem un pieņemta kā vidējā stiepes stiprība. Detalizēta testa gaita aprakstīta 2.3.7. apakšnodaļā.

Šļūdes paraugi konstantiem spriegumiem tika pakļauti 5 dienas. To laikā regulāri veikti deformāciju nolasījumi, kā arī atzīmēts telpas apkārtējās vides mitrums un temperatūra. Sasniedzot 2–5 dienas pēc slogošanas sākuma, slodze no standu atsvariem tika pakāpeniski noņemta un tika nolasīti deformāciju atgriezeniskuma mērījumi pie katras atslodzes pakāpes. Slodzes noņemšanas pakāpes bija vienādas ar slodzes pielikšanas pakāpēm. Deformāciju atgriezeniskuma mērījumi reģistrēti 1–2 dienu periodā.



3.17. att. Šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšana stiepē (RTU laboratorija)

3. nodaļas kopsavilkums

Izmantojot jauno, ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģiju, laboratorijas apstākļos iegūstamas paaugstinātas precizitātes reālo materiālu īpašību raksturīgās vērtības. Tāpat ar to iespējams novērtēt dažādu iekšējo un ārējo ietekmes faktoru, piemēram, cementa kompozīta vecuma un apkārtējās vides apstākļu ietekmi uz konstrukciju elementu darbību, ko ne vienmēr iespējams novērtēt ar teorētiskiem aprēķiniem un kas maksimāli tuvu atbilst konstrukciju apkārtējās vides apstākļiem, slogojuma lielumam un

ilgumam un konstrukciju ģeometriskajām atšķirībām, turklāt īpašības noteiktas projektā paredzētajam cementa kompozīta sastāvam, kas var atšķirties no standartos aprakstītā.

Jaunā metodoloģija sniedz gan materiālam nepieciešamo īpašību noteikšanas, gan arī drošu konstrukciju aprēķiniem vajadzīgo parametru noteikšanas metodiku. Tā ir universāla un derīga dažādu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei. Tā ir aprobēta parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, dažāda vecuma cementa kompozīta paraugiem, atšķirīgu ģeometrisku formu paraugiem, divām mitruma koncentrācijās. Metodoloģijā ietilpstošās metodikas kopumā pārbaudītas 15 dažādiem cementa kompozīta sastāviem. Eksperimentālajos testos kopumā pārbaudīti: dažādu izmēru kubi, prizmas, cilindri, kā arī plātņveida iezāgētie paraugi (CT un kuponveida).

4. GALVENIE METODOLOĢIJAS EKSPERIMENTĀLĀS APROBĀCIJAS REZULTĀTI UN TO ANALĪZE

Svaiga cementa kompozīta īpašības viegli var ietekmēt dažādi apstākļi, kā piemēram, maisīšanas procedūra, apkārtējās vides apstākļi u.c., līdz ar to ir iespējama nenoteiktība eksperimentālajos rezultātos. Tāpat, eksperimentālo testu rezultātus, var ietekmēt paraugu ģeometrisku izmēru atšķirības, kā arī leņķiskās nobīdes no to paralēlajām virsmām.

Zemāk dotie, grafikos attēlotie lielumi, ir trīs līdz sešu vienlaikus iestrādāto paraugu vidējās vērtības. Lai noteiktu vidējo vērtību, tika ņemti vērā rezultāti, kur starp katra testa paraugiem, ar vienādu sastāvu un aprūpi, rezultātu atšķirības bija robežās no 5–20 %. Rezultāti, kas atšķīrās vairāk kā par 20 %, netika ņemti vērā.

Šī darba ietvaros un jaunās ilglaicīgo un ilgizturīgo īpašību noteikšanas metodoloģijas aprobācijai, eksperimentāli pārbaudīti vairāki cementa kompozītu sastāvi:

- Dažādi parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu sastāvi un to ietekme uz īslaicīgajām un ilglaicīgajām īpašībām (šāda veida testos pārbaudīti visi tālāk norādītie cementa kompozīta sastāvi);
- Dažādu cementa kompozīta mitruma koncentrāciju ietekme uz īslaicīgajām un ilglaicīgajām īpašībām (šāda veida testos pārbaudīti visi cementa kompozīta sastāvi, izņemot agro testu cementa kompozīts);
- Dažādu cementa kompozīta piedevu ietekme uz īslaicīgajām un ilglaicīgajām īpašībām (šāda veida testos pārbaudīti parastas stiprības cementa kompozīti ar borsilikāta spuldžu stikla piedevu (atšķirīgos piedevas daudzumos) un ar montmorilonīta piedevu; kā arī augstas stiprības cementa kompozīti ar montmorilonīta piedevu un ar PVA šķiedrām; un sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar nano- un mikrosiliku un PVA šķiedru kokteili);
- Dažādu cementa kompozītu atšķirīgu aprūpes laiku jeb dažādos cementa kompozīta vecumos (ilglaicīgo testu sākumā) ietekme uz īslaicīgajām un ilgstošajām īpašībām (šāda veida testos pārbaudīti augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA šķiedrām – t.s., agrajos šļūdes testos un augstas stiprības cementa kompozīts ar montmorilonīta piedevu);
- Dažādu paraugu ģeometriju ietekme uz īslaicīgajām un ilglaicīgajām īpašībām jeb mēroga faktors (šāda veida testos pārbaudīts sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar nano- un mikrosiliku un PVA šķiedru kokteili).

4.1. Eksperimentālie pārbaudes rezultāti sevišķi augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas, nanosilikas piedevu un PVA šķiedru kokteili

4.1.1. Spiedes stiprība

Pētījumi rāda, ka cementa kompozīta kubiskā spiedes stiprība ir lielāka mazāko izmēru paraugiem – 50 × 50 × 50 mm (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumā Nr. 2., att. P2.1.), kas

sakrīt parastas stiprības cementa kompozītu mēroga faktora hipotēzi, ka samazinoties paraugu izmēram, samazinās defektu iespējamība (Brauns, 2000). Visiem eksperimentāli pārbaudītajiem sastāviem šī stiprību sakarība starp abu izmēru paraugiem ir 12–15 %. Pārrēķina koeficients ir ~1,16. Vislielākā kubiskā spiedes stiprība ir sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem ar mikrosilikas piedevu un bez PVA šķiedru kokteiļa (MS REF), paraugiem 50 × 50 × 50 mm un tā ir 147 MPa, bet tāda paša sastāva paraugiem 100 × 100 × 100 mm tā ir 129 MPa. Augstas stiprības cementa kompozīta paraugi bez mikrosilikas piedevas un bez PVA šķiedru kokteiļa (REF) uzrādīja tādu pašu tendenci un rezultātu atšķirība ar MS REF ir ~33 %, abu izmēru paraugiem.

Divu dažādu diametru – Ø47 mm un Ø72 mm, bet vienāda garuma – 190 mm paraugu cilindriskā spiedes stiprības (sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.2.) parāda, ka sevišķi augstas stiprības cementa kompozīta cilindriskā spiedes stiprība ir lielāka paraugiem ar lielāko diametru – Ø72 × 190 mm. Turklāt visiem pārbaudītajiem sastāviem šī sakarība ir 4–9 % apmērā. Tāpat, ka vislielākā cilindriskā spiedes stiprība ir paraugiem ar izmēriem Ø47 × 190 mm MS REF un tā ir 87 MPa, bet paraugiem ar izmēriem Ø72 × 190 mm tā ir 91 MPa.

Divu dažādu garumu – 190 mm un 300 mm, bet vienāda diametra – Ø72 mm paraugu cilindriskā spiedes stiprības (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumā Nr. 2., att. P2.3.) parāda, ka sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu īsākie paraugi – 190 mm, uzrāda par ~1–6 % lielāku spiedes stiprību nekā garie – 300 mm paraugi, bet REF šī sakarība ir pretēja. MS REF paraugi uzrāda par ~2–7 % labāku spiedes stiprību nekā paraugi ar mikrosilikas piedevu un PVA šķiedru kokteili (MS PVA).

Visaugstākos spiedes stiprības rādītājus, gan kubisko, gan cilindrisko, uzrāda MS REF un šī starpība ar MS PVA spiedes stiprībām ir robežās no 2–7 %, kas norāda, ka PVA šķiedrām nav ne uzlabojoša, ne arī būtiski pasliktinoša ietekme uz spiedes stiprības lielumu. Nelielā stiprību starpība varētu būt izskaidrojama ar to, ka šķiedru iekļaušana procesā tiek piesaistīts vairāk gaiss un šādu šķiedrainu cementa kompozītu ir tehnoloģiski grūtāk viendabīgi iestrādāt cementa kompozīta veidņos, līdz ar to cementa kompozīta sastāvs ir neviendabīgāks, poraināks.

Satāvos tika izmantots cements ar augstu agro stiprību, tādēļ tika veikta stiprības pārbaude dažādos vecumos, tai skaitā agrā, 7 dienu vecumā, sagraujot spiedē cementa kompozīta kubus ar izmēriem 100 × 100 × 100 mm (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.4.). Cementa kompozīts 7 dienu vecumā uzrāda ~84 % no 28 dienu (cementa kompozīta standartvecuma) stiprības un ~70 % no 123 dienu stiprības. Pie tam šī stiprība ievērojami pārsniedz izmantotā cementa Aalborg White 52,5 R nodrošināto 33–41 MPa stiprību 7 dienu vecumā. Šāds stiprības pieaugums izskaidrojams ar mikrosilikas lietojumu. Cementa kompozīta stiprības pieaugums pēc ilglaicīga testa, t.i., pēc 95 dienām pēc sasniegtā standarta vecuma (kopējais cementa kompozīta vecums 123 dienas) ir ~15 %.

Sevišķi augstas un augstas stiprības cementa kompozītu kubiskās spiedes stiprības ir ~30–32 % lielākas par to cilindriskajām spiedes stiprībām (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.5.). Tātad augstu un sevišķi augstu cementa kompozītu attiecība starp

kubiskajām un cilindriskajām vērtībām ir $\sim 0,7$. Rashid *et al.* (2002), L' Hermite (1960), Neville (1981) un EC 2 pētījumos minēts, ka šī attiecība, atkarībā no cementa kompozīta klases un paraugu ģeometrijas, mainās no 0,7–0,94.

Tāpat eksperimentāli tika pārbaudīts spiedes stiprību pieaugums vienāda izmēra paraugiem – $\varnothing 47 \times 190$ mm, bet dažādos cementa kompozīta vecumos – 28, 123 dienas, sk. pielikumu Nr. 2, att. P2.6. un divās atšķirīgās mitruma koncentrācijās – mitrā un gaissausā.

Mitrā koncentrācijā, abiem sastāviem, abos vecumos nav vērā ņemams pieaugums $\sim 1\%$, bet gaissausā koncentrācijā abiem sastāviem novērots $\sim 13\%$ stiprības pieaugums, kas izskaidrojams ar cementa kompozīta ķīmiskajiem procesiem, kas norit cementa kompozītam žūstot (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.6.). MS PVA abos vecumos uzrāda par 4–6% lielāku stiprības lielumu nekā NS PVA. Tas norāda, ka nanosilikas klātbūtne sastāvā iespējams ir aizkavējusi cementa kompozīta augsto agro stiprību. Maksimālā sasniegtā cilindriskā spiedes stiprība ir MS PVA – 125 MPa.

Pēc ilgstošajiem testiem, t.i., pēc žūstošā rukuma, šļūdes vienasīgo deformāciju un atgriezenisko deformāciju noteikšanas perioda beigām, REF, MS REF, MS PVA paraugi tika sagrauti spiedē un iegūtas cementa kompozīta vidējās cilindriskās spiedes stiprības 61 dienas vecumā. Paraugiem doti šifrējumi – pēc šļūdes pārbaudēm – “pēc ilglaicīgās slodzes testa” un pēc rukuma pārbaudēm – “pēc ilglaicīgā testa bez slodzes” (sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.7.).

Salīdzinot cilindrveida paraugu eksperimentāli iegūtās spiedes stiprības 28 un 61 dienu vecumā (sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.7.) var novērot, ka abos vecumos augstāku spiedes stiprību, pirms un pēc ilgstošajiem testiem, uzrāda MS REF, kas ir cementa kompozīta sastāvs bez PVA šķiedrām. Stiprības pieaugums laikā no 28 dienas līdz 61 dienai sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem (MS REF un MS PVA) ir 11–16%, bet augstas stiprības cementa kompozītam (REF) – 22%.

Ja salīdzina cementa kompozīta stiprību pieaugumu pēc ilgstošiem testiem, tad redzams, ka MS REF un MS PVA sastāviem tas ir tikai par 2%, bet REF spiedes stiprība, kas pieaugusi zem slodzes, ir par 1,5% lielāka nekā bez slodzes. Tātad, tas liek secināt, ka augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozīta gala stiprību būtiski neietekmē tā pakļaušana slogojumam.

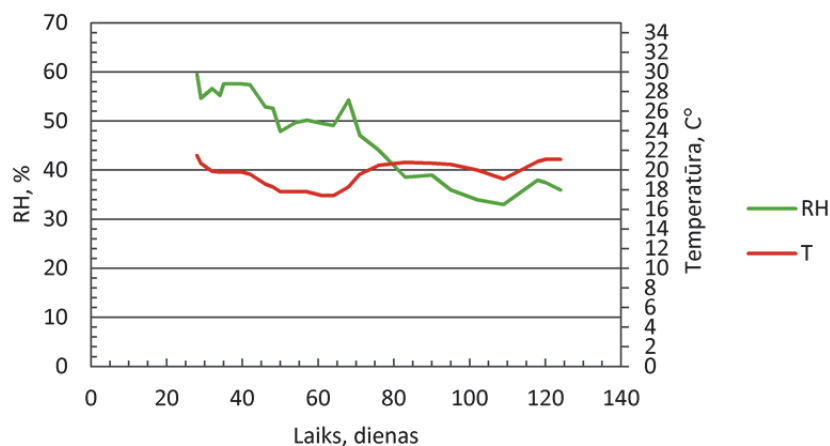
4.1.2. Elastības modulis spiedē

Šļūdes testu sākumā, pēc eksperimentāli noteiktajām, elastīgajām deformācijām, izmantojot Huka likumu, noteikts elastības modulis 28 dienu vecumā. Slodze šļūdes sviru stendu atsvariem pielikta pakāpeniski un elastīgās deformācijas arī tika nolasītas pakāpeniski – pie katra sprieguma līmeņa. Elastības modulis tika noteikts spriegumu – deformāciju līknes taisnajā posmā.

Iegūtie rezultāti (sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.8.) parāda, ka MS PVA paraugiem noteiktais elastības modulis ir par ~ 3 GPa jeb 5,4% augstāks nekā NS PVA.

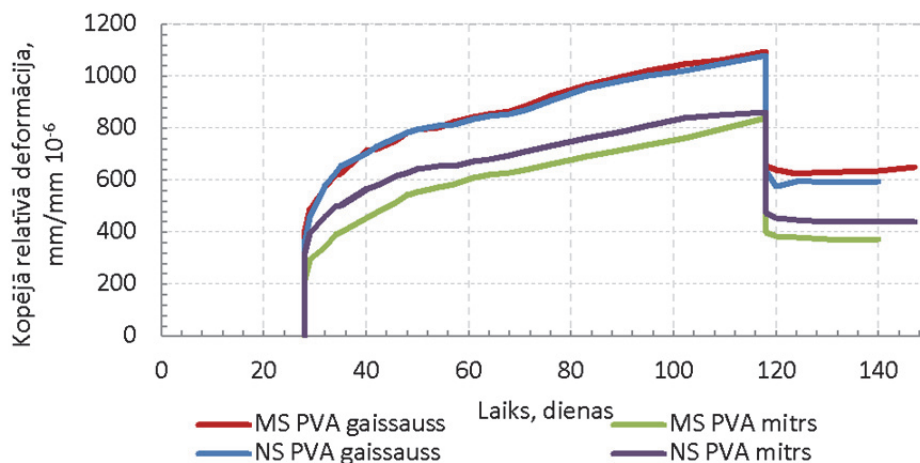
4.1.3. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē

Šī eksperimenta ietvaros kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas tika noteiktas divās paraugu mitruma koncentrācijās: ietītiem – mitriem un žūstošiem – gaissausiem. Paraugus ietinot, tajos novērsta mitruma kustība, lai tādējādi varētu noteikt pamatšķūdes lielumu. Pārbaužu laikā reģistrēts apkārtējās vides mitrums un temperatūra (sk. att. 4.1.).



4.1. att. Pārbaužu laikā reģistrētais apkārtējās vides mitrums un temperatūra

Salīdzinot NS PVA un MS PVA eksperimentāli iegūto, kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju līknes, var secināt, ka ietītie paraugi 90. dienā pēc noslodzes deformējas par ~ 25 % mazāk (sk. att. 4.2.) nekā gaissausie paraugi, turklāt nedaudz lielāka deformāciju starpība ir starp mitrajiem un gaissausajiem MS PVA paraugiem.



4.2. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līknes MS PVA un NS PVA sastāviem dažādās mitruma koncentrācijās – mitrie un gaissausie ($\varnothing 47 \times 190$ mm paraugiem)

Vispārēji lielākas kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas uzrāda paraugi ar nanosilikas piedevu. Salīdzinot savstarpēji tikai abu sastāvu kopējās deformācijas, atsevišķi starp gaissausiem un atsevišķi starp mitriem paraugiem, jāsecina, ka tās ir ļoti līdzīgas, rezultātu atšķirība ir 0,5–2 %. Iegūtie rezultāti atbilst hipotēzei, ka cementa kompozīts ar augstāku

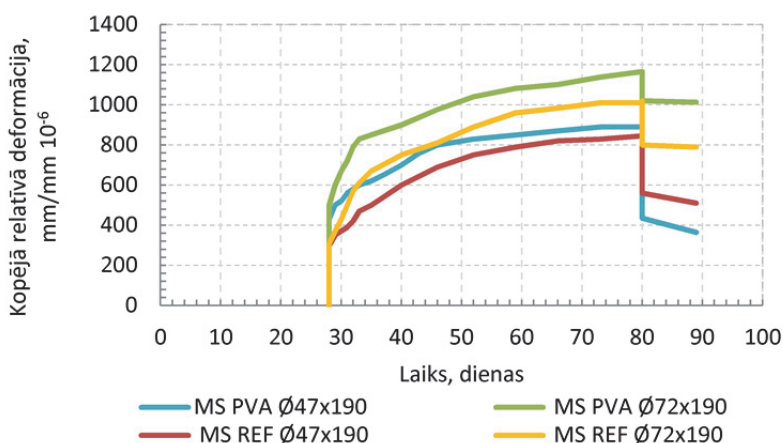
stiprību, šajā gadījumā tas ir cementa kompozīts bez nanosilikas piedevas, laikā, slodzes ietekmē mazāk deformācijas (Neville *et al.* 1983 u.c.).

Slodzi noņemot, acumirkīgais deformāciju atgriezeniskuma lielums gan žūstošajiem, gan mitrajiem paraugiem ir nedaudz mazāks kā sākotnējās elastīgajās deformācijas, sk. att. 4.2.

Kopējās, neelastīgās, atgriezeniskās deformācijas ir nelielas ~1 %. Cementa kompozīta NS PVA mitrajos un žūstošajos paraugos deformācijas 30 dienu laikā samazinās par attiecīgi 38 % un 8 %, bet MS PVA 12 % un 1,3 % no deformācijām pēc slodzes noņemšanas. Apskatot šos rezultātus var secināt, ka nanosilikas minerālajai mikropiedevai nav būtiskas ietekmes uz cementa kompozīta ilglaicīgajām deformācijām.

Paraugu paliekošās, neatgriezeniskās deformācijas apskatāmā perioda beigās. Mitrajiem paraugiem tās ir ~50–56 %, žūstošajiem paraugiem – 43–45 % no kopējām, relatīvajām, vienasīgajām, ilgstošajām deformācijām, sk. att. 4.2.

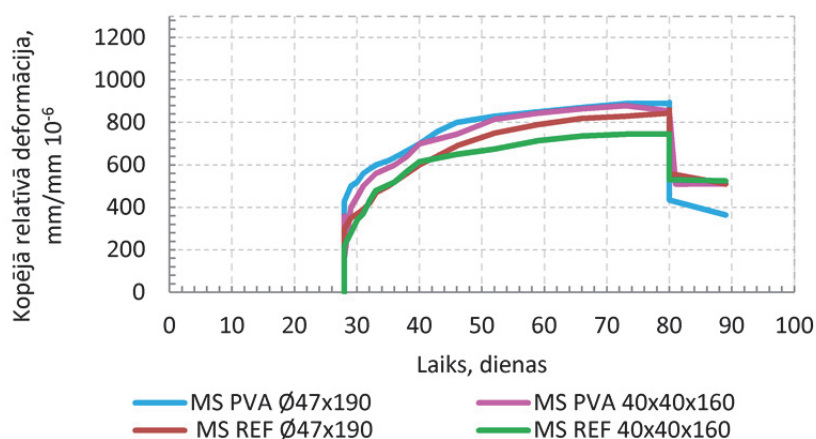
Attēlā 4.3 ir attēlotas kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības dažādu diametru paraugiem (Ø47 un Ø72 mm), gaissausos apstākļos. Kā redzams, tad paraugi ar lielāko diametru, abu sastāvu cementa kompozītiem, šļūdē vairāk, iespējams tas ir saistīts ar palielināto virsmas laukumu, kas ir pakļauts žūšanai. Turklāt lielāka rezultātu atšķirība – 30% ir paraugiem bez šķiedrām. Bet vismazākās deformācijas uzrādīja paraugi bez šķiedrām.



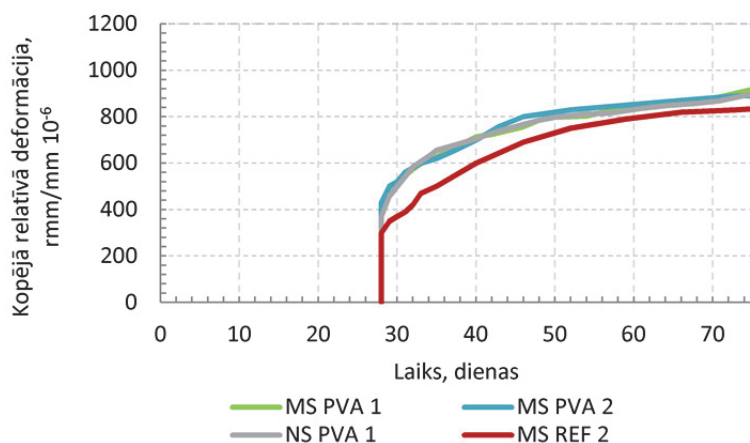
4.3.att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības dažādu diametru paraugiem (Ø47 un Ø72 mm), gaissausos apstākļos

Attēlā 4.4. ir attēlotas kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības dažādu ģeometriju paraugiem (Ø47 × 190 mm, 40 × 40 × 160 mm), gaissausos apstākļos. Kā redzams, tad iegūtie rezultāti būtiski neatšķiras. Prizmatiskie paraugi 2-12% deformējas mazāk nekā cilindriskie paraugi, kas varētu būt izskaidrojams ar paraugu līdzīgo virsmas laukuma lielumu (1600 mm²; 1734 mm²). Paraugi bez šķiedrām uzrādīja mazāku deformāciju lielumu nekā ar šķiedrām.

Attēlā 4.5. ir attēlotas kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības, noteiktas atkārtotos eksperimentālos testos, gaissausos apstākļos. Kā redzams, tad iegūta laba atkārtoto pārbaužu rezultātu sakritība ar iepriekšējiem eksperimentiem.



4.4. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju– laika līkņu vērtības dažādu ģeometriju paraugiem ($\text{Ø}47 \times 190 \text{ mm}$, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$), gaissausos apstākļos



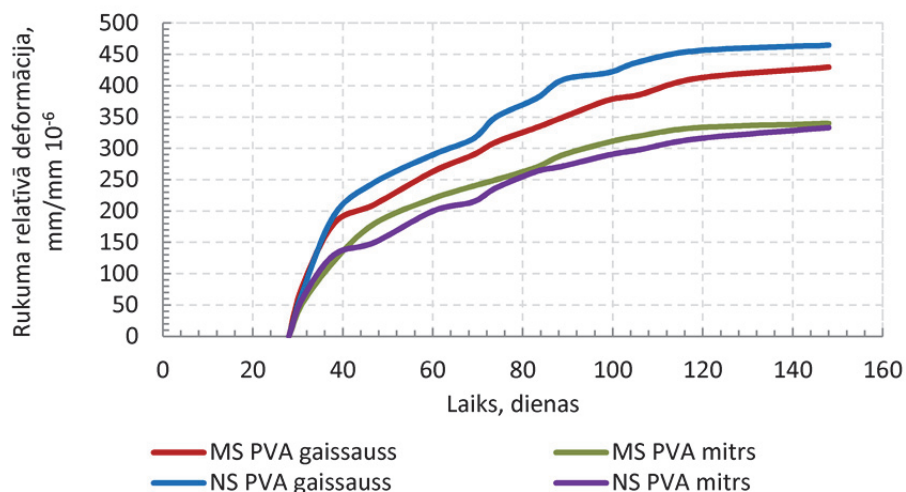
4.5. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības, noteiktas atkārtotos eksperimentālos testos, gaissausos apstākļos

4.1.4. Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas un mitruma zudumi

Paralēli šļūdes vienasīgo, relatīvo deformāciju nolasījumiem, tika reģistrētas arī žūšanas rukuma vienasīgo, relatīvo deformāciju izmaiņas nenoslogotiem, ietītiem un žūstošiem paraugiem, izmantojot abas žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanas metodes, sk. 2.3.4. apakšodaļu.

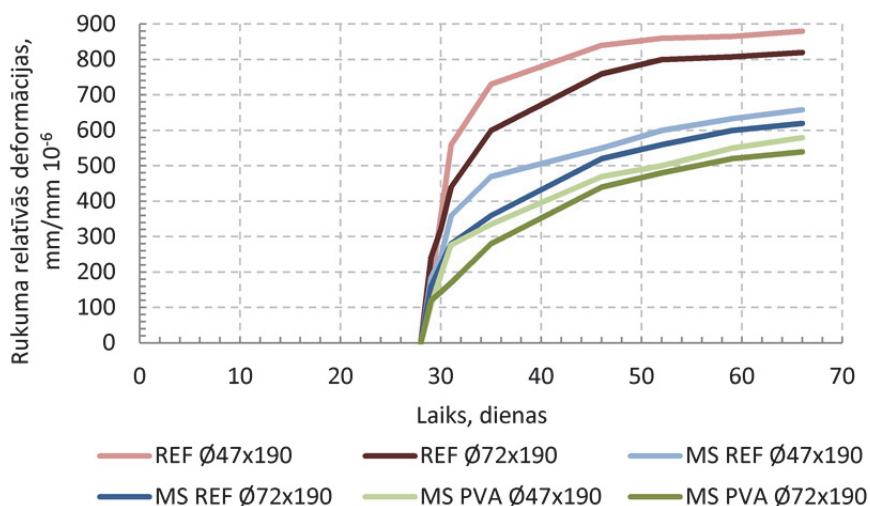
NS PVA paraugi 120. dienā parada par 75 % lielākas žūšanas rukuma vienasīgās, relatīvās deformācijas nekā MS PVA, sk. att. 4.6. Iespējams tas izskaidrojams ar to, ka cementa kompozīta ķīmisko procesu laikā nanosilikas piedevas ietekmē izdalās vairāk mitruma vai iespējams cementa kompozīta struktūrā ir parādījušās vairāk poru caur kurām mitrums ir iztvaikojis.

Kopumā ietītie paraugi rūk mazāk par žūstošajiem paraugiem. Atšķirība starp NS PVA un MS PVA ietīto un žūstošo paraugu deformācijām ir attiecīgi 27 % un 21 %.



4.6. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības NS PVA un MS PVA sastāviem dažādās mitruma koncentrācijās ($\text{Ø}47 \times 190 \text{ mm}$)

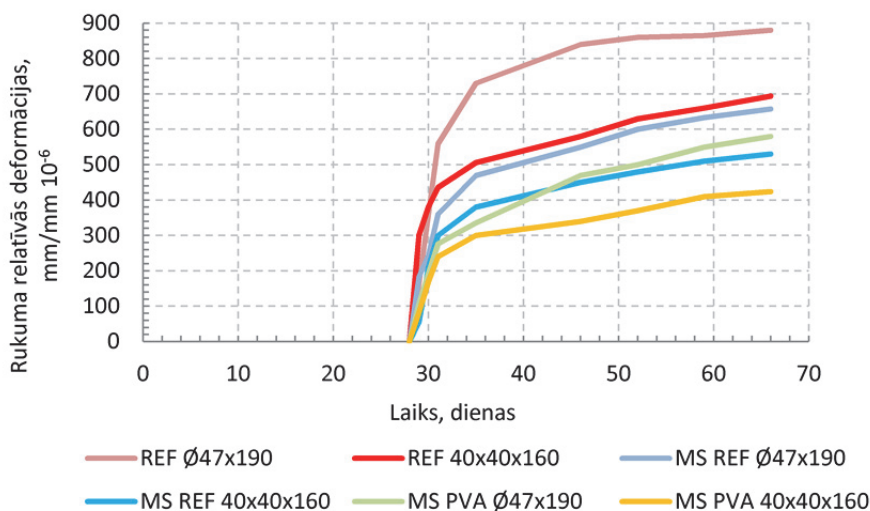
Salīdzinot dažāda diametra, bet vienāda garuma paraugu žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas (sk. att. 4.7.), jāsecina, ka paraugi ar lielāku diametru – $\text{Ø}72 \text{ mm}$, 37. dienā ir sarūkuši par 9–12 % vairāk nekā mazāka diametra paraugi – $\text{Ø}47 \text{ mm}$. MS PVA ir sarūcis par ~10–15% mazāk nekā MS REF. REF, kam ir zemāk spiedes stiprība, žūšanas rukums ir par ~18 % lielāks nekā MS REF. REF paraugi uzrāda to pašu sakarību, ka lielāka diametra paraugi rūk ~7 % mazāk nekā mazāka izmēra paraugi. Šis novērojums sakrīt arī ar Neville *et al.* (1983) eksperimentālo datu apkopojumiem.



4.7. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības dažādu diametru ($\text{Ø}47$ un $\text{Ø}72 \text{ mm}$), dažādu cementa kompozītu (REF, MS REF, MS PVA) paraugiem, gaissausos apstākļos

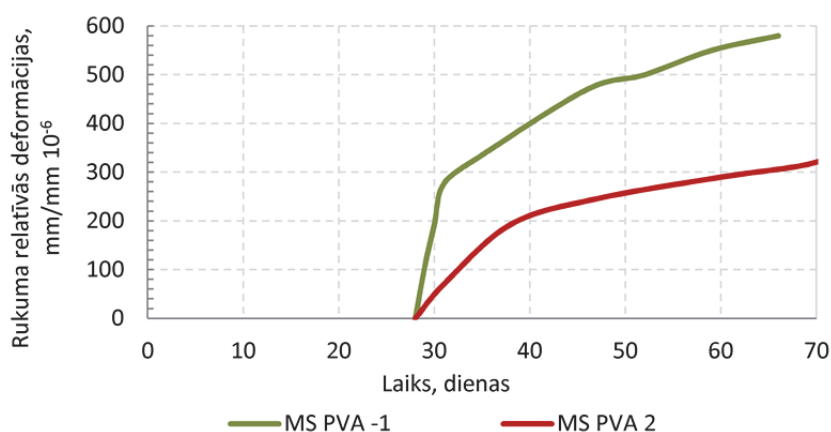
Salīdzinot dažāda izmēra un šķērsriezuma formas ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ un $\text{Ø}47 \times 190 \text{ mm}$) paraugu žūstošā rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas lielumus (sk. att. 4.8.), jāsecina, ka paraugi ar riņķveida, t.i., lielāko šķērsriezuma laukumu – 1734 mm^2 ($\text{Ø}47 \times 190 \text{ mm}$) 37. dienā ir sarūkuši vairāk nekā paraugi ar kvadrātveida šķērsriezumu ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) un mazāko laukumu – 1600 mm^2 . Vislielākā atšķirība 22 % ir starp MS REF

dažādu izmēru paraugiem. Starp MS PVA un REF dažāda šķērsriezuma paraugiem šī atšķirība ir ~13 %. MS PVA paraugi – rūk par ~8–13 % mazāk nekā MS REF. Turklāt REF rūk par ~18 % vairāk nekā MS REF.



4.8. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības dažādu ģeometriju paraugiem, gaissausos apstākļos

Attēlā 4.9. ir attēlota divu, dažādu žūšanas rukuma deformāciju noteikšanas metožu, bet vienāda cementa kompozīta sastāva (MS PVA) un vienāda cementa kompozīta vecuma, rezultāti. Ar apzīmējumu – 1, apzīmēta žūšanas rukuma deformāciju noteikšanas metode, kad deformācijas tiek nolasītas parauga vidusdaļā, identiski kā šļūdes deformāciju noteikšanas paraugiem. Vidējotā deformāciju vērtība tiek sarēķināta no 3 paraugu 3 mērījumiem, t.i. kopā no 9 mērījumiem. Ar apzīmējumu – 2, apzīmēta metode, kad žūšanas rukuma deformācijas tiek noteiktas ar rukuma skavu, ar šīs metodes palīdzību ir iespējams iegūt tikai vienu rukuma mērījumu, tādējādi, lai iegūtu vidējoto deformāciju vērtību ir jāizmanto vairāk kā 3 paraugu.



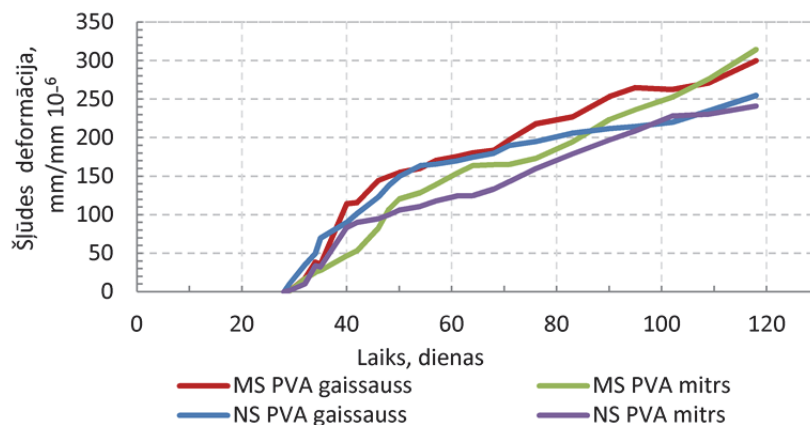
4.9. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu vērtības noteiktas pēc dažādām metodēm, gaissausos apstākļos

Salīdzinot abu žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju noteikšanas metožu iegūtos rezultātus 37. dienā pēc testa sākuma (sk. att. 4.9.), jāsecina, ka rezultātu atšķirība ir

liela – 48%, turklāt lielākas žūšanas rukuma deformācijas ir iegūtas ar metodi – 1. Tādējādi jāsecina, ka, lai noteiktu korektas šļūdes vienasīgās deformācijas ir jāpielieto žūšanas rukuma deformāciju noteikšanas metode, kad deformācijas tiek mērītas tajā pašā vietā, kur tās mēra šļūdes deformāciju noteikšanas paraugiem - parauga vidusdaļā.

4.1.5. Šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē

Šļūdes vienasīgās, relatīvas deformācijas spiedē attēlotas 4.10. attēlā. Kā redzams, tad 90. dienā pēc noslodzes NS PVA žūstošo šļūdes paraugu deformācijas par 1,5 % pārsniedz ietīto paraugu deformācijas (pamatšļūde). MS PVA rāda pretēju sakarību. Kopumā MS PVA uzrāda par 17 % lielāku šļūdes vienasīgo deformāciju lielumu nekā NS PVA.



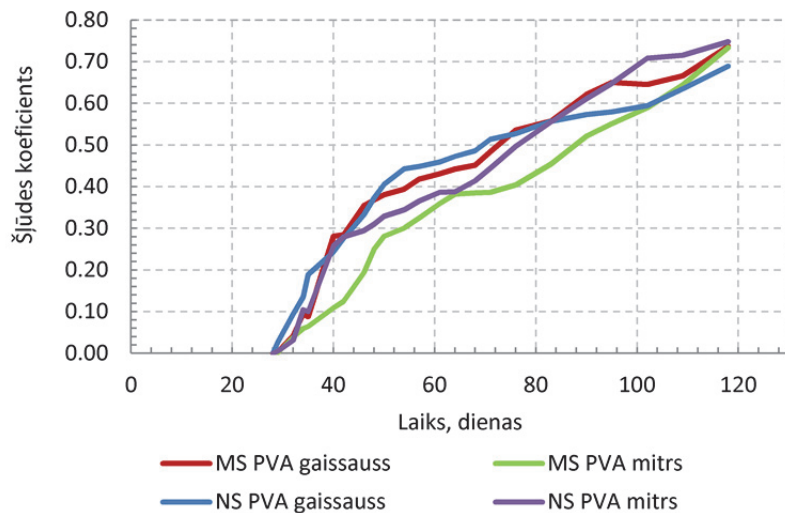
4.10. att. Šļūdes vienasīgo, relatīvo deformāciju – laika līknes spiedē

Ievērojamās žūšanas šļūde vienasīgās deformācijas cementa kompozītā ar nanosilīku varētu būt saistīta ar lielajām žūšanas rukuma vienasīgajām deformācijām, jo procesi, kas iespaido rukumu, līdzvērtīgi iedarbojas arī uz žūšanas šļūdi. Piemēram, mikroplaisāšana, žūstot palielina gan žūšanas rukuma, gan žūšanas šļūdes vienasīgās deformācijas.

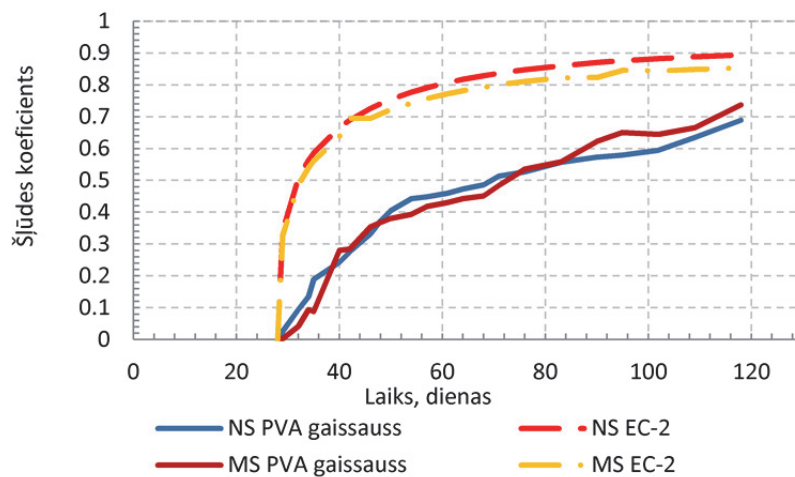
4.1.6. Šļūdes koeficients spiedē

Šļūdes koeficients spiedē rāda šļūdes vienasīgo deformāciju un elastīgo deformāciju attiecību. Cementa kompozītam ar nanosilīku žūstošo paraugu šļūdes koeficients, ~90 dienas pēc noslodzes, pārsniedz ietīto paraugu šļūdes koeficientu par 9%, bet cementa kompozītam bez nanosilīka par ~1%. MS PVA ietīto paraugu šļūdes koeficients ir aptuveni vienāds ar NS PVA paraugiem, bet žūstošiem paraugiem šī starpība ir ~7 %, sk. att. 4.11.

Pēc diviem standartizētiem modeļiem: EN 1992–1–1 (EC–2) un FIP 2010, tika noteikts teorētiskais šļūdes koeficients un salīdzināts ar eksperimentāli iegūtajiem (sk. att. 4.12. un 4.13.). Jāatzīmē, ka modeļi ir atšķirīgi. Modelis EC –2 apskata tikai šļūdes žūstošās daļas komponenti, bet modelis FIP 2010 aprēķinā ietver abu šļūdes komponentu summu. Kā redzams att. 4.12., tad eksperimentāli iegūtās vērtības, izmantojot EC – 2, ir ~17–22 % mazākas nekā teorētiski aprēķinātās šļūdes koeficienta vērtības. Atšķirība varētu būt izskaidrojama ar to, ka EC–2 ir paredzēts cementa kompozītam ar kubisko spiedes stiprību līdz 105 MPa.



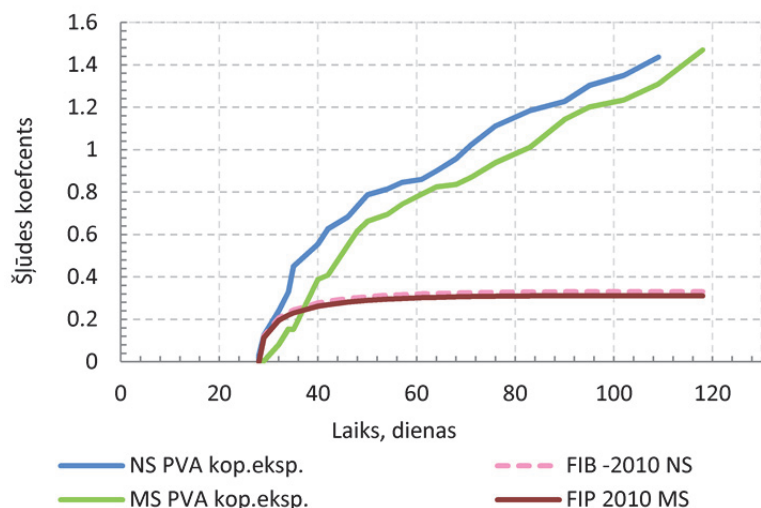
4.11. att. Šķūdes koeficienta – laika līkņu vērtības spiedē



4.12. att. Teorētisko un eksperimentālo žūstošās šķūdes komponentu koeficientu – laika līkņu salīdzinājums (Modelī EC-2 iekļauta tikai žūstošās šķūdes komponente)

Attēlā 4.13. skaidri redzams, ka, izmantojot modeli FIP 2010 eksperimentāli iegūtie pilno šķūdes deformāciju lielumi pēc 90 noslodzes dienām ir par 78 % lielāki nekā teorētiski aprēķinātie.

Lielā atšķirība izskaidrojama ar to (kā jau tas tika minēts arī literatūras apskatā), ka neviens no standartizētajiem modeļiem pilnībā neietver reālu cementa kompozīta sastāvu atšķirīgos, iekšējos un ārējos ietekmes faktoros. To skaidri parāda arī iegūtie šķūdes koeficientu dati, izmantojot modeli FIP 2010. Modeli FIP 2010 rekomendēts lietot cementa kompozītiem ar kubisko spiedes stiprību līdz 140 MPa.

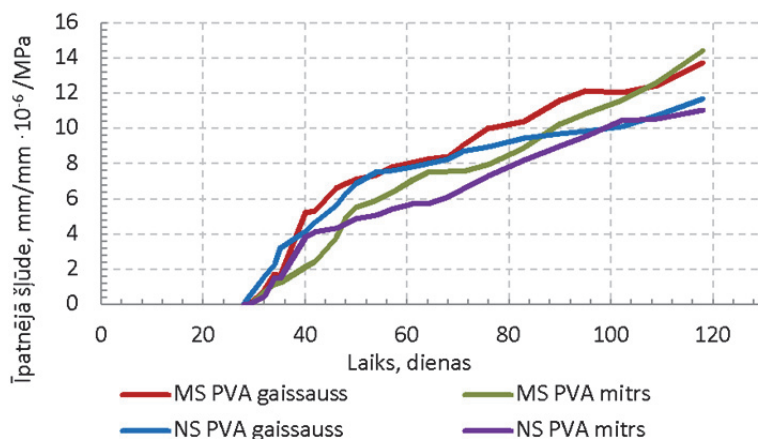


4.13. att. Teorētisko un eksperimentālo, pilno (summāro) šļūdes deformāciju komponentu koeficientu – laika līkņu salīdzinājums (Modelī FIP 2010 iekļautas abu šļūdes deformāciju komponentes – gan žūstošā šļūde, gan pamatšļūde)

4.1.7. Īpatnējā šļūde spiedē

Īpatnējā šļūde spiedē ir visobjektīvākais ilgstošā slogojuma deformāciju parametrs, jo tas izslēdz spriegumu ietekmi uz ilgstošajām slodzes deformācijām.

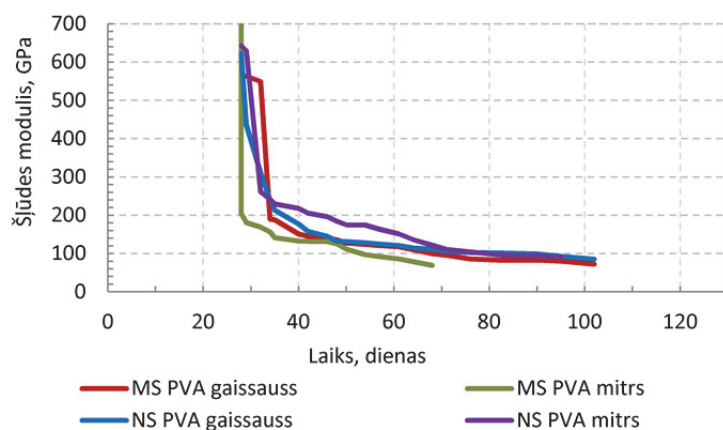
Cementa kompozītam NS PVA žūstošo paraugu īpatnējā šļūde 90. dienā pēc slogojuma, sk. att. 4.14., pārsniedz ietīto paraugu rādītājus par ~8 % un cementa kompozītam MS PVA par ~5 %. MS PVA ietīto paraugu īpatnējā šļūde ir par ~20 % lielāka nekā NS PVA paraugiem. Žūstošiem paraugiem šī starpība ir ~13 %.



4.14. att. Īpatnējā šļūde spiedē

4.1.8. Šļūdes modulis spiedē

Šļūdes modulis, sk. att. 4.15. ir pieliktā sprieguma un šļūdes deformāciju attiecība. Šis ilglaicīgais parametrs izmantojams ilgstoši slogotu konstrukciju deformāciju noteikšanai. Jo šļūdes modulis mazāks, jo materiāls vairāk šļūdē.



4.15. att. Šļūdes moduļa – laika līkņu vērtības spiedē

Kā redzams, att. 4.15., šļūdes moduļim ir tendence laikā samazināties, kas izskaidrojams ar šļūdes deformāciju pieaugumu un kopējo deformāciju pieaugumu. Neilgi (pirmajās dienās) pēc paraugu noslodzes paraugi uzrāda strauju šļūdes moduļa samazinājumu, tad nedēļu šļūdes modulis samazinās lineāri un pēc aptuveni divām nedēļām šļūdes moduļa samazinājums kļūst nelineārs un tā vērtība mainās ar samazinošu ātrumu. Kā redzams, tad aptuveni 80 dienā pēc paraugu noslodzes šļūdes moduļa vērtības abiem cementa kompozīta sastāviem, abās mitruma koncentrācijās ir vienāds ~80–90 GPa. Eksperimentālie rezultāti rāda, ka salīdzinot NS PVA paraugus ar MS PVA paraugiem, ka NS PVA abās mitruma koncentrācijās pēc pirmās noslodzes nedēļas uzrāda lielāku šļūdes moduli.

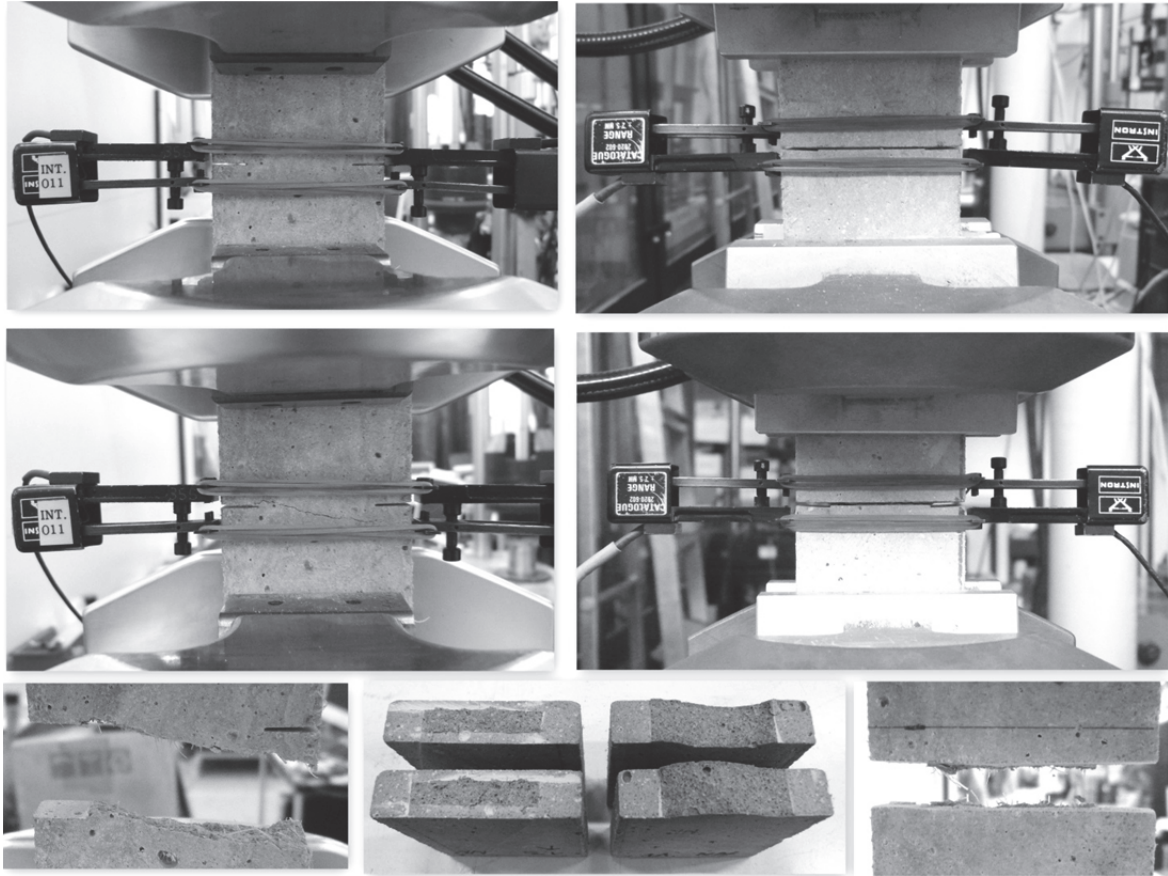
4.1.9. Stiepes stiprība

Cementa kompozīta paraugu stiepes stiprība noteikta ar divu veidu kuponveida formas paraugiem. Attēlos 4.16. un 4.17. redzama stiepes pārbaudes stabilitāte ar dažādiem kuponveida un CT paraugiem.

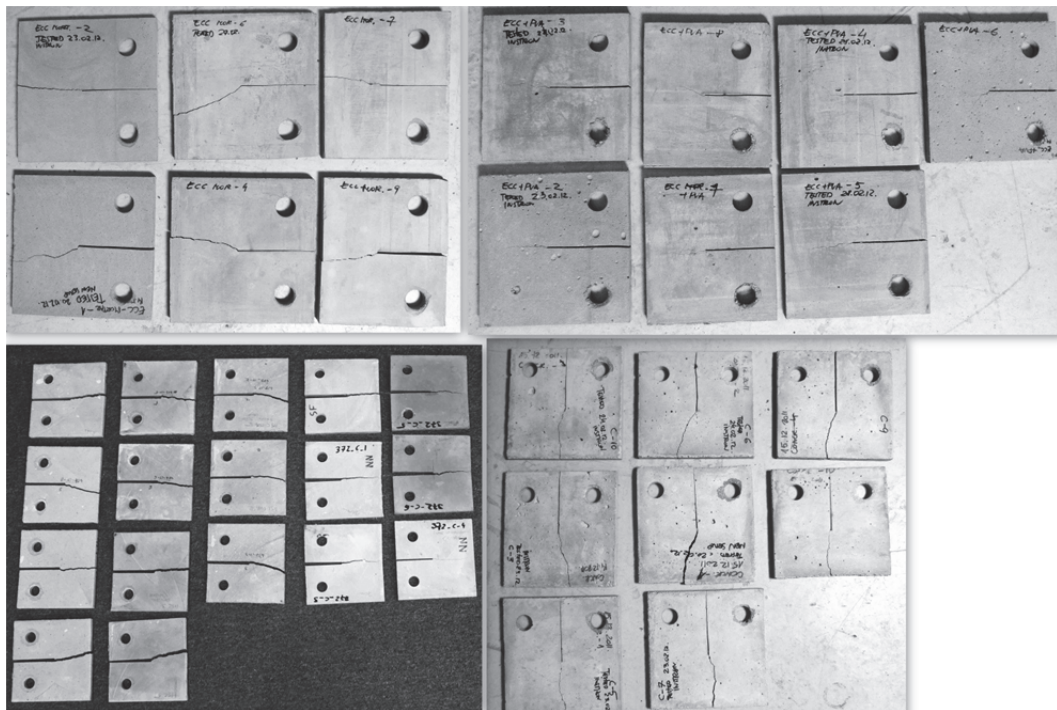
Attēlā 4.16. uzskatāmi parādīti paraugu atšķirīgie sabrukumi. Kā redzams, lai paraugs sabruktu prognozētajā vietā, iepriekš veiktajam iezāgējuma lielumam parauga vidusdaļā ir būtiska nozīme. Lai paraugs sabruktu paredzētajā šķērsriezuma laukumā ir jāveido pietiekami dziļi iezāgējumi (*notch*), vai iezāgējumu veidojot pa parauga šķērsriezuma perimetru (sk. att. 2.7.).

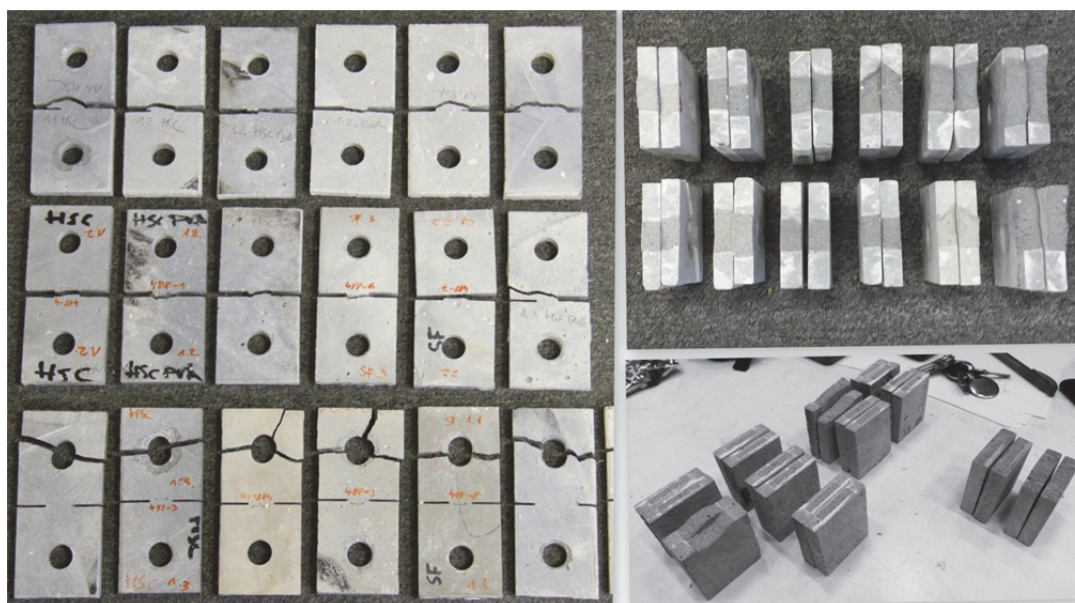
Lai kuponveida paraugi ar izmēriem 150 × 70 × 12 mm nesabruktu balstā, sk. att. 4.17., tad paredzamā sabrukuma šķērsriezuma izmērs, parauga vidusdaļā veidojams mazāks nekā attālumus no izurbtā cauruma malām līdz parauga ārējai malai, lai lielākais vājinājums būtu parauga vidusdaļā.

Eksperimentālās pārbaudes ar CT paraugiem ir stabilas, sk. att. 4.17., plaša vienmēr parādās iezāgējuma gala un attīstās līdz parauga ārējai malai.



4.16. att. Testa stabilitāte – dažādu iezāgējumu, dažādu paraugu vidusdaļas šķēsgriezuma ģeometriju atšķirīgie sabrukumi, nosakot stiepes stiprību un (DTU)





4.17. att. Stiepes stiprības noteikšanai izmantotie kuponveida un CT paraugi un uzskatāmā testu stabilitāte (RTU, DTU)

4.1.10. Stiepes stiprība un plaisu atvēruma lielums noteikts, izmantojot kuponveida paraugus

Stiepes slodzes lielums, kas noteikts dažādiem cementa kompozīta sastāviem ar CT paraugiem, atkārtotās pārbaudēs dod 6 % atšķirību, kas uzskatāma par nebūtisku. Cementa kompozīta sastāvu ar mikro- un nanopiedevu stiepes slodžu lielumi atšķiras par 3 % (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.9. un P2.10.).

MS PVA un NS PVA iegūto stiepes stiprību atšķirība ir ~14 %. Atkārtotās pārbaudēs iegūtās MS PVA sastāvu stiepes stiprības uzrāda 12 % atšķirību. MS PVA uzrāda par 10 % labāku stiprību nekā MS REF (sastāvs bez šķiedrām) (rezultātu grafisko attēlojumu sk. Pielikumu Nr. 2, att. P2.10.).

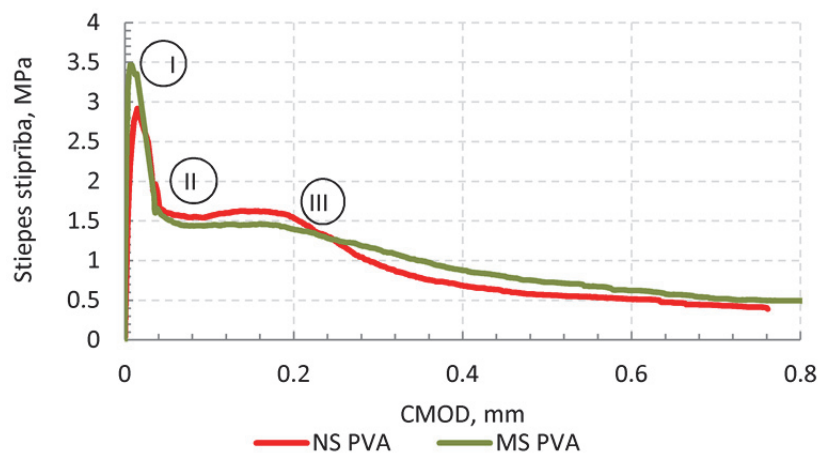
Attēlā 4.18. parādītas vidējās stiepes stiprības sevišķi augstas stiprības cementa kompozītam ar PVA šķiedru kokteili, ar un bez nanosilikas piedevas, kas noteiktas ar kuponveida formas paraugiem bez satvērējžokļiem paredzētajiem caurumiem paraugu galos. Paralēli tika noteikts plaisu atvēruma lielums (CMOD) iezāgējumu abās pusēs.

Kā redzams att. 4.18., tad MS PVA paraugi uzrāda par 14 % mazāku stiepes stiprību nekā NS PVA.

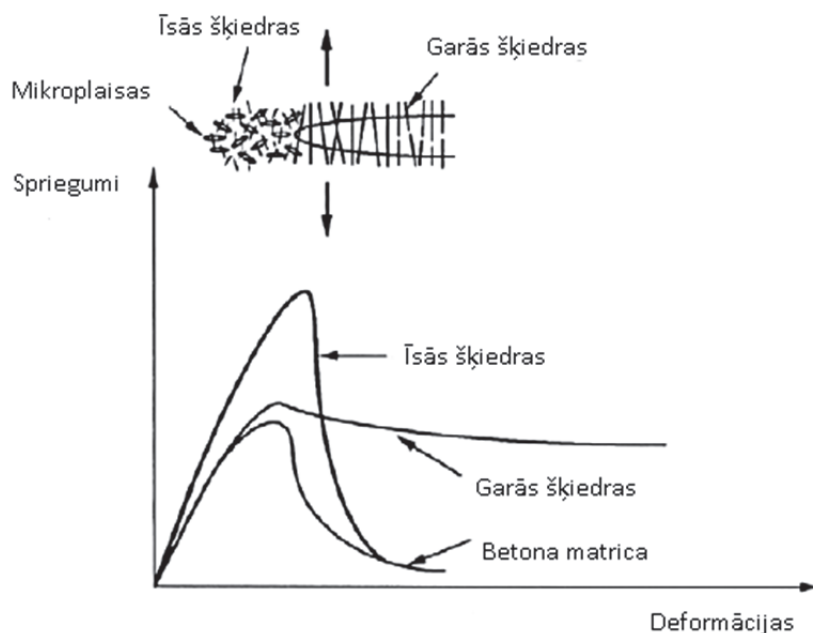
Šķiedru kokteilis prognozēti dod labāku šķiedrbetona darbību, jo īsākās šķiedras uzlabo garāko šķiedru darbību. Šāda veida materiāls, iepriekš minēto šķiedru darbības dēļ, ir arī mazāk trausls sk. att. 4.19.

Pēc līkņu rakstura (sk. att. 4.18.), var skaidri redzēt šķiedru kokteiļa darbību – posmā līdz “I” cementa kompozīts sasniedz savu stiepes stiprību. Posmā no “I” līdz “II” cementa kompozīta paraugos sāk pārplīst īsākās šķiedras un lēnām stiepjas garākās, punktā “II” īsās šķiedras ir pārrāvušās un cementa kompozīts ir zaudējis ~50 % no savas graužošās stiprības šajā posmā

notiek spriegumu izlīdzināšanās (*strain softening*). Posmā “II–III” darbojas tikai garākās šķiedras un stiprība par ~1 % pieaug un turpinot pieaugot plaisu atvērimumam. Punktā “III” arī garākās šķiedras zaudē savu stiprību, paraugs strauji sadalās – sabrūk.



4.18. att. Stiepes stiprības – plaisu atvēruma lieluma līknes MS PVA un NSPVA, noteiktas ar kuponveida formas paraugiem (CMOD noteikts ar digitālo pārvietošanu noteikšanas metodi)



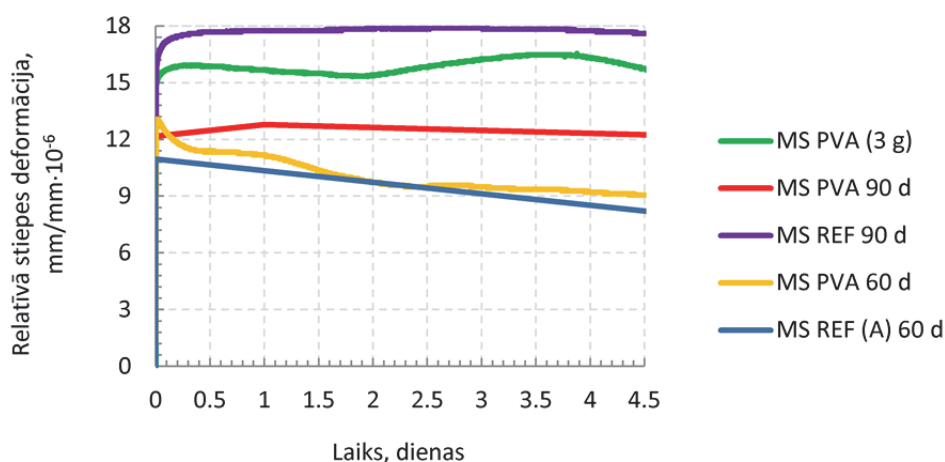
4.19. att. Dažāda garuma šķiedru ietekme uz cementa kompozīta plaisu attīstību (Betterman *et al.*, 1995)

4.1.11. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas stiepē

Attēlā 4.20. attēlotas kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas stiepē MS PVA un MS REF sastāviem. Cementa kompozītu vecums slogošanas brīdī ir 60, 90 dienas un 3 gadi. Sešdesmit dienu vecie paraugi ar apzīmējumu 60 d, pirms slogošanas gaisausos apstākļos ir žuvuši 2–3 dienas, bet 90 dienu, ar apzīmējumu 90 d, vecie paraugi pirms slogošanas gaisausos apstākļos ir žuvuši ~30 dienas. Testa laikā paraugi noslogoti ar ~25 % no graužošanās stiepes

slodzes. Ar papildus apzīmējumu 3 g apzīmēta vidējā deformācija no ~3 gadus vecajiem, tāda paša sastāva paraugiem.

Kā redzams, tad vienāda vecuma MS REF paraugi deformējas par ~23 % vairāk nekā – MS PVA, kas sakrīt ar vispārējo hipotēzi, ka šķiedras samazina stiepes deformāciju lielumu. Ja salīdzina vienāda sastāva, bet dažāda vecuma paraugus (MS PVA 90 d un MS PVA 3 g), tad redzams, ka vecākais paraugs šļūdē par 18 % vairāk. Tas varētu būt izskaidrojams ar to, ka šis paraugs ir pilnībā izžuvis un tajā vairs nenorīt rukuma deformācijas. Domājams, ka reālās šļūdes stiepes deformācijas paraugiem agrā un vecumā ir daudz lielākas, jo kā pierāda stiprības testi, tad parauga stiprība turpina augt arī pēc cementa kompozīta nosacītā standartvecuma (28 dienas) sasniegšanas.



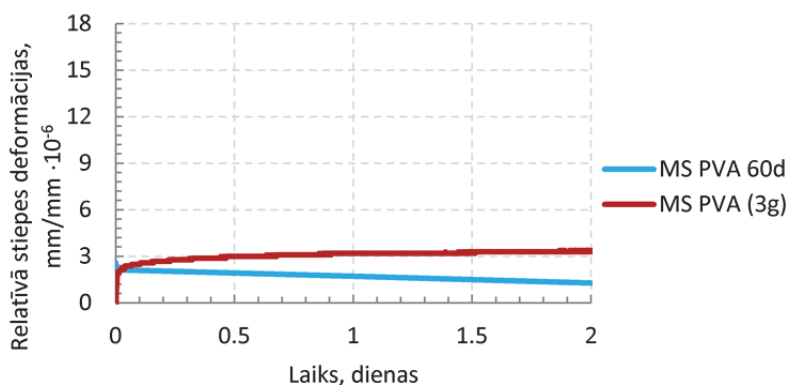
4.20. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līknes stiepē MS PVA un MS REF 3 gadus, 60 un 90 dienu veciem, vienāda sastāva paraugiem (apz. A – def. noteiktas ar Aistova tenzometru)

Attēlā 4.20. attēlotas arī kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas stiepē MS REF un MS PVA paraugiem. Paraugi, ar apzīmējumu 60 d, eksperimentāli pārbaudīti uzreiz pēc paraugu cietināšanas ūdenī, kad parauga mitrums ir liels un uzreiz notiek intensīva žūšanas un parauga rukšana. Paraugi, tāpat kā 30 dienas žuvušie paraugi, apzīmētie ar 90 d, tie tika noslogoti ar ~25 % no atbilstošā parauga graužošās stiepes slodzes. Kā redzams, tad sākotnēji (elastīgajā apgabalā) paraugi deformējas lineāri, atbilstoši klasiskajai cementa kompozīta spriegumu un deformāciju diagrammai, bet paraugus atstājot zem slodzes ilgstoši (5 dienas), deformācijas paraugos, kas apzīmēti ar 60 d, par ~7–30 % samazinās, kas ir izskaidrojams ar to, ka stiepes šļūdes deformācijas ir mazākas par rukuma deformācijām. Paraugam rūkot, tajā parādās pretējas zīmes deformācijas, tāpēc grafikos šīs līknes dilst. Iegūtie rezultāti pierāda, ka iekšējie spēki materiālā varbūt daudzkārt lielāki par ārējiem, jo neskatoties uz to, ka paraugs tika pakļauts ārējiem spriegumstāvoklim – stiepei, tas iekšējo spēku ietekmē saruka, radot paraugā spiedi.

Attēlā 4.20. ar papildus marķējumu A ir apzīmēts parauga vid. stiepes deformācija, kas noteikta ar Aistova tenzometru. Kā redzams, ar abām mērierīcēm ir iegūta pietiekoši laba mērījumu sakritība, lietojot Aistova tenzometru deformāciju palielinājumu nolasījumus nevar

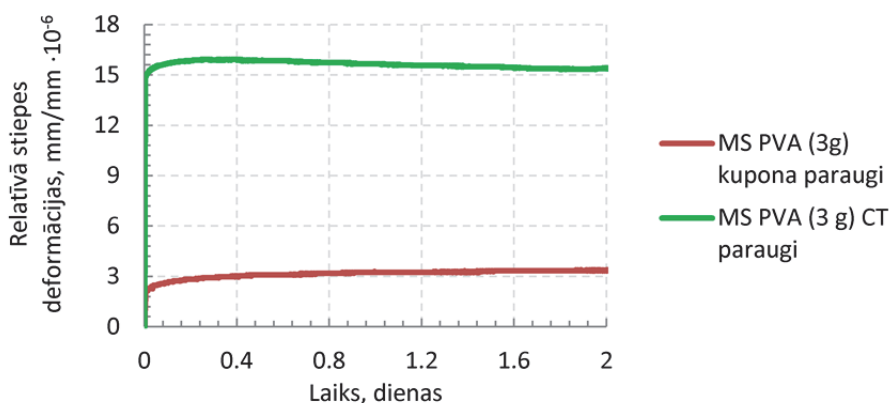
iegūt īsos laika periodos, jo Aistova tenzometra precizitāte nav pietiekoša, to var redzēt pēc iegūto līkņu formas. Aistova tenzometri nav piemēroti vēl mazāku deformāciju mērīšanai.

Attēlā 4.21. parādīta kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju un laika līknes stiepē, kas noteiktas ar kuponveida formas paraugiem. Kā redzams att. 4.21., tad paraugi, kas pirms eksperimentālās pārbaudes nav atstāti žūšanai, uzrāda pretēju līkņu raksturu, jo tās papildus ietver arī žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas. Stiepes, šļūdes deformācijas, kas iegūtas, izmantojot kuponveida paraugus, rāda objektīvu deformāciju lielumu nekā ar CT paraugiem, kuru tālāk var izmantot inženieraprēķinos.



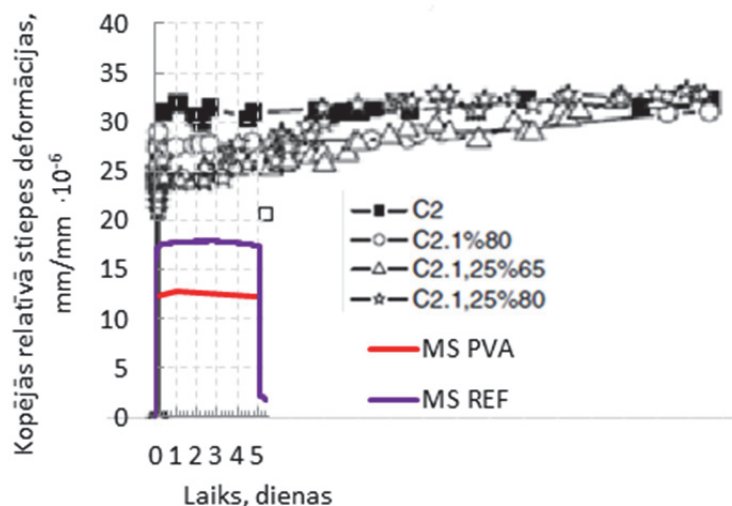
4.21. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līknes stiepē noteiktas MS PVA kuponveida paraugiem, paraugu vecums 60 dienas un 3 gadi

Attēlā 4.22. salīdzinātas kopīgo, relatīvo, vienasīgo deformāciju un laika līknes, kas iegūtas, slogojot CT un kuponveida formas paraugus, kas pirms slogošanas žuvuši 30 dienas. Kā redzams, tad līkņu raksturs ir līdzīgs un iegūtās stiepes deformācijas pēc 2 dienu slogojuma ir 5x lielākas nekā ar kuponveida paraugiem.

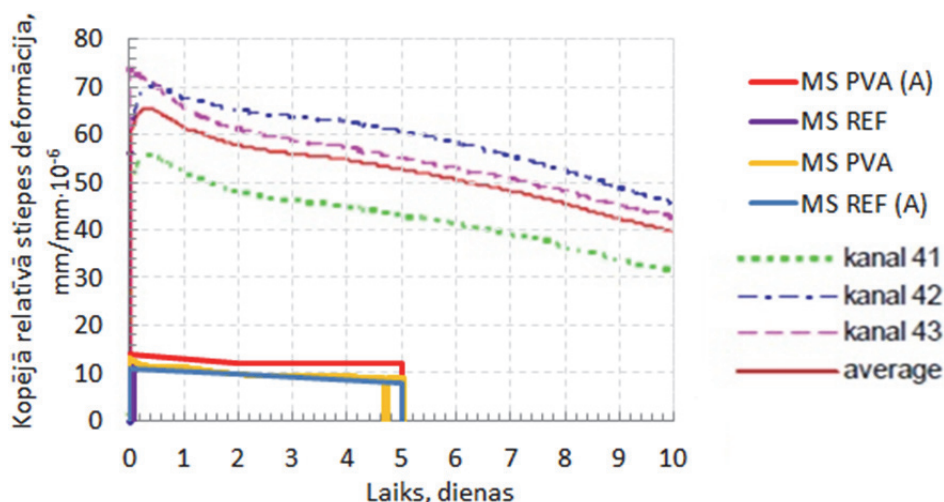


4.22. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līknes noteiktas MS PVA kuponveida un CT paraugiem (paraugu vecums 3 gadi)

Apskatot citu autoru iegūtos rezultātus šķiedrbetonam ar tērauda fibrām, novērojami līdzīgas rezultātu sakarības (sk. att. 4.23. un 4.24.).



4.23. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu stiprē salīdzinājums cementa kompozītam ar tērauda šķiedrām, 28 dienu vecumā (Marangon *et al.*, 2012) un MS REF un MS PVA 90 dienu vecumā, stiprē deformācijas noteiktas pēc dažādām metodikām



4.24. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju – laika līkņu stiprē salīdzinājums cementa kompozītam ļoti agrā vecumā – 2 dienas (Guomin J., 2008) un MS REF un MS PVA, 60 dienu vecumā, deformācijas noteiktas pēc dažādām metodikām

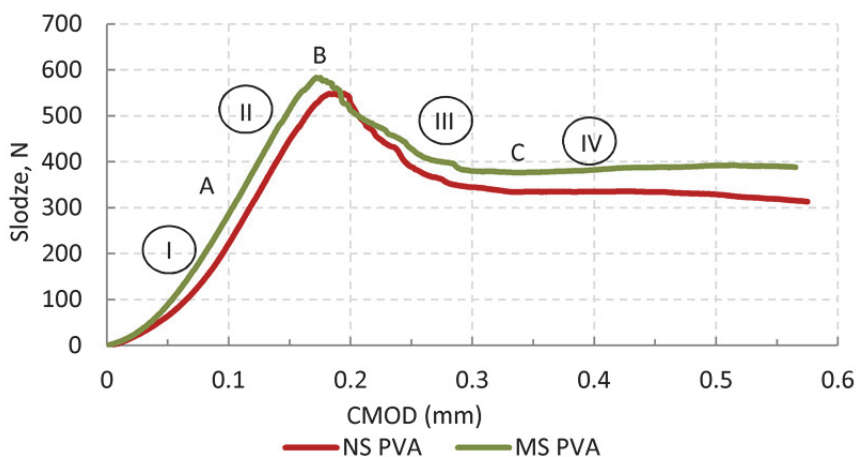
4.1.12. Stiprē slodzes un plaisu atvēruma lielums, noteikts, izmantojot koncentrētas stiprē (CT) paraugus

Attēlā 4.25. redzama stiprē slodzes un plaisu atvēruma lieluma līknes MS PVA un NS PVA sastāviem, izmantojot CT paraugus. Eksperimenti veikti uz daudzfunkcionālās iekārtas “Instron”. PVA šķiedru (MC 40/8 un MC 200/12) kokteilis parāda atšķirīgu sevišķi augstas stiprēbas cementa kompozīta darbību. Īsāko šķiedru galvenais uzdevums ir kontrolēt plaisas attvērumu un mazo plaisu attīstību, kamēr garākās šķiedras kontrolē lielās plaisas un veido tiltu starp diviem plaisu malām (Wang *et al.*, 1987; Brandt, 2008; Sun *et al.*, 2000; Toutanji *et al.*, 2010 u.c.).

Attēlā 4.19. uzskatāmi parādīta īso un garo šķiedru darbība.

Eksperimentāli iegūtajās MS PVA un NS PVA līknēs (sk. att. 4.25.) var identificēt vairākus plaisu attīstības posmus: pirmais posms no punkta 0 līdz A (t.i. no 0 līdz ~60–80 % no graužošanas slodzes), kas atbilst līknes elastīgās daļas augošajam posmam, tas ir posms, kur vēl nav parādījusies galvenā plaisa. Otrais posms no A līdz B (t.i. no ~60–80 % no graužošanas slodzes līdz graužošanai slodzei), kas atbilst līknes posmam, kurā parādās un stabilizējas galvenā plaisa līdz materiāls sasniedz tā graužošanas vērtību. Punktā B ir nolasāms graužošanas slodzes lielums. Trešais posms no B līdz C (t.i. no graužošanas slodzes līdz ~60 % no graužošanas slodzes), kas atbilst posmam, kur sākas deformācijas pieaug un plaisas sāk atvērties (*strain softening*) un kur slodzes – spriegumu līkne raksturs atkal ir gandrīz lineārs. Pēdējā – ceturtajā posmā (no punkta C līdz līknes beigām) jeb nelineārajā daļā, kur viens vai abi materiāli ir to nelineārajā posmā un plaisas platums turpina pieaugt līdz pilnīgam sabrukumam (Naaman, 1996).

Iegūtie eksperimentālie rezultāti (sk. att. 4.25.) ir ļoti līdzīgi. NS PVA sasniegtā graužošanas slodze ir par ~8 % mazāka un 0,5 mm plaisu atvērums tas sasniedz pie par 15 % zemākas slodzes nekā MS PVA. Vidējā graužošanas stiepes slodze MS PVA ir 590 N, bet NS PVA – 560 N.

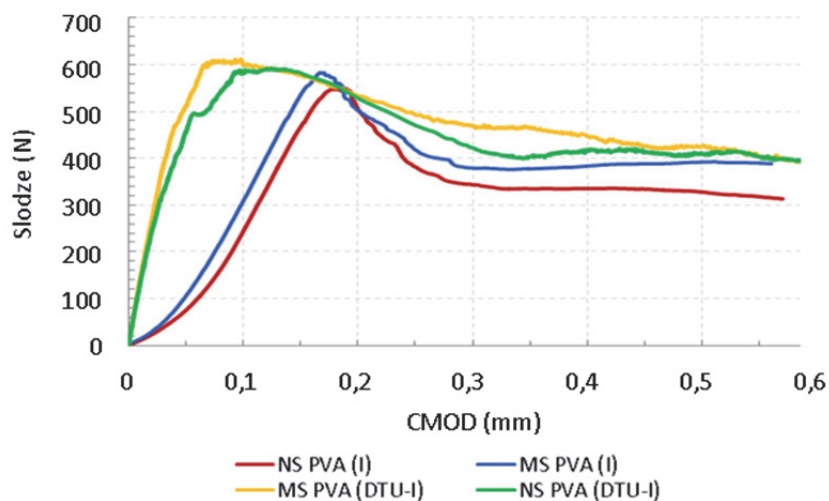


4.25. att. Slodzes – plaisu atvēruma lieluma līknes MS PVA un NS PVA, noteiktas, izmantojot CT formas paraugus

Attēlā 4.26. attēlotas NS PVA un MS PVA vidējotās stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma vērtības, kas noteiktas uz CT paraugiem, kas iegūti uz jaunizveidotā stiepes stenda (izgatavots Dānijas Tehniskajā universitātē (DTU – I)) un salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem, kas tika iegūti uz universālās testēšanas iekārtas – „Instron” (I).

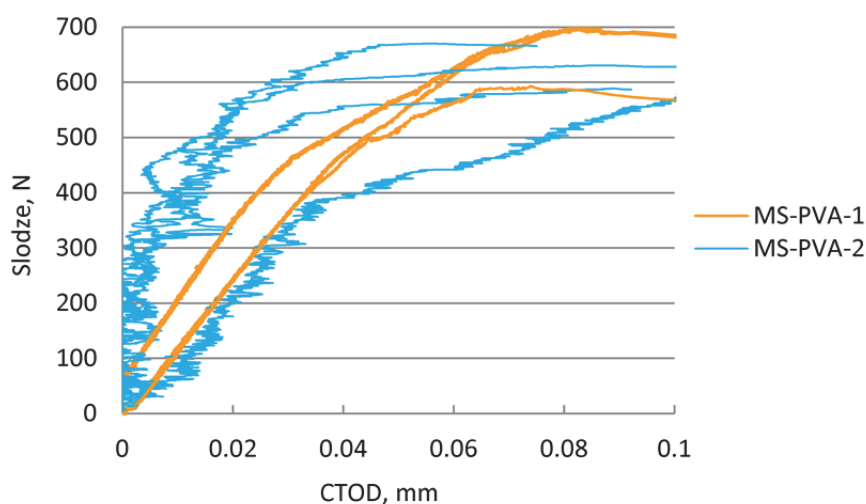
Kā redzams, tad iegūtās stiepes slodzes ir 4–8 % atšķirību, kas uzskatāma par nebūtisku. Bet, apskatot līkņu raksturus, redzams, ka to atšķirība ir būtiska. Tā izskaidrojama ar universālās iekārtas sākotnējo tukšgaitu. Eksperimentālie dati, kas iegūti uz DTU jaunizveidotā stenda slodzes – plaisu atvēruma lieluma līkņu raksturs ir precīzāks un tuvāk atbilst cementa kompozīta stiepes stiprības un deformāciju diagrammu līkņu raksturam un sakrīt arī ar citu autoru eksperimentiem (Wang *et al.*, 1987). Tāpat iegūtie dati uz „DTU –I” uzrāda labu sakrītību ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metodes datiem (sk. att. 4.27. un 4.28.). Līdz ar to jāsecina, ka uz jaunizveidotais stends ir atbilstošāks mazu izmēru paraugiem

(150 × 150 × 12 mm) un deformāciju jutīgu, augstas stiprības cementa kompozītiem stiprību un deformatīvo parametru noteikšanai.



4.26. att. Stiepes stiprības – plaisu atvēruma lieluma līknes MS PVA un NS PVA cementa kompozītu paraugiem, iegūtas ar divām dažādām, eksperimentālām metodēm, noteiktas ar CT formas paraugiem (apz. „DTU-I” – DTU jaunizveidotais stends, „I” – universālā testēšanas iekārta „Instron”)

Attēlā 4.27. ir parādīts vienāda cementa kompozīta sastāva (MS PVA), bet divu plaisu noteikšanas metodiku ar „Instron” deformāciju mērītāju (apz. – 1) un digitālo attēlu pārvietojuma noteikšanas metodes „Imetrum” (apz. – 2) rezultātu salīdzinājums. Ar „Instron” deformāciju mērītāju pārvietojumi noteikti iezāgējuma (*notch*) galā – CMOD un pārrēķināti uz plaisas galu – CTOD, eksperiments veikts uz DTU jaunizveidotā stenda. Ar digitālā attēlu pārvietojuma metodes „Imetrum” palīdzību pārvietojumi noteikti uzreiz plaisas galā – CTOD, un eksperiments veikts uz universitātes iekārtas “Instron” (RTU).

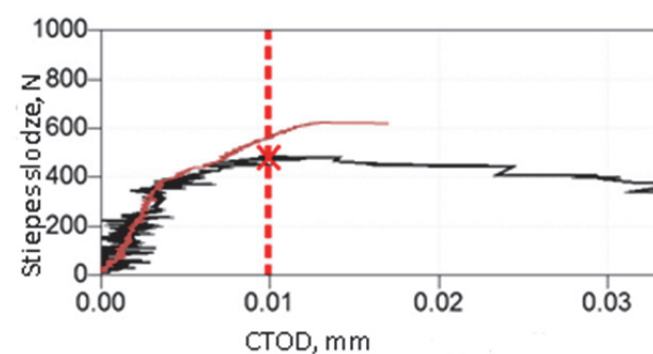


4.27 att. Divu pārvietojumu iegūšanas metožu stiepes spēka un pārvietojumu līkņu salīdzinājums paraugiem ar mikrosilīku un PVA šķiedrām (apz. 1 – „Instron” deformāciju mērītāju; 2 – „Imetrum” digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metodi)

Kā redzams, iegūto līkņu raksturi ir līdzīgi un sasniegto gala vērtību atšķirība ir 6–17 %. Digitālo attēlu pārvietošanu metode "Imetrum" rezultātu līknes apraksta precīzāk, reģistrējot detalizētākas pārvietošanu vērtības.

Attēlā 4.28. ir parādīta vienāda cementa kompozīta sastāva, bet divu digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas metodiku salīdzinājums. Ar „Imetrum” metodiku noteiktie pārvietošanu ir parādīti ar sarkano līniju, bet ar melno līniju „GOM Aramis” noteiktie pārvietošanu.

Kā redzams, tad abas metodes cementa kompozīta stiepes radītos pārvietošanu apraksta vienlīdz detalizēti un precīzi. Tā kā salīdzināti vienāda sastāva divi paraugi, tad parādās neliela ~12 % stiprības atšķirība.



4.28 att. Dažādu digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas metožu (GOM „Aramis” un „Imetrum”) iegūtās stiepes stiprības un pārvietošanu līkņu salīdzinājums, paraugiem ar mikrosilīku un PVA šķiedru kokteili

4.1.13. Spriegumu intensitātes faktors, spriegumu sadalījums plaisas galā

Izmantojot eksperimentāli iegūtos datus, augstas stiprības cementa kompozītiem NS PVA/ MS PVA analītiski noteikti šādi plaisu veidošanās parametri:

Materiāla lūzuma izturība $K_{IC} - 33.53/ 27.25 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$;

Spriegumi plaisas gala $\sigma_c - 2.39/ 1.94 \text{ MPa}$;

Energijas izdalīšanās ātrums $G_c - 22.4/ 15.47 \text{ N/ m}$;

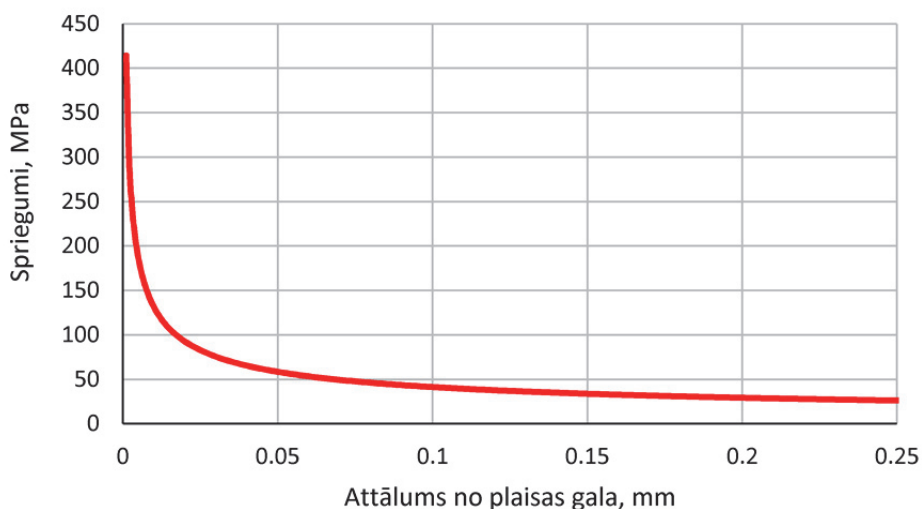
Īpatnējā virsmas enerģija $\gamma_s - 9.72/ 6.15 \text{ N/ m}$;

Plaisas gala galējā lūzuma enerģija $\epsilon_u - 6.8/ 4.4 \mu\text{m}$.

Neskatoties uz to, ka NS PVA uzrāda par 4–6% mazāku spiedes stiprības pieaugumu nekā MS PVA, citi pētījumi apliecina, ka nanosilīkas klātbūtne uzlabo plaisu attīstības īpašības. Iegūtās cementa kompozītu stiepes stiprības, kas noteiktas ar kuponveida paraugiem, parādīja, ka NS PVA lūzuma izturība ir par 18,7% augstāka un kritiskā enerģija ir par 36,6% augstāka, līdz ar to apliecinot, ka šādi cementa kompozīti (15-24 N/m) ir trauslāki stiepes sloģojumā un tiem ir lielāka plaisu iespējamība salīdzinājumā ar normālu betonu (35-70 N/m). Kritiskā enerģija ir enerģija, kas nepieciešama, lai izveidotu jaunu plaisas laukuma daļu. Plaisas galā, pirms plaisas progresēšanas, rodas spriegumi, kas pēc teorētiskā aprēķina ir bezgalīgi, bet ņemot vērā FPZ

darbību un tās garumu spriegumi, veidojoties mikroplaisām, tiek pakāpeniski uzņemti un izlīdzināti. Spriegumi plaisas galā NS PVA paraugiem ir par 29.2% lielāki nekā MS PVA.

Iegūto spriegumu sadalījums plaisas galā dots attēlā 4.29. Spriegumu vērtība ir skaidrojama ar FPZ esamību, kurā pateicoties mikroplaisu zonai notiek stiepes spriegumu izlīdzināšanās (*tensile softening*) (Pereira, 2012).



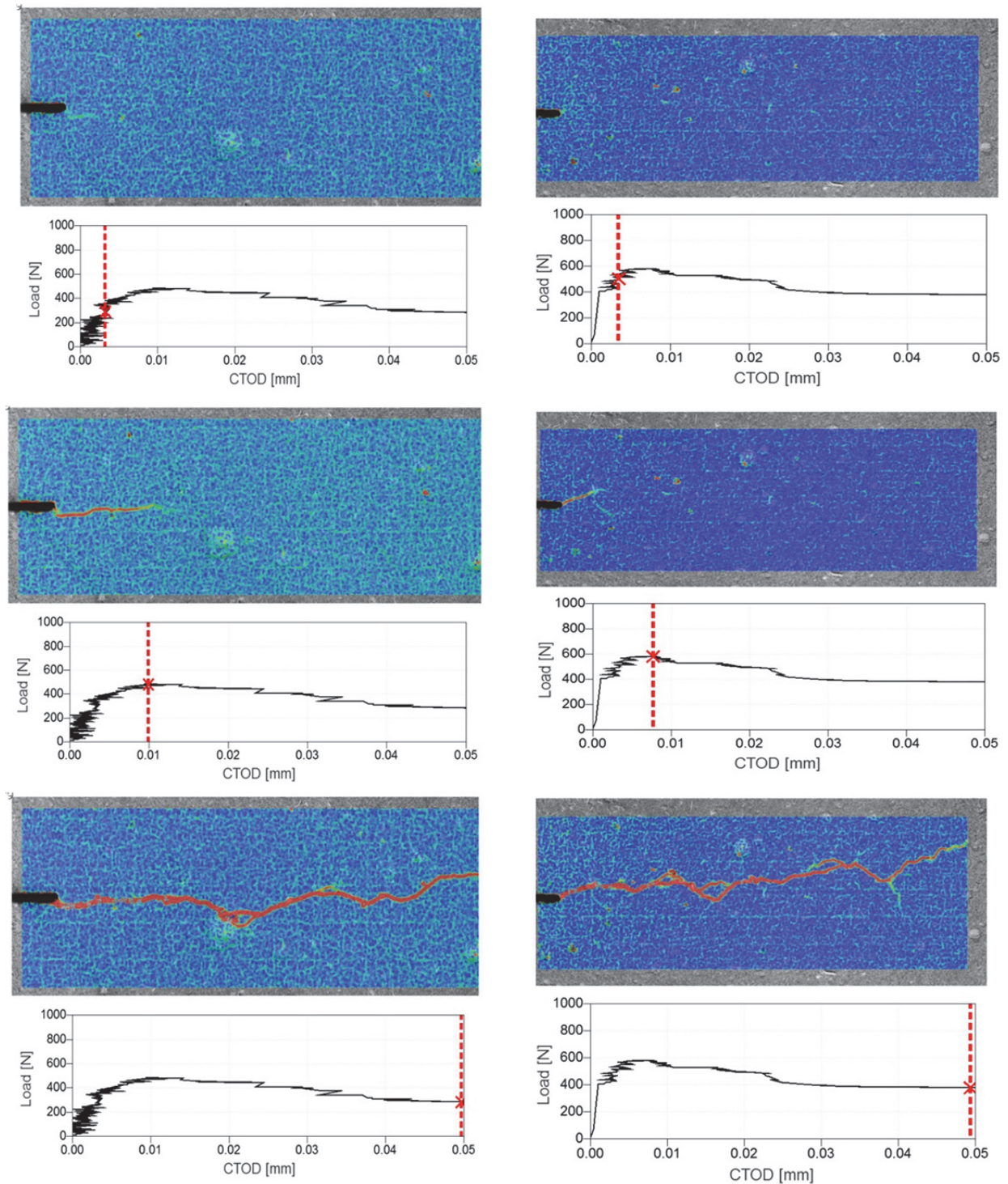
4.29. att. Spriegumu sadalījums plaisas galā, kas veidojoties mikroplaisām, tiek pakāpeniski uzņemti un izlīdzināti (paraugiem ar nanosiliku un PVA šķiedru kokteili)

4.1.14. Plaisu sākšanās, attīstība un tālākas izplatības raksturs

Plaisu sākšanās, attīstības novērošanu un tālākās izplatības raksturu ērti veikt, lietojot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metodi, kas ietver datorprogrammu “GOM Aramis” izmantošanu. Ar datorprogrammas GOM „Aramis” iepriekš uzņemto un apstrādāto fotoattēlu palīdzību var fiksēt plaisas attīstību ar 1 sekundes intervālu, tas nozīmē, ka iegūstami plaši un detalizēti plaisu sākšanās un attīstības dati. Att. 4.30. apkopoti raksturīgie plaisu attīstības punkti – plaisas sākšanās, kritiskā sprieguma sasniegšana un plaisas atvēršanās, kā arī plaisas atvēruma palielināšanās dažādos slogojuma brīžos diviem cementa kompozītiem (MS PVA un NS PVA).

Cementa kompozīta mikroplaisas parādās, kad cementa kompozīts sasniedzis ~10–20 % no graužošās stiprības. Pieaugot spriegumiem, mikroplaisas palielinās, apvienojas un sasniedzot materiāla specifisko kritisko vērtību K_{IC} (spriegumu intensitātes faktors) ~60–80 % no graužošās stiprības sākas galvenās plaisas veidošanās (sk. att. 4.30. abu sastāvu pirmo attēlu). Slogojuma posmā starp pirmo un otro attēlu ir plaisas veidošanās un stabilizēšanās. Otrajā attēlā redzams brīdis, kad spriegumi plaisas galā ir sasnieguši savu kritisko vērtību, t.i. materiāls ir sasniedzis savu graužošo stiprību stiepē, un plaisa sāk atvērties. Cementa kompozītam, sasniedzot savu graužošo stiprību, plaisas atvēruma lielums ir ~ līdz 0,005 mm. Trešajā attēlā redzama pilnībā izveidojusies un atvērusies plaisa, kā arī materiāla sabrukums un stiprības samazinājums.

a) cementa kompozīts ar mikrosilīku b) cementa kompozīts ar mikro- un nanosilīku

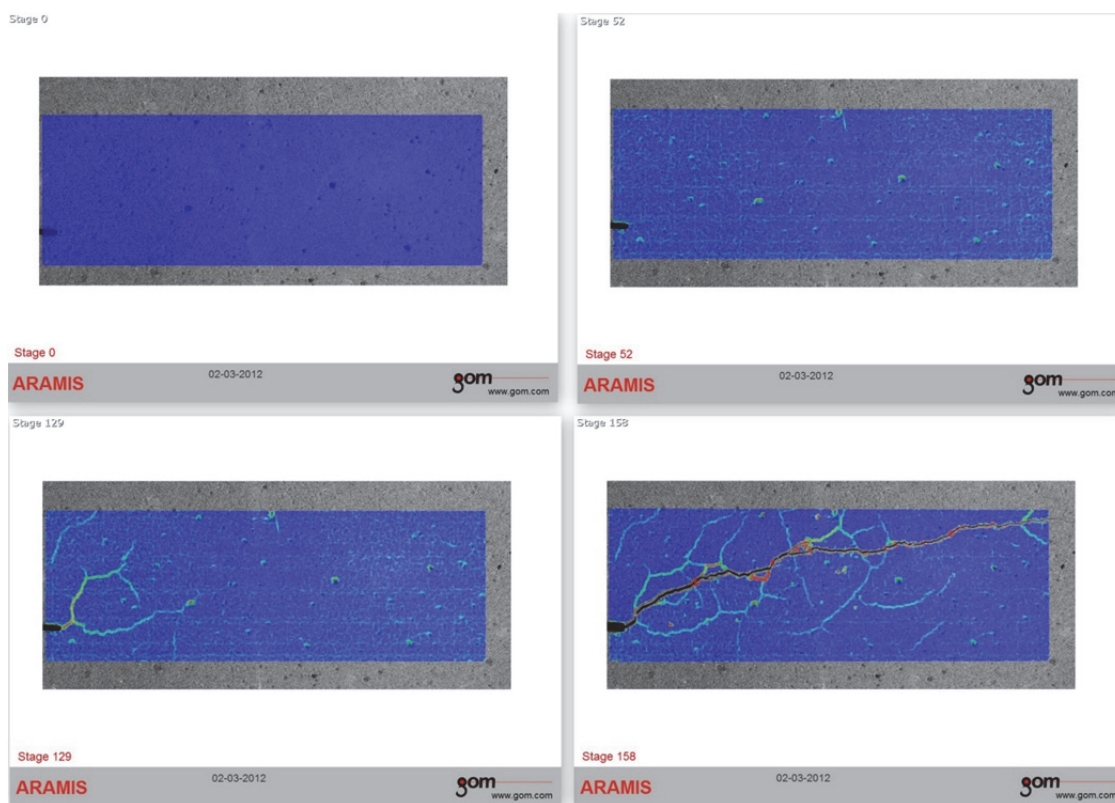


4.30. att. Plaisu attīstība MS PVA (a) un NS PVA (b) paraugiem dažādos slodzes etapos, iegūta no datorprogrammas GOM „Aramis”; (Load – slodze; CTOD– plaisas gala atvērums)

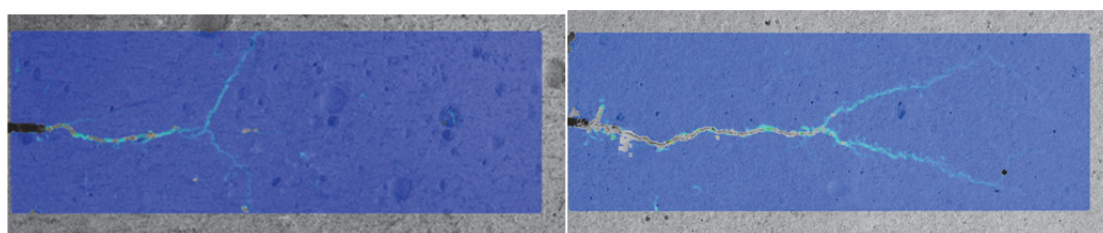
Attēlā 4.31. ir redzama ECC (a) matricas un ECC PVA (b) paraugu daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*), kas novērota izmantojot digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas metodi – sistēmu GOM „Aramis”. ECC materiāliem ir raksturīga daudz plaisu veidošanās, kas atspoguļojas kā galvenās plaisas un plaisu zaru augšana un attīstība. Attēlā 4.31. ir atspoguļota ECC matricas saplaisāšana visos raksturīgajos plaisu posmos – bez slodzes; stiepes slodzei pieaugot parādās mikroplaisas, nākošajā posmā mikroplaisām apvienojoties izveidojas galvenā plaisa un pēdējā posmā materiāls ir sasniedzis savu graujošo stiprību un plaisa strauji iziet cauri visam paraugam un sāk atvērties.

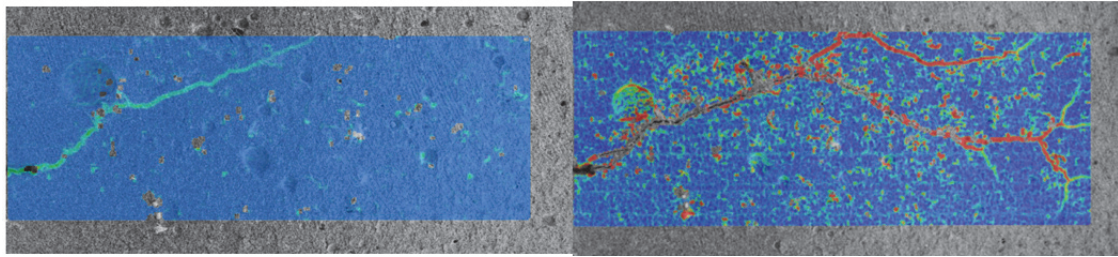
Attēlā (b), kurā attēlots ECC PVA, redzams līdzīgs plaisu raksturs, bet tāpat redzams, ka šķiedru piejaukšana ir piesaistījusi vairāk gaisu un cementa kompozīta paraugs ir daudz neviendabīgāks. Attēlā skaidri redzamas, daudz sīkas poras. Attēlā (c) parādīts parastas stiprības betona plaisāšana ar raksturīgo, vienu galveno plaisu.

a) ECC matrica

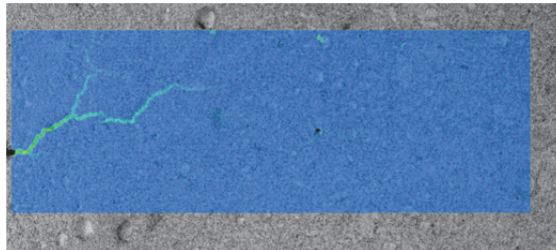


b) ECC + PVA šķiedras





c) Parastas stiprības cementa kompozīta matrica



4.31. att. ECC matricas (a), ECC PVA (b) un parastas stiprības cementa kompozīta matricas (c) stiepes paraugu skaidri redzamā daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*), kas novērota izmantojot digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas metodi – sistēmu „GOM Aramis”

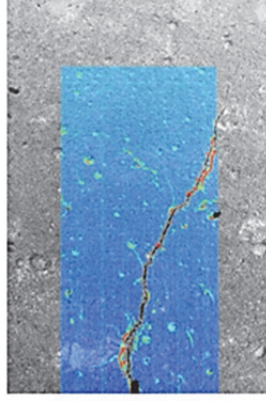
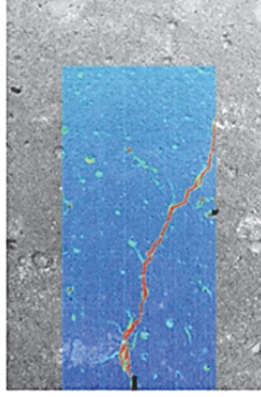
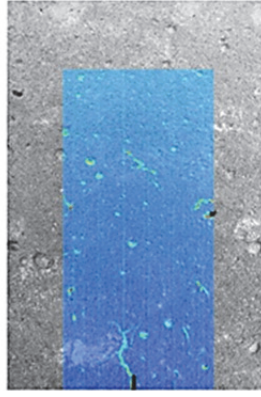
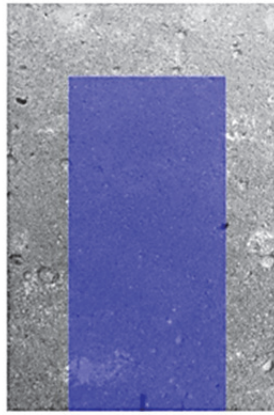
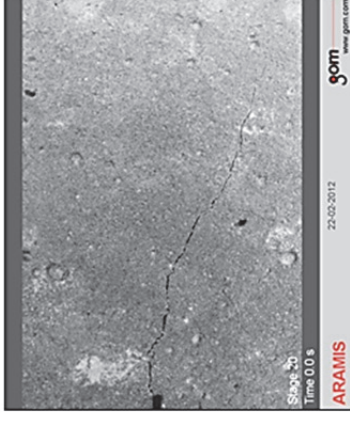
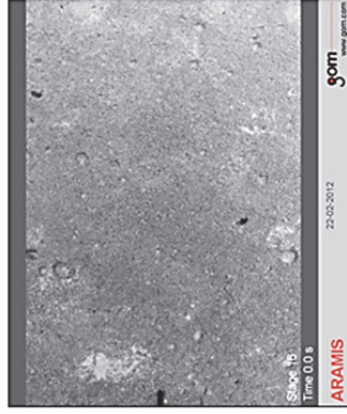
Attēlā 4.32. ir attēlota cementa kompozīta plaisas un mikroplaisu redzamība ar un bez fotoattēlu apstrādes. Kā redzams, tad ar cilvēka aci plaisa saskatāma tikai pie plaisu atvēruma $\sim 0,02$ mm, kad cementa kompozīts jau ir sasniedzis robežstiprību un plaisa jau ir atvērusies (sk. att. 4.32. pirmās rindas pēdējo attēlu). Attēlā 4.32. otrajā rindā parādīta plaisu un mikroplaisu redzamība, iegūtos fotoattēlus apstrādājot datorprogrammā GOM „Aramis”. Kā redzams, tad mikroplaisas un galvenā plaisa sākās, attīstās un stabilizējas ilgi pirms cementa kompozīts sasniedz graužošo stiprību.

Attēlā 4.33. attēlotas ar makro objektīvu redzamās plaisas, kā mēroga objekts plaisu lieluma parādīšanai, izmantots milimetru papīrs.

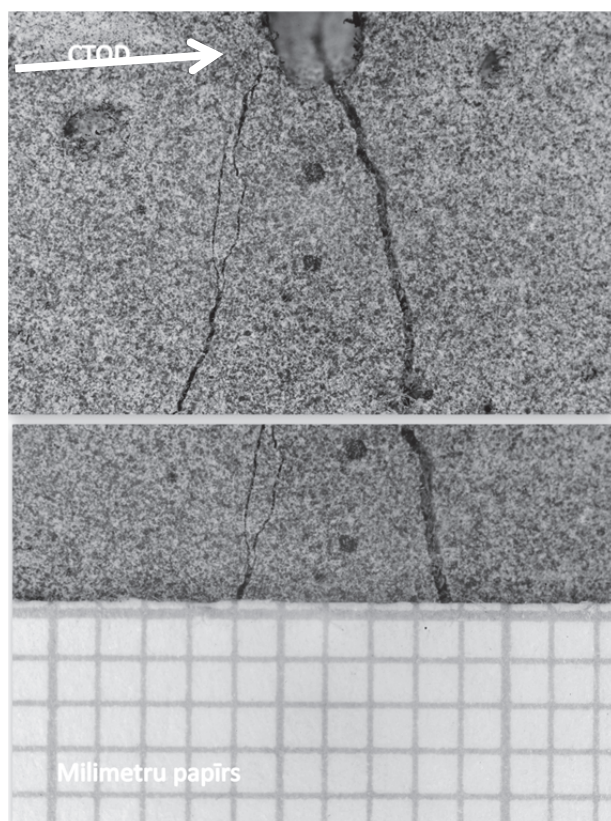
Plaisu raksturs, kas veidojies stiepes slogojuma laikā, parādīts att. 4.33., 4.34. un 4.35. att. Kā redzams visos attēlos plaisas sākas prognozētajā vietā – iezāgējuma (*notch*) galā un izplatās virzienā un parauga ārmalu, pa iespējams īsāko ceļu.

Apskatot dažādu cementa kompozītu plaisu testu eksperimentālos rezultātus, redzams, ka visiem parastas un augstas stiprības cementa kompozītiem ar un bez šķiedrām raksturīga viena galvenā plaisa, sk. 4.34., bet tikai cementa inženierkompozītam ar PVA šķiedrām (ECC PVA) ir raksturīga daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*), sk. att. 4.34.

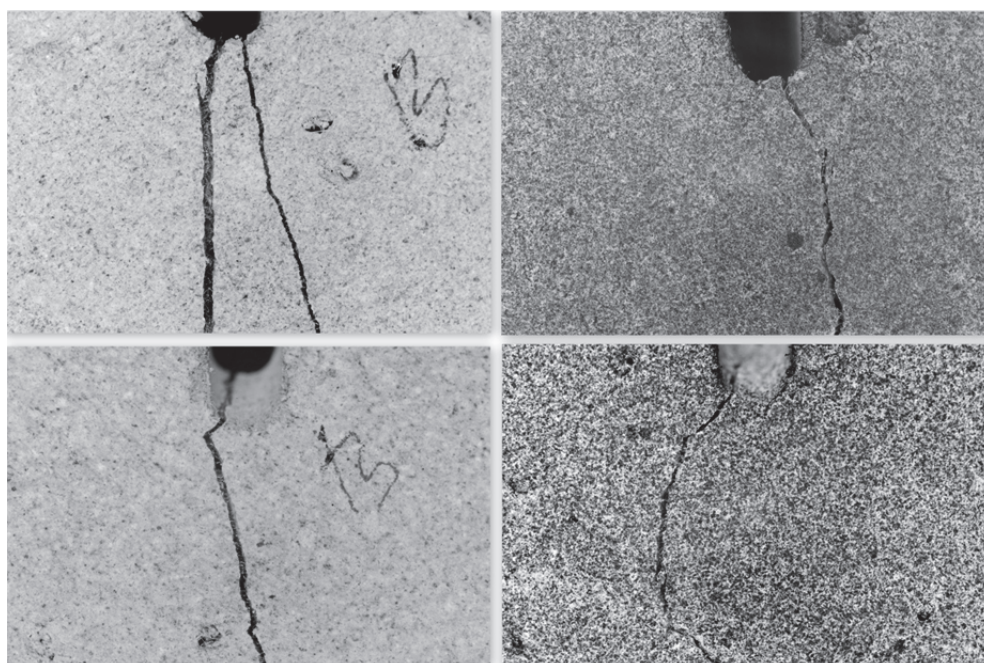
Eksperimentālie testi rāda, ka plaisām, galvenokārt, ir taisns raksturs, mainot savu formu tikai saskaroties ar kādu paraugā esošo, iekšējo pildvielu. Poras un tukšumi uzskatāmi, kā cementa kompozīta vājinājumi, bet kā redzams att. 4.33., 4.34. un 4.35. plaisas ne vienmēr izplatās tukšumu un poru – vājinājumu vietās.



4.32. att. MS PVA paraugu stiepes slogojuma laikā radušās plaisas un mikroplaisu redzamība ar cilvēka aci un ar fotoattēlu apstrādes datorprogrammu „GOM Aramis”



4.33. att. Ar makro objektīvu veiktie plaisu pētījumi (DTU)

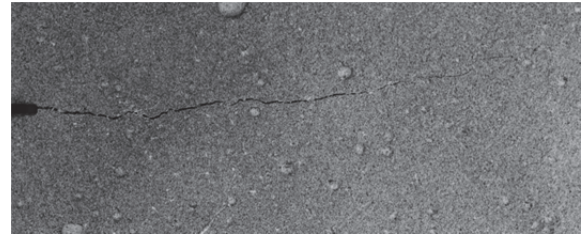
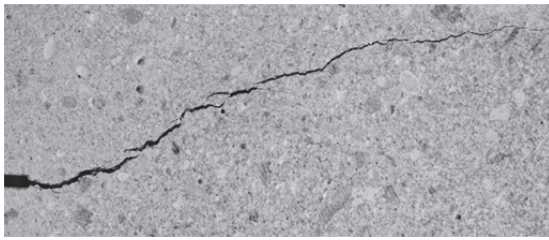


4.34. att. Ar makro objektīvu veiktie plaisu atvēruma un rakstura pētījumi dažādu veidu šķiedrbetoniem (DTU)

Atšķirīgie plaisu raksturi

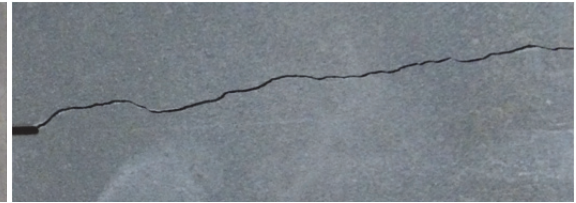
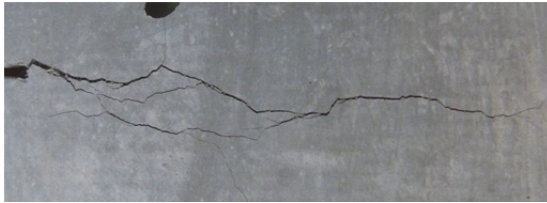
Parastas stiprības betons

MS PVA



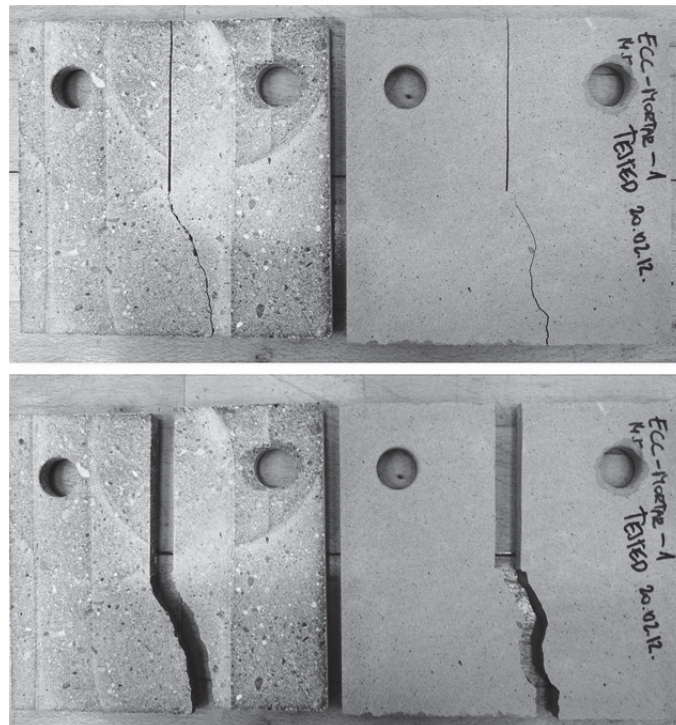
ECC PVA

ECC



4.35. att. Dažādu cementa kompozītu atšķirīgie plaisu raksturi (DTU)

Attēlā 4.36. redzama dažādu cementa kompozītu bez šķiedrām līdzīgs sabrukums un plaisu raksturs, kas ir vērts 30° leņķī no iezāgējuma.



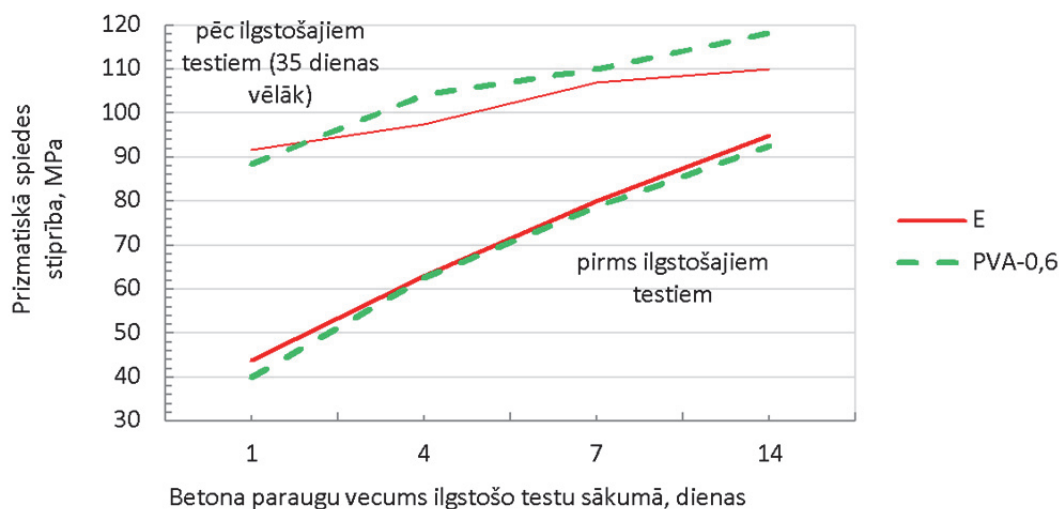
4.36. att. CT paraugu sabrukums cementa kompozītiem bez šķiedrām (DTU)

4.2. Ilglaicīgo testu rezultāti un to analīze cementa kompozīta agrā vecumā

4.2.1. Spiedes stiprība

Augstais cementa saturs cementa kompozītā un zemā ūdens–cementa attiecība nodrošina strauju cementa kompozīta cietēšanu ar augstiem stiprības rādītājiem pat agrā

cementa kompozīta vecumā. Visi cementa kompozīta paraugu spiedes stiprības rezultāti 1, 4, 7 un 14 dienu vecumā ir doti att. 4.37.



4.37. att. Spiedes stiprība dažādos cementa kompozīta vecumos, cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām, pirms un pēc ilgstošajiem testiem

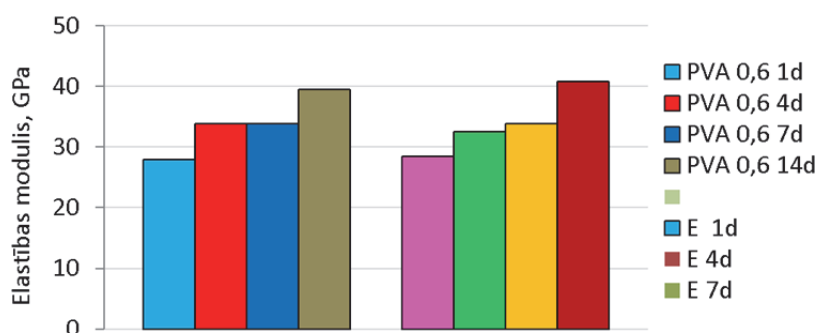
Kā redzams attēlā, augsti spiedes stiprības rādītāji sasniegti jau pēc 24 stundu cietēšanas – 40–45 MPa. Arī pēc turpmākās cietēšanas ir novērojams ievērojams spiedes stiprības pieaugums. Pēc 1 dienas un 14 dienu cietēšanas nedaudz augstāku spiedes stiprību (7% un 2%) uzrādīja references sastāvs (E) (bez šķiedrām), kas varētu būt izskaidrojams ar vienmērīgāku cementa kompozīta struktūru, jo cementa kompozītu iemaisot šķiedras tiek piesaistīts vairāk gaiss līdz ar to cementa kompozītu sastāvi kļūst poraināki un nav iespējams cementa kompozīta sastāvu iegūt tik vienmērīgu kā bez šķiedrām. Spiedes stiprība pēc 24 stundu cietēšanas ir robežās no 40–44 MPa, pēc 4 dienu cietēšanas – 63 MPa, pēc 7 dienu cietēšanas – 80 MPa, pēc 14 dienu cietēšanas spiedes stiprība ir robežās no 93–95 MPa.

Iegūtie spiedes stiprības rezultāti tālāk tika izmantoti, lai noteiktu nepieciešamo slodzes līmeni šļūdes deformāciju noteikšanas pārbaudžu veikšanai.

Spiedes stiprība tika noteikta arī pēc ilglaicīgajām pārbaudēm (35 dienas pēc šļūdes testu sākuma). Lielākais spiedes stiprības pieaugums tika novērots paraugiem, kuri tika slogoti pēc 1 dienas cietēšanas. Spiedes stiprība (pēc šļūdes testiem) ir robežās no 89–92 MPa. Cementa kompozīta paraugi, kuri normālas cietēšanas apstākļos cietējuši ilgāku laiku (pēc šļūdes testiem) uzrādīja augstāku spiedes stiprību, bet stiprības lieluma pieauguma sakarība kļuvusi mazāka. Spiedes stiprība pēc šļūdes deformāciju noteikšanas pārbaudēm 4 dienu cietējušam cementa kompozītam bija robežās no 98–104 MPa, 7 dienu no 107–110 MPa un 14 dienu cietējušiem paraugiem no 110–118,1 MPa. Augstāko spiedes stiprību uzrādīja cementa kompozīts ar PVA šķiedrām (0,6 % apmērā) ir 118 MPa, bet references sastāva augstākā noteiktā spiedes stiprība ir 110 MPa.

4.2.2 Elastības modulis spiedē

Cementa kompozīta paraugi šļūdes deformāciju pārbaužu sākumā tika slogoti pakāpeniski līdz iepriekš noteiktam slodzes līmenim. Cementa kompozīta slogošanas procesā tika noteiktas elastīgās deformācijas no kurām noteikts cementa kompozīta elastības modulis. Kā redzams att. 4.38., cementa kompozīta elastības modulis līdz ar cementa kompozīta cietēšanas laiku un stiprības pieaugumu pieaug par 30 %. Elastības moduļa lielums cementa kompozītam ar un bez šķiedrām atbilstošos vecumos ir līdzīgs. Cementa kompozīta elastības modulis pēc 1 dienas cietēšanas ir 28 GPa, bet pēc 14 dienu cietēšanas elastības moduļa lielums pieauga līdz 40 GPa.

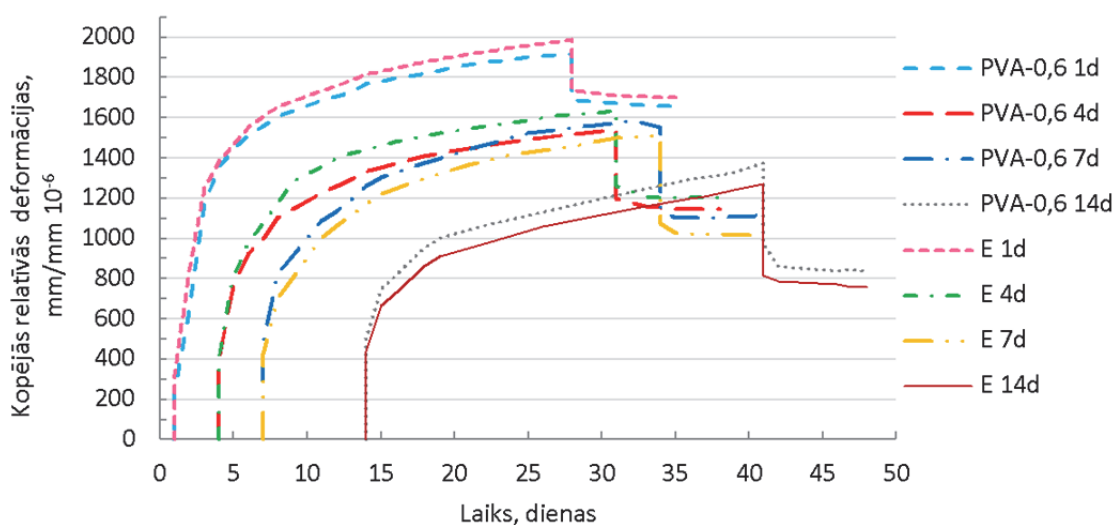


4.38. att. Cementa kompozītam (ar un bez PVA šķiedrām) agrā vecuma elastības modulis

4.2.3. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas

Attēlā 4.39. parādītas cementa kompozīta (ar un bez šķiedrām) dažādu vecumu kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas, kas ietver elastīgās deformācijas, šļūdes un žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas.

Paraugi tika slogoti 28 dienas, tad slodze no paraugiem tika noņemta un atgriezeniskās deformācijas tika noteiktas 7 dienu periodā pēc 28 dienu slogošanas.



4.39. att. Agrā vecuma kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

Kā redzams att. 4.39., cementa kompozīta kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas samazinās par 35 % līdz ar cementa kompozīta cietēšanas laiku, un stiprības pieaugumu. Cementa kompozīta paraugi, kuri normālos cietēšanas apstākļos cietējuši 14 dienas uzrādīja viszemākās kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas, bet visaugstākās kopējās, relatīvās deformācijas uzrādīja 1 dienu vecie paraugi. Salīdzinot references sastāvu ar cementa kompozītu, kam pievienotas PVA šķiedras, var konstatēt, ka sākotnēji – 1 un 4 dienu vecie references cementa kompozīta paraugi uzrādīja par ~3–6% lielāku kopējo, relatīvo deformāciju lielumu nekā tāda paša vecuma paraugi ar šķiedrām, bet 7 un 14 dienu vecie references cementa kompozīta paraugi uzrādīja par ~3–9% zemāku kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju lielumu. Pēc paraugu atslogošanas lielākās, palielošās deformācijas tika konstatētas paraugiem, kuri slogoti pēc 1 un 4 dienu vecumā. Pieaugot cementa kompozīta paraugu cietēšanas vecumam, atgriezenisko deformāciju lielums palielinās un neatgriezenisko deformāciju lielums samazinās.

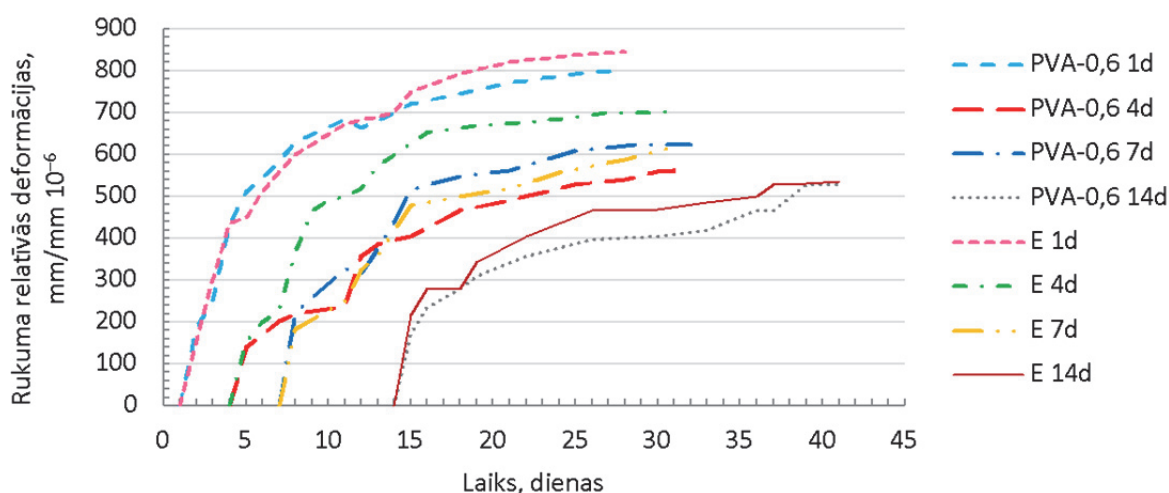
Pēc ilglaicīgajām pārbaudēm, paraugi tika sagrauti, tādējādi nosakot spiedes stiprības pieaugumu. Lai noteiktu ilglaicīgās deformācijas, sākotnēji paraugiem tika pielikta slodzes lielums, kas vienāds ar 25 % no attiecīgā vecuma graužošās slodzes. Turpinoties cietēšanas procesiem gaissausos apstākļos, spiedes stiprība pieauga un izmainījās pielikto spriegumu un graužošo spriegumu attiecība. No iegūtajiem spiedes stiprības rezultātiem noteikts gala slodzes līmenis, kāds bija saglabājies ilglaicīgo testu beigās. Zemākais gala spriegumu līmenis bija paraugiem, kuri pārbaudīti visagrākajā cementa kompozīta vecumā. Paraugiem, kuri slogoti pēc 1 dienas cietēšanas, gala slodzes līmenis pēc šļūdes deformāciju noteikšanas pārbaudēm bija robežās no 0,10–0,12, savukārt paraugiem, kuri slogoti pēc 14 dienu cietēšanas, gala slodzes līmenis pēc šļūdes deformāciju noteikšanas pārbaudēm bija robežās no 0,19–0,20. Lai arī pieliktās/graužošās slodzes līmenis ir augstāks paraugiem, kuri slogoti pēc 14 dienu cietēšanas, tomēr kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas lielākas ir paraugiem, kuri slogoti agrākā vecumā. Salīdzinot PVA šķiedru ietekmi uz ilglaicīgajām īpašībām var secināt, ka lai arī spriegumu līmenis ir augstāks cementa kompozītam bez PVA šķiedrām, tomēr šļūdes vienasīgās deformācijas lielākas ir cementa kompozītam ar PVA šķiedrām. No tā izriet, ka šķiedrām nav ilglaicīgo īpašību spiedē uzlabojoša ietekme.

4.2.4. Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas

Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas noteikts tādas pašas formas paraugiem kā nosakot ilglaicīgās slodzes deformācijas. Žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas tika mērītas paralēli šļūdes vienasīgajām deformācijām.

Paraugiem, kuru cietējuši tikai 1 un 4 dienas, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas ietver gan žūšanas rukuma deformācijas, gan autogēnā rukuma deformācijas. Tā kā autogēnā rukuma deformācijas paraugos notiek tikai pirmajās dažās dienās, tad paraugiem, pēc 7 un 14 dienu cietēšanas cementa kompozītiem hidratācija jau ir notikusi, un autogēnā rukuma deformācijas sastāda nenozīmīgu daļu no žūšanas rukuma deformācijām.

Attēlā 4.40. redzams, ka žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas, visos vecumos, visstraujāk pieaug pirmajās piecās dienās un pēc tam deformāciju pieauguma ātrums laikā samazinās. Abu sastāvu cementa kompozīta paraugiem, kas cietējuši normālos cietēšanas apstākļos ilgāk, žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas ir līdz 36 % mazākas. Kā redzams att. 4.40. PVA šķiedras cementa kompozīta žūšanas rukuma deformācijas ietekmē minimāli. Žūšanas rukuma deformācijas paraugiem ar PVA šķiedrām paraugiem, kas cietējuši ūdenī 1 līdz 4 dienas, ir aptuveni par 6–17 % zemāks nekā references sastāvam. Bet 7 dienu cietējušie references paraugi sarūk aptuveni par 3 % mazāk un 14 dienu cietējušie abu sastāvu paraugi uzrāda līdzīga lieluma žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas.



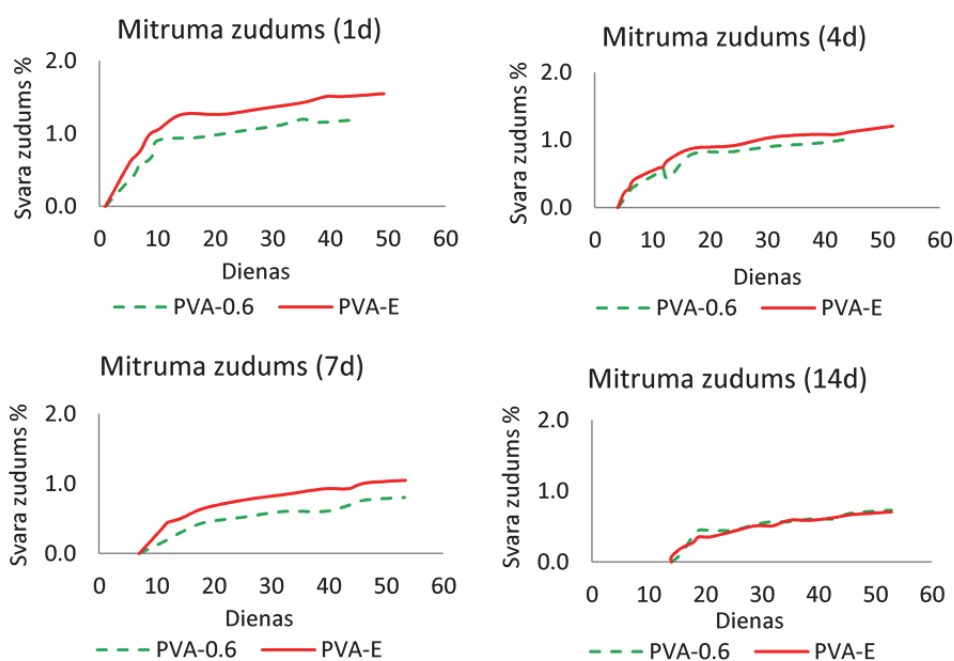
4.40. att. Agrā vecuma žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

No attēla 4.40. atspoguļotajām līknēm var secināt, ka, izmantojot PVA (0,6 %) šķiedras, iespējams samazināt cementa kompozīta relatīvās žūšanas rukuma deformācijas (ja aprūpes laiks ir no 1 līdz 4 dienām). Ar PVA šķiedru palīdzību ir iespējams samazināt cementa kompozīta autogēnā rukuma deformācijas par 2–10 %, bet žūšanas rukuma deformācijas PVA šķiedras praktiski neietekmē. Tomēr jāatzīmē, ka paraugiem, kas aprūpēti ilgāk par 1 dienu, jau pirms žūšanas rukuma deformāciju noteikšanas pārbaudēm ir noritējušas autogēnā rukuma deformācijas, kas šajā attēlā neatspoguļojas. Tā kā tas ir augstas stiprības cementa kompozīts, tad autogēnā rukuma deformācijas sastāda nozīmīgu lineārās deformācijas daļu. Tādēļ iegūtie rezultāti nevar būt attiecināmi tikai uz žūšanas rukuma vienasīgajām deformācijām, jo faktiski paraugiem iespējams ir lielākas žūšanas rukuma deformācijas. Tādēļ veicot agros testus, paralēli būtu lietderīgi atsevišķi noteikt arī cementa kompozīta autogēnā rukuma deformācijas, līdz ar to būtu iespējams precīzāk noteikt PVA šķiedru ietekmi uz žūšanas rukuma deformācijām.

Attēlā 4.41. atspoguļoti abu sastāvu paraugu mitruma zudumi pie dažādiem aprūpes laikiem (cietēšanas ilgumiem ūdenī). Abiem cementa kompozīta sastāviem novērota līdzīga parādība, jo mazāks aprūpes laiks, jo lielāks mitruma zudums. Ja cementa kompozītam ļauj cietēt ūdenī, aprūpē 4 dienas, tad mitruma zudumu var samazināt par 23 %, ja 7 dienas, tad par

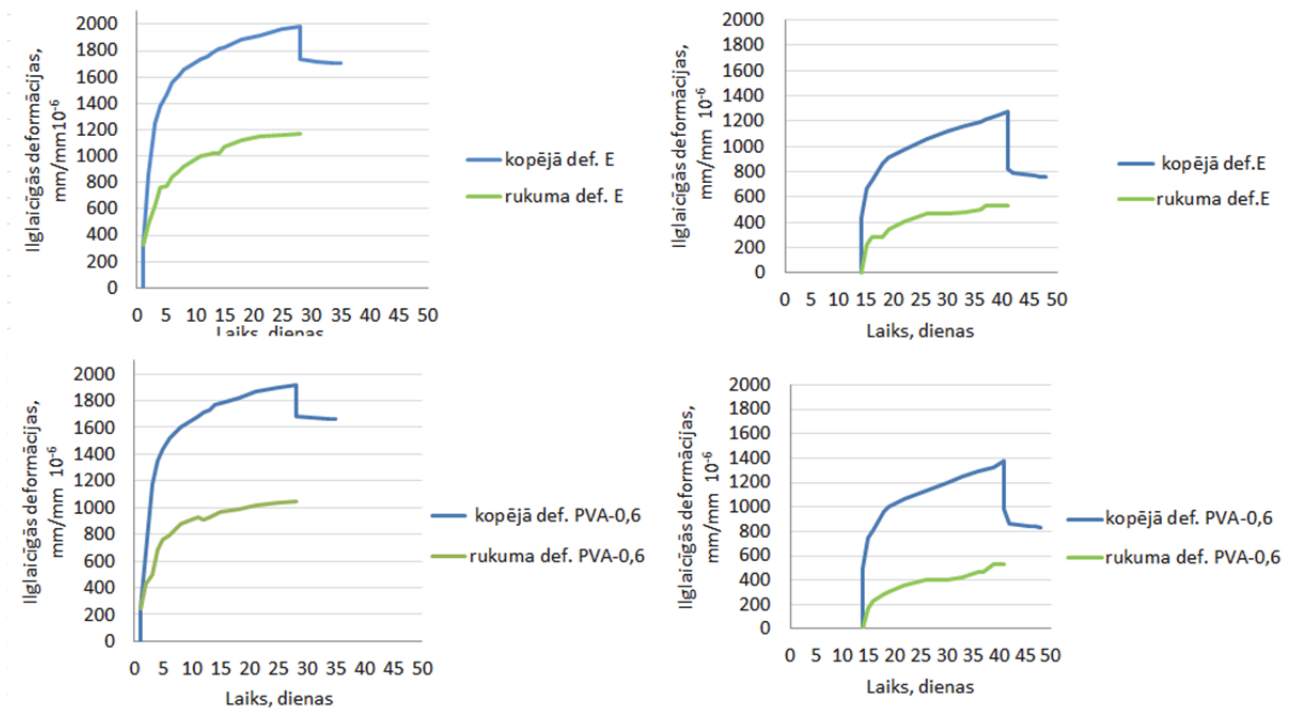
33 %, un ja 14 dienas, tad par 46% tātad, jo ilgāk cementa kompozīts cietē ūdenī, jo cementa kompozīts zaudē mazāk ūdens gaissausos apstākļos un cementa kompozīta žūšanas rukuma deformācijas ir mazāks, sk. att. 4.40. un 4.41.

Paraugiem, ar sākotnējo aprūpes laiku 1, 4 un 7 dienas, cementa kompozītam pievienotās PVA šķiedras, spēj samazināt mitruma zudumu par 9–20 % (sk. att. 4.41.), kas varētu būt izskaidrojams ar to, ka šķiedras izmaina iekšējā ūdens pārvietošanos cementa kompozīta struktūrā. Savukārt paraugiem, kas ir aprūpēti 14 dienas, PVA šķiedras praktiski neietekmē mitruma zudumu lielumu, jo paraugi jau ir gandrīz pilnībā hidratējušies un tie pietiekoši ilgi ir cietējuši ūdenī, tādēļ, žūstot paraugos esošā ūdens zudums ir neliels.



4.41. att. Agrā vecuma žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

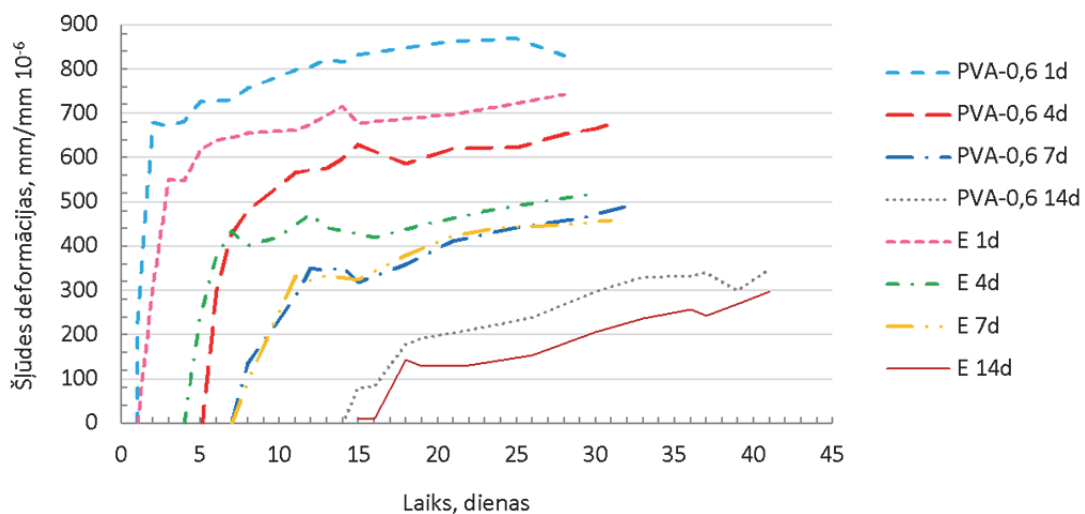
Attēlā 4.42. atspoguļots kopējo, relatīvo, vienasīgo un žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju salīdzinājums cementa kompozīta paraugiem ar un bez šķiedrām pēc 1 un 14 dienu cietēšanas ūdenī. Attēlā 4.42. redzams, ka references cementa kompozītam 1 dienas vecumā kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas ir par 38 % lielākas nekā 14 dienu vecumā, bet žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas par 54 % lielākas. Cementa kompozītam ar PVA šķiedrām attiecīgi par 28 % un 48 %. Šis novērojums apstiprina, ka ļoti agrā vecumā cementa kompozītam ir lielākas šļūdes vienasīgās deformācijas nekā lielākā vecumā. Tas izskaidrojams ar cementa kompozīta stiprības pieaugumu. Tāpat skaidri redzams, ka žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas veido ~50 % no kopējām, relatīvajām, vienasīgajām ilglaicīgajām deformācijām.



4.42. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju un žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju salīdzinājums pēc 1 dienas un 14 dienu cietēšanas ūdenī, cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

4.2.5. Šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē

Žūstošās šļūdes relatīvās, vienasīgās deformācijas lielumi attēloti att. 4.43. Vislielākās šļūdes vienasīgās deformācijas ir novērojamas paraugiem, kuri slogoti pēc 1 dienas cietēšanas, savukārt paraugi, kuri slogoti pēc 14 dienu cietēšanas uzrāda ievērojamu šļūdes vienasīgo deformāciju samazinājumu. Visos vecumos, izņemot 7 dienu cietējušos paraugus, cementa kompozīta paraugi ar PVA šķiedrām uzrāda par 12 –20 % lielākas deformācijas nekā references sastāva paraugi. Pēc 7 dienu cietēšanas un slogošanas abu sastāvu šļūdes vienasīgās deformācijas ir aptuveni līdzīga lieluma.

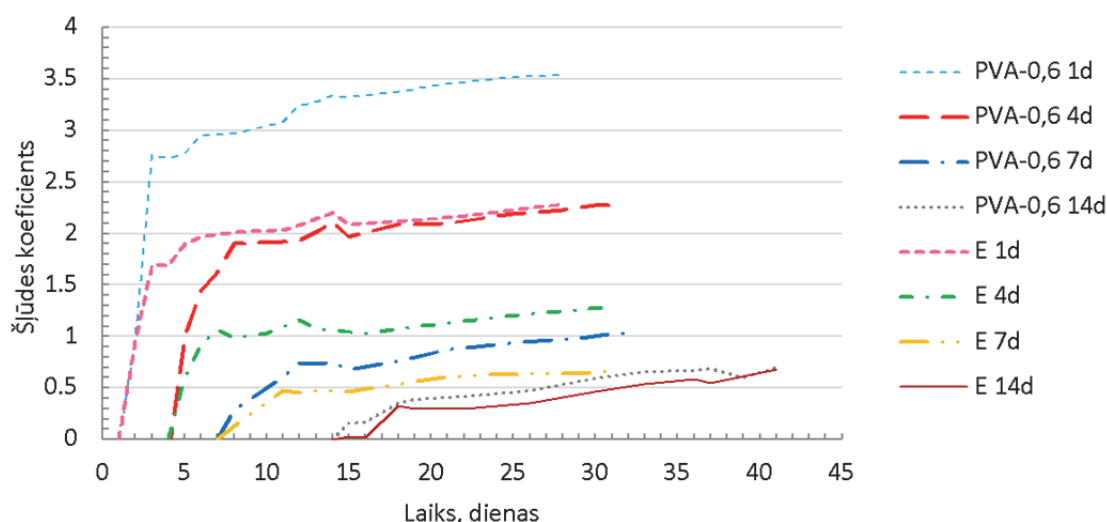


4.43. att. Agrā vecuma šļūdes vienasīgās, relatīvās deformācijas cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

4.2.6. Šļūdes koeficients spiedē

Šļūdes koeficients spiedē tāpat kā šļūdes vienasīgās deformācijas sākotnēji strauji palielinās, tomēr šļūdes koeficienta palielināšanās lielums laika faktora ietekmē kļūst arvien mazāks. Pieaugot cementa kompozīta vecumam un stiprībai, šļūdes koeficients pārbaudītajiem cementa kompozīta sastāviem dots att. 4.44.

Ar cementa kompozītu vecuma pieaugumu šļūdes koeficients spiedē ievērojami samazinās. Visos vecumos lielāku šļūdes koeficientu uzrāda cementa kompozīta paraugi ar PVA šķiedrām. Agrā cementa kompozīta vecumā – 1, 4 un 7 dienas cietējušie paraugi ar PVA šķiedrām, uzrāda par ~35–45 % lielāku šļūdes koeficientu nekā paraugi bez šķiedrām, bet 14 dienas vecie tikai ~1 % lielāku šļūdes koeficientu, kas varētu būt izskaidrojams ar sākotnēji mazāku cementa kompozīta stiprību un lielākām elastīgajām deformācijām, līdz ar to mazāku elastības moduli un lielākām šļūdes deformācijām. Visaugstāko šļūdes koeficienta vērtību uzrāda cementa kompozīta sastāvs ar PVA šķiedrām pēc 1 dienas cietēšanas, sasniedzot maksimālo vērtību 3.5, savukārt zemākā iegūtā vērtība ir 0.7, noteikta paraugiem bez šķiedrām pēc 14 dienu cietēšanas.



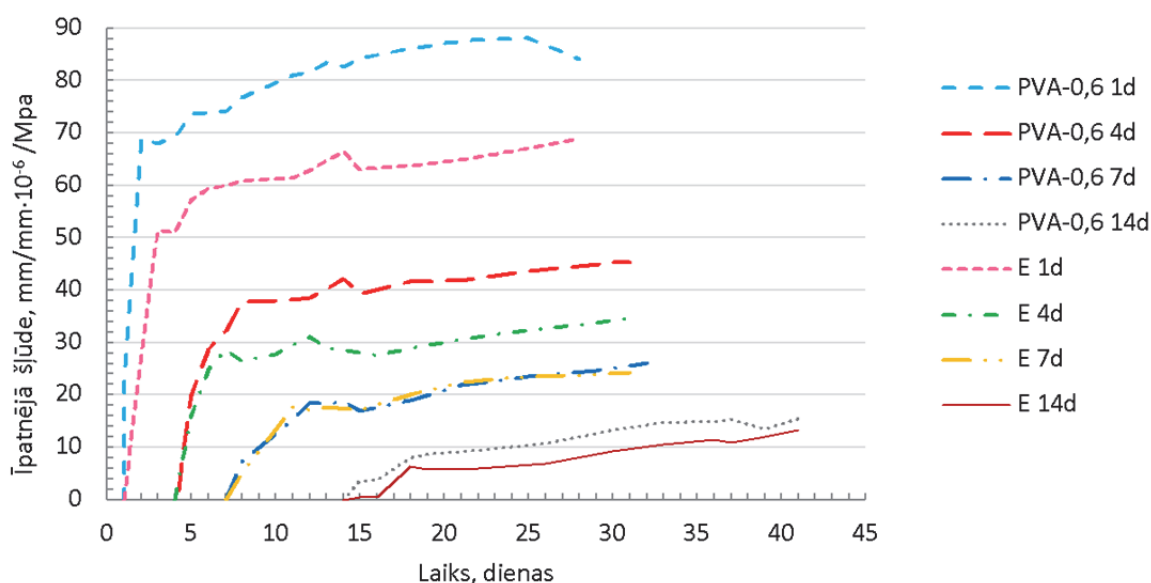
4.44. att. Agrā vecuma šļūdes koeficienta spiedē vērtības cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

4.2.7. Īpatnējā šļūde spiedē

Attēlā 4.45. Ir attēlota abu sastāvu dažādo cietēšanas vecumu īpatnējās šļūdes vērtības spiedē. Īpatnējā šļūde ir visobjektīvākais ilglaicīgo īpašību parametrs, jo izslēdz atšķirīgo spriegumu ietekmi uz rezultātiem. Kā redzams attēlā, tad visos vecumos vislielākie īpatnējās šļūdes rādītāji ir cementa kompozīta sastāvam ar PVA šķiedrām, turklāt pieaugot cietēšanas vecumam šī maksimālā vērtība un atšķirība starp cementa kompozīta sastāvu bez šķiedrām samazinās. Agrā cietēšanas vecumā (1 un 4 dienas) īpatnējā šļūdes lieluma atšķirība sasniedz ~20 %, bet cementa kompozīta cietēšanas vecumam pieaugot, šī atšķirība samazinās līdz ~3 %.

Apskatot attēlus 4.41, 4.42., 4.43., 4.44. un 4.45., jāsecina, ka cementa kompozītam pievienotās PVA (0,6 %) šķiedras agrā cementa kompozīta cietēšanas vecumā palielina

ilglaicīgās slodzes izraisītās īpašības, bet līdz ar cietēšanas vecuma pieaugumu un ar to saistītajiem cementa kompozītā notiekošajiem ķīmiskajiem procesiem, būtiska ietekme uz palielinātām vai samazinātām ilglaicīgo slodzes izraisīto īpašību vērtībām nav novērota.



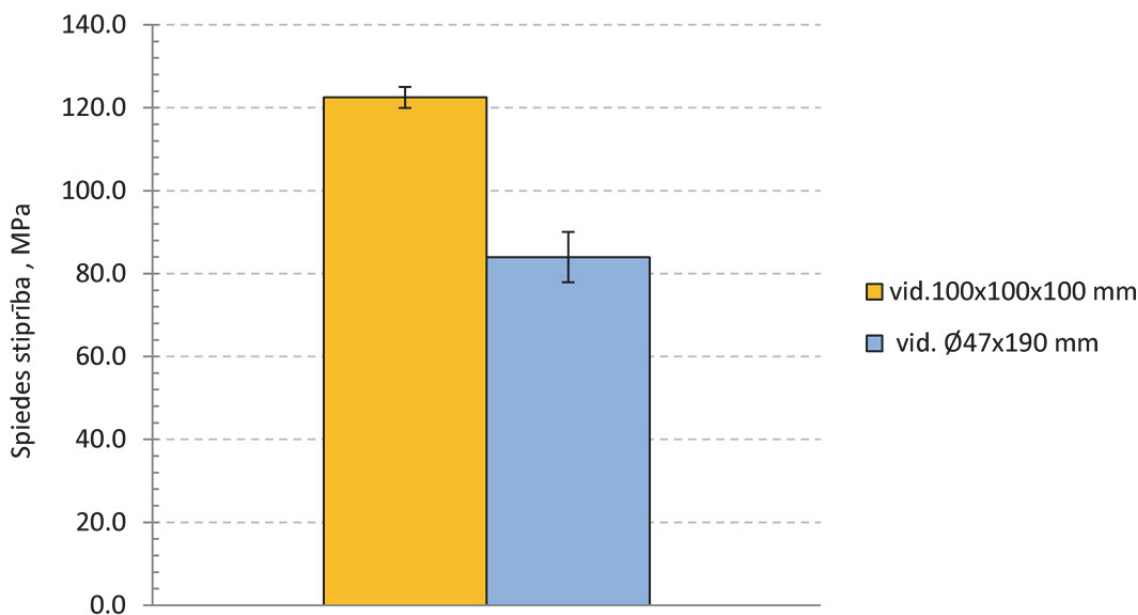
4.45. att. Agrā vecuma īpatnējā šļūde cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām

Dažādu cementa kompozīta sastāvu apvienotos eksperimentālos testu rezultātus (sk. pielikumā Nr. 2.). Papildinātu un detalizētu informāciju par katra cementa kompozīta eksperimentālajiem rezultātiem skatīt A.Sprinces zinātniskajās publikācijās (publikāciju sarakstu skatīt 23. lpp.).

4.3. Eksperimentālo datu statistiskā apstrāde

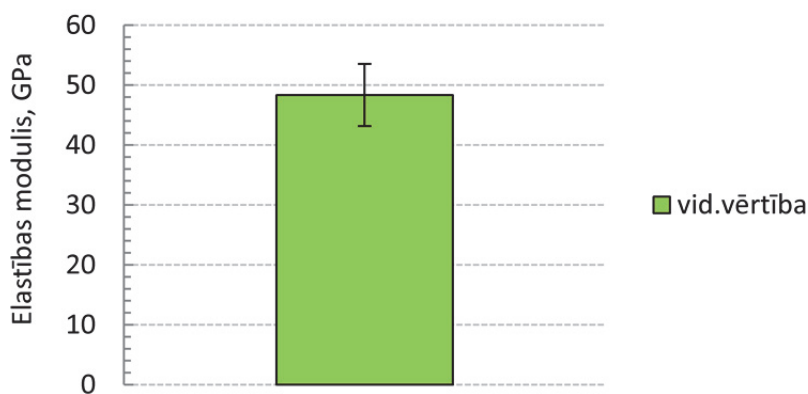
Lai novērtētu laboratorijā iegūto datu atbilstību, precizitāti un stabilitāti, tika veikta rezultātu statistiskā analīze. Eksperimentos iegūtās, rupjās kļūdas tika izslēgtas ar 3σ metodi. Rezultātu atbilstība un precizitāte noteikta ticamības intervālā 95% ar standartnovirzes vērtību (vidējā kvadrātiskā novirze) - S_d un ar variāciju koeficientu – V . Standartnovirze parāda cementa kompozīta īpašību izkliedi ap vidējo vērtību. Jo iegūtais rezultāts ir tuvāks vidējai vērtībai, jo standartnovirzes lielums ir mazāks. Variāciju koeficients ir standartnovirzes un vidējās rezultātu vērtības attiecība, parādot vērtību mainīgumu ap vidējo vērtību. Vispārīgi materiāla izkliede saistīta ar materiāla ne viendabību, izgatavošanas tehnoloģiju, parauga ģeometrisko stabilitāti, pārbaudes metodes, iekārtas un mērierīces precizitāti un korektu darbību.

Uzskatāma statistisko datu apstrāde parādīta vienam cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili. Attēlā 4.46. uzskatāmi parādīta spiedes stiprības standartnovirze. Vidējā kubiskā spiedes stiprība noteikta no 3 paraugiem, bet vidējā cilindriskā no 6 paraugiem. Kubiskajiem paraugiem $100 \times 100 \times 100$ mm S_d ir 2,5 MPa un V ir 2,1 %, bet paraugiem $\varnothing 47 \times 190$ mm S_d ir 6 MPa un V ir 7,2 %. Literatūras avotos norādītā standartnovirze ir diapazonā no 0,9–2,4 MPa un pieļaujamais variāciju koeficients līdz 15–20% (Omar *et al.*, 2008; Tarnopolskii, Kincis, 1985; Скудпа *et al.*, 1971).



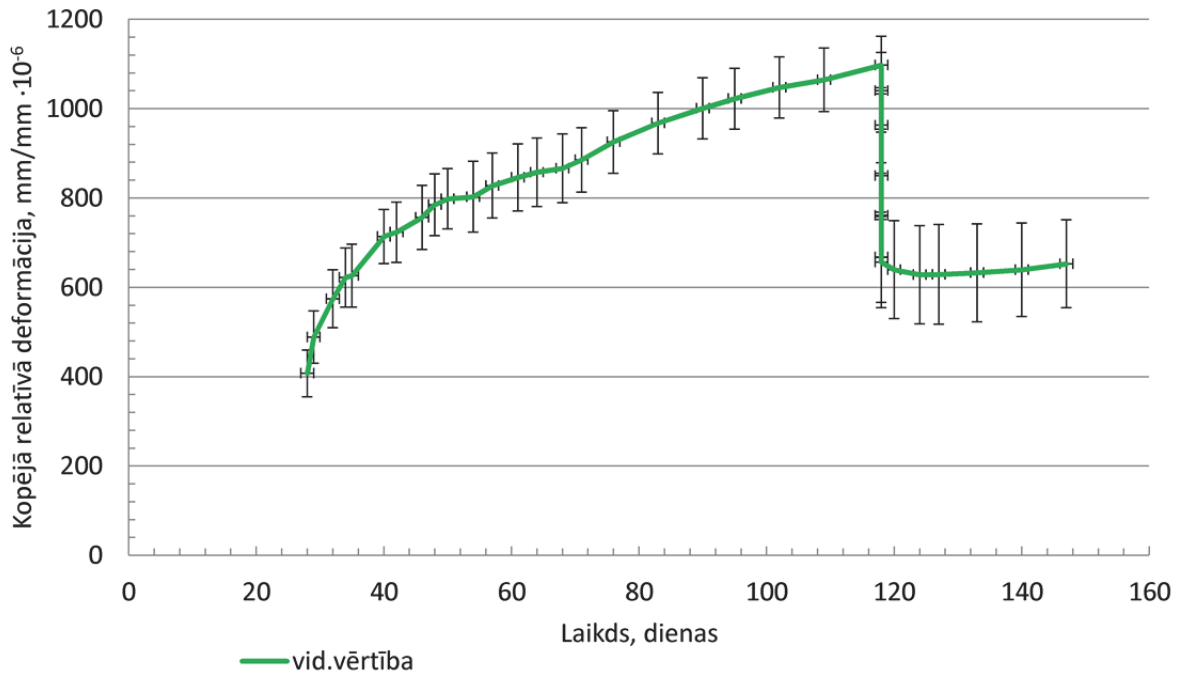
4.46. att. Spiedes stiprības standartnovirze kubiskiem (100 × 100 × 100 mm) un cilindriskiem (Ø47 × 190 mm) paraugiem cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Attēlā 4.47. uzskatāmi parādīta elastības moduļa standartnovirze, kas noteikta cilindriskiem (Ø47 × 190 mm) paraugiem. Vidējā vērtība noteikta no 6 paraugiem S_d ir 5,2 GPa un V ir 10,7%. Literatūras avotos norādītā standartnovirze ir diapazonā no 0,2–0,3 GPa un variāciju koeficients līdz 15–20% (Omar *et al.*, 2008).

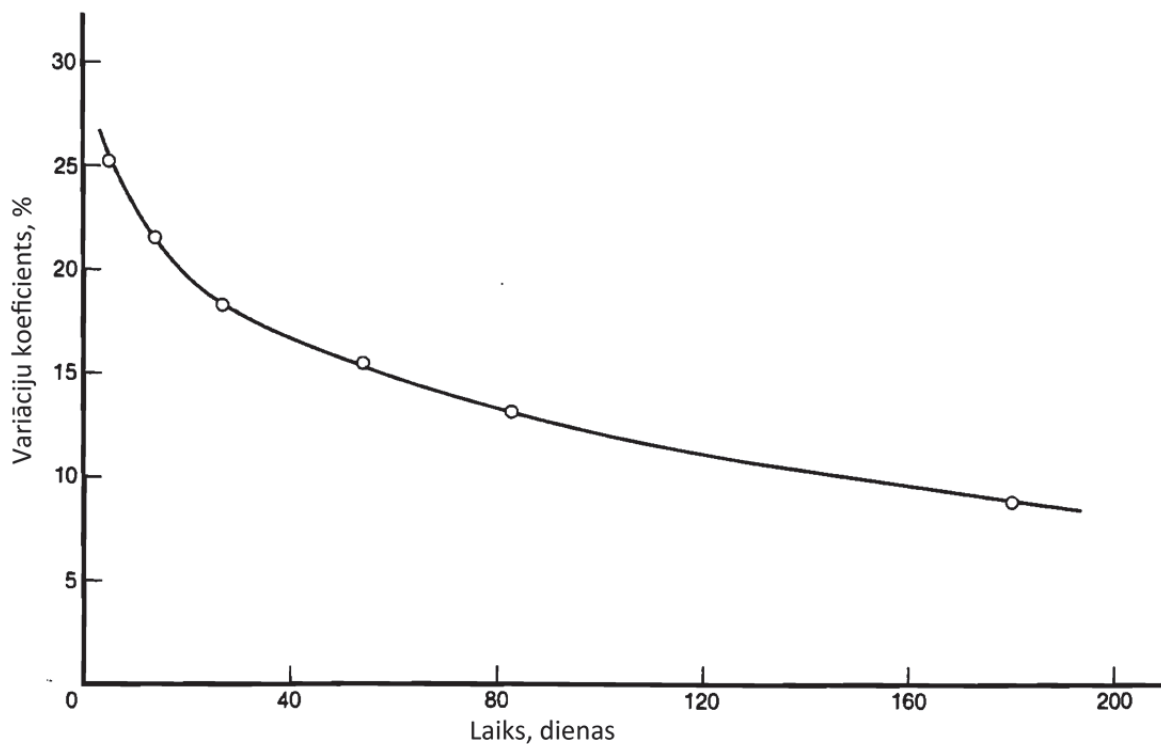


4.47. att. Elastības moduļa standartnovirze noteikta cilindriskiem (Ø47 × 190 mm) paraugiem cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē standartnovirzi skatīt attēlā 4.48. Standartnovirze noteikta cilindriskiem (Ø47 × 190 mm) paraugiem. Vidējā vērtība noteikta no 3 paraugiem. Maksimālā S_d vērtība ir $111,5 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$, bet vidējā S_d vērtība ir $79,7 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$ un maksimālais V ir 17,7%, bet vidējais V ir 10,7%. Literatūras avotos norādītā standartnovirze ir $162 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$ un variāciju koeficients līdz 15–20%, sk. att. 4.49. (Omar *et al.*, 2008; Neville *et al.*, 1983).



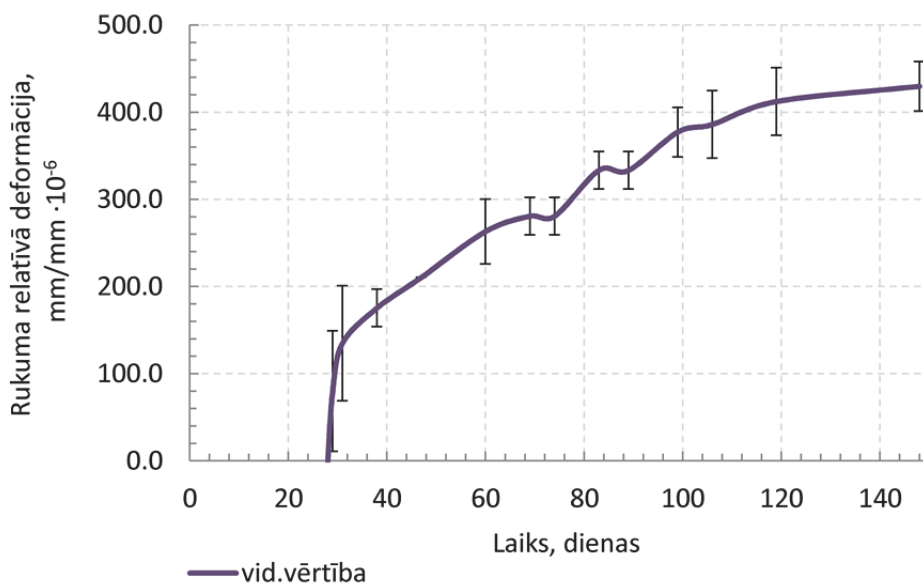
4.48. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju spiedē standartnovirze noteikta cilindriskiem ($\varnothing 47 \times 190$ mm) paraugiem cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili



4.49. att. Ilglaicīgo īpašību variāciju koeficients atkarībā no pārbaudes ilguma (Neville *et al.*, 1983)

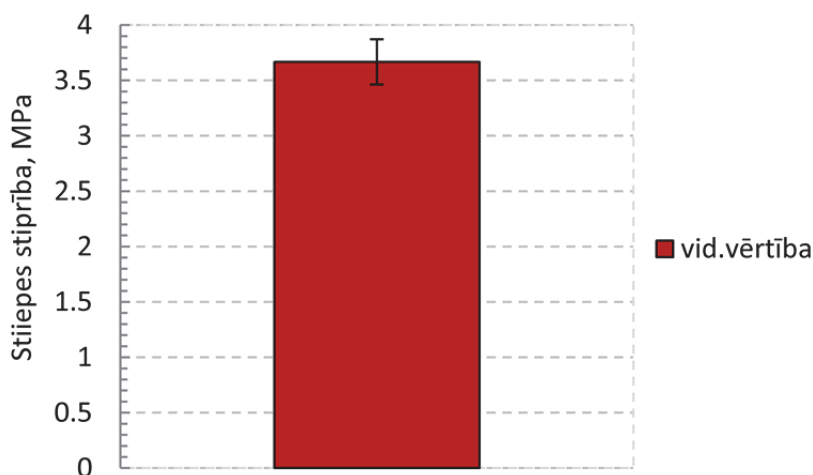
Žūšanas rukuma vienasīgo, relatīvo deformāciju standartnovirzi sk. att. 4.50. Standartnovirze noteikta cilindriskiem ($\varnothing 47 \times 190$ mm) paraugiem. Vidējā vērtība noteikta no 3 paraugiem. Maksimālā S_d vērtība ir $43 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$, bet vidējā S_d vērtība ir $24,8 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$ un maksimālais V ir 22,3%, bet vidējais V ir 8,5%. Literatūras avotos norādītā

standartnovirze ir $44,6 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$ un variāciju koeficients līdz 15–20% (Omar *et al.*, 2008; Neville *et al.*, 1983).



4.50. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju standartnovirze noteikta cilindriskiem ($\varnothing 47 \times 190 \text{ mm}$) cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Attēlā 4.51. uzskatāmi parādīta stiepes stiprības standartnovirze. Vidējā vērtība noteikta no 3 plātņveida paraugiem ar izmēriem $100 \times 50 \times 12 \text{ mm}$. S_d ir 0,2 MPa un V ir 5,6%. Literatūras avotos norādītā standartnovirze ir 0,13 MPa un variāciju koeficients līdz 15–20% (Omar *et al.*, 2008; Tarnopolskii, Kincis, 1985; Neville *et al.*, 1983).



4.51. att. Stiepes stiprības standartnovirze noteikta plātņveida ($100 \times 50 \times 12 \text{ mm}$) paraugiem cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Kopsavilkums par 4. nodaļu

Jaunās ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģijas aprobācijas laikā iegūti dažādu, jauno, atšķirīgo cementa kompozītu raksturojošie parametri.

Kā piemērs dots, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozīta ar mikro- un nanosilkas minerālo piedevu, ar un bez PVA šķiedru kokteiļa detalizēts, rezultātu apkopojums.

- **Spiedes stiprība**

Eksperimentāli iegūtie pārbaužu rezultāti apstiprina, ka sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu kubiskā spiedes stiprība ir lielāka mazāko izmēru paraugiem – $50 \times 50 \times 50$ mm, salīdzinot stiprībām, kas iegūtas ar paraugiem – $100 \times 100 \times 100$ mm, kas sakrīt ar parastas stiprības betonu mēroga faktora hipotēzi, ka samazinoties paraugu izmēram, samazinās defektu iespējamība (Brauns, 2000; Cajs, 1985). Visiem eksperimentāli pārbaudītajiem sastāviem šī stiprību sakarība starp abu izmēru paraugiem ir 12–15% robežās un pārrēķina koeficients ir 1,16. Sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu cilindriskā spiedes stiprība ir lielāka paraugiem ar $\phi/l = 1/2,5$ (t.i. paraugiem $\phi 72 \times 190$ mm), kuriem ir arī lielāka izmēra diametrs, salīdzinot ar paraugiem, kuru $\phi/l = 1/4$ (t.i. paraugiem $\phi 47 \times 190$ mm), un šī stiprību sakarība ir 4–9% apmērā. Sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu vienāda diametra, bet atšķirīgu garumu cilindriskie paraugi – $\phi/l = 1/2,5$ ($\phi 72 \times 190$ mm) un $\phi/l = 1/4$ ($\phi 72 \times 300$ mm) uzrāda par 1–6 % starpību, no tiem lielāku spiedes stiprību uzrāda īsākie paraugi.

Visu pārbaudīto cementa kompozītu eksperimentāli noteiktās kubiskās spiedes stiprības ir 30–32% lielākas par to cilindriskajām spiedes stiprību vērtībām. Tātad augstu un sevišķi augstu cementa kompozītu kubisko un cilindrisko stiprību attiecība ir $\sim 0,7$. Autoru Rashid *et al.*, 2002; L' Hermite, 1960; Neville, 1981 un EN 1992–1–1:2005 pētījumos minēts, ka stiprību attiecība atkarībā no cementa kompozīta klases un paraugu ģeometrijas mainās no 0,7 līdz 0,94.

Mitriem sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem uzrādītais stiprības pieaugums tikai par $\sim 1\%$ lielāks, bet gaissausā koncentrācijā stiprības pieaugums ir vidēji 13%, kas varētu būt izskaidrojams ar cementa kompozīta ķīmiskajiem procesiem, kas norit cementa kompozītam žūstot.

Cementa kompozīta cilindriskā spiedes stiprība noteikta pirms un arī pēc ilglaicīgajām pārbaudēm. Augstas stiprības cementa kompozītiem, kas pārbaudīti agrā vecumā, lielākais spiedes stiprības pieaugums tika novērots paraugiem, kuri tika slogoti pēc īsākā parauga aprūpes laika - 1 dienas cietēšanas ūdenī. Salīdzinot ar paraugiem, kas ūdenī cietējuši 28 dienas, stiprības pieaugums pēc 1 dienas ir par 13% lielāks nekā pēc 7 dienas. Sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem bez PVA šķiedru kokteili pēc ilglaicīgajām pārbaudēm uzrādīja par $\sim 10\%$ lielāku spiedes stiprību nekā sevišķi augstas stiprības cementa kompozītus ar PVA šķiedrām, turklāt paraugi, kas tika ilglaicīgi pakļauti konstantai slodzei (pēc šļūdes deformāciju noteikšanas pārbaudēm) uzrādīja par 2% mazāku stiprības pieaugumu nekā bez slodzes paraugi (pēc žūšanas rukuma deformāciju noteikšanas pārbaudēm).

Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts pārbaudīts agrā vecumā (paraugiem $100 \times 100 \times 100$ mm) un 7 dienu vecumā tas ir sasniedzis $\sim 84\%$ no 28 dienu (standartvecuma) stiprības un $\sim 70\%$ no 123 dienu stiprības. Pie tam šī stiprība ievērojami pārsniedz izmantotā

cementa Aalborg White 52,5 R nodrošināto 33–41 MPa stiprību 7 dienu vecumā. Šāds stiprības pieaugumus izskaidrojams ar mikrosilikas lietojumu.

- **Elastības modulis spiedē**

Augstas stiprības cementa kompozīta agrā vecuma pārbaudes norāda, ka elastības modulis līdz ar cietēšanas laiku un stiprības pieaugumu, pieaug par 30%. Elastības moduļa lielums cementa kompozītam ar un bez šķiedrām ir līdzīgs. Cementa kompozīta elastības modulis pēc 1 dienas cietēšanas ir 28 GPa, kas ir ~60% no elastības moduļa pēc 28 dienu cietēšanas, kas ir ~48GPa.

Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili uzrādīja par 5% lielāku elastības modulis nekā sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar mikrosilikas un nanosilikas minerālo piedevu.

- **Kopējās, relatīvās, vienasīgās, ilglaicīgās deformācijas spiedē**

Agrā vecuma pārbaudes apstiprināja, ka pieaugot cementa kompozīta vecumam un līdz ar to cementa kompozītu stiprībai, samazinās ilglaicīgo, kopīgo, relatīvo, vienasīgo deformāciju vērtības. Cementa kompozīta kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas samazinās par ~35% līdz ar cementa kompozīta cietēšanas laiku un stiprības pieaugumu. Visaugstākās kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas uzrādīja 1 dienu vecie paraugi. Salīdzinot references sastāvu ar cementa kompozītu, kam pievienotas PVA šķiedras, redzams, ka cementa kompozīts ar PVA šķiedrām uzrāda lielākas kopējas, vienasīgās, ilglaicīgās deformācijas. Pieaugot cementa kompozīta paraugu cietēšanas vecumam, atgriezenisko deformāciju lielums palielinās un neatgriezenisko deformāciju lielums samazinās.

Salīdzinot mitru un gaissausu paraugu kopējās, ilglaicīgās, vienasīgās deformācijas jāsecina, ka ietītie paraugi 90. dienā pēc noslodzes deformējas par ~25% mazāk nekā gaissausie paraugi, turklāt sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar mikrosiliku un PVA šķiedru kokteili uzrāda par ~2% mazākas kopējās, ilglaicīgas deformācijas kā paraugi ar mikro- un nanosiliku un PVA šķiedru kokteili. Kopējās, neelastīgās atgriezeniskuma deformācijas, kas parādās pēc elastīgajām deformācijām ir nelielas ~1%. Paraugu paliekošās, neatgriezeniskās deformācijas, kas apskatāmā atslodzes perioda beigās mitrajiem paraugiem ir ~50–56%, žūstošajiem paraugiem – 43–45% no kopējām, ilgstošajām, vienasīgajām deformācijām.

- **Žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas un mitruma zudumi**

Agrā cementa kompozīta vecuma eksperimentālie rezultāti parāda, ka žūšanas rukuma relatīvās, vienasīgās deformācijas, visos apskatītajos vecumos visstraujāk pieaug pirmajās četrās dienās un pēc tam deformāciju pieauguma ātrums laikā samazinās, tas daļēji izskaidrojams ar to, ka ļoti agrā vecumā žūšanas rukuma vienasīgās, deformācijas ietver gan žūšanas rukuma deformācijas, gan autogēnā rukuma deformācijas, tādēļ veicot agros testus lietderīgi paralēli veikt arī cementa kompozīta autogēnā rukuma deformāciju noteikšanas pārbaudes. Eksperimentālie pētījumi parāda, ka cementa kompozītam ar un bez PVA šķiedrām novērota līdzīga parādība, jo mazāks aprūpes laiks, jo lielāks mitruma zudums, t.i. jo ilgāk cementa

kompozīts cietē ūdenī, jo cementa kompozīts zaudē mazāk ūdens gaissausos apstākļos un cementa kompozīta žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas ir mazāks. Abu sastāvu cementa kompozīta paraugiem, kas cietējuši normālos cietēšanas apstākļos ilgāk, žūšanas rukuma relatīvās deformācijas ir līdz pat 36% mazākas. Eksperimenti parāda, ka PVA šķiedras cementa kompozīta žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas ietekmē minimāli.

Eksperimentālie pētījumi sevišķi augstas stiprības cementa kompozītam ar mikro- un nanosilkas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili parāda, ka cementa kompozīta paraugi ar nanosiliku rūk vairāk nekā tikai ar mikrosiliku, kas iespējams izskaidrojams ar to, ka cementa kompozīta ķīmisko procesu laikā nanosilikas piedevas ietekmē izdalās vairāk mitruma vai iespējams cementa kompozīta struktūrā ir parādījušās vairāk poru caur kurām mitrums ir iztvaikojis.

Tāpat iegūtie dati apstiprina hipotēzes, ka ietītie paraugi rūk par 21–27% mazāk kā gaissausie, jo tajos nenotiek mitruma apmaiņa. Un paraugi ar lielāku diametru – $\varnothing 72$ mm, rūk par 9–12% vairāk nekā mazāka diametra paraugi – $\varnothing 47$ mm, tas pats novērots ar dažādu ģeometriju un atšķirīgu virsmas laukumu paraugiem, kas izskaidrojams ar palielināto žūšanas virsmu.

Tāpat eksperimentāli noskaidrots, ka paraugi ar PVA šķiedrām uzrāda par ~10–15% mazākas žūšanas rukuma deformācijas kā bez šķiedrām. Un zemākas stiprības cementa kompozīti rūk par ~18% vairāk nekā augstākas stiprības cementa kompozīti.

- **Šļūdes vienasīgās, relatīvas deformācijas spiedē**

Vislielākās šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē ir novērojamas paraugiem ļoti agrā cementa kompozīta vecumā, pēc 1 dienas cietēšanas ūdenī, savukārt paraugi, kuri slogoti pēc 14 un vairāk dienu cietēšanas ūdenī uzrāda ievērojamu šļūdes vienasīgo deformāciju samazinājumu. Visos cementa kompozīta vecumos paraugi ar PVA šķiedrām uzrāda par 12–20% lielākas deformācijas nekā references sastāva paraugi.

Šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē, 90. dienā pēc noslodzes, sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu žūstošajiem paraugiem ir par ~17% lielākas nekā ietītajiem paraugi. Žūstošās šļūdes vienasīgās deformācijas saistīta ar lielajām žūšanas rukuma vienasīgajām deformācijām, jo procesi, kas iespaido žūšanas rukuma deformācijas, līdzvērtīgi iedarbojas arī uz žūšanas šļūdes deformācijām. Piemēram, mikroplaisāšana žūstot palielina gan žūšanas rukuma deformācijas, gan žūšanas šļūdes deformācijas.

Cementa kompozīts ar nanosilkas un mikrosilikas minerālo piedevu uzrāda par ~1–2% mazākas šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē nekā tikai ar mikrosilikas minerālo piedevu.

- **Šļūdes koeficients spiedē**

Šļūdes koeficients spiedē rāda šļūdes vienasīgo deformācijas un elastīgo deformāciju attiecību. Šļūdes koeficients spiedē tāpat kā šļūdes vienasīgās deformācijas sākotnēji strauji palielinās, tomēr šļūdes koeficienta palielināšanās lielums laika faktora ietekmē kļūst arvien mazāks. Pieaugot cementa kompozīta vecumam un stiprībai, šļūdes koeficients ievērojami

samazinās. Salīdzinot cementa kompozīta ar un bez PVA šķiedrām šļūdes deformācijas, redzams, ka visos agrajos cementa kompozītu vecumos tas uzrāda par ~35–45% lielāku šļūdes koeficientu, kas varētu būt izskaidrojams ar sākotnēji mazāku cementa kompozīta stiprību un lielākām elastīgajām deformācijām, līdz ar to mazāku elastības moduli un lielākām šļūdes vienasīgajām deformācijām. Šļūdes koeficients spiedē cementa kompozīta sastāvam ar PVA šķiedrām pēc 1 dienas cietēšanas ūdenī sasniedz maksimālo vērtību ~3.5, savukārt pēc 14 dienu cietēšanas ūdenī šļūdes koeficients ir samazinājies līdz ~0.7.

Salīdzinot žūstošo paraugu šļūdes koeficientus ~90 dienas pēc noslodzes, redzams, ka tie pārsniedz par ~9% ietīto paraugu šļūdes koeficientu vērtības.

Kā jau minēts iepriekš – literatūras apskatā, neviens no standartizētajiem modeļiem pilnībā neietver reālu cementa kompozītu sastāvu atšķirīgos, iekšējos un ārējos ietekmes faktoros. To skaidri parāda arī divu standartizēto modeļu: EN 1992–1–1 (EC–2) un FIP 2010 iegūtie rezultāti. Izmantojot šos modeļus tika noteikts teorētiskais šļūdes koeficients un salīdzināts ar eksperimentāli iegūtajiem koeficientiem. Abi modeļi ir atšķirīgi. Modelis EC–2 apskata tikai šļūdes žūstošās daļas komponenti, bet modelis FIP 2010 ietver abas šļūdes komponentes. Eksperimentāli iegūtās vērtības, izmantojot EC – 2, ir ~ 17–22% mazākas nekā teorētiski aprēķinātās šļūdes koeficienta vērtības. Atšķirība izskaidrojama ar to, ka EC–2 ir paredzēts cementa kompozītam ar kubisko spiedes stiprību līdz 105MPa. Izmantojot modeli FIP 2010 eksperimentāli iegūtie pilno šļūdes deformāciju lielumi pēc 90 noslodzes dienām ir par 78 % lielāki nekā teorētiski aprēķinātie.

Iegūtie rezultāti apstiprina, ka esošie, empīriskie modeļi piemērojami tikai parastas stiprības cementa kompozītiem, kuru izejas dati maksimāli tuvu atbilst empīriskajos modeļos pieņemtajiem. Visprecīzākais veids jaunizveidoto cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai ir laboratoriskās pārbaudes.

- **Īpatnējā šļūde spiedē**

Īpatnējā šļūde spiedē ir visobjektīvākais ilglaicīgo īpašību parametrs, jo izslēdz atšķirīgo spriegumu ietekmi uz rezultātiem. Agrā cementa kompozīta vecumā vislielākie īpatnējās šļūdes rādītāji ir cementa kompozīta sastāvam ar PVA šķiedrām, turklāt pieaugot cietēšanas vecumam šī maksimālā vērtība un atšķirība starp cementa kompozīta sastāvu bez šķiedrām samazinās, pēc 1 un 4 dienu cietēšanas ūdenī īpatnējā šļūdes lielumu atšķirība sasniedz ~20%, bet cementa kompozīta cietēšanas vecumam pieaugot, šī atšķirība samazinās līdz ~3%.

Žūstošo paraugu īpatnējā šļūde spiedē 90. dienā pēc slogojuma pārsniedz ietīto paraugu rādītājus par ~5–8 %. Žūstošie paraugi ar mikro- un nanosilkas minerālo piedevu uzrāda līdzīgas īpatnējās šļūdes vērtības, bet ietīto paraugu īpatnējā šļūde paraugiem ar mikrosilikas piedevu ir par ~20 % lielāka.

Esošie, empīriskie modeļi piemērojami tikai klasiskiem, parastas stiprības cementa kompozītiem, kuru izejas dati maksimāli tuvu atbilst empīriskajos modeļos pieņemtajiem. Jaunizveidoto RTU un DTU cementa kompozītu sastāvu teorētisko, ilglaicīgo īpašību vērtību

atšķirība ar eksperimentālajiem pārsniedz 20%, līdz ar to tas apstiprina, ka atšķirīgie ārējie un iekšējie ietekmes faktori būtiski ietekmē cementa kompozīta īpašības un esošie empīriskie modeļi nav piemērojami. Iegūtā, lielā rezultātu atšķirība apstiprina, ka visprecīzākais veids jaunizveidoto cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai ir laboratoriskās pārbaudes. Tas pats attiecināms arī uz deformāciju jūtīgām – plānsieniņu un liellaiduma konstrukcijām, jo esošās standartizētās, empīriskās līknes nav piemērotas nestandarta konstrukcijām.

- **Šļūdes modulis spiedē**

Šļūdes modulis spiedē attēlo pieliktā sprieguma un šļūdes vienasīgo deformāciju attiecību. Šis ilglaicīgais parametrs izmantojams ilglaicīgi slogotu konstrukciju pārvietojumu noteikšanai laikā. Pirmajās dienās pēc paraugu noslodzes paraugi uzrāda strauju šļūdes moduļa samazinājumu un aptuveni pēc divām nedēļām šļūdes moduļa samazinājums kļūst nelineārs un tā vērtība mainās ar samazinošu ātrumu.

- **Stiepes stiprība**

Eksperimentālās stiepes stiprības pārbaudes parāda, ka nanosilikai nav būtiskas ietekmes (~14%) uz stiepes stiprības palielinājumu. Atkārtotās pārbaudēs iegūta līdz 6% rezultātu sakritība. Sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar šķiedrām uzrāda par ~10% lielāku stiepes stiprību nekā bez šķiedrām.

- **Šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē**

Eksperimentālās pārbaudes parāda, ka cementa kompozītam agrā vecumā, kā arī cementa kompozīta paraugiem, kas pirms tam nav pietiekami ilgi žuvuši, šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē ir vērtas pretējā virzienā. Kā redzams, tad sākotnēji (elastīgajā apgabalā) paraugi deformējas lineāri, atbilstoši klasiskajai cementa kompozīta spriegumu un deformāciju diagrammai, bet paraugus atstājot zem slodzes ilglaicīgi, deformāciju lielums par ~7–30% samazinās (līknes dilst), kas ir izskaidrojams ar to, ka stiepes vienasīgās deformācijas ir vairakkārt mazākas par žūšanas rukuma vienasīgajām deformācijām un tās ir vērstas pretējos virzienos. Iegūtie rezultāti pierāda, ka iekšējie spēki materiālā varbūt daudzkārt lielāki par ārējiem, jo neskatoties uz to, ka paraugs tika pakļauts ārēja spriegumstāvoklim – stiepei, tas iekšējo spēku ietekmē saruka, radot paraugā spiedi. Tā pat eksperimentāli iegūts, ka jo vecāks paraugs (līdz 3 gadiem), jo paraugs uzrāda līdz pat 18% lielākas šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē. Sākotnēji šķiet, ka tā ir rupja kļūda, jo cementa kompozīta stiprības hipotēze liecina, ka stiprība turpina augt arī pēc cementa kompozīta nosacītā standartvecuma (28 dienas) sasniegšanas un deformācijas laikā samazinās. Šī īpatnība izskaidrojams ar to, ka vecākais paraugs ir pilnībā izžuvis un tajā vairs nenorit žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, kas samazina šļūdes vienasīgo deformāciju lielumu stiepē. Lai noteiktu objektīvas šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē turpmāk būtu nepieciešams paralēli noteikt šādu paraugu žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas.

Šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem ar PVA šķiedrām pie konstanta stiepes slodzes līmeņa uzrāda par ~23% mazākas šļūdes vienasīgās

deformācijas stiepē nekā bez šķiedrām, kas sakrīt ar vispārējo hipotēzi, ka šķiedras samazina stiepes radītās vienasīgās deformācijas.

Šļūdes vienasīgās deformācijas stiepē iegūtas, izmantojot divu veidu paraugus – CT un kuponveida. Eksperimentālie rezultāti rāda, ka atšķirība starp abu paraugu rezultātiem pēc divu dienu slogojuma ir tieši 5x. Kuponveida paraugs pakļauts centriskai stiepē un iegūtie ilglaicīgie rādītāji, rāda objektīvu deformāciju lielumu, kuru tālāk var izmantot inženieraprēķinos.

- **Plaisu atvēruma lieluma noteikšana ar mērierīču palīdzību**

Eksperimentālās ilgzturības pārbaudes skaidri parāda un apstiprina šķiedru kokteiļa darbības hipotēzi, ka pielietojot šķiedru “kokteili” tiek panākta lielāka materiāla darbības un sabrukuma efektivitāte, nekā izmantojot tikai viena veida šķiedras, jo katram šķiedru garumam - tipam ir sava funkcija: īsās šķiedras nostiprina cementa matricu un ir atbildīgas par plaisu atvēruma un mazo plaisu attīstību, tās tāpat veic garo šķiedru iespīlēšanu, bet garās šķiedras kontrolē lielās plaisas, savieno lielās plaisas, veidojot šķiedru tiltus un nepieļauj cementa kompozīta traušu, pēkšņu sabrukumu, kas īpaši svarīgi nesošo konstrukciju ekspluatācijā (Brandt, 2008).

Iegūtajās cementa kompozītu stiepes slodzes-pārvietojumu līknēs var identificēt vairākus plaisu attīstības posmus: pirmais posms no nulles slodžu lieluma līdz ~60–80% no graužošās slodzes, kas atbilst līknes elastīgās daļas augošajam posmam un, kur parādās mikroplaisas un nav vēl parādījusies galvenā plaisa. Otrais posms no ~60–80% no graužošās slodzes līdz graužošai slodzei, kurā parādās un stabilizējās galvenā plaisa un tas norit līdz materiāls sasniedz tā graužošo vērtību. Trešais posms no graužošās slodzes līdz ~60% no graužošās slodzes, kur pārvietojumi sāk strauji pieaug un plaisas sāk atvērties un kur slodzes – spriegumu līkne raksturs atkal ir gandrīz lineārs. Pēdējā – ceturtajā posmā, kur viens vai abi materiāli ir to nelineārajā posmā un plaisas platums turpina strauji palielināties līdz materiāls sabrūk (Naaman, 1996).

Salīdzinot maksimālo plaisas atvēršanās platumu, pie kāda plaisa sāk atvērties, ir skaidri redzams, ka NS PVA ir daudz padevīgāks un plaisas maksimālais atvērums ir par 35.3% lielāks nekā MS PVA.

Eksperimentālie dati, kas iegūti uz jaunizveidotā DTU stenda apstiprina, ka šī iekārta ir derīga un ir izmantojama stiepes slodzes noteikšanai, jo iegūta 4-8% rezultātu sakritība ar universālās iekārtas „Instron” rezultātiem, bet iegūtie līkņu raksturi ir atšķirīgi, kas izskaidrojams ar universālās iekārtas sākotnējo tukšgaitu. Eksperimentālie dati, kas iegūti uz DTU jaunizveidotās iekārtas ir precīzāki un tuvāk atbilst cementa kompozīta stiprību – pārvietojumu diagrammu līkņu raksturam. Tāpat iegūtie dati uzrāda labu sakritību ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas metodes datiem. Līdz ar to jāsecina, ka šāda jaunizveidotā iekārta ir precīzāka un atbilstošāka mazu izmēru paraugiem (150 × 150 × 12 mm) un deformāciju jūtīgiem, augstas stiprības cementa kompozītiem.

Salīdzinot stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma rezultātus, noskaidrots, ka augstas stiprības cementa kompozītu stiepes stiprība ir 28% lielāka, nekā parastas stiprības cementa kompozītiem un materiāla pēcdarbība pēc kritiskā stiepes sprieguma sasniegšanas ir krasi atšķirīga. Jo parastas stiprības cementa kompozīti uzreiz pēc stiepes graužošās slodzes sasniegšanas sabrūk, bet augstu stiprību sabrukums iestājas ar noilgumu, kas saistīts ar šķiedru pakāpenisku pārtrūkšanu, izraušanos.

Neskatoties uz to, ka NS PVA uzrāda par 4–6% mazāku spiedes stiprības pieaugumu nekā MS PVA, citi pētījumi apliecina, ka nanosilikas klātbūtne uzlabo plaisu attīstības īpašības. NS PVA uzrādīja par 18,7% augstāku lūzuma izturību, 36,6% augstāku lūzumu enerģiju. Lūzuma enerģijas vērtības šādiem cementa kompozītiem ir 15–24 N/m, kas pierāda, ka tie trauslāki stiepes slogojumā un ir lielāka plaisu iespējamība salīdzinājumā ar normālu betonu (35–70 N/m). Plaisas galā pirms plaisas progresēšanas rodas spriegumi, kas pēc teorētiskā aprēķina ir bezgalīgi, bet ņemot vērā FPZ darbību un tās garumu spriegumi tiek izlīdzināti un uzņemti pakāpeniski veidojoties mikroplaisām. Spriegumi plaisas galā NS PVA paraugiem ir par 29.2% lielāki nekā MS PVA.

- **Plaisu rašanās, tālāka attīstības, rakstura un plaisu atvēruma noteikšana ar digitālo attēlu pārvietojuma noteikšanas un analīzes metodiku**

Eksperimentāli pārbaudītās digitālo attēlu pārvietojuma noteikšanas un analīzes metodikas – „Imetrum” un GOM „Aramis” dod detalizētas, precīzi aprakstītas un līdzīga rakstura līknes, sasniegto gala vērtību atšķirība ir 6–17%. Metode ar “Imetrum” digitālo pārvietojumu mērītājs apraksta līknes daudz precīzāk, reģistrējot daudz detalizētākas pārvietojumu vērtības.

Ar datorprogrammu GOM „Aramis” iegūtie plaisu noteikšanas dati (ar 1 sekundes intervālu), parāda, ka cementa kompozīta mikroplaisas parādās, kad cementa kompozīts sasniedzis ~10–20% no graužošās stiprības. Pieaugot spriegumiem, mikroplaisas palielinās, apvienojas, stabilizējas un sasniedzot materiāla specifisko kritisko vērtību K_{IC} (spriegumu intensitātes faktors) ~60–80% no graužošās stiprības sākas galvenās plaisas veidošanās. Kad spriegumi plaisas galā ir sasnieguši savu kritisko vērtību, t.i. materiāls ir sasniedzis savu graužošo stiprību stiepē, un plaisa sāk atvērties. Cementa kompozītam sasniedzot savu graužošo stiprību, plaisas atvēruma lielums ir ~ līdz 0,005 mm. Pēc tam notiek plaisas atvēruma straujš palielinājums līdz materiāla sabrukumam.

Ar datorprogrammu GOM „Aramis” eksperimentāli iegūtie dati parāda plaisu zarojumu, mikro- un mazo plaisu rašanos, atvēršanos un aizvēršanos, kā arī to, ka patiesībā mikroplaisas un galvenā plaisa sākās, attīstās un stabilizējas ilgi pirms cementa kompozīts sasniedz graužošo stiprību, kamēr ar cilvēka aci plaisa saskatāma tikai pie plaisu atvēruma ~0,02 mm, kad cementa kompozīts jau ir sasniedzis robežstiprību un plaisa jau ir atvērusies.

Šī digital attēlu pārvietojumu noteikšanas metode apstiprina teoriju, ka cementa kompozīta mikroplaisāšana sākas cementa kompozīta slogojot virs 15-20% no graužošās slodzes un to, ka elementu slogot virs 60% no graužošās slodzes cementa kompozīta iekšējā struktūra

neatgriezeniski tiek sagrauta, līdz ar to samazinot tā nespēju un ilgtspējību. Tāpat tā liek spriest, ka slogojot liektus cementa kompozīta elementus virs 20% no graužošās slodzes, tūlītējai izliecei papildus pieskaitāma ilglaicīgā deformācija – šļūdes. Papildinošajā ietekmē izliece var pārsniegt pieļaujamo vērtību, mikroplaisas var pāraugt galvenajā plaisā, kas pat neturpinot augt neatgriezeniski maina iekšējo materiāla struktūru, samazinot elementa darba augstumu, nespēju, ilgizturību un ilgtspējību.

Dažādu cementa kompozītu ilgizturīgās pārbaudes apliecina, ka plaisas sākas prognozētajā vietā – iezāgējuma (*notch*) galā un izplatās virzienā uz parauga ārmalu pa iespējams īsāko ceļu. Plaisām, galvenokārt, ir taisns raksturs, mainot savu formu tikai saskaroties ar kādu iekšējo pildvielu. Poras un tukšumi uzskatāmi, kā cementa kompozīta vājinājumi, bet kā apliecina iegūtie rezultāti, plaisas ne vienmēr aug tukšumu un poru – vājinājumu vietās. Tāpat apskatot dažādu cementa kompozītu eksperimentālos plaisu datus, noteikts, ka visiem promocijas darba laikā pārbaudītajiem parastas un augstas stiprības cementa kompozītiem ar un bez šķiedrām, raksturīga viena galvenā plaisa, izņemot cementa inženierkompozītam ar PVA šķiedrām, tam raksturīga daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*), kas atspoguļojas kā viena vai vairākas galvenās plaisas un to zarojums. Eksperimentālie dati skaidri vizualizē, ka cementa kompozītam piejauktās šķiedras piesaista vairāk gaisu un cementa kompozīta paraugs paliek daudz neviendabīgāks, satur daudz vairāk poru.

Apvienotie eksperimentālie dati

Iegūtie dažādu cementa kompozītu eksperimentālie rezultāti apstiprina daudzu vadošo pētnieku (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch, Александровский u.c.) izteiktās hipotēzes, ka šļūdes deformācijas ietekmē cementa kompozīta blīvums, stiprība, jo cementa kompozīts ir blīvāks, jo tas ir stiprāks un mazāk šļūdē, kas izskaidrojams ar neaizpildīto gēla telpas relatīvo lielumu cementa akmeņi: par cik lielāka šī telpa, par tik mazāka stiprība un lielāka šļūdes deformācija. Gēla telpas lielums savukārt cieši saistīts ar cementa daudzumu un ū/c attiecību, kas kā zināms ir samazināts, lai sasniegtu cementa kompozīta stiprības pieaugumu. Kā arī virkni citu hipotēžu, kas saistītas ar cementa kompozīta vecumu, mitruma koncentrāciju, paraugu ģeometrisku formu (apkopotos rezultātus sk. Pielikumā 2.).

Agrā cementa kompozīta vecuma šļūdes vienasīgās deformāciju spiedē pārbaudes apstiprina hipotēzi, ka pieaugot cementa kompozīta vecumam, samazinās cementa kompozīta elastīgo deformāciju lielums un pieaug elastības moduļa vērtība, tāpat laikā samazinās arī šļūdes deformāciju lielums un samazinās šļūdes moduļa vērtība, kas izskaidrojams ar gēla daudzuma samazināšanos cementa akmeņi.

Eksperimentālie dati apstiprina, ka vispārīgi augstas stiprības cementa kompozīts šļūdē mazāk nekā parastas stiprības betons un šī atšķirība ir ~50%. Kas arī izskaidrojams ar to, ka augstas stiprības cementa kompozīti ir smalkgraudaināki, tātad to cementa kompozīta matricas pakojums ir blīvāks un šādi cementa kompozīti ir ar mazāku Ū/C attiecību.

Dažāda sastāva un stiprības cementa kompozītu eksperimentāli iegūtie dati uzrāda, ka augstas stiprības cementa kompozīta šļūdes koeficients, tāpat kā parastas stiprības cementa kompozītam ir robežās no 0,5 līdz 3, kas nesaskan ar literatūras avotiem, kas prognozē tā būtiski samazinošu vērtību. Tas nozīmē, ka parastu un augstas stiprības cementa kompozītu elastīgo un šļūdes deformāciju attiecība laikā saglabājas līdzīgās attiecībās.

Paraugi ar mazāku šķērsriezuma laukumu šļūdē līdz 30% mazāk un rūk līdz 12% mazāk nekā lielāka izmēra paraugi, kas varētu būt izskaidrojams ar mazāku žūšanas laukumu, kā arī mazāku iespējamo defektu iespējamību mazākā tilpuma dēļ – mēroga faktors.

Ar montmorilonīta minerālajai mikropiedevei nav būtiskas ietekmes uz cementa kompozīta stiprības un ilglaicīgo īpašību radītājiem.

Borsilikāta spuldžu stikla mikro- piedeva, kas daļēji – 20% aizvieto cementu, dod līdzvērtīgus rezultātus (atšķirība līdz 20%) ar references cementa kompozītam, kas pieļauj izmantot šādu jaunizveidotu, ekoloģiskāku, no otrreiz pārstrādāta materiāla izveidoto cementa kompozītu praktiskajā būvniecībā.

Tāpat eksperimentālajos rezultātos redzams, ka pievienotās PVA šķiedras uzlabo nevien parastas stiprības betonu stiepes stiprību un samazina plaisu atvēruma lielumu, kas ir paredzami, bet arī samazina šļūdes vienasīgo deformācijas lielumu (~50–80%).

Augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts bez PVA šķiedrām uzrādīja augstākus spiedes stiprības rādītājus gan dažādos cementa kompozīta vecumos (arī agrā), gan atšķirīgās mitruma koncentrācijas un kā kubiskai, tā cilindriskai stiprībai šī starpība ir robežās no 2–7 %, kas norāda, ka PVA šķiedrām nav ne uzlabojoša, ne arī būtiski pasliktinoša ietekme uz spiedes stiprības lielumu. Nelielā stiprību starpība varētu būt izskaidrojama ar to, ka šķiedru iejaukšana procesā tiek piesaistīts vairāk gaiss un šādu šķiedrainu cementa kompozītu ir tehnoloģiski grūtāk viendabīgi iestrādāt cementa kompozīta veidņos, līdz ar to cementa kompozīta sastāvs ir neviendabīgāks, poraināks.

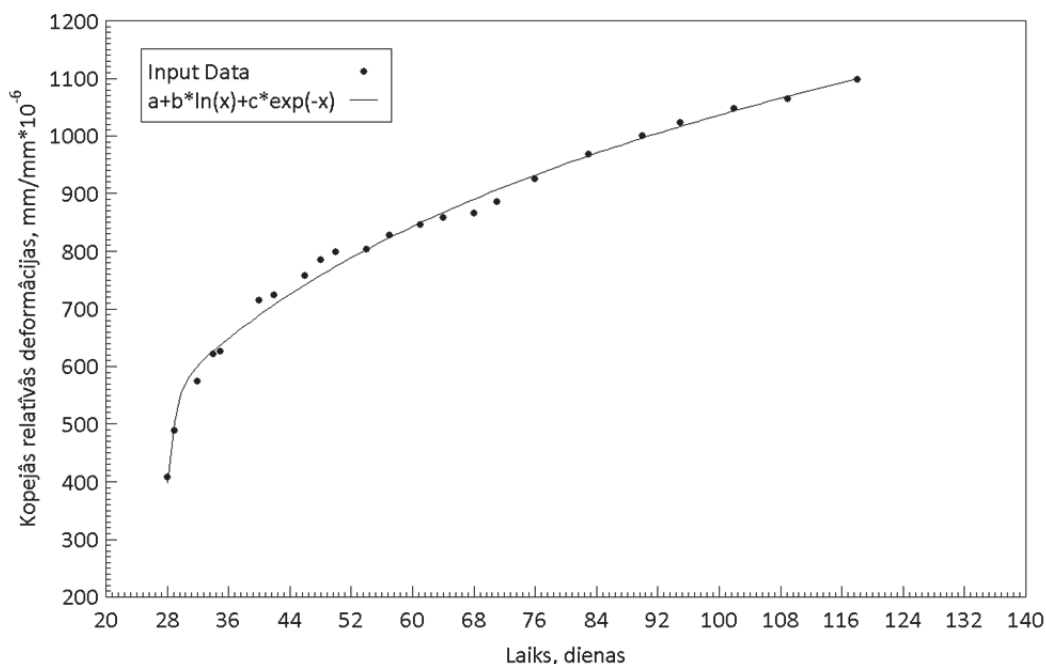
5. REKOMENDĀCIJAS

5.1. Materiālu darbības aprakstošie modeļi

Balstoties uz darbā iegūtajiem, eksperimentālajiem rezultātiem noteikti jauno augstas stiprības cementa kompozītu darbības aprakstošie vienādojumi, kas izmantojami no līdzīga materiāla veidotu konstrukciju šļūdes vienasīgo deformāciju un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju prognozēšanai.

Autora aprakstošie vienādojumi uzskatāmi parādīti vienam cementa kompozītam – augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili.

Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju rezultātu aprakstošās līknes sk. att. 5.1., 5.2. un to eksponentvienādojums ir $Y = a + b \cdot \ln(x) + c \cdot \exp(-x)$, kur a , b un c – eksperimentālās konstantes, x – laiks, dienās, determinācijas koeficients $R^2 = 0,9932$.

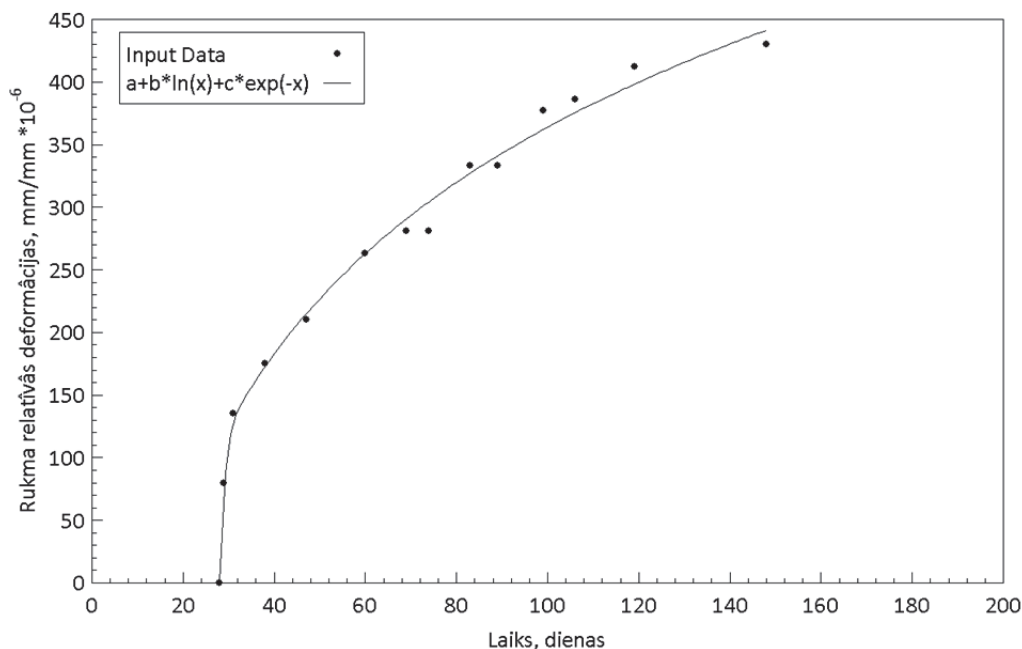


5.1. att. Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju aprakstošā līkne un tās vienādojums, augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

5.2. Rekomendācijas izmaiņām Eiropas standartā EN 1992–1–1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1–1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”” un Eiropas standartā EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana”

Standartos un normās šļūdes un rukuma parādības ir nepietiekoši izvērstas un sniegtās vērtības ir izmantojamas ierobežotas stiprības diapazona cementa kompozītiem. Lai turpmāk būtu iespējams projektēt un būvēt konstrukcijas no augstas stiprības cementa kompozītiem, ir nepieciešams veikt izmaiņas esošajā Eiropas standartā EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1–1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām””. Standartā

rekomendējamas izmaiņas, kas saistītas ar ierobežoto betona stiprības klasi. Stiprības klase ieteicams palielināt, lai tā kubiskās stiprības būtu virs 105 MPa. Tāpat būtu jāpārstrādā esošā šļūdes koeficientu noteikšanas shēma, paredzot to arī augstākas stiprības cementa kompozītiem vai ieviešot papildus pārejas koeficientus.



5.2. att. Žūšanas rukuma relatīvo, vienasīgo deformāciju aprakstošā līkne un tās vienādojums, augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Tāpat būtu jāpievieno atsauce, ka sarežģītu un nozīmīgu, kā arī deformāciju jūtīgu konstrukciju ilglaicīgo un ilgzturīgo īpašību prognozēšanai papildus jāveic laboratoriskās īpašību noteikšanas pārbaudes ar konstrukciju kalpošanai atbilstošiem, prognozētajiem apkārtējās vides apstākļiem, lai pārliecinātos par aprēķināto vai shematiski noteikto vērtību pareizību. Tāpat papildus ieteikts pievienot atsauci, ka esošie šļūdes koeficienti, esošās standartizētās, empīriskās līknes nav izmantojamas deformāciju jūtīgām un nestandarta konstrukcijām.

Lai veiktu korektus inženieraprēķinus, jaunajiem, uzlaboto sastāvu un īpašību cementa kompozītiem būtu nepieciešams izveidot eksperimentālo datu bibliotēku, apkopjot un analizējot eksperimentālos rezultātus un atrodot ģeometrisku formu, betona vecuma, slogojuma ilguma, apkārtējo vides apstākļu un citu būtisko ietekmes faktoru koeficientus, kas būtu izmantojami pie ilglaicīgo parametru vērtību precīzākas iegūšanas.

Eiropas standartu EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1–1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”” rekomendēts papildināt ar konstrukciju darbības prognozēšanas, ilglaicīgo parametru – šļūdes moduli, kas ir izmantojams pie ilgstoši slogotu konstrukciju pārvietojumu prognozēšanas. Tāpat būtu pievienojama atsauce, kā šāds parametrs ir aprēķināms.

Ar mērķi veikt laboratoriskas pārbaudes, Eiropā reglamentētais standarts EN 12390 „Sacietējuša betona testēšana” rekomendēts papildināt ar sacietējuša betona šļūdes vienasīgo

deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām, kurās būtu aprakstītas testa procedūras un datu ieguve un tālāka datu izmantošana šļūdes koeficienta, īpatnējās šļūdes un šļūdes moduļa aprēķināšana. Standartu tāpat rekomendēts papildināt ar plaisu attīstības izpētes noteikšanas metodikām – digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodiku.

Konstrukciju darbības prognozēšanai ilgstošas slodzes ietekmē, rekomendējams lietot kopējo šļūdes vienasīgo (spiedes gadījumā) un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju vērtību, jo abu parādības summējas un tādējādi sniedz nelabvēlīgāko gadījumu, kas būs vērsts uz konstrukciju projektēšanas drošības pusi.

Lai noteiktu korektas šļūdes vienasīgās deformācijas, kas īpaši attiecināms uz cementa kompozītiem agrā vecumā, kad cementa kompozīts vēl nav sasniedzis savu nosacīto gala stiprību un it īpaši pie korektu šļūdes deformāciju noteikšanas stiepē, no kopējām, vienasīgajām deformācijām ir jāatņem žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas, kas noteiktas identiska sastāva, parauga formas un ģeometrijas cementa kompozītiem un vienādos apkārtējās vides apstākļos kā šļūdes vienasīgās deformācijas. Deformācijas mērot, tāpat šļūdes paraugiem - parauga vidusdaļā.

Cementa kompozītu stiepes radītas, absolūtās deformācijas ir daudzkārt mazākas par spiedes radītām deformācijām, līdz ar to ir problemātiska šādu deformāciju lieluma reģistrēšana, lai noteiktu precīzas šļūdes vienasīgās un žūšanas rukuma vienasīgās deformāciju vērtības, ieteicams lietot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodes.

5.3. Ietikumi jauno cementa kompozītu sastāvu izveidē un īpašību noteikšanā

Promocijas darba laikā eksperimentāli noskaidrotas dažādu, jauno cementa kompozītu īslaicīgās, ilglaicīgās un ilgzturīgās īpašības kādas līdz šim nav bijušas noskaidrotas. Lai veiktu jauno sastāvu uzlabošanu un to tālāku izmantošanu praktiskajā būvniecībā, eksperimentālās pārbaudes ir nepieciešams atkārtot, palielinot paraugu statistisko daudzumu.

Promocijas darbā iesāktos, augstas stiprības cementa kompozītu ilglaicīgos, eksperimentālos un analītiskos pētījumus nākotnē būtu nepieciešams turpināt, pārbaudot cita veida augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītus, lai atrastu racionāli un optimāli labākos cementa kompozītu sastāvus mūsdienu paaugstinātajām, konstruktīvajām prasībām – paaugstinātām slodzēm, palielinātiem konstruktīvo elementu laidumiem, samazinātiem šķērsriezuma izmēriem, pieaugošajai elementu ģeometriskajai sarežģītībai un konstrukciju drošai ekspluatācijai, ilglaicībai un ilgtspējībai. Kā arī turpinot veidot eksperimentālo datu statistisko bibliotēku, kas nepieciešama precīzu pārejas koeficientu un augstāku stiprību cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai, kā arī precīzu aprakstošo vienādojumu noteikšanai.

SECINĀJUMI

Promocijas darbā izvirzītais mērķis un uzdevumi ir sasniegti. Pētījums sniedz metodoloģiju īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu (ISCK) šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un stiepē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanai, kā arī stiepes plaisu attīstības izpētes veikšanai un analīzei.

Promocijas darba rezultātā ir iegūti šādi galvenie secinājumi.

1. Izstrādātā īpaši smalkgraudainu (≤ 5 mm) cementa kompozītu šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē, stiepē un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju noteikšanas un stiepes plaisu attīstības izpētes metodoloģija dod iespēju laboratorijas apstākļos noteikt reālo parastas ($\bar{u}/c \geq 0,45$; $f_{ck28} \approx 12-40$ MPa), augstas ($\bar{u}/c \leq 0,4$; $f_{ck28} \approx 40-120$ MPa) un sevišķi augstas ($\bar{u}/c \geq 0,2$; $f_{ck28} \approx 120-400$ MPa) stiprības ISCK šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma deformācijas un plaisu atvēruma lieluma vērtības, kuras nav iespējams noteikt ar esošajām standartizētajām metodikām un empīriskajiem modeļiem.
2. Metodoloģija aprobēta, izmantojot 15 dažādu parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības ISCK dažāda vecuma un atšķirīgu ģeometrisku formu paraugus, divās mitruma koncentrācijās, pie konstanta slogojuma. Aprobācijas laikā eksperimentāli noteiktas jauno cementa kompozītu spiedes un stiepes stiprības, elastības moduļu, šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē un stiepē, žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas un stiepes plaisu atvēruma lieluma vērtības, kā arī veikta stiepes plaisu rašanās, attīstības un rakstura izpēte, kas līdz šim šādiem materiāliem nav noteikts. Noskaidrots, ka pie vidējās aritmētiskās ticamības 95% spiedes stiprības maksimālais variāciju koeficients (V) ir intervālā 2–8% un ilglaicīgi slogotu paraugu kopējo vienasīgo deformāciju maksimālais V atrodas intervālā 16–22%, kas ir ļoti labs rādītājs uz cementa bāzes veidotiem materiāliem.
3. Iegūtie rezultāti pierāda, ka gan parastas, gan augstas stiprības cementa kompozītiem elastīgo deformāciju (slodzes pielikšanas brīdī) un šļūdes deformāciju attiecības izmaiņas laikā ir robežās no 0,5 līdz 3,0, kas nesaskan ar EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana”, kurā līdz ar stiprības pieaugumu tiek prognozēts šļūdes koeficienta lieluma samazinājums.
4. Pārveidotais šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stands stiepē un adaptētais šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stands spiedē dod iespēju pārbaudīt cementa kompozītus ar pildvielu maksimālo izmēru līdz 5 mm, izmantot paraugus (≤ 70 mm), kas vairāk raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem un to konstrukciju izmēriem. Izmantojot šos standus, paraugiem ir iespējams pielikt konstantu slodzi un noturēt to nemainīgu ilgu laika posmu, eksperimentu laikā nav nepieciešamas spriegumu līmeņa korekcijas, kalibrēšanas līknes ir lineāras, nav jāpatērē energoresursi,

vienlaikus nodrošinot materiālu ietaupījumu. Būtiski pieminēt, ka nekur pasaulē nav izstrādāts standarts cementa kompozītu šļūdes deformāciju stiepē noteikšanai.

5. Jaunais, vienasīgais pārbaudes stends stiepē nodrošina plaisu un mikroplaisu attīstības izpēti. Eksperimentāli iegūtie spriegumu-deformāciju līkņu raksturi ir tuvāki teorētiskajiem pieņēmumiem un citu autoru rezultātiem, kā arī uzrāda labu sakritību ar datiem, kas iegūti ar digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodiku. Eksperimentālā aprobācija pierāda, ka jaunais, vienasīgais pārbaudes stends stiepē ir piemērots plaisu un mikroplaisu izpētei un ir atbilstošāks augstas un sevišķi augstas stiprības ISCK maza izmēra paraugiem ($150 \times 150 \times 12$ un $100 \times 50 \times 12$ mm) salīdzinājumā ar universālajām pārbaudes iekārtām, kas nav piemērotas paraugu mazajiem izmēriem, lēnajam sloģošanas ātrumam, kā arī mikroplaisu izpētei, jo rada pārāk lielas kustības, kas nedod iespēju iegūt asus augstas izšķirtspējas fotoattēlus.
6. Piedāvātais šļūdes vienasīgo deformāciju stiepē koncentrētās stiepes (CT) paraugs dod iespēju samazināt eksperimentālo rezultātu izkliedi un ir īpaši piemērots ISCK. Izmantojot CT paraugus, materiāla sabrukums ir prognozējams, deformāciju nolasīšanai tiek izmantots tikai viens digitālais deformāciju mērītājs atšķirībā no citu autoru piedāvātajām metodēm, kurās izmanto divus un vairāk deformāciju mērītājus. Atrisināts stiepes deformāciju reģistrēšanas jautājums, izmantojot digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodi ar $\pm 0,1 \mu\text{m}$ precizitāti, jo cementa kompozītu stiepes radītās, absolūtās deformācijas ir 10–20 reizes mazākas par spiedes radītajām deformācijām un ir problemātiska šāda lieluma deformāciju reģistrācija. Ar šo metodi iespējams noteikt un izpētīt mikroplaisu un plaisu rašanās, augšanas, zarošanās, apvienošanās, stabilizēšanās un atvēršanās stadijas. Šāda tipa metodes, iespējams, ir vienīgās, ar kuru palīdzību var noteikt specifiskas ekspluatācijas konstrukciju materiālu īpašības, kuriem nav pieļaujamas plaisu rašanās un attīstības pārbaudes.
7. Pašreiz lietotie šļūdes un rukuma deformāciju aprakstošie modeļi nav piemērojami un nekorekti apraksta jauno, atšķirīgo ISCK vienasīgo šļūdes un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju procesus, jo pastāv liela iekšējo un ārējo ietekmes faktoru nesakritība, tāpēc tiek piedāvāti jauni ISCK kopējo ilglaicīgo, vienasīgo deformāciju un žūšanas rukuma vienasīgo deformāciju procesus aprakstošie modeļi – eksponentvienādojumi, kas dod vislabāko sakritību ar eksperimentālajiem datiem (determinācijas koeficienti $R^2 = 0,993$) un ar kuru palīdzību var prognozēt no līdzīga materiāla veidotu konstrukciju elementu ilglaicīgo, kopējo un žūšanas rukuma vienasīgo deformēšanās lielumu.
8. Pierādīts, ka šļūdes deformācijas vienasīgā spiedē un stiepē noteikšanas metodes dod ticamus rezultātus ($V \leq 22\%$) un ir piemērotas dažādas stiprības cementa kompozītiem, tāpēc rekomendēts papildināt Eiropas reglamentēto standartu EN 12390 „Societējuša betona testēšana” ar šļūdes deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām.

LITERATŪRAS AVOTI

1. Aalborg White: CEM I 52,5R / Internets. - http://www.aalborgwhite.com/media/pdf_files/aalborg_white_cem_i_52.5r.pdf (piekļuves datums 2011.09.23).
2. ACI 209.1R-05 Report on Factors Affecting Shrinkage and Creep of Hardened Concrete // ACI Committee 209, 2005.
3. ACI 209.2R-08. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete // Reported by ACI Committee 209, 2008.
4. ACI 209R-92 Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures // Reported by ACI Committee 209, 1997.
5. ACI 224R-01 Control of Cracking in Concrete Structures // Reported by ACI Committee 224, 2001.
6. ACI 446.1R-91 Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties // Reported by ACI-Committee-446, 1999. (Reapproved 1999).
7. Acker P. Swelling, Shrinkage and Creep: A Mechanical Approach to Cement Hydration // Materials and Structures / Concrete Science and Engineering, Vol. 37, 2004, - pp 237-243.
8. Altoubat S. Early Age Creep and Shrinkage of Concrete with Shrinkage Reducing Admixtures (SRA) // Jordan Journal of Civil Engineering, Volume 4, No. 3, 2010, - pp.281-292.
9. Altoubat S., Lange D.A. The Pickett Effect in Early Age Concrete under Restrained Conditions // RILEM Publications SARL. – 2003. - pp. 133-143.
10. Asferg, J.L. Modeling of Concrete Fracture Applying the Extended Finite Element Method. Denmark: Technical University of Denmark, 2006.
11. ASTM-D2990-01 Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep- Rupture of Plastics // ASTM International Designation Committee D20 on Plastics and are the Direct Responsibility of Subcommittee D 20.10 on Mechanical Properties, United States of America, 2001.
12. ASTM-D7313-07 Standard Test Method for Determining Fracture Energy of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disk-Shaped Compact Tension Geometry // ASTM International Designation Committee, 2007, - pp. 7.
13. ASTM-E399 Standard Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. ASTM Standard Vol.03.01. // ASTM International Designation Committee, 1986.
14. ASTM-E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM Standard Vol.03.01. // ASTM International Designation Committee, 2005.
15. Atrushi D. S. Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling // Doctoral Thesis, 2003.
16. Bazant P. Z., Li G. H. Comprehensive Database on Concrete Creep and Shrinkage // Structural Engineering Report No. 08-3/A210c, 2008.
17. Bache H., Whittmann F. Fracture Mechanics in Design of Concrete And Concrete Structures, ed. – Switzerland: Elsevier, 1986.
18. Bajare D., Bumanis G., Shakhmenko G., Justs J. High Performance and Conventional Concrete Properties Affected by Ashes Obtained from Different Type of Grasses // American Concrete Institute, ACI Special Publication (289 SP), 2012, - pp. 317-330.
19. Balevičius R., Marčiukaitis G. Linear and Non-linear Creep Models for a Multi-Layered Concrete Composite //Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2013. - vol. 13, Issue 4 - pp. 472-490.
20. Batayneh M., Marie I., Asi I. Use of Selected Waste Materials In Concrete Mixes // Science Direct, Elsevier, Waste Management 27, 2007. - pp. 1870-1876.
21. Bazant P. Z. Prediction of Concrete Creep and Shrinkage: Past, Present and Future // Elsevir, Nuclear Engineering and Design 203, 2001, - pp. 27-38.
22. Bazant Z. P. Concrete Fracture Models: Testing and Practice //Engineering Fracture Mechanics 69, 2002. - pp. 165-205.
23. Bazant Z. P., Murphy W. P. Fracture Mechanics of Concrete - Structures Part I, USA: 1992.

24. Bazant Z. P., Wittmann F. H. (eds) Creep and Shrinkage in Concrete Structures // John Wiley and Sons Ltd., 1983.
25. Bazant Z., Hubler M., and Jirásek M. Improved Estimation of Long-Term Relaxation Function from Compliance Function of Aging Concrete // Journal of Engineering Mechanics. 2013. - vol. 139, Issue 2 - pp. 146–152.
26. Bažant Z., Prasannan S. Solidification Theory for Concrete Creep: Formulation // Journal of Engineering Mechanics. 1989. - vol. 115, no. 8 - pp. 1691–1703.
27. Bažant Z. P., Oh B. H. Crack Band Theory for Fracture of Concrete. Materials and Structures // RILEM, 16(93), 1983. - pp. 155–177.
28. Bentz D. P. A Review of Early-Age Properties of Cement-Based Materials // Cement and Concrete Research 38, 2008, - pp. 196–204.
29. Berfield T. A., Patel J. K., Shimmin R. G., Braun P. V., Lambros J., Sottos N. R. Micro and Nanoscale Deformation Measurement of Surface and Internal Planes Via Digital Image Correlation // Experimental Mechanics. – 2007. - vol. 47 - pp. 51-62.
30. Betterman L., Ouyang, C. & Shah, S.P. Fiber-Matrix Interaction in Microfiber-Reinforced Mortar // Advanced Cement Based Materials, 2(2), 1995. - pp. 53–61.
31. Bettten J., Creep mechanics, 3rd edition, Springer, Germany, 2008.
32. Bissonnette B., Pigeon M. Tensile Creep at Early Ages of Ordinary Silica Fume and Fiber Reinforced Concretes // Cem. Concr. Res. 25 (5), 1995. - pp. 1075–1085.
33. Bjontegaard O., Kanstad T., Sellevold E. J., Hammer T. A. Stress Inducing Deformations and Mechanical Properties of High-Performance Concrete at Very-Early-Ages // 5th Int. Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete. - Sandefjord, Norway, June 20-24, 1999. - pp. 1027-1040.
34. Bokalders V., Bloka M. Ekoloģiskās būvniecības rokasgrāmata. Kā projektēt veselīgas, racionālas un ilgtspējīgas ēkas. – Rīga: Domu spēks, 2013.
35. Boshoff W. P. Time-Dependent Behaviour of Engineered Cement-Based Composites // Stellenbosch University, 2007.
36. Brandt A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) Composites After Over 40 Years of Development in Building and Civil Engineering // Composite Structures. - 2008. - vol. 86 - pp. 3-9.
37. Branson D. E. Deformation of Concrete Structures. - McGraw-Hill Book Company, 1977.
38. Brauns J. „Stiegrota betona konstrukcijas. Eurokodeks EC2 konstrukciju projektēšanā”, Jelgava, 2007. - 154. lpp.
39. Brauns J. Stiegrbetons. Materiāli, īpašības un aprēķins. – Jelgava: LLU, 2000. – 87. lpp.
40. Breugel. Jón Guðni Guðmundsson Long-term creep and shrinkage in concrete using porous aggregate – the effects of elastic modulus, 1992.
41. Brooks J. J. 30 – Years Creep and Shrinkage of Concrete // Magazine of Concrete Research, 2005, 57, No. 9, - pp. 545–556.
42. Bruhwiler E., Broz J. J., Saouma V. Fracture Model Evaluation of Dam Concrete, 1998.
43. Bulavs F, Rādiņš I. Būvmehānikas ievadkurss. – Rīga: RTU izdevniecība, 2006.
44. Bumanis G., Sprince A. Betona agrās šļūdes deformāciju eksperimentāla izpēte // Diplomprojekts. RTU, Rīga, 2012.
45. Buyukozturk O. Creep and Shrinkage Deformation. 1.054/1.541 // Mechanics and Design of Concrete Structures (3-0-9). 2004. - Outline 5. Spring - pp. 1-11.
46. Čajs T., Mandrikovs A. Dzelzbetona konstrukcijas. Pamatnes un pamati. – Rīga: Zvaigzne, 1991.
47. Callister W. D., Rethwisch D. G. Fundamentals of Materials Science and Engineering // An Integrated Approach. 3rd edition,. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008. - pp. 326.
48. Darwin D. et al. Cracking of Concrete Members in Direct Tension // Reported by ACI Committee 224., 1997. - 92 (Reapproved).
49. Fanourakis G. C. The Relative Role of Creep Coefficient and Elastic Modulus In Concrete Creep Prediction Models // Бетон и железобетон взгляд в будущее, RILEM, Москва, 2014.

50. Fanourakis G. C., Ballim Y. Predicting Creep Deformation of Concrete: a Comparison of Results from Different Investigations // *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.* - pp. 2.
51. Fehling E., Schmidt M., Walraven J., Leutbecher T., Frolich S. Ultra-High Performance Concrete UHPC // *Ernst&Sohn.* – Berlin: 2014.
52. Fischer G., Li V. Effect of Fiber Reinforcement on the Response of Structural Members // *Engineering Fracture Mechanics.* – 2007. - vol. 74 - pp. 258-272.
53. Gilbert R. I. Time Effects in Concrete Structures // *Elsevier Science Publishers,* – Amsterdam: 1988.
54. Gilbert R. I., Ranzi G. Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures // *London and New York: Spon Press, 2011.* - pp. 3, 5, 9-11, 25-30, 26, 27, 33.
55. Goel R.; Kumar R.; Paul D.K. Comparative Study of Various Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete // *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2007,* - pp. 249-26.
56. Granger L., Torrenti J. M., Acker P. Thoughts about drying shrinkage: Experimental results and quantification of structural drying creep // *Materials and Structures/ Materiaux et Constructions.* – 1997. - Vol. 30 - pp. 589.
57. Graybeal B. A. Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, Research, Development, and Technology Turner-Fairbank Highway Research Center, 2006.
58. Gross D., Seelig, T. Fracture Mechanics: With an Introduction to Micromechanics, F. F. Ling, ed. // *Mechanical Engineering.* – 2011. - 2nd Edition.
59. Guomin J. Cracking risk of concrete structures in the hardening phase: Experiments, material modeling and finite element analysis. Norway: Doctoral Thesis Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, 2008.
60. Gutch A., Rosta'sy F.S. Young concrete under high tensile stresses - creep, relaxation and cracking, in // R. Springenschmidt (Ed.), *Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceedings of the International RILEM Symposium.* London: E&FN Spon, 1995. - pp. 111–118.
61. Hauggaard A. B., Damkilde L., Hansen P. F., Hansen J. H., Christensen S. L., Nielsen A. HETEK, Control of Early Age Cracking in Concrete, Phase 3: Creep in Concrete // *Danish Road Directorate, Lyngby, 1997.*
62. Hauggaard A. B., Damkilde L., Hansen P. F., Hansen J. H., Christensen S. L., Nielsen A. HETEK, Control of Early Age Cracking in Concrete, Phases 4 and 5: Material Modelling, Continuum Approach // *The Danish Road Directorate, Lyngby, 1997.*
63. Hauggaard A. B., Damkilde L., Hansen P. F., Transitional thermal creep of early age concrete // *J. Eng. Mech.* 125 (4), 1999, - pp. 458 – 465.
64. Hillerborg A. Analysis of one single crack. *Developments in Civil Engineering, 1983.* - pp. 223–249.
65. Hillerborg A. Application of fracture mechanics to concrete. Lund, Sweden, 1988.
66. Hillerborg A., Modeer M., Petersson P. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research, 6(6).* - 1976. - pp. 773–781.
67. Hilsdorf H.K., Brameshuber W. Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete. *International Journal of Fracture, 1(51).* – 1991. pp. 61–72.
68. Jenq, Y.S., Shah, S.P. Mixed Mode Fracture Parameters of Concrete. // *Proceedings, SEM-RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, S. P. Shah and S. E. Swartz, eds. 1987.* - pp. 359–369.
69. Jirasek M., Dobrusky S. Accuracy of Concrete Creep Predictions Based on Extrapolation of Short-Time Data // *5th International Conference on Reliable Engineering Computing, 2012,* - pp. 197-208.
70. Justs J., Shakhmenko G. Effect of Mix Proportions and Curing Regimes on Ultra High Performance Concrete // *Proceedings of 8th FIB International Symposium in Civil Engineering, Denmark, Lyngby, 20.-23. June, 2010,* - pp. 425 - 430.

71. Justs J., Bajare D., Shakhmenko G., Korjakins A. Ultra High Performance Concrete Hardening Under Pressure // in Proc. of the International Scientific Conference "Civil Engineering'11" of Latvia University of Agriculture, May 12-13, 2011, Jelgava, Latvia, - pp. 38-43
72. Karihaloo B. Fracture mechanics and structural concrete. Longman Scientific and Technical. 1995.
73. Korjakins A. Atkritumi palīdz izgudrot jaunus materiālus // Dienas Bizness. – 2011. – janvāris.
74. Korjakins A., Shakhmenko G., Bumanis G. The Use of Borosilicate Glass Waste as Concrete Micro-Filler // Proceeding of 2nd International Conference of Advanced Construction. – 2010. - Kaunas, Lithuania - pp. 129-134.
75. Kovler K. Drying creep of concrete in terms of age-adjusted effective modulus method. – 1997. - pp. 2-3.
76. Kovler K., Igarashi S., Bentur A. Tensile creep behavior of high strength concretes at early ages. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, – 1999. - Vol. 32, June – pp. 383-387.
77. Kruše P. un M., Althaus D., Gabriēls I. Ekoloģiskā būvniecība. – Rīga: VAK apvienība „Arkādija” sadarbībā ar „Bundstift”, „Bildungswerk Umwelt und Kultur” un a/s „Preses nams”, 1995.
78. Langeb D. A., Altoubatb S. A., Stanga H. Tensile basic creep of early-age concrete under constant load // Lennart Østergaarda*, David A. Langeb, Salah A. Altoubatb, Henrik Stanga Cement and Concrete Research 31. – 2001. - pp. 1895–1899.
79. Latvijas Ilgtspējīgas būvniecības padome / Internets. - <http://www.ibp.lv/lv/kontakti/> (piekļuves datums 2015.01.06).
80. Latvijas standarts LVS EN 12390 „Societējuša betona testēšana”.
81. Latvijas standarts LVS EN 1992-1-1:2005 Betona konstrukciju projektēšana. 1-1.daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām” – EC2.
82. Li V. C., Liang E. Fracture Processes in Concrete and Fiber Reinforced Cementitious Composites, ASCEJ Eng Mech 1126. - 1986. - pp. 566–586.
83. Lorman W. R. The Theory of Concrete Creep // Proceedings, ASTM. - 1940. - V. 40 - pp. 1082-1102.
84. Mageswari M., Videvelli B. The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete // The Open Civil Engineering Journal, 4, 2010. - pp. 65-71.
85. Mageswari M., Vidivelli B. The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete // The Open Civil Engineering Journal, 2010. - pp. 65 71.
86. Marangon E., Filho Toledo R. D., Fairbairn E. M. R. Basic Creep Under Compression and Direct Tension Loads of Self-Compacting-Steel Fibres Reinforced Concrete // G. J. Parra-Montesinos, H.W.Reinhardt, and A.E.Naaman (Eds): HPRCC 6, Rilem 2012. - pp. 171 178.
87. Mehta P. K., Concrete: Microstructure, Properties and Materials, 4.3. Drying Shrinkage and Creep, 2005.
88. Mehta P. K., Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties and Materials. – McGraw Hill Professional Publishing. - New York: 2006. - pp. 11, 14, 21-23, 88, 95-96, 100-101, 103-104, 106-107, 109, 456, 586.
89. Model Code 2010 // Final draft. - 2012. - Fib bulletin 65: Volume 1.
90. Mola F., Pellegrini L. M. The New Model for Creep of Concrete in FIP MODEL CODE 2010 // 37th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 2012.
91. Mucambe E. S. D., Gideon P. A. G. van Zijl. Creep and Shrinkage Prediction Models for Retaining Structures in South Africa // Master Thesis of Science in Engineering at the University of Stellenbosch, December 2010.
92. Naaman A. E., Reinhardt H. W. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites // RILEM Publications S.A.R.L., Proceedings PRO6, France, 2003.
93. Naaman A. E., Reinhardt H. W., Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites // Proceedings of 2nd International Workshop on HPRCC, Chapter 41, in High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: HPRCC 2, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, Editors, RILEM, No. 31, London: E. & FN Spon, 1996. - pp. 1-2.

94. Neville A., Aitcin P. C. High Performance Concrete – An overview //Materials and Structures, RILEM, vol.31, 1998, pp.111-117.
95. Neville A., Brooks J. J. Concrete Technology. - Prentice-Hall, 2010.
96. Neville A. M. Creep of Concrete // Plain, Reinforced and Prestressed. North Holland Publishing Co. – Amsterdam: 1970.
97. Neville A. M. Properties of Concrete, 4th edition, 1995.
98. Neville A. M., Creep of Concrete and Behaviour of Structures // Concrete International. - 2002. May - V.24, No.5.
99. Neville A. M., Dilger W. H., Brooks J. J. Creep of Plain and Structural Concrete. – London: Construction Press, 1983.- pp. 8-11, 62, 70, 73-74, 113, 140, 158-163, 246-251, 255.
100. Neville A. M., Meyers B. L. Creep of Concrete Influencing Factors and Prediction // Symposium on Creep of Concrete, SP-9 American Concrete Institute. – Detroit: 1964. - pp. 1-33.
101. Nielsen L. F. Composite creep analysis of concrete a rational, incremental stress-strain approach // BYG DTU R-178, 2014.
102. Omar W., Leader, Ahmad Mahir Makhtar, Tan Pui Lai, Omar R., Ng Ming Kwong. Creep, shrinkage and elastic modulus of Malaysian concrete // Project No: LPIPM/CREAM/UPP 02-02-06-09-23. Final report. June 2008.
103. Omar W., Makhtar A. M., Lai T. P., Omar R., Kwong M. N. Creep, Shrinkage And Elastic Modulus Of Malaysian Concrete // PROJECT NO: LPIPM/CREAM/UPP 02-02-06-09-23, 2008.
104. Østergaarda L., Langeb D. A., Altoubatb S. A., Stanga H. Tensile basic Creep of Early-Age Concrete under Constant Load // Pergamon, Cement and Concrete Research 31. - 2001. - pp. 1895–1899.
105. Paegle I., Fischer G. Evaluation of standardized Test Methods to Characterize Fiber Reinforced Cement Composites // Proceedings of the Second RILEM International Conference on Strain Hardening Cement Composites (SHCC2-Rio), Rio de Janeiro, Brazil: December 12-14, 2011. - pp. 9-16.
106. Paegle I., Fischer G. Evaluation of test Methods Used to Characterize Fiber Reinforced Cementitious Composites // Proceeding of the International Conference „Innovative Materials, Structures and Technologies” RTU Press: 2014. - pp. 121- 126.
107. Panovko J., Leppiks A., Strēķis A., Materiālu pretestības kurss. – Rīga: Latvijas valsts izdevniecība, 1955. - 427-428. Ipp.
108. Park S., Lee B. Studies on Expansion Properties in Mortar Containing Waste Glass and Fibers // Science Direct, Elsevier, Cement and Concrete Research 34. – 2004. - pp. 1145–1152.
109. Pease B. J. The Role of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage, Stress Development, and Cracking // Purdue University: 2005.
110. Pease B. J. Influence of Concrete Cracking on Ingress and Reinforcement Corrosion, Ph.D. Thesis, DTU: 2010.
111. Penny R. K., Marriott D. L. Design for Creep. Chapman and Hall, London, 1995.
112. Pereira E. B., Fischer G., Barros J. A. O. Effect of Hybrid Fiber Reinforcement on the Cracking Process in Fiber Reinforced Cementitious Composites // Cement and Concrete Composites, vol. 34, Issue 10, 2012. - pp. 1114-1123.
113. Pereira E. B., Fischer G., Barros J. A. O. Image-based Detection and Analysis of Crack Propagation in Cementitious Composites // International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Throught Science and Engineering. 2011. - pp. 343 – 350.
114. Pereira E. B., Fischer G., Barros J. A. O., Lepech M. Crack Formation and Tensile Stress-Crack Opening Behavior of Fiber Reinforced Cementitious Composites (FRCC) // Proceedings of Fra MCoS - 7, 2010. - pp. 1638-1647.
115. Pereira E. N. B. Processes of Cracking in Strain Hardening in Cementitious Composites // Doctoral Thesis of Universidade do Minho Escola de Engenharia, 2012.
116. Persson B. Influence of Maturity on Creep of High Performance Concrete with Sealed Curing // Materials and Structures, Vol. 32, 1999. - pp. 506-519.

117. Physical Properties of Elkem Microsilica / Internets. - <http://www.refractories.elkem.com> (piekļuves datums 2011.09.23).
118. Physical Properties of Elkem Nanosilika / Internets. - <http://www.elkem.com/Global/ESM/quality-safety/safety-data-sheets/silica-products/Nano-Silica-999-psi-EU-GHS.pdf> (piekļuves datums 2011.09.23).
119. Ping Z. Time-dependent Crack Growth and Fracture in Concrete // PhD Thesis, Lund, Sweden: 1992.
120. Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives // Materials and Structures. – 2009. - vol. 42 - pp. 1261-1281.
121. Rashid M., Mansur M., Paramasivam P. Correlations between Mechanical Properties of High-Strength Concrete. J. Mater. Civ. Eng., 2002, 14(3), - pp. 230-238.
122. Reinhardt H. W., Naaman A. E. High Performance Fiber Reinforced Cement Composite – E&FN Spon, RILEM, London, 1992.
123. Rilem TC 107 - CSP: Creep and Shrinkage Prediction Models: Principles of Their Formation. Measurement of Time-Dependent Strains of Concrete // Materials and Structure. - October 1998. - Vol. 31, - pp. 507-512.
124. Rilem TC 107 - GC: Guidelines for the Formulation of Creep and Shrinkage Prediction Models. Short Form of Creep and Shrinkage Prediction Model B3 for Structures of Medium Sensitivity // Materials and Structures. - December 1996. - Vol. 29 - pp. 587-593.
125. Rokugo K., Kanda T., Yokota H., Sakata N. Applications and Recommendations of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracking (HPFRCC) in Japan // Materials and Structures, RILEM, 2009, - pp. 1197-1208.
126. Rossi P., Tailhan J. L., Maou F., Gaillet L., Martin E. Basic Creep Behavior of Concretes Investigation of the Physical Mechanisms by Using Acoustic Emission // Elsevier, Cement and Concrete Research, 42, 2012, - pp. 61–73
127. Rusch H., Jungwirth D., Hisdorf H. K. Creep and Shrinkage. Their Effect on Behaviour of Concrete Structures // Springer Verlag New York Inc., New York, 1983. - pp. 6, 32.
128. Santos A., Guerra M. J. Betão armado e pre-esforçado. Fundamentos do betão pre-esforçado // Série Estruturas 1ª edição, 2006. - pp. 57-58.
129. Saulkalnes kvarca smiltis / Internets. - <http://www.saulkalne.lv/frakcija-0-1-0mm> (piekļuves datums 23.09.2011).
130. Scadelai M. A., Pinheiro L. M. Estruturas do concreto // Departamento de Engenharia de Estruturas, USP, EESC, 2003, 16.4.5.
131. Shah S., Ouyang C. Failure of concrete: fracture mechanics approach // Anales De Mecanica De La Fractura Vol. 9, 1992.
132. Shi C., Mo J. L. High Performance Construction Materials, Science and Applications // Engineering Materials for Technological Needs. World Scientific Publishing Co. – 2008. - Vol.1.
133. Shunzhi Q., Li V. C. Simplified Inverse Method for Determining the Tensile Strain Capacity of Strain Hardening Cementitious Composites // Journal of Advanced Concrete Technology Vol.5, No. 2, Japan Concrete Institute, 2007. - pp. 235-246.
134. Sikament 56 / Internets. -http://www.sika.lv/imagegallery/dokumenti/apraksti_LV/Betona_piedevas/Sikament-56_lv_c.pdf (piekļuves datums 2011.09.23).
135. Sobolev K., Ferrada-Gutiérrez M. How Nanotechnology Can Change the Concrete World // American Ceramic Society Bulletin. – 2005. - vol. 84, No. 11 - pp. 16-20.
136. Stang H. On the Applications of Cohesive Crack Modeling in Cementitious Materials. Materials and Structures, - 2006.
137. Sun W., Chen H., Luo X., Qian H. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete // The Department of Materials Science and Engineering. - Southeast University: China, 2000.
138. Tarnopolskii Y. M., Kincis T. Static Test Methods for Composites //Van Nostrand Reinhold Company, 1985.

139. Taylor M., Tam C., Gielen D. Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry // IEA-WBCSD workshop, Paris, France, 2006.
140. Totman C. A., Dempsey J. P., Design of Concrete Fracture Experiments // Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition, 2003.
141. Toutanji H., Xu B., Gilbert H., Lavin T. Properties of Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced High-Performance Organic Aggregate Cementitious Material: Converting brittle to plastic // Construction and Building Materials. - January 2010. - Volume 24, Issue 1 - pp. 1-10.
142. Transportation Research Circular E-C107, Control of Cracking in Concrete, Washington, 2006
143. Umehara H., Uehara T. Effect of Creep In Concrete at Early Ages on Thermal Stresses, Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, in: R. Springenschmidt (Ed.), Thermal Cracking in Concrete at Early Ages // Proceedings of the International RILEM Symposium, E&FN Spon, London, 1995. - pp. 79–86.
144. Usibe B. E., Etim I. P., Ushie J. O. Prediction of Creep Deformation in Concrete Using Some Design Code Models // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) – 2012. - Vol. 4, Issue 3, - pp. 49-53.
145. Vilciņa V. Atkritumi - to ietekme uz vidi un cilvēku veselību. Atkritumu apsaimniekošanas sistēmas attīstība Latvijā. – Rēzekne: Biedrība "Latvijas Zaļā josta", 2010.
146. Walraven J. C., Shen J-H. Non-linear Creep: A General Constitutive Model // in 'Creep and Shrinkage of Concrete', Proc. of the 5th International RILEM Symposium, Barcelona, E.& FN Spon, London, 1993.
147. Wang Y., Backer S., Li V. C. An Experimental Study of Synthetic Fiber Reinforced Cementitious Composites // Journal of Materials Science, 22, 1987, - pp. 4281 – 4291.
148. Westman G. Basic Creep And Relaxation of Young Concrete // in: R.Springenschmidt (Ed.), Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceedings of the International RILEM symposium, E&FN Spon. – London: 1995, - pp. 87– 94.
149. Westman G. Concrete Creep and Thermal Stresses // Doctoral Thesis, LULEA, 1999. - pp. 8.
150. Wight J. K., Macgregor J. G. Reinforced Concrete // Mechanics and Design. 6th Edition. Pearson Education, Inc., New Jersey, 2012. - pp. 67.
151. William D., Callister J. Materials Science and Engineering. 4th edition. - John Wiley and sons, Inc., 1997. - pp. 113.
152. Xi Y., Li Y., Xie Z., Lee J. S. Utilization of Solid Wastes (Waste Glass and Rubber Particles) as Aggregates in Concrete // International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, 2010.
153. Zehnder, A. T., Ph., D., Fracture Mechanics. 2010.
154. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – Стройиздат, Москва, 1973.
155. Кинцис Т. Я., Розе А. В., Жигун И. Г. Методы статических испытаний армированных пластиков. Зинатне, Рига, 1972.
156. Ковлер К., Йенсен О. М., Фаликман В. Как сделать хороший бетон еще лучше? // Технологии бетонов, Nr.1. 2005, / Internets. -<http://www.masterbetonov.ru/content/view/535/239/> (piekļuves datums 2012.08.19).
157. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. Издательство литературы по строительству, Москва, 1968.
158. Скудра А. М., Булавс Ф. Я., Роценс К. А. Ползучесть и статическая усталость армированных пластиков. – Зинатне, Рига, 1971.

PIELIKUMI

Pielikums Nr. 1

DARBĀ IZMANTOTIE DEFINĒJUMI UN TEORĒTISKĀS PAMATNOSTĀDNES

Cementa kompozīta un hidratētas cementa pastas struktūra

Cementa kompozīts ir daudzfāžu kompozīts materiāls, kas sastāv no rupjo pildvielu daļām, kuras ir iestrādātas javas pastā. Mikroskopiskā līmenī cementa pasta sastāv no nehidratētā cementa granulām, kuras ir iespiestas cementa hidratācijas produktu masā. Šie produkti ir cementa gels ar ūdeni piepildītu vai tukšu kapilāro poru daļēji caurejošu sistēmu. Visbeidzot, submikroskopiskajā līmenī cementa gels ir slikti izveidojušos saistītu daļu sajaukums, dažas šķiedru veidā vai adatveidīgas, bet vairākumā kā saburzītas lapas, kas veido bezgalīgu matēriju ar nepārtrauktu ūdens piepildītu gela poru sistēmu.

Svaiga cementa pasta ir plastisks cementa daļiņu pinums ūdenī, bet tikko pasta nostabilizējusies, tā noteikts vai bruto apjoms paliek aptuveni nemainīgs. Jebkurā hidratācijas stadijā sastingusi cementa pasta sastāv no vairāku savienojumu hidrātiem, kurus kopīgi sauc par gelu, tie ir kalcija hidroksīda kristāli un dažas citas komponentes. Hidratācijas procesā tukšumi tiek veidoti kā pārpalikumi no ūdens piepildītām telpām svaigā pastā. Šie tukšumi tiek saukti par kapilārām porām, bet iekš gela paši par sevi vēl eksistē iekšējie tukšumi, kurus sauc par gela porām.

Cementa gels sastāv no hidratētiem kalcija silikātiem. Hidratētajā cementa pastā lielākā daļa hidratācijas produktu ir cementa gels, kuram ir kolodiāli izmēri (apmēram 10 nm šķērsgrīzumā), un rezultējošā cementa gela masa ir ļoti poraina (apmēram 28 % no kopējuma), porām ir izmērs ap 1,5 nm. Tas nozīmē, ka vidēji cieta virsma var adsorbēt ne vairāk kā četras vai piecas ūdens molekulas. Cementa gels, saistīts ar kalcija hidroksīda kristāliem, piesaistās pie nehidratētām cementa daļiņām un aizpilda daļu no telpas, kura pastāvēja starp šīm daļām pirms hidratācijas. Pārpalikuma ūdens, kas ir nepieciešams hidratācijai aizpilda atlikušo telpu starp cementa graudiem, tas ir kapilāros tukšumus, kuri ir pat divas reizes lielāki nekā gela poras. Pie mitrās kopšanas un pietiekami zemās ū/c attiecības daži kapilārie tukšumi paliek segmentēti ar hidratācijas produktiem, bet ja nav tādas kopšanas, šie tukšumi paliek iztukšoti.

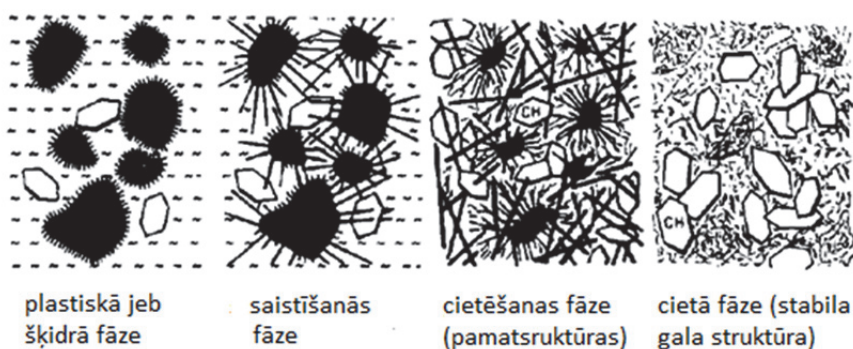
Kā zināms, ar ūdeni piesātināta cementa pasta pakļauta ārējās vides mitrumam, kas mazāks par vides piesātinājuma līmeni, nav ģeometriski stabila sistēma, galvenokārt tādēļ, ka C-S-H fiziski absorbētā ūdens zudumi rezultējas rukuma deformācijās. Līdzīgi, ja hidratētā cementa pasta ir pakļauta ilglaicīgas slodzes iedarbībai, atkarībā no pieliktās slodzes lieluma un darbības ilguma, C-S-H zaudēs lielu daudzumu fiziski absorbētā ūdens, kas pastā izpaudīsies kā šļūdes deformācijas. Tas nenozīmē, ka neeksistē citu iemeslu, kas izraisa cementa pastas šļūdi, taču absorbētā ūdens zudumi ilglaicīgas slodzes iedarbībā rādās ka ir visnozīmīgākais cēlonis (Neville *et al.*, 1983; Mehta *et al.*, 2005; Boshoff, 2007 u.c.).

Cementa kompozīta mehānisko īpašību attīstība

Cementa kompozīts agrā vecumā ir raksturojams kā sarežģītas mijiedarbības mehānisko īpašību attīstības produkts, kuram nepārtraukti mainās mehāniskās īpašības. Cementa kompozīta īpašības izmainās atšķirībā no cementa kompozīta dzīves cikla. Kopumā var izdalīt piecus cementa kompozīta dzīves ciklus (Atrushi, 2003):

- Plastiskā jeb šķidrās fāzes cikls;
- Saistīšanās cikls (aktīvs hidratācijas posms);
- Cietēšanas cikls (pamatstruktūras veidošanās posms);
- Cietā fāzes cikls (stabilas gala struktūras – lietojamības posms);
- Pārstrādes cikls (utilizācija).

Att. P1.2. ir parādītas četras, cementa pastas bez pildvielām, hidratācijas cikla skices.



P1.2. att. Cementa pastas hidratācijas ciklu skices (Breugel, 1992)

Ķīmiskās reakcijas starp cementu un ūdeni sauc par hidratāciju. Cementa kompozīta šķidrā fāze sākas no ūdens un ķīmisko piedevu pievienošanas brīža sausam cementa kompozīta maisījumam un turpinās līdz cementa kompozīta iepildīšanai veidņos un saistīšanās laika sākumam. Svaigam cementa kompozītam piemīt no plastiskas, veidojamas konsistences līdz pat izteikti šķidrāi konsistencei – atkarībā no izmantotajām cementa kompozīta komponentēm un maisījuma sastāva. Att. P1.2. pirmajā skicē redzams, ka cementa daļiņas ir izkliedētas ūdenī un pamazām uz cementa daļiņu virsmas sākas hidratācijas produktu veidošanās tās ir attēlotas, kā mazās „adatas”. Saistīšanās posmā sākoties hidratācijas procesiem, cementa kompozīts kļūst saistīgs un iegūst pirmo mehānisko stiprību. Att. P1.2. otrajā skicē redzams, ka hidratācijas produkti sāk izplesties – „augt” un tās ir attēlotas, kā lielās „adatas”. Normāli hidratācija notiek 5–15 h pēc cementa kompozīta iemaisīšanas. Pēc saistīšanās cikla cementa kompozīta deformējamība ir ievērojami samazinājusies un cietēšanas process ir sācies. Cietēšana saistās ar ievērojamu stiprības pieaugumu un siltuma izdalīšanos ķīmisko reakciju rezultātā. Šie procesi izraisa termiskās deformācijas un tilpuma samazināšanos rukuma iedarbībā. Maksimālā cementa kompozīta temperatūra cietēšanas periodā rodas 1–2 dienas pēc betonēšanas, kam seko dažu dienu atdzišanas periods – atkarībā no cementa kompozīta izmēriem un izdalītā hidratācijas siltuma intensitātes. Cementa kompozīta agrā vecumā raksturo siltuma izdalīšanās, ūdens patēriņš hidratācijas procesos un cementa kompozīta īpašību attīstība. Hidratācijas

rezultātā tādas materiāla īpašības kā stiprība un elastības modulis pieaug ar strauju ātrumu. Att. P1.2. trešajā skicē redzams, ka lielākā daļa cementa ir izreaģējusi ar ūdeni un ir izveidojusies cementa kompozīta pamatstruktūras skelets. Cietā fāze jeb stabilā gala struktūra ir sasniegta, ka visas cementa daļiņas ir izreaģējušas, materiāls kļūst blīvāks un materiāla īpašību pieauguma ātrums samazinās. Visi šie procesi ir savstarpēji saistīti, izslēdzot kādu no procesiem, tiek bremsēta, kavēta vai pārtraukta cementa kompozīta fizikāli-mehānisko un deformatīvo īpašību attīstība un netiek sasniegts vēlamais rezultāts (Atrushi, 2003; Breugel, 1992 u.c.).

Spiedes stiprība

Spiedes stiprība ir mehāniskā īpašība, kas cementa kompozītā tiek visvairāk pētīta, gan agrā vecumā, gan arī vēlākā cementa kompozīta vecumā. Tam ir vairāki iemesli – cementa kompozīta primārais uzdevums konstrukcijās ir materiāla spējai pretoties spiedes spēkiem. Cementa kompozīta spiedes stiprību ir vienkārši noteikt un tas lielā mērā raksturo cementa kompozīta kvalitāti kopumā. Papildus tam, no cementa kompozīta spiedes stiprības ir iespējams korelēt citas mehāniskās īpašības kā stiepes stiprība, elastības modulis, deformējamības īpašības un ilgmūžība. Cementa kompozīta vecumam un hidratācijas pakāpei ir vislielākā nozīme cementa kompozīta stiprības pieaugumam laikā, tāpēc dažādi matemātiskie modeļi, balstīti uz šiem parametriem ir izstrādāti un aprakstīti literatūrā. Citi koncepti spiedes stiprības pieaugumam cementa kompozītā ir balstīti uz porainību (Breugel, 1992), ķīmiskajām reakcijām u.c. (Emborg, 1998; Kanstad *et al.*, 1999, Laube, 1990, Jonasson, 1984, Byfors, 1980 u.c.).

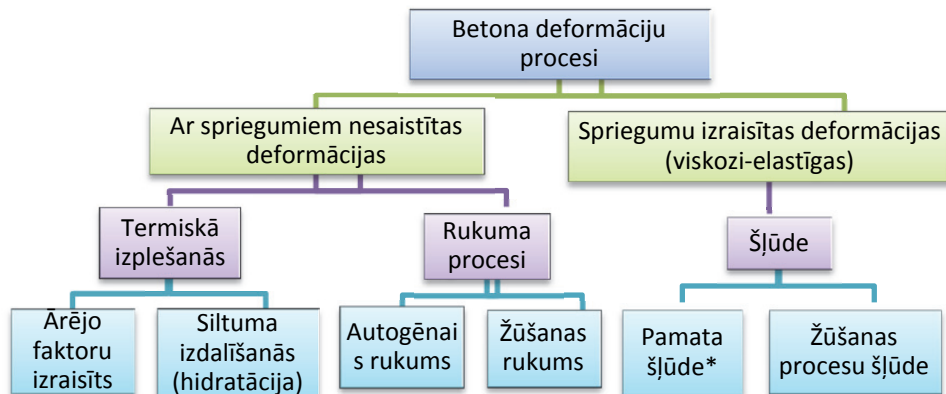
Deformatīvie un ilglaicīgie procesi cementa kompozītā

Cementa kompozīta viskozi – elastīgā darbība

No cementa kompozīta veidotas konstrukcijas ir pakļautas plaša veida ārējām iedarbēm konstrukciju ekspluatācijas laikā. Uz konstrukcijām iedarbojas tādas ārējas slodzes kā pašsvars, lietderīgā slodze, vējā un sniega slodzes, seismiskās slodzes, kā arī apkārtējās vides apstākļu izraisīta ietekme no temperatūras un relatīvā mitruma svārstībām. Cementa kompozīti un cementa kompozīta konstrukcijas visbiežāk tiek aplūkotas šādu iedarbju kombinācijās. Tomēr eksistē arī iekšējie slodžu veidi, kas rodas no iekšējām ierosinātām deformācijām, kuras izsauc rukumu, temperatūra dažādas cietēšanas stadijās pa cementa kompozīta apjomu (Bumanis, 2012). Šo slodžu veidu ietekme ir sevišķi svarīga cementa kompozīta agrā vecumā. Cementa kompozīta konstrukciju darbība slodžu ietekmē ir kompleksa, kā rezultātā cementa kompozītā rodas trīs pamata deformāciju tipi: elastīgās deformācijas, plastiskās deformācijas un viskozās deformācijas. Šīs deformācijas cementa kompozītā var darboties arī kombinācijas kā elastīgi–plastiskas vai viskozi elastīgas deformācijas. Attiecībā uz laika ietekmi deformācijas var tikt iedalītas divās kategorijas: no laika neatkarīgas deformācijas un no laika atkarīgas deformācijas. Attiecībā uz slodžu ietekmi cementa kompozīta deformācijas var tikt iedalītas no slodzes atkarīgas deformācijas un no slodzes neatkarīgas deformācijas (sk. att. P1.3.).

Par elastīgām sauc deformācijas, kuras ir proporcionālas pieliktajai slodzei un, slodzi noņemot, tās ir atgriezeniskas, atjaunojot sākotnējo formu un izmērus. Savukārt pie lielām

slodzēm, deformācija vairs nav proporcionāla pieliktajai slodzei un tā pārvēršas paliekošā, neatgriezeniskā deformācijā, kuru sauc par plastisku jeb neelastīgu. Viskozitāte ir materiāla izturēšanās, kad tam pielikta ārēja slodze, kuras potenciālā enerģija ir relatīvi maza, salīdzinot ar materiāla iekšējo molekulārās struktūras termālo enerģiju.



P1.3. att. Cementa kompozīta deformāciju izraisīto iedarbes (Atrushi, 2003)

*Termins pamata šļūde tiek attiecināts uz apvalkā ievietotu cementa kompozītu, kurā nenotiek iekšēja vai ārēja mitruma migrācija.

Cementa kompozīts pieder pie materiāliem, kuru deformācijas ir atkarīgas no slodzes ilguma. Tas nozīmē, ka, ja cementa kompozīta paraugu slodze ar ilgstošu, nemainīgu slodzi, tajā attīstīsies no laika atkarīgas plastiskās deformācijas. Pakāpenisku deformāciju pieaugumu laikā pie nemainīgas slodzes sauc par šļūdi.

Teorētiski aplūkojot cementa kompozītu, ir pieņemts uzskatīt, ka tas ir elastīgs, izotropisks, homogēns materiāls, kura darbība atbilst Huka likumam. Bet realitāte neviens no šiem pieņēmumiem nav pilnīgi paties un cementa kompozīts nav pilnībā elastīgs materiāls. Tādēļ, pieliekot slodzi, cementa kompozīta deformāciju attīstība nepakļaujas vienkāršiem likumiem, bet gan ir sarežģīta un kompleksa. Tomēr cementa kompozīts nav arī plastisks materiāls plastiskuma definīcijas izpratnē – tas sabrūk pie nelielām plastiskām deformācijām. Šī iemesla dēļ cementa kompozīts netiek uzvertts arī kā plastisks materiāls un to neiesaka lietot lielu slodzi uzņemšanai, ja vien tas nav papildināts ar tērauda stiebrojumu.

Cementa kompozīta elementam pieliekot slodzi, sākotnēji parādās acumirklīgās deformācijas. Acumirklīgās deformācijas nav pilnībā elastīgas, daļa no tām var būt plastiskas. Deformācija slodzes pielikšanas brīdī ir atkarīga ne tikai no slodzes lieluma, bet arī no slodzes ātruma, tādēļ ir grūti nošķirt elastīgās deformācijas no šļūdes. Jo lēnāk elements tiek slodgots, jo lielākas būs acumirklīgās deformācijas, pamatā uz šļūdes rēķina. Ērtuma dēļ praksē pieņem, ka elastīgās deformācijas slodzes ātruma brīdī nav izšķiramas no acumirklīgajām deformācijām. Šis pieņēmums ļauj deformācijas iedalīt divās svarīgās grupās: deformācijās, kas rodas slodzes pielikšanas brīdī, un deformācijās, kas attīstās laikā slodzes iedarbībā. Bet cementa kompozīta apjoma telpiskās izmaiņas sāk norisināties, kopš cementa kompozīta

ievideņošanas brīža, tam žūstot un cietējot, un turpinās arī pēc cementa kompozīta sacietēšanas, pašizraisot deformācijas. Tādejādi cementa kompozīta elementam, kuram ir pielikta slodze, jebkurā laikā t pie konstantas ārējās slodzes izraisīta sprieguma σ kopējo deformāciju $\varepsilon(t)$ nesaplaisājušā, neaksiāli slogotā cementa kompozīta paraugā var noteikt kā dažādu komponentu summu, sk. izteiksmi (1.1). Šī pati izteiksme attēlo cementa kompozīta deformācijas pie nemainīgas temperatūras (Kovler, 1997).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{el}(t, t_0) + \varepsilon_{cr}(t, t_0) + \varepsilon_{sh}(t) = \frac{\sigma}{E(t_0)} + \frac{\sigma}{E(t_0)} \varphi(t, t_0) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (1.1)$$

kur

t_0 – slogošanas laiks;

t – jebkurš laika moments pie konstantas ārējās slodzes;

σ – normālspriegums, MPa;

$\varepsilon(t)$ – kopējās deformācija pie nemainīgas temperatūras laika momentā t ;

$\varepsilon_{el}(t)$ – acumirklīgā deformācijas laika momentā t ;

$\varepsilon_{el}(t, t_0)$ – acumirklīgā deformācija slogošanas brīdī t_0 ;

$\varepsilon_{cr}(t, t_0)$ – šļūdes deformācijas jebkurā laika momentā t ;

$\varepsilon_{sh}(t)$ – rukuma deformācijas jebkurā laika momentā t bez ārējās slodzes;

$E(t_0)$ – cementa kompozīta elastības modulis slogošanas brīdī t_0 , GPa;

$\varphi(t, t_0)$ – šļūdes koeficients jebkurā laika momentā t_0 .

Acumirklīgā deformācija

Kā vairums konstruktīvo materiālu arī cementa kompozīts slodzes pielikšanas brīdī līdz noteiktai pakāpei uzrāda elastīgu raksturu. Deformācija galvenokārt ir elastīga ar nelielu neelastīgas deformācijas komponenti un tās vērtība ir atbilstoši pieliktās slodzes lielumam un statiskā elastības moduļa vērtībai (sk. att. P1.4.).

Acumirklīga deformācija nolasāma 10–100 min pēc slodzes pielikšanas. (ACI 209R-92, 1997).

Tomēr veicot spriegumu-deformāciju pārbaudes, jārēķinās, ka slodzes pielikšana prasa noteiktu laiku. Slogošanas laika ietekme palielina deformācijas sākušos šļūdes procesu rezultātā. Tas nozīmē, ka cementa kompozīta darbība pieliktās slodzes ietekmē ietvers sevī noteiktu šļūdes deformācijas vērtību, kas atkarīga no slodzes pielikšanas ātruma. Tomēr šo deformāciju parasti pieskaita pie acumirklīgām deformācijām. Laika ietekme pie slodzes pielikšanas elastības moduļa noteikšanai nav definēta visos standartos, tāpēc dažkārt tas rada grūtības salīdzināt eksperimentālos datus ar literatūrā publicētajiem. Citiem vārdiem sakot,

termiņš acumirkļīgs ir atkarīgs no pieņēruma vai pieejamā aprīkojuma un izvēlētajā pārbaudes procedūras. Acumirkļīgās deformācijas nosaka cementa kompozīta elastības moduli.

Acumirkļīgās elastīgās deformācijas atbilst cementa kompozīta statistiskajam elastības modulim slogošanas brīdī un šļūdi var pieņemt kā kopējo deformāciju un elastīgo deformāciju starpību. Tomēr, ievērojot precizitāti, jāņem vērā, ka, tā kā elastības modulis palielinās laikā, elastīgās deformācijas samazinās. Tādēļ šļūdes deformāciju būtu nepieciešams pieņemt kā starpību starp kopējām deformācijām un elastīgajām deformācijām apskatāmajā momentā nevis slogošanas brīdī. Praksē tiek izmantotas abas metodes. Ērtuma, kā arī mazo atšķirību dēļ, elastīgo deformāciju izmaiņas netiek ņemtas vērā, izņemot atsevišķus strukturālus gadījumus.

P1.1. tabula

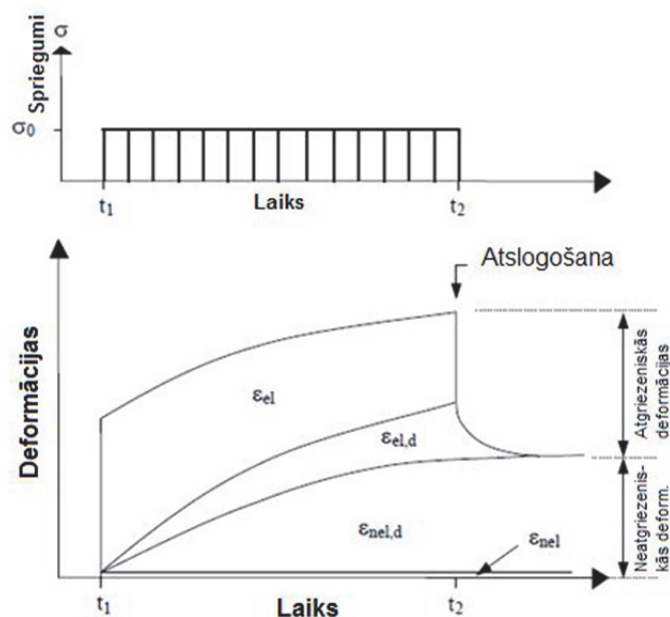
Deformāciju klasifikācija (Neville *et al.*, 1983)

Deformācijas	No slodzes atkarīgas deformācijas		No slodzes neatkarīgās deformācijas
	Acumirkļīgas	Laikā mainīgas	
Atgriezeniskas	Elastīgās (ϵ_{el})	Aizkavēti elastīgās ($\epsilon_{el,d}$)	Termiskās deformācijas, rukums vai uzbriešana*
Neatgriezeniskas	Neelastīgās (ϵ_{nel}) (plastiskās)	Aizgavēti neelastīgās ($\epsilon_{nel,d}$) (viskozā daba)	

*Gan termiskajām deformācijām, gan rukuma (vai uzbriešanai) ir atgriezeniskā un neatgriezeniskā darbība.

Viena no šļūdes apskatīšanas metodēm ir šļūdes deformāciju iedalīšana aizkavēti elastīgās un viskozās deformācijās (sk. tab. P1.1.).

Tūlītējās jeb acumirkļīgās deformācijas (definētas īsā laika sprīdī, piemēram, sekundēs vai maksimums-minūtēs) tiek attiecinātas uz no laika neatkarīgām deformācijām un tās raksturo cementa kompozīta tūlītējās reakcijas slodzes pielikšanas brīdī. Šļūde savukārt ir attiecināma uz no laika atkarīgām deformācijām, tās, kuras sāk iedarboties uzreiz pēc acumirkļīgajām deformācijām. Ir skaidrs, ka robeža starp šiem diviem deformāciju veidiem nav stingri noteikta un tiek nosacīti patvaļīgi pieņemta. No slodzes atkarīgas deformācijas tiek iedalītas atgriezeniskajās deformācijās un neatgriezeniskajās deformācijās. Atgriezeniskās deformācijas tālāk tiek iedalītas momentāni elastīgās (ϵ_{el}) un aizkavēti elastīgās ($\epsilon_{el,d}$) deformācijās. Neatgriezeniskās deformācijas iedalās momentāni neelastīgās (ϵ_{nel}) deformācijās cementa kompozīta plastiskās darbības dēļ un aizkavēti neelastīgās ($\epsilon_{nel,d}$) deformācijas, kas rodas no cementa kompozīta viskozās dabas (sk. att. P1.4.).



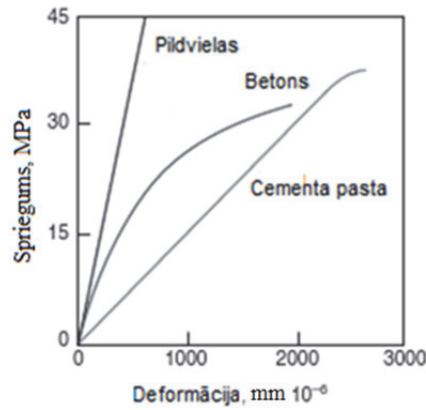
P1.4. att. Tipiskas cementa kompozīta deformāciju izmaiņas laikā slodzes pielikšanas un noņemšanas gadījumā, uzskatāmi attēlo cementa kompozīta pamata deformāciju tipus (Atrushi, 2003)

Aizkavētais elastīgums var tikt uztverts kā šļūdes veids. Šī deformācija norisinās ar laikā samazinošu ātrumu un ir pilnībā atgriezeniska. Tās lielumu iegūst no šļūdes atgriezeniskuma vērtības. Abus deformāciju veidus, kas atrodas no laika atkarīgo deformāciju kolonnā, var uzskatīt par šļūdi. Aizkavētā elastīgā deformācija veido lielu daļu no šļūdes deformācijām periodā tieši pēc slodzes un sasniedz nemainīgu vērtību apmēram 10 nedēļu laikā, dažos avotos tiek uzskatīts, ka tā veido primārās šļūdes apgabalu. No otras puses šļūdes tecēšanas (viskozo deformāciju) komponente palielinās laikā, bet ar samazinošu ātrumu. No tā var secināt, ka aizkavētais elastīgums un tecēšana ir savā starpā saistītas parādības. Šo iedalījumu tomēr nevar pieņemt kā absolūti patiesu, jo joprojām notiek diskusijas un nav pārliecības, ka atgriezeniskās šļūdes deformācijas ir aizkavētās elastības radītas un neatgriezeniskās viskozitātes.

Elastīgās deformācijas

Ķermenim pieliekot spēku, tajā radīsies spriegumi un izmainīsies tā forma, t.i., veidosies deformācijas, kuras var būt gan saskatāmas ar aci, gan tik nelielas, ka tās uzrāda tikai jūtīgi mērinstrumenti.

Elastīgās deformācijas ϵ_{el} ir atkarīgas no materiāla elastīgajām īpašībām, kuras raksturo elastības modulis jeb Junga modulis, ko definē kā slodzes un atgriezeniskās deformācijas attiecību materiāla elastības robežās bez tā saplaisāšanas.



P1.5. att. Pildvielu, betona un cementa pastas sprieguma-deformāciju attiecība (Mehta, Monteiro, 2006)

Cementa kompozīts ir viens no materiāliem, kuriem sprieguma-deformācijas līkne elastīgajā apgabalā nav lineāra. Kaut atsevišķi gan hidratēta cementa pasta, gan pildvielas, slogojot izturas elastīgi (sk. att. P1.5.), pat īslaicīgas slogošanas gadījumā cementa kompozīts neuzvedas kā elastīgs materiāls. Tomēr, slogojot ar slodzi līdz 10–15 % no cementa kompozīta robežstiprības, slodzes deformāciju līkne nav izteikti liekta un no tās var iegūt iespējami tuvu elastības moduļa vērtību. Parauga slogošanas brīdī tajā rodas galvenokārt elastīgas deformācijas, kas atbilst statistiskajam elastības modulim slogošanas laikā. Jāatzīmē, ka elastības modulis pieaug laikā, palielinoties cementa kompozīta stiprībai, elastīgās deformācijas samazinās (Neville *et al.*, 1983).

Elastības modulis

Elastības modulis raksturo materiāla elastīgās īpašības stiepes un spiedes deformāciju gadījumā jeb materiāla stingrību un tā spēju pretoties elastīgām formas un izmēru izmaiņām, kas rodas materiālam pieliekot ārējus spēkus. Informācija par materiāla elastības moduļa lielumu ir nepieciešama konstrukciju analizē, lai noteiktu katra elementa stingumu, deformēšanās spēju un iekšējos spriegumus, kurus izraisa pieliktas ārējās slodzes. Elastības moduļa lielums tāpat ir nepieciešams, lai prognozētu cementa kompozīta šļūdes un rukuma deformācijas, un pie plaisu kontroles (Neville *et al.*, 1983; Rashid *et al.*, 2002; Gilber, Ranzi 2011).

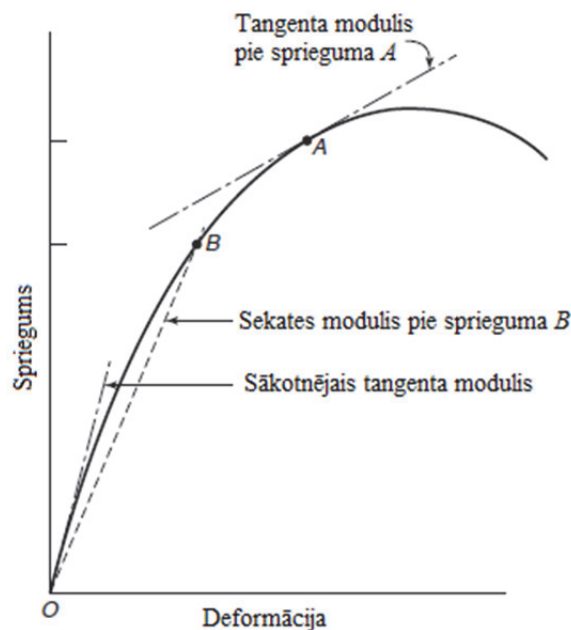
Praksē parasti pieņem, ka elastības modulis E ir laikā nemainīgs un atbilst tā aprēķinātajai vērtībai pirmās slogošanas laikā. Elastības moduli nosaka pakļaujot cementa kompozīta kubu vai cilindru aksiālai spiedei un nosakot tā deformācijas. To nolaka 1–5 min laikā, no slodzes pielikšanas brīža. Elastības moduli nosaka pie slodzes lieluma ~0,45 % no graužošajiem spriegumiem (ACI 209R-92, 1997).

Tā kā spriegumu – deformāciju līkne nav lineāra, nav iespējams runāt tikai par vienu elastības moduli, to parasti definē ar trīs elastības moduļu veidiem:

- sākotnējais tangenta modulis – tā ir līnija, kas sākas punktā 0 un ir vilkta pa līknes sākotnējo lineāro posmu. Tā noteikšana nav vienkārša, bet parasti taisne ir paralēla

sekantes moduļa atgriezeniskajai līknei pēc slodzes noņemšanas. Sākotnējais elastības modulis ir aptuveni vienāds ar dinamisko modeli (Neville, Brooks, 1990).

- tangentes modulis – to definē ar tangenta slīpumu katrā līknes punktā ($E_c = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$) tādejādi tā lielums ir mainīgs. Tangentes elastības modulis nedod reālu elastības moduļa vērtību materiālam, jo tas ir neatbilstošs pie spriegumiem, kas ir daudz lielāki vai mazāki nekā spriegums, pie kāda noteikts šis tangenta elastības modulis;
- sekantes modulis – to definē ar taisnes slīpumu pret līkni katrā līknes punktā, kuras sākumpunkts ir vienāds ar līknes sākumpunktu ($E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon}$). Tā vērtība arī ir mainīga.



P1.6. att. Tangenta un sekantes elastība modulis (Wight, Macgregor, 2012; EN 1992–1-1, 2005 u.c.)

Lielākoties praksē elastības modulis tiek noteikt kā sekantes elastības modulis. Nav noteiktas standarta metodes sekantes moduļa noteikšanai. Tā kā sekantes moduļa vērtība samazinās palielinoties spriegumam, spriegums pie kāda tiek noteikts sekantes modulis vienmēr ir jāatzīmē. Abus moduļa veidus var aplūkot att. P1.6.

Elastības modulis galvenokārt ir atkarīgs no cementa kompozīta stiprības, un attiecīgi no cementa kompozīta maisījumā izmantotajām sastāvdaļām un tā vecuma, paraugu formas un izmēriem, kā arī pārbaudes metodes (Iravani, 1996; Mokhtarzadeh, French, 2000). Bet nav atrasta sakarība, kas precīzi aprakstītu stiprības un elastības moduļa ietekmi. Elastības moduļa lielums ir 500–1600 reizes lielāks par cementa kompozīta spiedes stiprību (Reynolds, 1988). Elastības moduli ietekmē arī cementa kompozīta mitruma pakāpe: mitrs cementa kompozīts uzrādīs augstāku elastības moduli nekā sauss cementa kompozīts - pretēji cementa kompozīta stiprībai: cementa kompozīts ir stiprāks, kad ir sauss nekā kad ir mitrs. Iespējama iemesls ir mazākas deformācijas pie slodzes piesātinātā cementa kompozītā, nekā sausā, kur ir mazāk adsorbētā un gēla ūdens.

Tipiskās elastības moduļa E variācijas laikā t , par atskaites vērtību ņemot elastības moduļa lielumu 28 dienu vecumā, ir attēlotas tab. P1.2.

Cementa kompozīts ar augstāku stiprību, salīdzinot ar zemākas stiprības cementa kompozītu, uzrādīs augstāku elastības moduli un attiecīgi arī mazākas sākotnējās elastīgās deformācijas, kā arī mazāku šļūdes deformāciju attīstību.

P1.2. tabula

Cementa kompozīta elastības moduļa pieaugums laikā (Gilbert, Ranzi, 2011)

Cementa tips	Cementa kompozīta vecums t (dienas)					
	3	7	28	90	360	30 000
Parastais portlandcements	0,68	0,83	1,0	1,09	1,15	1,20
Augstas agrās stiprības cements	0,77	0,88	1,0	1,06	1,09	1,13

Tā kā galvenā dzelzsbetona pielietojuma sfēra ir liektos elementos, tiek veikti pētījumi arī elastības moduļa noteikšanai liecē izmantojot sijveida paraugus. Paraugi tika slogoti liecē ar zināmu slodzi un tad no zināmām sijas aprēķina formulām noteikts elastības modulis. Ir novērots, ka spriegumu – deformāciju līknes liecē saskan ar līknēm, kas iegūtas no spiedē slogotiem cementa kompozīta paraugiem.

Elastības modulis var tikt noteikt spiedes vai stiepes stiprības testu laikā. Daži zinātnieki konstatējuši mazu atšķirību starp stiepes un spiedes elastības moduļiem (Kanstad *et al.*, 1999), kamēr citi pētījumi uzrādījuši par 15 % augstāku elastības moduli cementa kompozīta darbībā stiepē (Onken, Rostasy, 1995) pēc 28 dienu cietēšanas. Šī atšķirība ir izskaidrojama ar cementa kompozīta mazāku nelineāro darbību stiepē, salīdzinājumā ar deformācijām spiedes spriegumu iedarbībā. Pētnieks Hagihara *et al.* (2002) noskaidrojis, ka stiepes (E_t) un spiedes (E_c) elastības moduļu attiecību ir robežās no 1,07–1,18.

Puasona koeficients

Puasona koeficients μ raksturo materiāla elastīgās īpašības. Elementam pieliekot stiepes (vai spiedes) spēku, tas pagarinās (saīsinās), bet šķērsriezums samazinās (palielinās). Puasona koeficients norāda cik reizes izmainās deformējama ķermeņa šķērsriezums to stiepjot vai spiežot (sk. izteiksmi (1.2)) (Santos, Guerra, 2006). Tas ir izteikts kā šķērsvirziena un garenvirziena deformāciju attiecība. Nesaplaisājušam cementa kompozītam koeficienta vērtība ir $\sim 0,2$ un splaisājušam ir 0 (Brauns, 2007):

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right| \quad (1.2)$$

kur

μ – Puasona koeficients

ε' – šķērsvirziena deformācija (negatīva pie aksiālas stiepes un pozitīva pie aksiālas spiedes), mm;

ε – garenvirziena deformācija (pozitīva aksiālā stiepē, negatīva aksiālā spiedē), mm.

Puasona koeficients ir atkarīgs no cementa kompozīta pretestības, to ietekmē sastāvs un pildvielu veids. Tā kā joprojām nav izstrādāts precīzs koeficienta aprēķina veids, to parasti nosaka eksperimentāli, ja ir nepieciešams akurāts rezultāts. Tomēr normālos apstākļos tas nav nepieciešams un pieņem tā aptuveno vērtību. Puasona koeficients lielā mēra ir atkarīgs arī no pieliktās slodzes lieluma. Pie slodzēm, kuras ir lielākas par aptuveni $0,4f_{ck}$, tas strauji palielinās pieaugot slodze, to izraisa mikroplaisu attīstība, un tā vērtība var pārsniegt pat 0,5. Pie pastāvīgas slodzes Puasona koeficients mainās minimāli. Tas liecina par to, ka šļūdes koeficients ir aptuveni vienāds gan garenvirzienā, gan šķērsvirzienā (Rusch *et.al.*, 1983).

Rukuma deformācijas (no laika atkarīgās deformācijas)

Cementa kompozīts ir materiāls, kuru ietekmē spriegumu izmaiņas laikā, kamēr ārējie spēki vēl nav pielikti. Rukums un izplešanās ir neatkarīgi no ārējām pieliktajām slodzēm, un rodas laikā, galvenokārt mitruma migrācijas rezultātā, kā arī ūdens patēriņa rezultātā hidratācijas procesos.

Rukumu definē kā neslogota cementa kompozīta tilpuma samazinājumu pie konstantas temperatūras. Tā galvenais iemesls ir ūdens zudums cietēšanas laikā. Pat pēc sacietēšanas rukuma deformācijas turpina attīstīties, jo žūšanas process var turpināties vēl vairākus mēnešus.

Rukums var izraisīt cementa kompozīta saplaisāšanu, un, ja aprēķinos nav ņemtas vērā cementa kompozīta rukuma deformācijas, tās var izraisīt konstrukciju pārmērīgu saplaisāšanu un padarīt tās ekspluatācijai nederīgas. Tomēr dzelzsbetona konstrukcijās rukums var būt arī labvēlīga parādība, jo palīdz nostiprināt saiti starp cementa kompozītu un stiebrojumu.

Ja cementa kompozīta elementa tilpuma izmaiņas ir brīvi iespējamas un nav ierobežotas, rukums cementa kompozītā neradīs nekādus spriegumus. Savukārt, rukuma ierobežojums radīs cementa kompozītā stiepes spriegumus un deformācijas. Ierobežojumi var būt ārēji, piemēram, nekustīgs savienojums ar blakus elementiem vai berze pret zemes virsmu, un iekšēji – tērauda stiebrojuma iedarbība.

Cementa kompozīta rukumu parasti izsaka, kā elementa dimensijas izmaiņu (garuma izmaiņa pret sākotnējo garumu) izteikta procentos, mm/mm vai in./in. Pēdējā laikā rukumu izsaka mikrodeformācijās (*microstrains*) vai miljonos, kā deformācijas lielums 1×10^{-6} mm/mm.

Šļūdes deformācijas (no laika atkarīgās deformācijas)

Šļūdes definīcija

Literatūras avotos ir sastopamas vairākas definīcijas, kas izskaidro šļūdes (no laika atkarīgās deformācijas) būtību un darbības principu. Cementa kompozītam kā kompozītam materiālam šļūdes definīciju veido gan pildvielu deformāciju raksturojums, gan cementa pastas komplicētā deformācijas shēma. Šļūde ir neelastīga cementa kompozīta deformācija ilgstošas

slodzes iedarbībā. Tā iedarbojas tūlīt pēc pielikto spriegumu izraisītājām elastīgajām deformācijām. Šļūde ir saistīta un iedarbojas līdzās žūšanas rukumam un termiskajai izplešanai. Cementa kompozīta šļūdēšana notiek spiedes, stiepes un lieces spriegumu iedarbībā (Neville, 1995). Šļūde parādās mainīgu un nemainīgu spriegumu gadījumā (Cajs, Mandrikovs, 1991). Pēc slodzes noņemšanas var konstatēt pretējas deformācijas - šļūdes relaksāciju, taču tās neatgriež paraugu sākotnējā stāvoklī, šļūde raksturojas ar nepilnu atgriešanos, t.i., cementa kompozīta šļūde vispārīgi ir neatgriezenisks process.

Literatūras avotos minētās vēl arī šādas šļūdes definīcijas:

- nepārtraukts deformāciju palielinājums laikā;
- deformāciju pieaugums pie patstāvīgas slodzes (Neville, 1995);
- deformāciju palielinājums nemainoties spriegumiem (ja tie ir mazāki arī par proporcionalitātes robežu). Šī parādība saistīta ar laiku (Panavko *et al.*, 1955);
- relaksācija jeb spriegumu samazinātājs laikā;
- deformāciju palielināšanās laikā pie patstāvīgas slodzes;

Šļūdes vērtība ir bezdimensionāls lielums (garuma izmaiņa pret sākotnējo parauga garumu) izteikts %, mm/mm. Parasti to izsaka mikrodeformācijās $\cdot 10^{-6}$ mm/mm. Cementa kompozītam tā parasti ir robežās no 400 līdz 1600 10^{-6} mm/mm (Rilem TC 107-CSP, 1998; ACI 209.1R-05, 2005).

Šļūdes deformācijas attēlo no laika atkarīgu deformāciju palielināšanos ilgstošas, nemainīgas slodzes iedarbībā, kas norisinās pēc sākotnējām, acumirkļīgajām deformācijām, sk. att. 1.9. To izcelsme meklējama hidratētā cementa pastā.

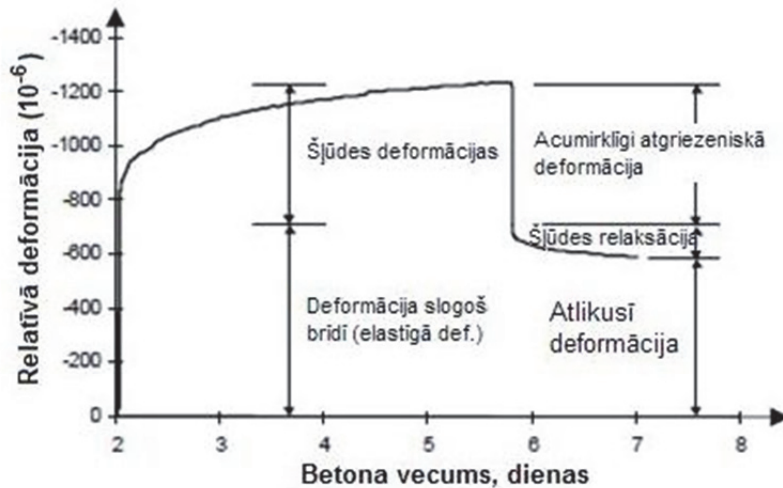
Neskaitāmi eksperimentālie pētījumi ir pierādījuši, ka šļūdes deformācijas var būt vairākas reizes lielākas nekā sākotnējās slodzes deformācijas, un pirmā gada, pēc slogošanas sākuma, laikā šļūdes deformācijas var 2–3 reizes pārsniegt deformācijas, ko izraisījis slogošana. Tādejādi šļūdes rašanās un attīstības jautājums ir svarīgs drošu konstrukciju projektēšanā un ekspluatācijā.

Šļūde palielinās laikā ar samazinošu ātrumu. Laika periodā, tieši pēc sākotnējās slogošanas, šļūde attīstās ātri, bet palielināšanās ātrums ievērojami palēninās laikā. Vispārīgi tiek pieņemts, ka apmēram 50 % no gala šļūdes vērtības attīstās pirmajos 2–3 mēnešos un apmēram 90 % 2–3 gadu laikā. Pēc dažiem slogošanas gadiem, šļūdes deformāciju izmaiņu ātrums laikā ir ļoti mazs (Gilbert, Ranzi, 2011).

Šļūdes relaksācija

Pēc ilgstošas slogošanas slodzi noņemot, deformācijas acumirkļīgi samazinās par elastīgo deformāciju vērtību izejot no elastīgā moduļa un slodzes lieluma. Šo tūlītējo deformāciju samazinājumu sauc par acumirkļīgo atgriezenisko deformāciju. Tā kā elastības modulis dotajā laika momentā ir lielāks par vērtību slogošanas brīdī, kā arī ņemot vērā iespējamām neelastīgajām deformācijām (neatgriezeniskās deformācijas), sk. att. P 1.7. slogošanas sākumā, kopumā acumirkļīgi atgriezeniskās deformācijas ir mazākas par elastīgajām deformācijām slogošanas sākumā. Pēc acumirkļīgās atgriezeniskās deformācijas notiek pakāpeniska

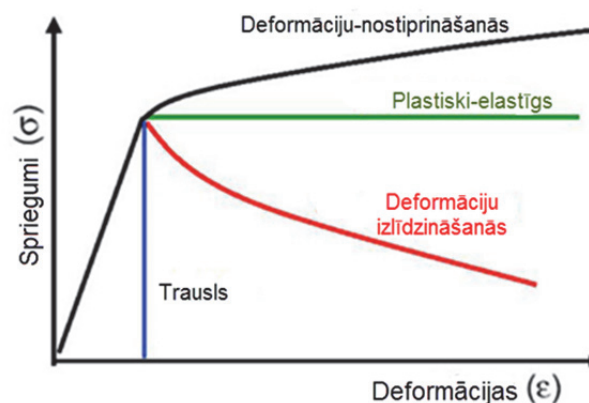
deformāciju samazināšanās, ko sauc par šļūdes relaksāciju. Cementa kompozītam agrā vecumā sākotnējais deformāciju samazinājums atbilst acumirkļīgi elastīgajai deformācijai atslogošanas brīdī, un šļūdes relaksācija atbilst aizkavēti elastīgajai deformācijai, kā norādīts. Atgriezeniskās šļūdes deformācijas sākotnējā stadijā norit strauji, tomēr tās ar laiku samazinās līdz konstantai vērtībai, kas ir pretēji šļūdes deformācijām, kas turpinās bezgalīgi. Literatūrā attēlo, ka šļūde ir daļēji atgriezeniska. Neatgriezeniskās deformācijas (atlikusī deformācija) līknē ir relatīvi lielas. Šļūdes relaksācija ir neliela, tomēr svarīga prognozējot cementa kompozīta deformācijas mainīgu slodžu ietekmē.



P1.7. att. Šļūdes deformācija pie spiedes slodzes pielikšanas un šļūdes relaksācija HPC (Atrushi, 2003)

Slodzes izraisītu plaisu attīstība cementa kompozītā

Cementa kompozīta plaisāšanai ir nozīmīga loma cementa kompozīta darbībā uz slodzi, gan spiedē gan stiepē. Plaisu dēļ cementa kompozīts kļūst nevienmabīgs, samazinās tā stiprība un ilgzturība. Agrākie pētījumi cementa kompozīta mikroskopiskajā uzvedībā sevī ietver cementa kompozīta darbību uz spiedes izraisītiem spriegumiem. Spriegumu-deformāciju sakarība (sk. att. P1.8.) tiešā veidā ir saistīta ar mikroplaisu attīstību, jo tās ir plaisas, kuras veidojas cementa kompozīta saistīšanās procesa laikā (saistes plaisas) un izplatās apkārt esošajā javā.



P1.8. att. Spriegumu—deformāciju līknes dažādiem materiāliem (Weiss, 2003)

Sākotnēji veiktajos mikroplaisāšanas pētījumos, tika uzskatīts, ka cementa kompozīts sastāv no diviem lineāri elastīgiem, trausliem materiāliem: cementa pastas un pildvielām. Un mikroplaisāšana tika uzskatīta kā cēlonis cementa kompozīta nelineārajai spriegumu—deformācijas uzvedībai spiedē. Šis uzskats mainījās 1970. gadā, kad tika izpētīts, ka ievērojama daļa no nelineārās plaisāšanas darbības ir tiešā mērā atkarīga no mikroplaisu klātbūtnes cementa kompozītā. Mikroplaisu ietekme uz cementa kompozīta darbību un sabrukuma raksturlielumiem ir būtiska (Winter *et al.*, 1963, 1966, 1969; Slate, Matheus, 1967; Shah, Chandra, 1970; Shah, Slate, 1968; Darwin *et al.*, 1997; ACI-Committee-224, 2001; Reinhardt, Naaman, 1992; Naaman, Reinhardt, 2003).

Viens no pirmajiem lūzumu mehānikas attīstītājiem bija Griffith (1920), kurš mēģināja izskaidrot trauslu materiālu sabrukumu. Lineāri elastīgā lūzumu mehānika (LELM) paredz strauju mikroplaisu izplatīšanos caur homogēnu, izotropisku, lineāri elastīgu materiālu. Teorija izmanto sprieguma intensitātes faktoru K , kas reprezentē sprieguma lauku asas plaisas galā un ir funkcija no plaisas ģeometrijas un sprieguma (ACI-Committee-224, 2001).

Spiedes izraisītas mikroplaisas

Agrāko pētījumu laikā tika konstatēta saistība starp slodzes izmaiņām un mikroplaisu veidošanos cementa kompozītā. Pirms tiek pielikta slodze, tilpuma izmaiņas cementa pastā jau rada iekšējās plaisas javas rupjo pildvielu tuvumā. Zem īslaicīgas spiedes slodzes, līdz tiek sasniegti 30 % no spiedes izturības cementa kompozītā nekādas jaunas plaisas neveidojas (Winter *et al.*, 1963). Virs šī slodzes vērtības jaunas saistes plaisas sāk veidoties viscaur cementa kompozīta struktūrā. Saistes plaisas palielinās līdz tiek sasniegta 70 % vērtība no spiedes izturības, pēc šīs vērtības plaisas jau sāk parādīties arī pašā javā. Javas plaisāšana norit strauji, veidojot nepārtrauktas plaisas paralēli pieliktās slodzes virzienam, līdz mirklim kad cementa kompozīts vairs nav spējīgs uzņemt slodzi. Javas plaisāšanas sākums ir saistīts ar cementa kompozīta spiedes izturību.

Derucher (1978) savos pētījumos, izmantojot elektro-mikroskopa skenēšanu (EMS), nonāca pie cita apgalvojuma par cementa kompozīta mikroskopisko uzvedību. Viņš pētīja izžāvētus cementa kompozīta paraugus pie ekscentriski pieliktas slodzes ar EMS. Viņš novēroja ka mikroplaisas, kuras eksistē pirms slodzes pielikšanas, ir saistes plaisas, ar turpinājumu apkārt esošajā javā perpendikulāri saistes plisai. Palielinot pielikto slodzi līdz 15 % no spiedes izturības, plaisas neizplatās, bet tikai kļūst platākas. Pie apmēram 20 % no spiedes izturības plaisas sāk izplatīties un pie aptuveni 30 % no spiedes izturības, tās sāk apvienoties. Pie 45 % no spiedes izturības, plaisu apvienošanās ir gandrīz pilnībā beigusies. Pie 75 % no spiedes izturības plaisas sāk izplatīties un apvienoties jau javā un tā līdz iestājas sabrukums.

Kopumā mikroplaisām, kuras ir cementa kompozītā jau pirms slodzes pielikšanas, ir maza nozīme cementa kompozīta spiedes stiprības ietekmēšanā.

Eksperimentāli pētījumi (Spooner *et al.*, 1972, 1975, 1976; Martin *et al.*, 1991) liecina, ka nelineārā spiedes uzvedība cementa kompozītā ir lielā mērā saistīta ar nelineāro cementa pastas ietekmi. Cementa pasta zem spiedes slogojuma nav elastīga un trausla, kā apgalvots

iepriekš, bet gan nelineārs materiāls ar relatīvi augstu deformāciju kapacitāti. Nelineārā cementa pastas uzvedība var tikt saistīta ar bojājumiem cementa pastā, pat pie ļoti zemiem spriegumiem (ACI-Committee-224, 2001).

Plaisu attīstība stiepes slogojumā

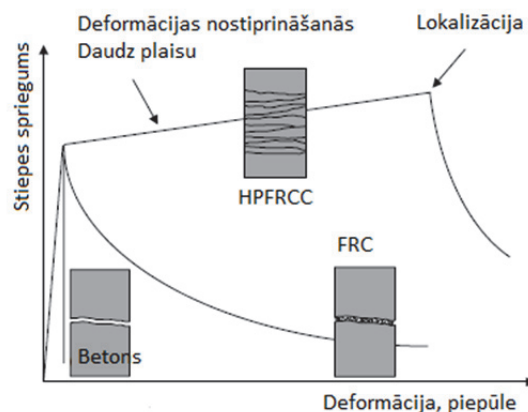
Kad stiegrots cementa kompozīta elements tiek pakļauts stiepei, divu veidu plaisas var sākt veidoties. Viens plaisu veids ir redzamās plaisas uz cementa kompozīta virsmas, otrs plaisu veids neprogresē līdz cementa kompozīta virsmai (Darwin *et al.*, 1997).

Katrai no abu veidu plaisām ir sava ģeometrija. Pirmais plaisu veids ir raksturīgs ar to, ka platākā plaisas daļa ir uz cementa kompozīta virsmas un tā sašaurinās virzienā uz stiegrojumu. Pie maza stiepes līmeņa plaisas platuma atšķirība starp cementa kompozīta virsmi tuvāko un stiegrojumam tuvāk esošo ir ļoti maza pie maza stiepes līmeņa (tūlīt pēc plaisas izveidošanās), un tā palielinās palielinoties stiepes spēkam, tātad plaisas platums uz cementa kompozīta virsmas palielinās daudz straujāk nekā plaisas platums tuvāk stiegrojumam. Otrā veida plaisas jeb iekšējās plaisas, savu platumu samazina virzoties tuvāk cementa kompozīta virsmai.

Balstoties uz stiepes spēku dažādību pa elementa garumu, visas plaisas neveidojas pie viena un tā paša spriegumu līmeņa. Pētnieki Clark's un Spiers apgalvo ka pirmās nozīmīgās plaisas sāk veidoties pie aptuveni 90 % no vidējās cementa kompozīta stiepes stiprības un pēdējās nozīmīgās plaisas pie aptuveni 110 % no vidējās stiepes stiprības (Darwin *et al.*, 1997).

Augstas stiprības šķiedrbetona deformēšanās raksturs stiepē

Augstas stiprības šķiedrbetona deformēšanās raksturu stiepē var iedalīt pēc to deformācijas attīstības pēc pirmo plaisu parādīšanās. Tādi trausli materiāli kā nestiegrots cementa kompozīts un java zaudē savu stiepes slodzes nestspēju gandrīz uzreiz pēc pirmo plaisu parādīšanās (sk. att. P1.9.) Savukārt šķiedru pievienošana ļauj cementa kompozītam ievērojami paaugstināt tā izturību, tomēr tā stiepes stiprība un īpaši spriegumu kapacitāti pēc pirmo plaisu parādīšanās neuzlabojas. Šķiedrbetons (FRC) ir kvazi – trausls materiāls ar stiepes deformācijas mīkstinošām īpašībām, t.i., lielāku sabrukšanas enerģiju (Li, Liang, 1986; Fischer, Li, 2007).



P1.9. att. Shematiska cementa kompozīta struktūras sprieguma-deformācija sakarība stiepē (Fischer, Li, 2007)

Augstas stiprības (veiktspējas) ar šķiedrām pastiprināts cementa kompozīts – HPFRCC (high performance fiber reinforced cement composit) turpmāk augstas stiprības šķiedrcementa kompozīts atšķiras ar to, ka tā galīgā stiprība ir lielāka par pirmās plaisas stiprību un tāda cementa kompozīta struktūrā rodas daudz mazu plaisu neelastīgas deformācijas procesā, plaisas platums nepārsniedz 0,2 mm. Pretstatā lokalizētai deformācijai tradicionālā šķiedrbetonā FRC, kur saredzamās plaisas ir atkarīgas no skalas garuma, HPFRCC deformācija makro mērogā ir vienveidīga un tiek uzskatīta par šķietamu deformāciju, kas ir materiāla īpašība un nav atkarīga no skalas garuma.

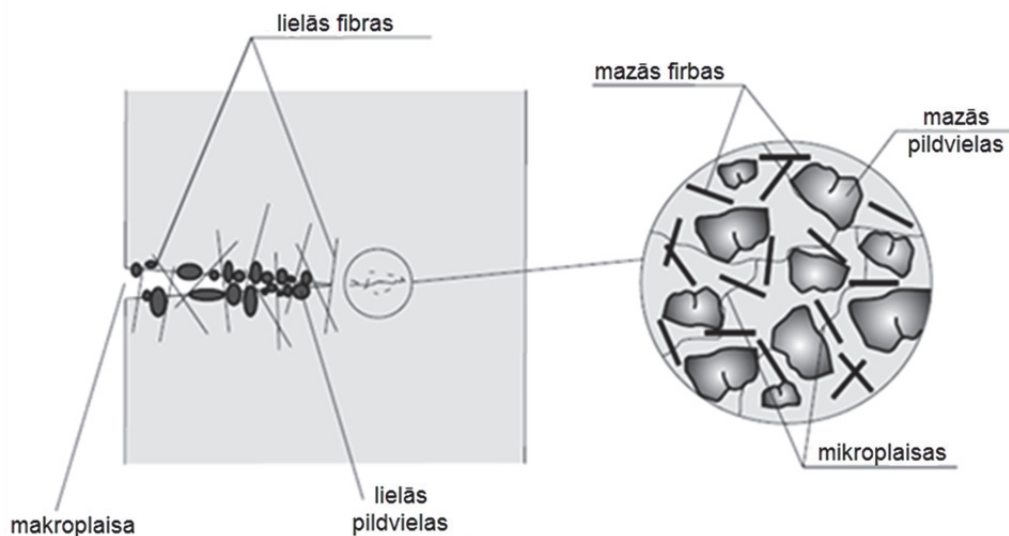
Galvenā HPFRCC pazīme kopumā un sevišķi projektētos cementa inženierkompozītos – ECC (engineered cementitious composites) ir daudzo plaisu veidošanās pie struktūras stiepes sprieguma paaugstināšanas. Šī izturēšanās ir atkarīga no divām papildus prasībām – lai galējais spriegums $\sigma_{B,peak}$, ko nodrošina šķiedras saplaisājušajā šķērsgriezumā, pārsniedz struktūras stiprību pie pirmo plaisu parādīšanās σ_{fc} , sk. izteiksmi (1.3).

$$\sigma_{B,peak} > \sigma_{fc} \quad (1.3)$$

Un, lai pieliktais spriegums pirms struktūras saplaisāšanas var tikt pārnesta ar šķiedru palīdzību pēc struktūras saplaisāšanas. Turklāt, kad plaisas veidojas cementa kompozīta struktūrā, tām jāizplatās pie konstanta sprieguma σ_{ss} un ar noteiktu plaisu atvēruma, lai panāktu vienādu spriegumu sadalījumu visā šķērsgriezumā. Ko citādāk var izteikt kā enerģijas līdzsvaru starp ārējo spēku – enerģija, kas nepieciešama, lai cementa kompozīta struktūrā izplatītos plaisas, un enerģiju, ko izkļiedē šķiedras (kā tilti), citiem vārdiem, galējam spriegumam $\sigma_{B,peak}$, ko rada šķiedras saplaisājušā šķērsgriezumā vajag pārsniegt cementa kompozīta struktūras plaisāšanas stiprību.

Enerģija, kas ir pie galējā sprieguma $\sigma_{B,peak}$ un atbilstoša plaisu atvēruma σ_{peak} , tiek samazināta ar enerģiju, kas aiziet elastīgai šķiedru izstiepšanai un neatgriezeniskai izraušanai, bet tai jābūt pietiekamai, lai izlīdzinātu līdzsvarotu plaisu izplatīšanos, vai citiem vārdiem tai jāpārsniedz struktūras izturība G_{tip} pie plaisas gala. Lai apmierinātu šos nosacījumus nepieciešams liels šķiedru daudzums (dažādos literatūrās avotos atšķirīgi no 5 % – 1,5 %) (Fischer, Li, 2007).

Att. P1.10. attēlota cementa kompozīta ar dažādu šķiedru veidu plaisāšanas process. Pielietojot šķiedru “kokteili” tiek panākta lielāka materiāla darbības un sabrukuma efektivitāte, nekā izmantojot tikai viena veida šķiedras, jo katram šķiedru garumam – tipam ir sava funkcija: īsās šķiedras nostiprina cementa matricu un ir atbildīgas par plaisu atvēruma un mazo plaisu attīstību, tās tāpat veic garo šķiedru iespīlēšanu, bet garās šķiedras kontrolē lielās plaisas, savieno lielās plaisas, veidojot šķiedru tiltus un nepieļauj cementa kompozīta trauksli, pēkšņu sabrukumu, kas īpaši svarīgi nesošo konstrukciju ekspluatācijā (Brandt, 2008; Prisco, Plizzari, 2009).



P1.10. att. Cementa kompozīta ar dažādu šķiedru veidu plaisāšanas process (Brandt, 2008)

Ilglaicīgās parādības

Šķūdes un rukuma parādības ir pētīta jau sen, bet vēl joprojām ir daudz neskaidrību saistībā ar tām. Cementa kompozītam kā kompozītam materiālam šķūdes definīciju veido gan pildvielu deformāciju raksturojums, gan cementa pastas komplicētā deformācijas shēma. Tā veidojas tūlīt pēc pielikto spriegumu izraisītājām elastīgajām deformācijām. Šķūde ir saistīta un iedarbojas līdzās rukumam un termiskajai izplešanai (Neville *et al.*, 1983; Neville, 1995).

Rukums

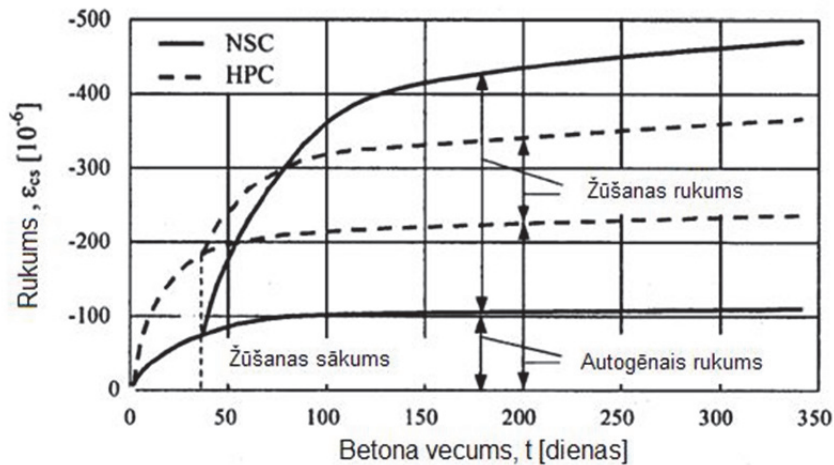
Eksistē vairāki rukuma deformāciju veidi: kapilārais jeb plastiskais rukums, autogēnais rukums, žūšanas rukums, ķīmiskais rukums, termiskais un karbonizācijas rukums.

Plastiskais rukums. Plastiskais rukums rodas brīvajam ūdenim iztvaikojot no cementa kompozīta tilpuma virsmas, kamēr cementa kompozīts ir plastiskā—šķidrā fāzē pirms saistīšanās. Rukuma lielums ir atkarīgs no ūdens zudumiem no cementa kompozīta virsmas, ko savukārt ietekmē temperatūra, apkārtējās vides mitrums un vēja plūsma. Plastiskais rukums ir lielāks, ja cementa kompozītā ir palielināts cementa daudzums, smalkāka tā granulometrija un zemāka ū/c attiecība. Mikrosilīcijs savas smalkās struktūras dēļ palielina plastisko rukumu.

Autogēnais rukums. Autogēnais rukums ir cementa hidratācijas procesa rezultāts. Hidratācijas procesos notiks rukuma deformācijas, pat ja ūdens kustība tiks pilnībā izslēgta no vai uz cementa kompozītu (izolētos apstākļos). Autogēnais rukums ir sekas cementa kompozīta iekšējiem procesiem, ko sauc par „iekšējo žūšanu”. Iekšējā žūšana ir izskaidrojama ar ūdens atbrīvošanos no kapilārajām porām, ko izraisa nehidratētā cementa vēlme saistīties ar brīvo ūdeni un veidot hidratācijas produktus. Rezultātā notiek tilpuma samazināšanās un deformācijas procesi (Bjontegaard, 1999) ir pētījis autogēno rukumu padziļināti.

Autogēnā rukuma skaitliskā vērtība normālas stiprības cementa kompozītam ir relatīvi maza, bet tā ievērojami palielinās augstas stiprības cementa kompozītam, kam ir zema ū/c

attiecība. Zemā ū/c attiecība kopumā izraisa strauju autogēnu rukumu agrajā cementa kompozīta vecumā, rezultātā palielinot kopējo autogēno rukumu. Autogēnais rukums augstas stiprības cementa kompozītā ir ievērojams, kā to var redzēt att. P1.11. ir salīdzināts normālas stiprības cementa kompozīta un augstas stiprības cementa kompozīta rukums. Tāpēc ir skaidrs, ka autogēnais rukums ir ievērojams faktors stiepes spriegumu cēlonim cementa kompozītā, kā rezultātā var rasties rukuma plaisas. Dotajos gadījumos autogēnais rukums rada lielākas deformācijas par temperatūras svārstību izraisītajām, īpaši, gadījumos, ja temperatūras pieaugums ir ierobežots (grīdās, kolonnās u.c.).



P1.11. att. Autogēnā un žūšanas rukuma deformācijas normālas un augstas stiprības cementa kompozītā (FIB, 1999)

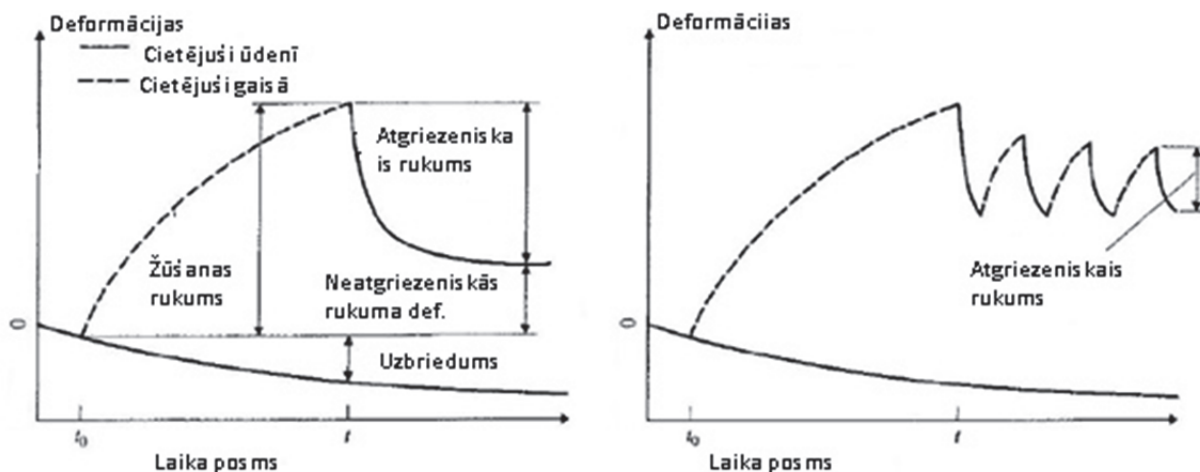
Augstas stiprības cementa kompozīts tiek raksturots kā ļoti jūtīgs pret plaisāšanu. Lai no vērstu šo trūkumu, tradicionālas cementa kompozīta aprūpes metodes tiek lietotas, kā arī tiek izmantotas vieglas pildvielas, kuras piesūcinātas ar ūdeni un kalpo kā iekšējs ūdens rezervuārs cementa kompozīta cietēšanas procesā. Pētījumus rukuma ierobežojumam ir veikuši Van Breugel (2001), Zhutovsky *et al.* (2001) un Bentur (2001). Daudzie pētījumi ir apstiprinājuši autogēnā rukuma nozīmi cementa kompozītā ar zemu ū/c attiecību, kā arī temperatūras ietekme uz rukuma procesiem iegūst lielāku nozīmi.

Žūšanas rukums veidojas parauga cietēšanas procesā, mitruma zaudēšanas rezultātā, tās ir sekas ūdens iztvaikošanai no cementa kompozīta. Žūšanas rukums deformācijas īpaši lielas ir cementa kompozīta agrā vecumā, bet pieaugot cementa kompozīta vecumam, deformāciju lielums samazinās. Žūšanas rukums būtiski atkarīgs no apkārtējā gaisa mitruma, temperatūras un vēja iespējamības. Att. P1.12. kreisajā pusē parādītas žūšanas rukuma deformācijas laika posmā no t_0 līdz t un tad paraugu atkārtoti samitrinot, redzamas atgriezeniskās un neatgriezeniskās rukuma deformācijas. Rukuma atgriezeniskās deformācijas ir ~40–70 % no kopējām žūšanas rukuma deformācijām. Bet labajā pusē žūšanas rukuma deformāciju lielums paraugu cikliski, atkārtoti mitrinot.

Žūšanas rukums parasti notiek cementa kompozītam, kurš ir atklāts apkārtējai videi un tam nodrošināta ūdens iztvaikošana. Šādā cementa kompozītā notiek žūšanas rukuma izraisītas deformācijas, kas var izsaukt virsmas plaisu rašanos.

Normālas stiprības cementa kompozītam var pieņemt, ka žūšanas rukums ir vienāds ar kopējo rukumu.

Deformāciju līkne (sk. att. P1.12.) parāda, ka cementa kompozīts ir pakļauts autogēnajam rukumam pirms žūšanas sākuma. Savukārt, sākoties žūšanas procesam laikā t_0 , attīstās žūšanas rukuma deformācijas.



P1.12. att. Mitruma kustība cementa kompozītā: kreisais att. rāda parauga žūšanas rukuma deformācijas laika posmā no t_0 līdz t un tad tas tika samitrināts; bet labajā att. redzamas žūšanas rukuma deformācijas paraugu cikliski mitrinot (Neville, Brooks, 2010)

Dažos literatūras avotos izšķir arī cementa kompozīta **termisko rukumu**, kas izpaužas kā saraušanās pirmajās stundās (vai dienās) pēc cementa kompozīta sacietēšanas, jo hidratācijas siltums pamazām izkliedējas. Savukārt ar terminu endogēnais rukums tiek saprasta tā cementa kompozīta rukuma daļa, kas nav saistīta ar žūšanu (proti, autogēnais plus termiskais rukums) (ACI Committee 209, 2005).

Karbonizācijas rukums ir fenomens, kas atklāts tikai nesēn. Atmosfērā esošais oglekļa dioksīds mitruma klātbūtnē reaģē ar hidratējušos cementu. Kalcija hidroksīds $[Ca(OH)_2]$ pārvēršas par kalcija karbonātu un arī citas cementa komponentes sadalās. Šāda hidratējuša cementa sastāvā esoša kalcija sadalīšanās ir ķīmiski iespējama pat pie zema oglekļa dioksīda satura normālā atmosfērā. Karbonizācija lēnām norisinās caur cementa kompozīta virsmu iespiežoties arvien dziļāk cementa kompozīta sastāvā.

Oglekļa dioksīda iespiešanās ātrums ir atkarīgs no cementa kompozītā esošā mitruma daudzuma un no apkārtējās vides relatīvā mitruma. Karbonizācija izraisa cementa kompozīta elementa svara pieaugumu un rukumu. Karbonizācijas rukums norisinās jo kalcija hidroksīda kristālu vietā veidojas kalcija karbonāti. Tā kā jaunajiem elementiem ir mazāks tilpums, tādēļ seko rukums. Karbonizācijas process noved arī pie lielākas stiprības un mazākas caurlaidības, jo tiek sekmēts hidratācijas process – atbrīvošanās no ūdens, kā arī kalcija karbonāts aizpilda

cementa pastā esošos tukšumus. Tā kā karbonizācijas rukums ilgā laika periodā salīdzinājumā ar žūšanas rukumu ir neliels, tas pārsvarā netiek ņemts vērā (Gilbert, Ramzi, 2011).

Cementa kompozītu šļūdes process

Šļūde cementa akmenī var būt saistīta ar iekšējo kustību absorbciju vai starpkristālisko ūdeni. Glukliha eksperimentā parādīts, ka cementa kompozīts, no kura bija paņemts prom viss iztvaikojušais ūdens, faktiski neparāda šļūdi (Neville, 1995).

Hidratētā cementam ir dominējoša nozīme laika atkarīgajā cementa kompozīta deformācijā, un tas īstenībā ir cementa kompozīta šļūdes stūrakmens.

Cieša savstarpējā sakarība starp stiprību un šļūdi cementa akmenim ļauj pieņemt, ka šļūde tāpat kā stiprība, atkarīga no neizpildītās gēla telpas relatīvā lieluma cementa akmenī: par cik lielāka šī telpa, par tik mazāka stiprība un lielāka šļūde (Neville, 1995).

Precīzs šļūdes mehānisms vēl nav zināms, kaut gan acīmredzami, ka šļūde tāpat kā citas cementa akmens mehāniskās īpašības, galvenokārt atkarīgas no makrostruktūras kodoliālos izmēros un tikai netieši no ķīmiskā sastāva (Neville, 1995).

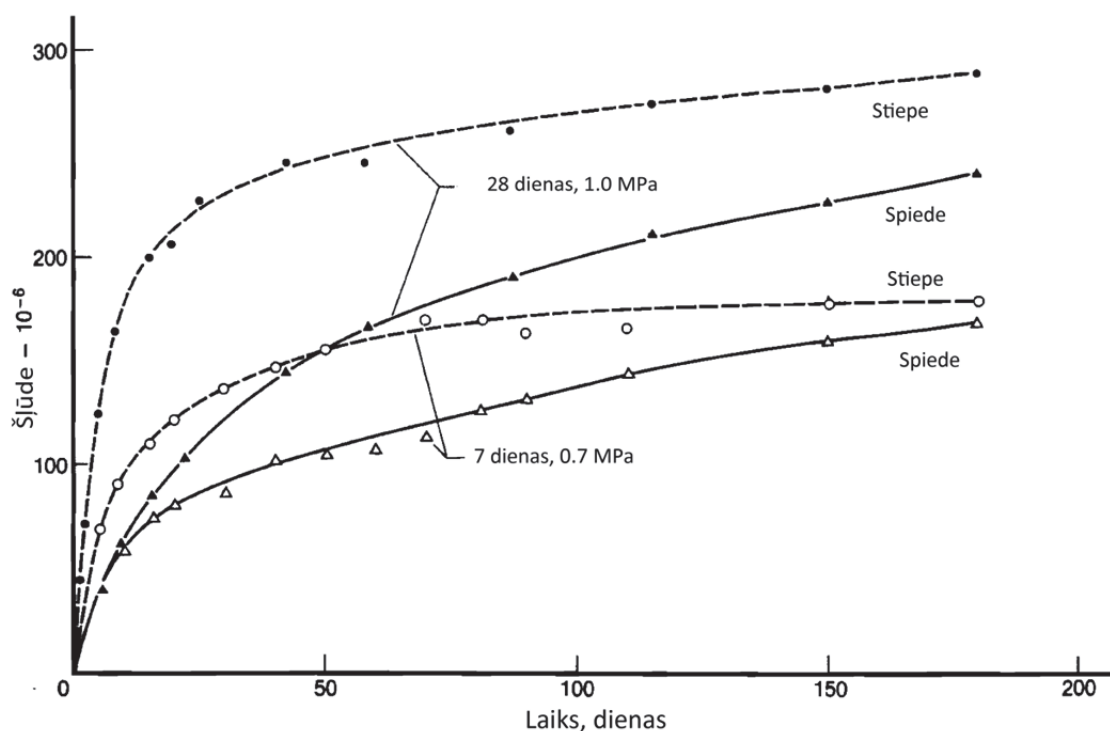
Vispārīgi materiāls uzrāda šļūdi, ja tā deformācijas palielinās laika gaitā zem pastāvīgas slodzes. Šļūde nav gluži sinonīms plūstamībai. Likums, kas regulē deformācijas, ir funkcionāla attiecība starp spriegumu un relatīvu pagarinājumu lielumiem. Bet atsaucoties uz šļūdi, pieņem, ka, pirmkārt, tā ir attiecība starp deformāciju un spriegumu (Huka likums) vai arī plastiska spriegumu–deformāciju līkne elastīgiem materiāliem, un deformācijas, kuru apjoms tiek ietekmēts laika gaitā, kuru laikā darbojas pieliktā slodze. Šāda sprieguma–deformāciju sakarība ir funkcija no laika.

Šļūdes stiepē

Stiepes izraisīta šļūde ir nozīmīga novērtējot cementa kompozīta pretestību rukuma un temperatūras spriegumu izraisītai plaisāšanai, kas ietekmē, piemēram, izlieci, aprēķinot stiepes spriegumus priekš-saspriegtās sijās un projektējot ūdeni aizturošas konstrukcijas.

Kā jau minēts iepriekš, līdz šim tikai nedaudz autoru (Westman, 1995; Neville *et al.*, 1983; Marangon *et al.*, 2012; Kovler *et al.*, 1999; Bissonnette, Pigeon, 1995; Atrushi, 2003; Guomin, 2008; Østergaarda *et al.*, 2001, Langeb *et al.*, 2001 u.c.) ir veikuši šļūdes stiepē deformāciju noteikšanas eksperimentus, kas ir veikti uz pašu autoru izveidotu metodiku un iekārtu bāzes. Viens no iemesliem ir, ka šļūdes deformācijas stiepē pārbaužu veikšana ar aksiālu stiepes slodzi ir ļoti problemātiska, jo parastas stiprības cementa kompozīta stiepes stiprība ir aptuveni 10 % no tā spiedes stiprības, bet eksperimentālie rezultāti rāda, ka augstas stiprības cementa kompozītu stiepes stiprība ir 4–6 % no to spiedes stiprības, tādejādi pārbaudē pieliktā slodze ir zema un, secīgi, iegūtās deformācijas ir ļoti mazas, daudzkārt mazākas par šļūdes deformācijām spiedē un ir problemātiski reģistrējamas un tas apgrūtina precīzu mērījumu iegūšanu. Otrs iemesls ir, ka cementa kompozīta paraugs slogošanas laikā žūst un paraugā parādās rukuma deformācijas, kas ir pretēji vērtas un varbūt daudz lielākas par šļūdes deformācijām stiepē. Ja tas netiek ievērots, tad tas var radīt būtiskas kļūdas rezultātos.

Literatūrā minēts, ka pie vienāda spriegumu lieluma, šļūdes deformācijas spiedē un stiepē ir aptuveni vienāds, kaut slogošanas sākumā šļūdes deformācijas stiepē ir lielākas nekā spiedē (sk. 1.13. att.) (Neville *et al.*, 1983).



P1.13. att. Ūdenī cietināta, stiepei un spiedei pakļauta, cementa kompozīta šļūdes deformācijas pie gaisa relatīvā mitruma 50 % (Neville *et al.*, 1983)

Kā rāda dažādu citu autoru veiktie eksperimenti, tad parastas stiprības betoniem aptuveni pēc mēneša kopš slogošanas sākuma, šļūdes attīstības ātrums stiepē strauji samazinās un var pieņemt, ka ilgtermiņā deformācijas spiedē ir augstākas nekā stiepē. Tas attiecas gan uz dažādiem slodzes lielumiem, gan atšķirīgu slogošanas vecumu.

Šļūdes deformācijas stiepē, tāpat kā spiedē, ir proporcionālas pieliktajai slodzei līdz spriegumu/stiprības attiecībai 0,5 un pie augstākām slodzes/stiprības attiecībām mikroplaisāšana cementa kompozītā ievērojami palielina plastiskās deformācijas. Eksperimentāli veiktie lieces testi parāda, ka šļūde stieptajā zonā ir lielāka par šļūdi spiestajā, bet uz neitrālās ass paliek nemainīga (Neville *et al.*, 1983).

Gutch, Rosta (1995) savos veiktajos eksperimentos secinājuši, ka sākotnējā spriegumu/stiprības attiecība būtiski neietekmē šļūdi stiepē. Umehara un Uehara (1995) un Hauggaard *et al.* (1997; 1999) savos pētījumos pierāda temperatūras ietekmi uz agrīnā vecuma stiepi šļūdē. Tāpat arī to, ka spiedes un stiepes šļūde ir salīdzināmas. Bissonnette un Pigeon (1995) identificēja, ka ū/c attiecībai un slogošanas ilgumam, ir būtiska nozīme uz šļūdes stiepē deformācijām agrīnā vecumā. Šo autoru eksperimentālie pētījumi pierādīja, ka pie palielinātas ū/c attiecības materiāls dod augstāku īpatnējo šļūdi. Altoubat un Lange (2001) konstatēja, ka sākotnējā pamata šļūdes līkne ir ļoti jutīga pret slogošanas ilgumu pirmajās 2 dienās. Tāpat tika secināts, ka pamata šļūdes modelis, kas balstās uz sacietēšanas teoriju, apmierinoši apraksta

stiepes šļūdi uzvedība agrā vecumā. Østergaarda *et al.* (2001) u.c. autori pētījuši parastā portlandcementsa pamata šļūdes uzvedību agrā vecumā. Tāpat eksperimentāli pētīts sloģojuma vecuma, sākotnējā spriegumu/stiprības attiecības un ū/c attiecības ietekme uz šļūdes stiepē deformāciju lielumu.

Lineārā un nelineārā šļūde. Superpozīcijas likums. Ilglaicīgais elastības modulis

Izšķir lineāro un nelineāro šļūdi. Šļūdi sauc par lineāru, ja deformācijas ir aptuveni proporcionālas spriegumiem un, ja spriegumi nepārsniedz mikroplaisu rašanās robežu. Kad spriegumi pārsniedz šo robežu, sākas deformāciju pastiprināts pieaugums jeb nelineārā šļūde (Bulavs, Radiņš, 2006; Cajs, Mandrikovs, 1991).

Lineārā šļūde

Lineāro šļūdi izskaidro ar to, ka cementa akmens gelveida sastāvdaļai piemīt viskoza daba. Deformācijas ir atkarīgas no slodzes darbības ilguma. Lineārās šļūdes deformāciju dzišana notiek tāpēc, ka kristalizācijas procesā gēla daudzums samazinās, notiek spriegumu pārdalīšanās (no gelveida komponenta uz cementa akmens un pildvielu kristālisko veidojumu). Praktiski šļūdes deformācijas izdziest pēc vairākiem gadiem reizē ar stiprības pieauguma izbeigšanos (Bulavs, Radiņš, 2006; Cajs, Mandrikovs, 1991).

Nelineāra šļūde

Pie lielākām slodzēm proporcionalitāte starp slodzi un deformāciju fiksētā laika momentā nesaglabājas un šļūdes parādība kļūst nelineāra. Eksistē vairāki paņēmieni nelineāro šļūdes teoriju izveidošanai. Šļūdes nelinearitāte raksturīga relatīvi lielu spriegumu gadījumos. Viena no vienkāršākajām metodikām ir gabaliem lineāras aproksimācijas metode. Kaut arī šī metode ir visai tuvināta, tā tomēr dod iespēju spriest par materiāla šļūdi dažādos deformēšanās diapazonos. Inženieru aprēķinos tiek lietotas vienkāršotas uz papildus hipotēzēm balstītas teorijas (Bulavs, Radiņš, 2006; Cajs, Mandrikovs, 1991).

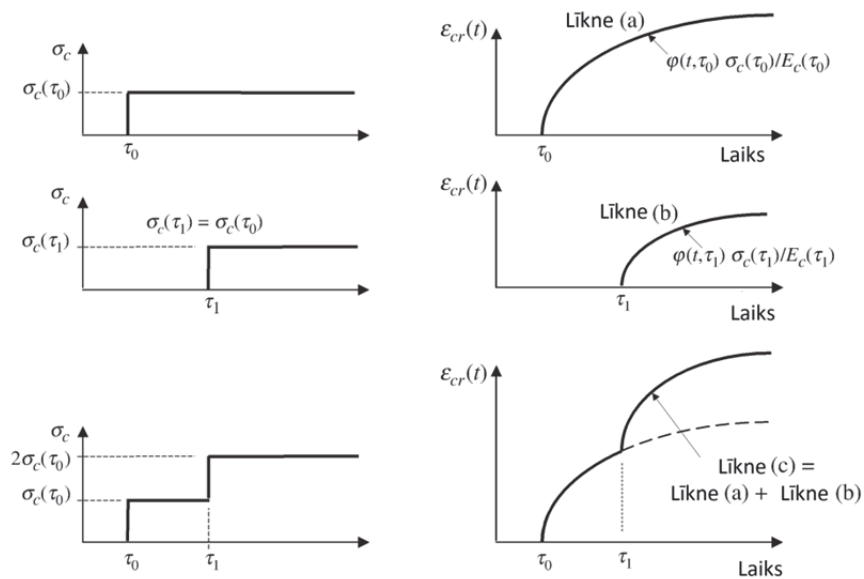
Superpozīcijas princips

Lielākā daļa materiālu pie zemiem spriegumu līmeņiem darbojas lineāri visko–elastīgi, turpretim pie augstiem spriegumu līmeņiem materiāls darbojas nelineāri gan elastīgajās, gan arī no laika atkarīgajās deformācijās. Lineārā visko–elastīgā darbība nozīmē, ka šļūdes deformācijas ϵ ir proporcionālas pieliktajiem spriegumiem σ . Cementa kompozītam lineārais šļūdes likums ir spēkā pie spiedes spriegumiem zem 30–40 % no cilindru spiedes stiprības (Shen, Walraven, 1991; Bazant, Najjar, 1973, Gilbert, Ranzi, 2011).

Pieņēmums par cementa kompozīta lineāro darbību ir svarīgs priekšnoteikums superpozīcijas principa izmantošanai. Superpozīcijas princips nozīmē, ka ja deformācijas, kas rodas no katra spriegumu līmeņa pieguma $\Delta\sigma(t_0)_n$, kas pielikts laikā t_0 , tiek summētas, tad kopējā deformācija laikā t tiek iegūta (sk. att. 1.14.).

Kā piemēru superpozīcijas darbības principam var minēt trīs cementa kompozīta paraugu, kas iegūti vienas betonēšanas laikā un cietējuši vienādos apstākļos, darbību pie

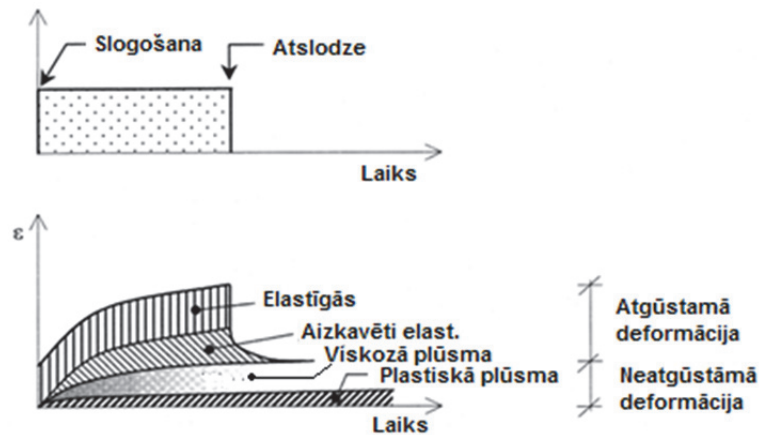
atšķirīgiem spriegumiem σ_n un laikā t_0 . Ja pirmo cementa kompozīta paraugu slogu ar spriegumu līmeni σ_1 un laikā $(t_0)_1$, tad parauga deformācijas raksturo līkne a) (sk. att. P1.15.). Līdzīgi otrs paraugs tiek slogots ar sprieguma līmeni σ_2 un laikā $(t_0)_2$, kura deformācijas raksturo līkne b). Trešais paraugs tiek slogots ar spriegumu līmeni σ_1 un laikā $(t_0)_1$, un paaugstināts par spriegumu līmeni (stiepē vai spiedē) σ_2 un laikā $(t_0)_2$. Deformāciju līkni raksturo grafiks c) vai d). Izejot no šiem datiem un superpozīcijas principa, tad līknes c) un d) var tikt iegūtas summējot līknes a) un b). Tomēr šļūdes relaksācija atslogojot un šļūdes deformācijas turpmākā slogošanas gadījumā netiek ievērtētas ar superpozīcijas principu. Šo efektu izraisa plastiskā plūstamība ar neatgriezeniskajām laikā veidojošām deformācijām, kas attēlotas att. P1.15.



P1.14. att. Superpozīcijas princips (Gilbert, Ranzi, 2011)

Ilglaiīgais elastības modulis

Ilglaiīgās deformācijas ϵ_i vērtība raksturo materiāla šļūdētspēju. Dažādiem materiāliem šī vērtība ir atšķirīga. Tātad dažādu materiālu ilglaicīgās elastības moduļi līdzīgi kā īslaicīgās elastības moduļi ir atšķirīgi. Ilglaiīgo elastības moduļu vērtības H konkrētiem materiāliem vienmēr ir mazākas par attiecīgo materiālu momentāno elastības moduļu vērtībām. To mērvienības ir vienādas (Pa) (Bulavs, Radiņš, 2006).



P1.15. att. Deformāciju galvenie veidi slodzes pielikšanas un noņemšanas ietekmē (Emborg, 1989)

Šļūdes mehānismi

Šļūdes deformācijas var iedalīt divās komponentēs, kuras norisinās vienlaicīgi:

Galvenā šļūde ε_{bc} – tās avots ir ilgstošas, nemainīgas slodzes iedarbība uz cementa kompozīta paraugu, kurā mitruma zudumi vai ieguvumi ir novērsti. Tā attēlo šļūdi pie nemainīga mitruma daudzuma, bez mitruma kustības materiālā, un tādejādi tā ir neatkarīga no parauga izmēra un formas.

Žūšanas šļūde ε_{dc} – papildus šļūde, kas novērojama, kad paraugs ir pakļauts apkārtējai videi un žūst. Tā kā to izraisa žūšanas process, tad žūšanas šļūde ir atkarīga no parauga izmēra un formas un tā ilgtermiņā var sasniegt savu robežvērtību. Cementa kompozīta žūšanas šļūdi veido divas savstarpēji papildinošas fizikālas parādības: raksturīgā žūšanas šļūde – žūšanas šļūde, kas raksturīga materiālam, un pamatšļūde, sk. izteiksmi (1.4) (Granger *et al.*, 1997) .

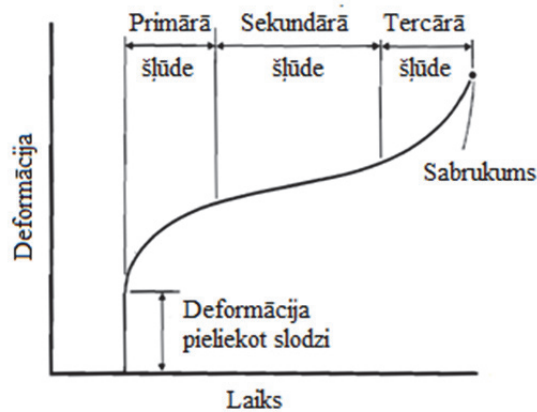
$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{bc} + \varepsilon_{dc} \quad (1.4)$$

kur

ε_{bc} – pamatšļūdes deformācijas, mm/mm · 10⁻⁶;

ε_{dc} – žūšanas šļūdes deformācijas, mm/mm · 10⁻⁶.

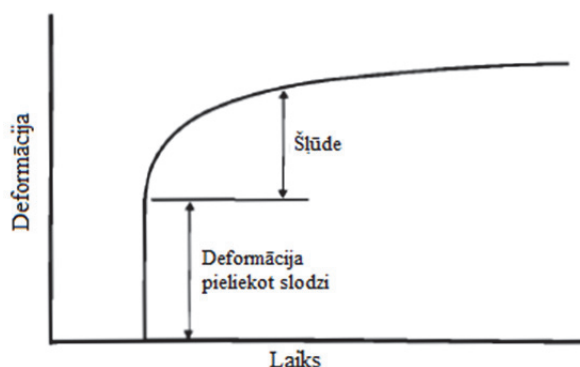
Vispārīgā šļūdes deformāciju-laika līkne (sk. att. P1.16.) šļūdes procesu jebkurā materiālā iedala trīs apgabalos: primārajā, sekundārajā un terciārajā šļūdē. Slodzes pielikšanas brīdī rodas acumirklīga deformācija, kura ir elastīga, bet tā var sevī iekļaut arī neelastīgu komponenti.



P1.16. att. Vispārīgā šļūdes deformācijas—laika līkne (Neville *et al.*, 1983)

Primārās šļūdes apgalā šļūdes attīstības ātrums samazinās laikā, grafiski to attēlo deformāciju – laika līknes slīpuma samazināšanās. Tas liecina par materiāla šļūdes pretestības pieaugumu – spriegotā materiālā deformācija kļūst sarežģītāka. Sekundārā šļūdē jeb līdzsvara šļūdē tās ātrums ir konstants, t.i., diagramma kļūst lineāra. Bieži vien šis ir šļūdes ilgākais posms. Šļūdes ātruma pastāvīgums tiek skaidrots ar balansu starp konkurējošiem procesiem - deformāciju nostiprināšanos un atgriezeniskumu (Callister, Rethwisch, 2008). Terciārās šļūdes apgalā novērojams šļūdes ātruma pieaugums, kura rezultātā paraugs sabrūk. Terciārā šļūde var arī netikt novērota, tas ir atkarīgs no tā vai ir, vai arī nav, spriegumu pieaugums. Piemēram, cementa kompozītā terciārās šļūdes apgalā var rasties šļūdes pieauguma dēļ, ko izraisa mikroplaisāšana pie lielām slodzēm, t.i., slodzēm, kuras pārsniedz tipisko darba slodžu apgalā, kas parasti ir 25 līdz 40 procenti no cementa kompozīta īslaicīgās stiprības (Neville *et al.*, 1983).

Ja darba slodzes netiek pārsniegtas, primārā šļūde cementa kompozītā nav izšķirama no sekundārās un terciārais apgalā nav novērojams. Šāda deformāciju – laika līkne ir attēlota att. P1.17.



P1.17. att. Vispārīgā šļūdes deformāciju - laika līkne cementa kompozītam, kas darbojas normālas slodzes apstākļos (Neville *et al.*, 1983).

Šļūdes mikromehānismi

Cementa kompozīta šļūdes procesu mehānismi ir sarežģīti un joprojām nav līdz galam izpētīti. Lai gan ir vispārpieņemti 2 galvenie iespējamie mehānismi: mikroplaisāšana cementa

kompozīta apvalkā un, t.s., slodzes izraisītais rukums, neviena no ierosinātajām teorijām nav līdz galam attiecināma uz visiem iegūtajiem šļūdes novērojumu rezultātiem, bet katra no tām izskaidro tikai daļu no novērojumiem un saskan ar daļu no iegūtajiem eksperimentālajiem rezultātiem. Ir iespējams, ka šļūde ietver sevī divus vai vairāk mehānismus vienlaicīgi. Tomēr, lai pieņemtu šādu kombinētu teoriju, vēl nav iegūti nepieciešamie eksperimentālie pierādījumi. Neville *et al.* (1983) ir izdalījis 6 šļūdes mikromehānismu teorijas:

Mehānisku deformāciju teorija

Šajā teorijā tiek pieņemts, ka slogota cementa kompozīta izturēšanos izraisa iekšējie spriegumi, kurus rada slodzes izraisīta cementa pastas kapilāru struktūras formas maiņa. Cementa kompozītam tiek pakļautam spiedei, kapilāri tiek deformēti un tajos esošais ūdens tiek pārvietots uz āru, kur kapilāru diametrs ir lielāks, tādējādi samazinot spriegumu ar kādu tiek piesaistīts kapilārais ūdens. Tas samazina izraisītos spiedes spriegumus un daļēji kompensē pieliktos ārējos spriegumus. Tomēr ūdens iztvaikošana izjauc higrisko līdzsvaru. Spriegumi kapilārajā ūdenī pieaug un, lai saglabātu līdzsvara stāvokli, arī spiede cietajā fāzē pieaug. Rezultējošā deformācija veido šļūdi un tādējādi tā īstenībā ir aizkavēta elastīga parādība, kuras kavēšanos rada nepieciešamais laiks, lai atjaunotu tvaika spiediena līdzsvaru ar apkārtējo vidi. Noņemot slodzi, radušās spiedienu atšķirības starp gaisa un ūdens fāzēm kapilāru struktūrā veido spēkus, kas atgriež kapilārus to agrākajā formā. Teorijas autors Eižēns Freissinets (*Eugene Freyssinet*) uzskata, ka cementa kompozītam pieliktā slodze palielina pārkārtojumu, kas noved pie tilpuma samazinājuma, iespējamību un tieši šie pārkārtojumi rada neatgriezenisku cementa kompozīta šļūdi, savukārt elastīgā deformācija, kura tiek pagarināta mitruma iedarbības dēļ ir atgriezeniska. Šī hipotēze neizskaidro dažādu faktoru iedarbību uz šļūdi un tai nav apstiprinošu eksperimentālu pierādījumu, tādēļ mūsdienās tā netiek apskatīta.

Plastiskās tecēšanas teorija

Viena no teorijām ierosina, ka šļūdes veidošanās iemesls ir kristāliskā tecēšana, t.i., plakņu savstarpējā slīdēšana kristāliskā režģī. Tas norāda, ka cementa kompozīta šļūdei varētu būt līdzīga daba metālu plastiskajai tecēšanai. Tomēr metālu plastiskā deformācija norisinās tikai tad, ja darbojošies spriegumi pārsniedz tecēšanas robežu. Var pieņemt, ka cementa kompozīta tecēšanas robeža ir ārkārtīgi zema, vai arī, ka cementa kompozīta tecēšanas robežas ir vairākas, vienmērīgi izkliedētas sākot no pavisam mazas.

Viskozās tecēšanas teorija

Šļūdes viskozās tecēšanas teorija ir vien no vissvarīgākajām. Hidratēta cementa pasta ir augsti viskozs šķidrums, un tā viskozitāte palielinās laikā, ko izraisa ķīmiskas izmaiņas struktūrā. Šajā hipotēzē pieņem, ka cementa kompozīts sastāv no divām daļām: no cementiska materiāla, kas to slogojot izturas viskozi, un inertas pildvielas, kas slodzes iespaidā netek. Kad cementa kompozīts ir slogots, pildvielu klātbūtne aizkavē cementa tecēšanu, tādējādi pildvielas pakāpeniski kļūst noslogotākas, kamēr spriegumi cementa pastā samazinās. Tā kā cementa

pastas šļūde ir proporcionāla pieliktajam spēkam, tad šļūdes ātrums pakāpeniski samazināsies, slodzei pārejot no viskoza uz inerti materiālu.

Aizkavētās elastības teorija

Šī teorija tieši sasaista šļūdi ar žūšanas rukumu. Tiek pieņemts, ka īsto šļūdi nav iespējams novērot ar darba slodzēm slogotā paraugā un nevienmērīga rukuma deformācijas izraisa elastīgas izmaiņas cementa kompozītā. Tas gan neizskaidro šļūdi ūdenī uzglabātā cementa kompozītā un lielās masu konstrukcijās. Pieņem, ka cementa kompozīta šļūdi izraisa nelineāra spriegumu – deformāciju attiecība cementa kompozītā, kas ir sekas nevienmērīgam rukumam. Rukums neveido tiešu šļūdes pieaugumu, bet gan ir par iemeslu nevienmērīgām tilpuma izmaiņām, kas rosina īslaicīgus spriegumus. Šie īslaicīgie spriegumi kopā ar ārējas slodzes radītiem spriegumiem palielina cementa kompozīta iekšējo spriegumu lielumu un izkliedētību.

Infiltrācijas teorija

Infiltrācija ir dispersijas vides viskoza tecēšana dispersā fāzē. Šī teorija ir radusies no novērojuma, ka hidratēta cementa pasta ir stingrs gels un tādos gēlos slodze izraisa viskozā komponenta izstumšanu no elastīgā struktūras skeleta dobumiem. Tas rada spriegumu pārdali no viskozā komponenta uz elastīgo cementa pastas skeletu. Tādejādi cementa kompozīta šļūdes iemesls ir gēla ūdens infiltrācija spiediena ietekmē.

Mikroplaisāšana

Ir vispārīgi pieņemts, ka spriegumu – deformāciju attiecības nelinearitāti cementa kompozītā izraisa šļūde. Tomēr ir eksperimentāli iegūti rezultāti, kas norāda, ka nelinearitātes cēlonis ir kontaktzona starp pildvielu un hidratētu cementa pastu. Kontaktzonas loma ir nodrošināt mikroplaisāšanas neturpināšanos un neizplešanos. Šļūdes un spriegumu proporcionalitātes augšējā robeža ir apgabals, kurā sākas saišu, starp pildvielu un pastu, plaisāšana. Jāatzīmē, ka mikroplaisāšana ir atbildīga tikai par daļu no deformācijām, kas radušās ilgstošas pastāvīgas slodzes dēļ. Tā ir šļūdes deformāciju neatgriezeniskā daļa. Saišu plaisu attīstības apjoms šļūdes iedarbībā ir atkarīgs no saišu plaisu daudzuma cementa kompozītā pirms slodzes pielikšanas.

Tā kā neviena no apskatītajām teorijām pilnīgi neizskaidro šļūdes veidošanos, tad ACI Committee 209 (2008) ir izveidojusi kombinētus mehānismus, kas sevī iekļauj vairākas teorijas vienlaikus:

Cementa matricas viskoza tecēšana, ko izraisījusi ar adsorbēta ūdens slāņiem ieeļļotu gēla daļiņu slīdēšana vai nobīde.

Konsolidācija, ko izraisījusi adsorbēta ūdens infiltrācija vai starpslāņu ūdens sadalīšanās.

Aizkavēts elastīgums, ko izraisa cementa matricas elastīgo deformāciju aizkavēšana skeletā, ko veido pildvielas.

Paliekoša deformācija, ko izraisa vietējas plaisas (mikroplaisāšana un kristālu sairšana) un pārkristalizēšanās un jaunu fizikālu saišu veidošanās.

Apmierinošai šļūdes teorijai ir vienotā veidā jāizskaidro cementa kompozīta uzvedības moduļi dažādos apstākļos pie dažādiem slodzes stāvokļiem. Viedokļu atšķirība parasti ir vērsta uz ūdens nozīmi šļūdes sākumā vispārīgi pieņemot, ka ūdens kustība ir saistīta ar sākotnējo šļūdi, bet daļiņu un cietu vielu kustība tiek saistīta ar ilgtermiņa šļūdi.

Ilglaicīgo īpašību makro mehānismi

Plašs eksperimentālais materiāls, kas iegūts pētot šļūdes un rukuma parādību, dod iespēju paredzēt dažādu faktoru ietekmi uz ilgstošu cementa kompozīta deformējamību. Šļūdes un rukuma deformāciju lielumu ietekmē dažādi iekšēji un ārēji faktori.

Iekšējie ietekme faktori

- Cementa tips ietekmē cementa kompozīta stiprību slogošanas momentā, jo augstvērtīgāks cements, jo mazāka šļūde.
- Cementa maluma smalkums ietekmē cementa kompozīta stiprības pieaugumu jaunā vecumā un tādā veidā ietekmē arī tā šļūdi.
- Šļūdes deformāciju lielums stiprā mērā atkarīgs arī no ūdens un cementa attiecības. Jo mazāka ū/c attiecība, jo šļūde būs lielāka.
- Pildvielu veids un mērogs tāpat ietekmē šļūdes lielumu. Agrāk veiktie pētījumi rāda, ka pildvielas notur šļūdi tāpat kā rukumu.
- Arī pildvielu Elastības modulis ietekmē šļūdes deformāciju lielumu. Cementa kompozīts ar dažādām pildvielām, raksturojas ar dažādu šļūdes deformāciju lielumu šļūde un elastības modulis arī saistīti ar proporcionālām sakarībām. Cementa kompozīta uzdotā sastāva stiprība un elastības modulis proporcionāli viens otram.
- Cementa kompozīta stiprība nozīmīgā līmenī ietekmē cementa kompozīta šļūdi, plašā vērtību diapazonā šļūde proporcionāla cementa kompozīta stiprībai, slodzes pielikšanas momentā.
- Cementa kompozīta vecums slogošanas momentā. Vecuma ietekme ir lielāka, nekā cementa kompozīta stiprības pieaugums laikā. Īslaicīgā deformācija mainās līdz ar cementa kompozīta vecumu. Šai deformācijai ir tendence asimptotiski samazināties līdz sasniedz galējo vērtību ϵ_0 . Jo vecāks cementa kompozīts, jo mazāks gēla daudzums cementa akmenī un mazāka beigu deformācija.

Ārējie ietekmes faktori

Daudz dažādi ārējie faktori ietekmē šļūdes un rukuma lielumu un attīstības ātrumu. Kā būtiskākie minēti:

- Parauga forma;
- Slodzes veids. Jo lielāki spriegumi, jo lielāka šļūde. Šļūdes ir intensīvāka, ja pielikts lielāks spriegums un augstāka apkārtējās vides temperatūra;

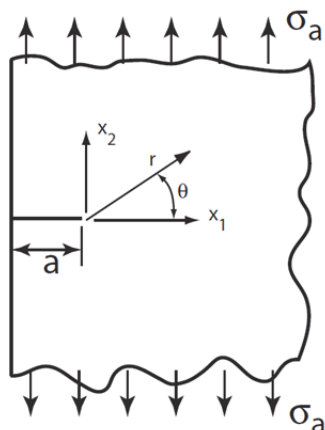
- Slogojuma ilgums;
- Saspriegums;
- Apkārtējās vides mitrums. Šļūde palielinās līdz ar mitruma samazināšanos, jo lielāks mitrums, jo mazāka šļūde. Apkārtējās vides mitruma ietekme uz sacietējušu cementa kompozītu ir nenozīmīga;
- Paraugu iekšējais mitrums – izolēts vai brīvi mainīgs. Izžūšana noved pie cementa kompozīta šļūdes pieauguma (agrā vecumā);
- Pie temperatūras paaugstināšanas virs normālas. Tas nosacīti saistīts ar ūdens pārbīdes pieaugumu un deformāciju procesa aktivizāciju. Tomēr šļūdes pieaugums ar laiku apstājas un paliek vienāds pie visām temperatūrām;
- Cementa kompozīta briedums.

(Neville, 1995; Neville *et al.*, 1983; Neville, Meyers, 1964; Čajs, Mandrikovs, 1991; Bulavs, Radins, 2006; Panovko *et al.* 1955; Gilbert, Ranzi, 2011 u.c.).

Cementa kompozīta plaisu mehānikas pamatprincipi

Uz plaisām iespējams skatīties no dažādiem skatu punktiem. Piemēram, atomu līmenī uz plaisu var skatīties kā atomu plakņu atdalīšanos. Mikrostruktūras līmenī kā uz materiāla daļiņa polikristāliskā materiālā vai šķiedras kompozītā.

P1.18. att. parādīts paraugs ar jau esošu, izveidotu plaisu, kuras garums ir a . Paraugam ir pielikts stiepes spriegums σ_a . Tuvu plaisas galam spriegums ir paaugstināts virs vidējā sprieguma σ_a . Dēļ paaugstinātā spriegumstāvokļa materiāls tuvu plaisas galam piedzīvo lielas deformācijas un tiek sagrauts, ļaujot plaisai izplatīties tālāk. Spriegumu virziens pirms plaisas gala ir attēlots att. 1.18. Ja materiāls līdz plaisas turpināšanās mirklim uzvestos kā lineāri elastīgs materiāls, tad spriegumi plaisas galā būtu nosakāmi pēc (1.5) izteiksmes.



P1.18. att. Paraugs ar pieliktu stiepes spriegumu un iepriekš izveidotu plaisu. I veida spriegumu intensitātes faktors $K_I = 1.12\sigma_a\sqrt{\pi a}$ (Zehnder, 2010)

$$\sigma_{22} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1.5)$$

kur

K_I – spriegumu intensitātes faktors, $MPa\sqrt{mm}$

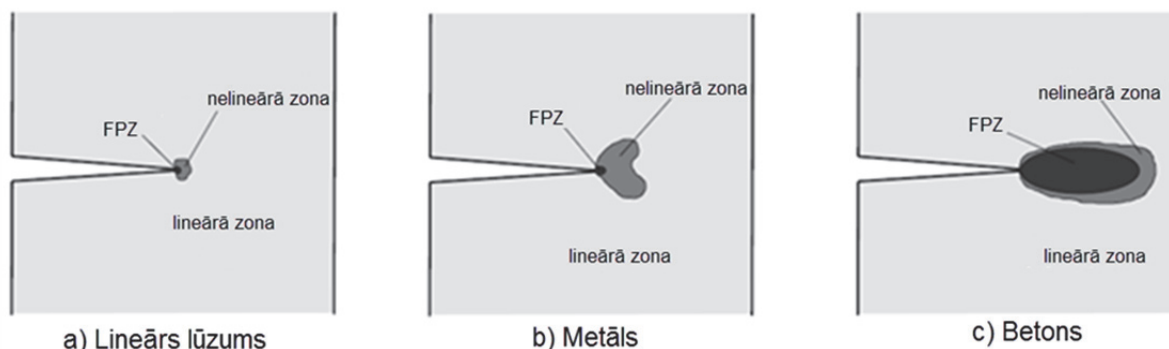
r – attālums no plaisas gala, mm

σ_{22} – spriegumi, MPa

Dēļ paredzamā bezgalīgā sprieguma plaisas galā materiāls sabruks vai neelastīgi un nelineāri deformēsies, lai izvairītos no spriegumiem plaisas galā, tādēļ, ļoti tuvu plaisas galam izteiksme (1.5) nav piemērota, lai raksturotu spriegumu laukumu. Tomēr ja r_p zonas izmērs tuvu plaisas galam ir mazs relatīvi a izmēram, kurā notiek neelastīgas deformācijas, spriegumu ārpus „padošanās zonas” ir iespējams diezgan tuvināti iegūt no izteiksmes (1.5). Šis ir tā sauktais „mazās proporcijas padevīgums” (“small scale yielding” (SSY)) – pieņēmums plaisu mehānikā (Zehnder, 2010).

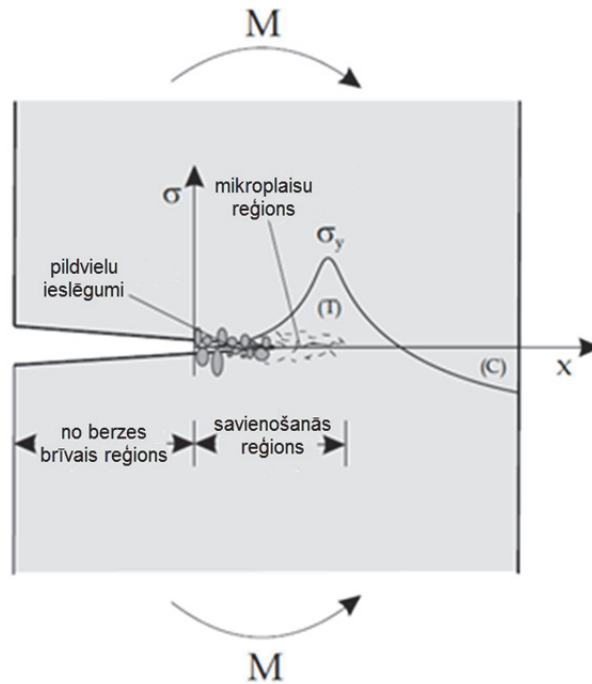
Lūzumu procesu zona

Betons un citi cementa kompozīta materiāli pēc to strukturālās uzbūves ir kvazi—trausli (*quasi-brittle*) materiāli. Līdz ar to lūzumu uzvedība šādos materiālos nav skaidrojama tikai ar stiprības kritēriju, jo bezgalīgais spriegums plaisas galā izraisītu sabrukumu pie jebkuras slodzes. Tādēļ, plaisas galā eksistē maza neelastīga zona, kur materiālā norisinās materiāla izlīdzināšanās (*material softening*). Tēraudam šī neelastīgā zona ir nedefinēta kā tecēšanas zona (*yielding zone*). Elastīgi plastiskiem materiāliem lielākā daļa no nelineārās zonas ir plastiski nostiprināta (*plastic hardening*) vai perfekti plastiska un lūzumu procesu zona (*Fracture process zone (FPZ)*) ir ļoti maza daļiņa no nelineārās zonas, sk. att. P1.19.(b). Kvazi-trausliem materiāliem, kā betons un cementa kompozīti, FPZ ir daudz lielāka un aizņem gandrīz visu nelineāro zonu (ACI—Committee—446, 1999).



P1.19. att. Izmaiņas spriegumu sadalījumā plaisas gala zonā, nelineārajā zonā un FPZ a) elastīgi trauslos materiālos, b) elastīgos materiālos un c) kvazi-trauslos materiālos (ACI-Committee-446, 1999)

Pēc tam, kad maksimālie spriegumi, lokāli, ir sasniegti, materiāla reģions ap plaisas galu izlīdzina spriegumus. Stiepes izlīdzināšanas zona plaisas galā nepārtraukti izkliedē enerģiju, kamēr plaisas gals turpina attīstīties, sk. att. P1.20.

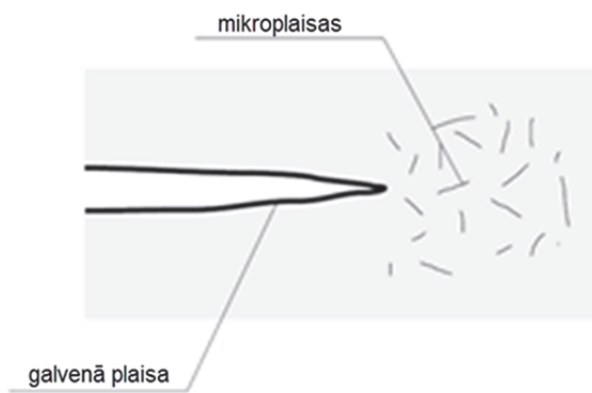


P1.20. att. FPZ un dažādās zonas stiepes izlīdzināšanās dēļ, pārejas zonā no makroplaisas līdz neskartam, veselam materiālam plaisas galā (Pereira, 2012)

Lūzuma brīdī, augstais spriegumu līmenis plaisas gala tuvumā izraisa haotiski izvietotas un orientētas mikroplaisas, kas veidojas galvenokārt nepilnību un tukšumu dēļ plaisas galā. Šī haotiski orientētā mikroplaisu zona tās veidošanās mirklī patērē daudz enerģijas, kas paredzēta plaisas tālākai attīstībai, kā rezultātā plaisas tālāka attīstība ir apgrūtinātā. Šis fenomens ir mikroplaisu vairogs (*micro-crack shielding*), sk. att. P1.21. (Pereira, 2012).

Augstā porainība un neviendabīgais cementa kompozīta raksturs, kā arī sākotnēji jau esošo mikroplaisu klātbūtne, uzskatāmi norāda uz to ka, makro plaisas parādīšanās matricā, liecina, ka reģionā pirms plaisas ir zona, kurā ir mikroplaisājumi, sk. att. P1.21.

Līdzīgi kā ar citiem lūzumu mehānikas (*fracture mechanics*) lielumiem, kas iegūti veicot dažādus testus, tie ir atkarīgi no parauga ģeometriskajiem parametriem.



P1.21. att. Mikroplaisu vairogs (Pereira, 2012)

FPZ garums plaisas galā ir atkarīgs no dažiem būtiskiem materiālu raksturojošiem parametriem (Hillerborg *et al.*, 1976; Karihaloo, 1995). Lai raksturotu FPZ izmērus tiek izmantota FPZ raksturīgais garums, l_{ch} (Asferg, 2006), ko izsaka (1.6) izteiksme.

$$l_{ch} \approx \frac{E_t G_f}{f_t^2} \quad (1.6)$$

kur

f_t – materiāla stiepes izturība, *MPa*

E_t – materiāla Junga modulis, *GPa*

G_f – materiāla lūzuma enerģija *N/m*

l_{ch} – FPZ garums, *mm*

Lai gūtu priekšstatu par cementa kompozīta materiāla FPZ garumu, tas salīdzināts ar stikla FPZ garumu, sk. tab. P1.3.

P1.3. tabula

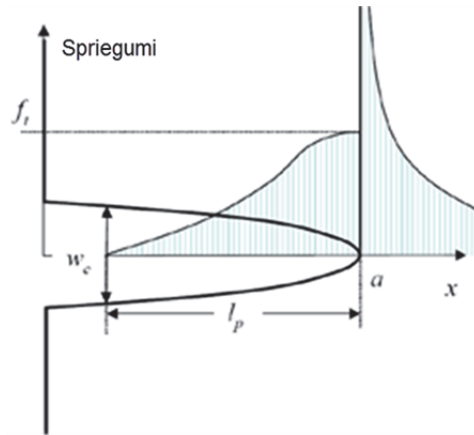
FPZ garuma salīdzinājums dažādos materiālos (Karihaloo, 1995)		
Materiāls	l_{ch}, mm	Atsauce
Stikls	10^{-6}	(Bache, 1986)
Cementa pasta ar silīcija putekļu pildvielām	1	(Bache, 1986)
Sacietējusi cementa pasta	5-15	(Hillerborg, 1983)
Java	100-200	(Hillerborg, 1983)
Augstas stiprības cementa kompozīts (50 – 100 MPa)	150-300	(Hilsdorf, Brameshuber, 1991)
Parastais betons	200-500	(Hillerborg, 1983)
Dambju cementa kompozīts ($D_{max} =$ 38 mm)	700	(Bruhwiler, et al. 1991)

Spriegumu sadalījums plaisas galā

Spriegumu sadalījums cementa kompozīta plaisas galā no stiepes izraisīta spēka ir plaši apskatīts jēdziens, ko aplūkojuši daudz pētnieku (Hillerborg *et al.*, 1976; Karihaloo, 1995; Bažant, Oh, 1983; Stang *et al.*, 2006; Bazant, 2001), kas analizējuši plaisas gala esošos spriegumus, izvirzot modeļus, kā raksturot spriegumu stāvokli.

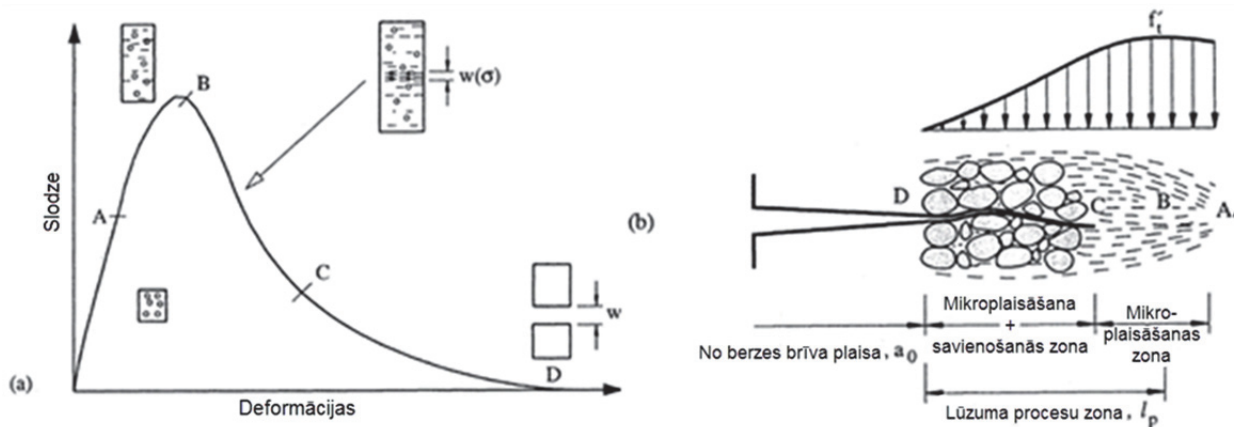
Pēc P1.3. tabulā dotajiem datiem redzams, ka FPZ cementa pastai ir 1 mm un FPZ augstas stiprības cementa kompozītam ir 150–300 mm. Cementa kompozīta pildvielas pasargā cementa kompozītu no trauksa sabrukuma un palielina FPZ izmērus, kur parādās mikroplaisas un mikroplaisu savienšanās (*crack bridging*).

Pētījumā, ko veica (Stang *et al.*, 2006) tika salīdzināti savienoto mikroplaisu modelis (*bridged crack model*) (sk. att. P1.22.) ar fiktīvās plaisas modeli, kas aprakstīts tālāk, un izanalizējot veiktos pētījumus, tika dots slēdziens ka FCM ir daudz atbilstošāks, lai raksturotu cementa kompozīta plaisu raksturu un spriegumu sadalījumu (Asferg, 2006).



P1.22. att. Savienoto plaisu modelis (Stang *et al.*, 2006)

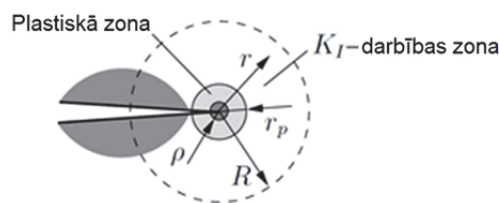
Att. P1.23. parādīts tipisks, cementa kompozīta parauga stiepes slodzes-deformāciju grafiks ar stiepes relaksāciju (*tension softening*) un mikroplaisu un mikroplaisu savienošanās ietekmi.



P1.23. att. a) Tipiska stiepes slodzes-deformāciju līkne cementa kompozīta paraugam; b) FPZ sākotnējās plaisas galā. FPZ var attīstīties tikai stiepes relaksācijas zonas BCD ietvaros un tā ir ieskaita ar nelineāru reģionu BA (Karihaloo, 1995)

Spriegumu intensitātes faktors

Plaisas gala lauks tiek pilnībā raksturots ar spriegumu intensitātes faktoru K_I . Šis K_I -ietekmētais lauks dominē reģionā ap plaisas galu. Tas shematiski ir attēlots att. P1.24. ar apli un rādīsim R . Ārpus R robežām augstāk minētie nosacījumi var būt vērā neņemami (Gross, Seelig, 2011).



P1.24. att. K-koncepts

K_I ietekmētā lauka ticamība ir ierobežota arī virzienā uz centru, jo lineārā elastīguma stāvoklis nesniedz patiesu ieskatu patieso spriegumu un deformāciju lielumam zem konkrētas r vērtības. Viens no iemesliem ir, ka neviens īsts materiāls nespēj izturēt bezgalīgus spriegumus. Turklāt, bezgalīgi augstas deformācijas parādīšanās ir pretrunā ar pieņēmumu par lineāru elastīgumu, kā pamatā ir mazas deformācijas. Vairumā gadījumu visos esošos materiālos, plastiskā tecēšana jeb neelastīgās deformācijas parādās gadījumos, kad lielā mērā palielinās spriegumu līmenis. Turklāt, pastāv arī maza, bet galīga procesu zona plaisas galā, kur notiek savstarpējo saišu sabrukums. Šīs zonas lielums ir raksturots ar ρ kā attēlots 1.24. att., savukārt plastiskā zona ir raksturota ar r_p .

Tātad mēs varam secināt, ka K_I raksturotais apgabals ir lielāks salīdzinājuma ar iekšējo apgabalu, kuru nevar raksturot ar plaisas gala lauku ($\rho, r_p \ll R$) un tādēļ uz to var atsaukties kā „melno kasti”. Balsoties uz šiem apstākļiem, var droši pieņemt, ka procesi, kas norisinās šai „melnajā kastē” ir kontrolēti ar K_I raksturoto apkārtējo lauku. Šī hipotēze ir K-koncepta pamatā, kas nosaka, ka procesu zona vai plaisas gals ir netiešā veida raksturojams ar K_I . Spriegumu intensitātes faktors, līdzīgi kā paši spriegumi, ir uztverams kā mainīgais vai kā „slodzes parametrs” plaisas galam tuvā reģionā.

Iegūstot priekšstatu par spriegumu intensitātes faktoru, mēs esam spējīgi noformulēt plaisas kritērijus. No tā mēs iegūstam, ka plaisu izplatīšanās sākas, kad spriegumu intensitātes faktors K_I sasniedz materiāla specifisko kritisko vērtību K_{IC} :

$$K_I = K_{IC} \quad (1.7)$$

Balstoties uz šiem apgalvojumiem, kritiskais stāvoklis eksistē procesu zonā, kas noved pie materiāla sadalīšanās. Taktiski esam pieņēmuši ka procesa zonas stāvoklis ir raksturots ar patieso K_I vērtību un nav atkarīgs ar složošanas vēstures plaisas galā.

Lielums K_{IC} no izteiksmes (1.7) labajā pusē tiek saukts par plaisāšanas izturību. Tas ir materiāla parametrs, kurš tiek iegūts no attiecīgiem eksperimentiem. K-faktors ir ar dimensijām [spriegums]*[garums]^{1/2}. Tas tiek izteikts ar dažādām vērtībām $\text{Nmm}^{-3/2}$ vai $\text{MPa mm}^{1/2}$.

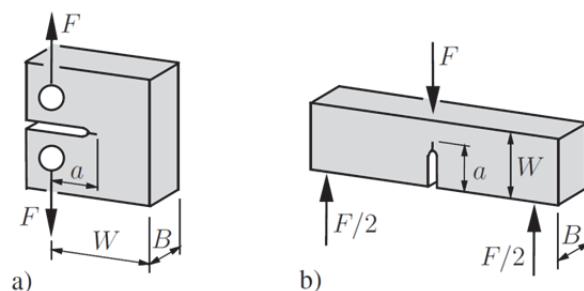
Eksistē daudzas metodes, kā noteikt K-faktoru. Par cik šīs metodes ir tiešā veidā saistītas ar lūzuma procesu lauka (*Fracture process zone (FPZ)*) lielumiem, visas tehnikas, kuras saistītas ar lineāro elastību ir pielietojamas, lai noteiktu spriegumus un deformācijas. Taču reizēm ir nepieciešams piemeklēt metodes balstoties uz specifiskajiem plaisu raksturlielumiem (spriegumu īpatnībām).

Analītiskās metodes tiek galvenokārt lietotas, kad slēgta tipa risinājumi ir nepieciešami. Tie var tikt iegūti no relatīvi vienkāršiem robežvērtību gadījumiem. Gadījumos, kad risinājumi nepieciešami sarežģītākās situācijas, tiek izmantotas skaitliskās metodes. Vairumā gadījumu tiek izmantotas galīgo elementu metodes vai robežvērtību metodes. Deformāciju mērīšana plaisas gala reģionā tiek lietotas eksperimentālās metodes (Gross, Seelig, 2011).

Lūzuma izturība

Cietu ķermeņu lūzuma izturība ir funkcija no starpatomu kohēzijas spēka. Pamatojoties uz to, teorētisko kohēzijas izturību elastīgiem materiāliem var novērtēt ar aptuveno vērtību $E/10$, kur E – elastības modulis. Lielākai daļai materiālu šis teorētiskais skaitlis nesakrīt ar noteikto eksperimentāli, un tas ir daudz mazāks. 1920. gadā Griffith's izteica pieņēmumu, ka šo neatbilstību starp teorētisko kohēzijas izturību un eksperimentos novēroto lūzumu stiprību var izskaidrot ar ļoti sīku, mikroskopisku efektu, plīsumu vai plaisu klātbūtni materiālā, kas normālos apstākļos vienmēr eksistē uz virsmas vai materiāla iekšienē. Šie plīsumi rada lūzumu izturības samazināšanos, kuras lielums ir atkarīgs no plaisas orientācijas un tās ģeometrijas.

Materiāla lūzuma izturība K_{IC} parasti tiek noteikta izmantojot standartizētus testus, kā ASTM- Standard "Test for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" E399-90 (ASTM-E399, 1986). Šajos testos dažādas formas paraugi tiek testēti. Divi no šādiem paraugiem ir parādīti att. P1.25. Testa paraugiem ir jābūt sākotnēji izveidotai plaisai, lai varētu paredzēt plaisas tālākās attīstības vietu un virzienu. No nomērītas slodzes pie kuras plaisa sāk attīstīties tālāk, materiāla lūzuma izturība var tikt noteikta izmantojot sakarības starp spriegumu intensitātes faktoru, pieliktās slodzes lielumu un plaisas garumu (Gross, Seelig, 2011).



P1.25. att. Testu paraugi a) Compact Tension (CT), b) 3-punktu liece (3PB) (Gross, Seelig, 2011)

Lai no mērījumiem iegūtu lūzuma izturību, kas var tik uzskatīta kā lielums, kas atkarīgs no materiāla ģeometrijas, paraugiem ir jāatbilst lineārās plaisāšanas mehānikas pamatprincipiem. Attiecīgi, plastiskajai zonai ir jābūt mazai salīdzinājumā visa parametra garumu kā arī ar K_I raksturoto reģionu (Gross, Seelig, 2011).

Griffith'a trauslo lūzumu teorija

Plaisas izplatīšanās, t.i., tās augšanas, laikā, kad materiālam ir atbrīvošanās no elastīgās deformāciju enerģijas, nedaudz enerģijas uzkrājas (jeb paliek) materiālā elastīgo deformāciju veidā. Griffith's (*Griffith Theory of Brittle Fracture*) izstrādāja kritēriju priekš plaisas pagarināšanās novērtēšanai elipsveida formas plaisām (sk. att. P1.26.) izmantojot divu enerģiju līdzsvaru. Viņš pierādīja, ka kritiskais spriegums (*critical stress*), kas nepieciešams plaisu augšanai trauslos materiālos ir aprēķināms ar izteiksmi (1.8):

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (1.8)$$

kur

E – materiāla elastības modulis

γ_s – īpatnējā (raksturīgā) virsmas enerģija,

a – puse no plaisas sākotnējā garuma

No izteiksmes (1.8) varam izteikt γ_s (sk. izteiksmi (1.9)).

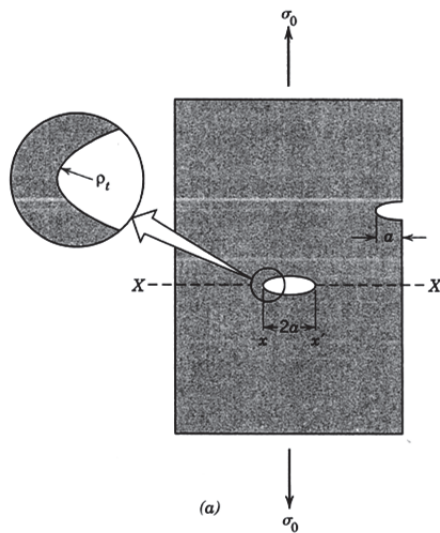
$$\gamma_s = \frac{\sigma_c^2 \pi a}{2E} \quad (1.9)$$

1950. gadā G.R.Irwin ieteica apvienot abus lielumus γ_s un γ_p , kas ir plastiskās deformācijas enerģijas, ļoti plastiskiem materiāliem, terminā ζ_c , kas ir izteikts ar izteiksmi (1.10).

$$\zeta_c = 2(\gamma_s + \gamma_p) \quad (1.10)$$

kur

ζ_c – kritiskās enerģijas atbrīvošanās koeficients, (*critical strain energy release rate*)



P1.26. att. Virsmas un materiāla iekšējās plaisas

Ievietojot izteiksmē (1.8) izteiksmi (1.10) iegūstam Griffith'a plaisas augšanas kritēriju, kuru izsaka ar izteiksmi (1.11):

$$\zeta_c = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (1.11)$$

Tātad, plaisas augšana notiek, kad $\frac{\pi \sigma^2 a}{E}$ pārsniedz konkrētā materiāla ζ vērtību.

Šļūdes, rukuma, plaisu ietekme uz konstrukciju darbību

Šļūde konstrukcijās atšķiras no rezultātiem, kas iegūti ar cementa kompozīta paraugiem laboratorijās. Reālas konstrukcijas ir pakļautas apkārtējās vides mitruma un temperatūras izmaiņām, kā arī ir maz ticams, ka slodze visu ekspluatācijas laiku paliks konstanta, vēl jo vairāk - katra slodzes izmaiņa rada rezultējošo deformācijas komponenti, kas ir nepārtraukta bezgalīgi ilgu laiku. Taču tie nav vienīgie faktori, kas sarežģī dzelzsbetona konstrukciju izturēšanos, pret cementa kompozīta tilpuma izmaiņām laikā, prognozēšanu.

Reālu konstrukciju galvenā atšķirība no eksperimentos izmantotajiem cementa kompozīta paraugiem ir stiegrojuma esamība, kas dod iespēju izmantot cementa kompozīta darbību spiedē un stiegrojuma darbību stiepē, un tā ietekme uz deformāciju norisi un spriegumu pārdalīšanos. Tādēļ cementa kompozīta konstrukciju stiprība ir atkarīga no tērauda stiegrojuma īpašībām. Tomēr, pie darba slodzēm, tērauda spriegumi parasti atrodas elastīgajā apgalbā un konstrukciju izturēšanos slodzē pamatā ietekmē cementa kompozīta nelineārās deformācijas. Stiegotās konstrukcijās cementa kompozīta šļūdi galvenokārt ņem vērā, lai noteiktu tā plaisāšanas iespaidu uz izlieci.

Konstrukcijās cementa kompozīta šļūde ir reizē gan vēlams, gan nevēlams fenomēns. No vienas puses, tas ir vēlams, jo sniedz nepieciešamo elastības pakāpi cementa kompozītam, samazinot ārējās slodzes izraisītos spriegumus un novēršot spriegumu koncentrāciju, bet no otras – šļūdes deformācijas bieži vien ir atbildīgas par pārmērīgu izlieci pie darba slodzēm - tas var izraisīt nestabilitāti (piemēram, arkās), plaisāšanu, garu kolonnu izliekšanos, iepriekš saspriegtā konstrukciju sasprieguma zudumu un iekšējo spriegumu un reakciju pārdalīšanās statistiski nenosakāmos locekļos. Ja konstrukcija ir nestabila, šļūdes un rukuma deformācijas var dramatiski samazināt slodzes uzņemšanas kapacitāti. Tādēļ ir svarīgi noteikt maksimālo deformāciju palielinājumu laikā.

Bieži vien šļūdes kaitīgās sekas ir nelabvēlīgākas slodzi neuzņemošiem elementiem, kuri ir saistīti ar konstrukciju, tādiem kā, logu rāmji, apšuvuma paneļi un starpsienas, nekā pašām konstrukcijām.

Pie šļūdes negatīvajām sekām var pieskaitīt arī ekonomisko kaitējumu – jo, ja ir bojātas konstrukcijas, tās parasti vai nu tiek likvidētas, vai arī piedzīvo plašos labojumus, ilgi pirms paredzētā kalpošanas laika beigām.

Apskatot šļūdi konstrukcijās, ir jāņem vērā cementa kompozīta īpašību izmaiņas tam kļūstot vecākam, piemēram, rukuma, šļūdes un elastīgās deformācijas. Strukturālajā analīzē šim nolūkam izmanto vecuma koeficientu. To nosaka ar datoranalīzi vienkāršam, nestiegotam, identiska sastāva kā apskatāmajā konstrukcijā, cementa kompozītam, kurš slogots ar tāda paša lieluma slodzi kā konstrukcija. Tomēr jāuzsver, ka vecuma koeficientu var izmantot tikai sekojošos gadījumos:

Balstu stāvokļi tiek pēkšņi izmainīti, piemēram, pamatnes izmaiņas vai pēkšņu papildus spēku pielikšana (iepriekšējās saspriegšanas u.c.).

Balstu stāvokļi vai uzspiestās deformācijas mainās tādā pašā ātrumā kā šļūde.

Ja izmaiņas norisinās daudz ātrāk vai lēnāk kā šļūde, tad vecuma koeficientu nevar izmantot.

Lai atvieglotu šļūdes deformāciju analīzi reālās dzelzsbetona konstrukcijās, ir radīti vairāki aprēķinu pieņēmumi:

- Cementa kompozīta elementi, iekļaujot rukuma, šļūdes un termiskās īpašības, tiek uzskatīti par homogēniem.
- Šļūdes, rukuma un elastīgās deformācijas ir savstarpēji saskaitāmas un neatkarīgas.
- Pie slodzēm, kuras ir mazākas par 40–50 % no cementa kompozīta stiprības, ir pieņemts, ka šļūdes deformācijas ir aptuveni proporcionālas pastāvīgajai slodzei un pakļaujas složošanas vēstures pārklāšanās principam. Tomēr praksē šļūdes deformāciju nelinearitāte var parādīties jau pie slodzes lieluma 30–35 % no cementa kompozīta stiprības.
- Rukuma un termiskās deformācijas ir vienmērīgi izkliedētas elementa šķērsriezuma dziļumā. Šis pieņēmums ir pareizs plānām un vidēji plānām konstrukcijām. Biezos elementos šis pieņēmums var radīt kļūdas.
- Parastu konstrukciju analīzē netiek ņemta vērā sarežģītā deformāciju atkarība no ūdens daudzuma un temperatūras vēstures.
- Šļūdes deformāciju ierobežojumu, ko izraisa stiegrojums un/vai iepriekš saspriegtais stiegrojums pieņem vidēji, neapskatot pakāpenisku slodzes pārņemšanu starp cementa kompozītu un tēraudu.
- Šļūdes laika – pakāpes attiecības līknēm dažādos apkārtējās vides mitruma apstākļos un dažādos šķērsgriezumos ar dažādu formu un izmēriem ir vienāda forma.

Pat ar šiem vienkāršotajiem pieņēmumiem, precīza teorētiskā šļūdes ietekmes analīze joprojām ir relatīvi sarežģīta. Tomēr akurāta analīze lielākajā daļā konstrukciju nav nepieciešama, izņemot speciālās būves, piemēram, atomreaktoros, tiltos ar lieliem laidumiem vai speciālas okeāna konstrukcijas. Tādēļ tiek izmantotas vienkāršotās analīzes metodes savienojumā ar empīriskām metodēm, ar kurām pieskaita plaisāšanas un stiegrojuma deformāciju ierobežojumu (Scadelai, Pinheiro, 2003).

Šļūdes lielums, kas nepieciešams konstrukciju aprēķinos, var tikt novērtēts dažādās pakāpēs. Pakāpe ir atkarīga no aprēķināmās konstrukcijas tipa un aprēķinam pieejamo datu kvalitātes. Gadījumos, kad nepieciešams tikai aptuvenš šļūdes novērtējums, kas ir piemēroti aptuveni aprēķiniem, ir iespējams novērtēt paredzamās šļūdes deformācijas balstoties tikai uz pāris parametriem, tādiem kā, gaisa relatīvais mitrums, cementa kompozīta vecums un elementa dimensijas. Otra galējība ir konstrukciju, kuras ir jūtīgas pret deformācijām, aprēķins. Šādā gadījumā šļūdes deformāciju novērtējums tiek balstīts uz apjomīgu laboratorijā iegūtu rezultātu kopumu un datoranalīzi (Fanourakis, Ballim, 2003). Ideālā variantā tiek meklēts kompromiss starp vienkāršu rezultātu prognozēšanu un laboratorijā iegūtu datu precizitāti.

Šļūdes iedarbību uz konstrukcijām galvenokārt jāņem vērā lietojamības robežstāvokļa pārbaudēs. Cementa kompozīta konstrukciju lietojamības defekti, piemēram, pārmērīga

plaisāšana un/vai pārmērīga izliece ir bieži sastopami. Nestspējas robežstāvoklī šļūdes efekti ir jāapskata tikai gadījumos, kad tie ir ārkārtīgi lieli, piemēram, pārbaudot nestspējas robežstāvokļa stabilitāti gadījumos, kad otrās kārtas efekti ir svarīgi. Otrās kārtas efekti ir papildus iedarbes efekti, ko rada konstrukciju deformācijas. Citos gadījumos nestspējas robežstāvokļa analizē tie nav būtiski, ja ir nodrošināts pietiekams elementu plastiskums un pagriešanās kapacitāte.

Analizējot konstrukcijas tās iedala statistiski noteicamās un nenoteicamās. Statiski noteicamas ir konstrukcijas ar vienu laidumu starp balstiem, piemēram vienlaiduma sijas, kopnes u.c. Šādās konstrukcijās pielikto slodžu darbības efektus nosaka tikai ar līdzsvara stāvokļa nosacījumu. Tādēļ šļūdei ietekme uz nestspēju ir tikai statistiski nenoteicamās konstrukcijās. Par statistiski nenoteicamām konstrukcijām sauc ģeometriski nemainīgas sistēmas, kurām balstu reakciju vai piepūļu noteikšanai to elementos nepietiek ar statikas līdzsvara vienādojumiem, bet ir nepieciešami papildus vienādojumi. Ja visa statistiski nenoteicamā konstrukcija ir veidota no viena homogēna materiāla ar vienādām šļūdes īpašībām visos virzienos, šļūde nevar ietekmēt konstrukciju darbību slodzē. Tas attiecas arī uz dzelzsbetonu, ja tā stiegrojums ir vienmērīgi un simetriski izvietots. Šis nosacījums atteicas tikai uz pirmās kārtas efektiem, t.i., slodžu iedarbēm. Tomēr, ja deformāciju aprēķinā ir jāņem vērā arī otrās kārtas efekti, šļūdes ietekmi nevar neņemt vērā. Tas attiecas gan uz statistiski noteicamām, gan nenoteicamām konstrukcijām (Rusch, 1983; Neville, 1983, 2002; Bazant, Wittmann, 1983; Bazant, Murphy, 1992; Branson, 1977; Gilbert, 1988; Neville, Aitcin, 1998; Rokugo *et al.*, 2009 u.c.).

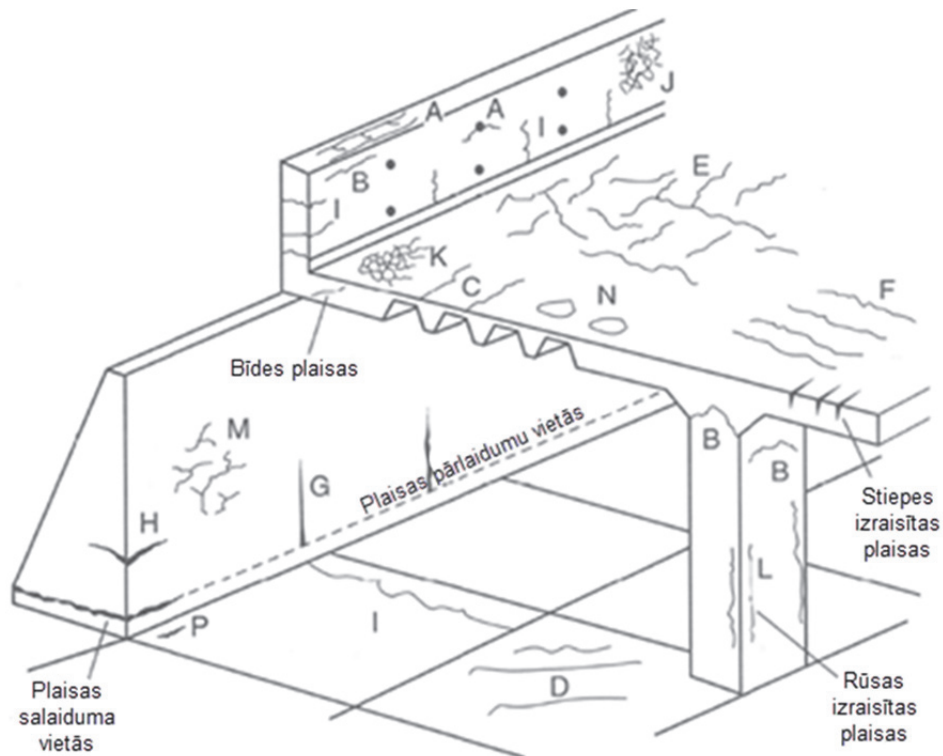
Plaisu izplatība un rašanās cementa kompozīta konstrukcijās

Visbiežākais cēlonis cementa kompozīta konstrukciju sabrukumam vai būtiskam nestspējas samazinājumam ir plaisas, kas veidojas jau cementa kompozīta mikrostruktūrā. Visās cementa kompozīta konstrukcijās neatkarīgi no to noslogojuma vai konstrukcijas atrašanās vietas veidojas dažādu veidu plaisas, kuru cēloņi ir ļoti dažādi. Plaisāšanas procesu cementa kompozītā veido spriegumi, kuri koncentrējoties sasniedz vērtību, kas pārsniedz cementa kompozīta stiepes vai spiedes stiprību. Plaisas ir jebkurā cementa kompozīta konstrukcijā, bez izņēmumiem, tas ir skaidrojams ar cementa kompozīta cietēšanas procesā esošajiem spriegumiem. Plaisas izmēri var būt visdažādākie, sākot ar mikroskopiskām, ko nav iespējams saskatīt ar aci, līdz makroplaisām ar plaisu atvēruma lielumu, kuru iespējams saskatīt ar neapbruņotu aci. Plaisu atrašanās vieta arī var būt visdažādākā. Jo lielāks procentuālais plaisu daudzums konstrukcijā, jo lielāks nestspējas samazinājums salīdzinājumā ar sākotnējo aprēķinu. Kā arī plaisu klātbūtne cementa kompozīta konstrukcijās, pakļauj konstrukciju būtiskiem korozijas bojājumiem (Pease, 2005, 2010), tiek sagrauts aizsargslānis un plaisas izplatās tālāk, līdz ar to samazinot konstrukcijas darba augstumu.

No lielākās daļas plaisu ir iespējams izvairīties izmantojot atbilstošu cementa kompozīta maisījuma recepti, izvēloties pareizo novietojumu, atbilstoši blīvējot, pareizi apstrādājot un

pareizi kopjot cementa kompozītu. Tomēr no slodzes izraisītām plaisām cementa kompozītā praktiski nav iespējams izvairīties.

Nestiegotā un stiegotā cementa kompozītā plaisas rodas dažādu cēloņu ietekmē un tiek izšķirti dažādi plaisu veidi (sk. att. P1.27.)



P1.27. att. Dažādu cēloņu izraisītas plaisas hipotētiskā cementa kompozīta konstrukcijām
(Concrete Society Report, 1992; Neville, 1996)

Dažādu cēloņu izraisītas plaisas:

Plastiskās sēšanās plaisas:

- A – Pārāk liels stiegrojuma daudzums dziļākos šķērsgriezumos
- B – Izliekšanās kolonnas augšgalā
- C – Šķērsgriezuma dziļuma izmaiņas

Plastiskās rukuma plaisas:

- D – Diagonālā plātņu plaisāšana
- E – Plaisu nenoteikta plaisāšana
- F – Pārstiegotas plātnes

Termiskā rukuma plaisas:

- G – Ārējo ierobežojumu ietekmē
- H – Iekšējo ierobežojumu ietekmē
- I – Rukuma plaisas

Nepareizas iestrādes izraisītas plaisas:

- J – Nospiedumi no veidņiem
- K – Pārāk daudz izlīdzināts cementa kompozīts

Slodzes izraisīta plaisāšana:

Stiepes, spiedes un lieces izraisīta plaisāšana

Bīdes izraisīta plaisāšana

L – Korozijas izraisītas plaisas

M – Sārnu izraisīta plaisāšana

N – Plātņu burbuļošana, ko izraisa iesprostotais ūdens

P – Plaisāšana no sasalšanas/atkušanas

Iespējams vienīgais visbiežāk sastopamais agras plaisāšanas iemesls cementa kompozītā ir plastiskais rukums. Viens no plastiskā rukuma cēloņiem ir pārāk liela ūdens daudzuma pievienošana mikstūrai. Kad cementa kompozīts vēl ir plastiskā stāvoklī, pirms sacietēšanas, tas ir pilns ar ūdeni. Šis ūdens aizņem konkrētu daudzumu vietas un ļauj plātnei ieņemt konkrētu formu. Cietēšanas laikā plātne zaudē mitrumu, rūk un rada spriegumus cementa kompozīta plātnē. Kad spriegums kļūst pārāk liels, tas tiek atbrīvots un, tad cementa kompozītā veidojas plaisas. Parasti plastiskā rukuma plaisas ir matveida un ir gandrīz nemanāmas, bet tās var būt arī visā cementa kompozīta šķērsgriezumā.

Plastiskā rukuma plaisas var parādīties jebkurā vietā uz cementa kompozīta plātnes vai cementa kompozīta sienas, bet pavisam noteikti tās parādīsies iekšējos stūros. Iekšējie stūri ir tie kuri ir vērsti uz plātnes centru. Tāpat arī apaļas formas caurumi plātnēs un citās konstrukcijās rada tieši tādas pašas problēmas kā iekšējie stūri. Lai izvairītos no nejaušām plaisām cementa kompozītā tiek izveidotas kontroles šuves. Kontroles šuves patiesībā ir saraušanās šuves, tās atveras platākas līdz ar cementa kompozīta saraušanos. Kontroles šuves tiek izveidotas cementa kompozītā uzreiz pēc cementa kompozīta ieliešanas vai arī neilgu laiku pēc tā sacietēšanas. Šīs šuves tiek izveidotas, lai plaisāšana nenotiktu neparedzamā vietā, bet jau zināmā vietā (VandeWater, 1998).

Cementa kompozīta autogēnais un žūšanas rukums izraisa laikā attīstošas plaisas, kas samazina elementa stingumu. Tas atspoguļojas kā pakāpeniska esošo plaisu paplašināšanās, un nozīmīga liekto elementu izlieces palielināšanās. Šī problēma ir īpaši nozīmīga gadījumos, kad jāprojektē pārseguma plāksnes, kas ir samērā plānas un ar lielu laiduma augstuma attiecību, un tādejādi ir jūtīgas pret izlieci. Svarīgi ir izlieci aprēķināt precīzi, arī gadījumos, kad izmanto augstas stiprības dzelzsbetona stiegrojumu. Šāda stiegrojuma izmantošana nozīmē, ka mazāk stiegrojuma ir nepieciešams stiprībai un attiecīgi stiegrojumam pēc plaisu parādīšanās ir mazāks stingums, kas noved pie lielākas konstrukciju izlieces un platākām plaisām.

Lielākā daļa dzelzsbetona konstrukciju aprēķina normatīvu, ieskaitot NE 1992-1-1 (2005), ietver divas pieejas izlieces noteikšanai. Pirmā un vienkāršākā metode balstās uz izlieces ierobežošanu apmierinot plātnes minimālo biezumu vai maksimālo laiduma-biezuma attiecību. Otrā metode ir izlieces kontrolēšana to reāli aprēķinot, izmantojot reālus materiālu modeļus un konstrukciju īpašības. Aprēķinātā izliece nedrīkst pārsniegt pieļaujamās izlieces robežu attiecīgajām konstrukcijām un to pielietojumam.

Dzelzsbetona elementi plaisā, kad stiepes spēks cementa kompozītā pārsniedz cementa kompozīta stiepes stiprību. Lai kontrolētu plaisu veidošanos cementa kompozīta konstrukcijās parasti tiek ierobežots spriegums stieģrojumā, kas šķērso plaisas un ir jāpārliecinās, ka stieģrojums ir stieptajā zonā. Savukārt stiepes spriegumu līmenis ir atkarīgs no maksimālā pieļaujamā plaisas platuma w . Tātad ja maksimālais pieļaujamais plaisas platums ir pārsniegts, tad arī maksimālais pieļaujamais stiepes spēks stieģrojumā ir pārsniegts. Aprēķina normatīvi parasti paredz maksimālo pieļaujamo attālumu starp stieģrojumu un maksimālo nepieciešamo stieģrojuma aizsargslāni. Daži normatīvi, piemēram, NE 1992-1-1 (2005) paredz plaisu platuma aprēķinu, ar nolūku ierobežot plaisu platumu līdz pieņemamam lielumam. Tāpat kā ar izlieci, arī pie plaisu platuma ierobežošanas pastāv vienkāršākas un komplicētākas (precīzākas) aprēķina metodes.

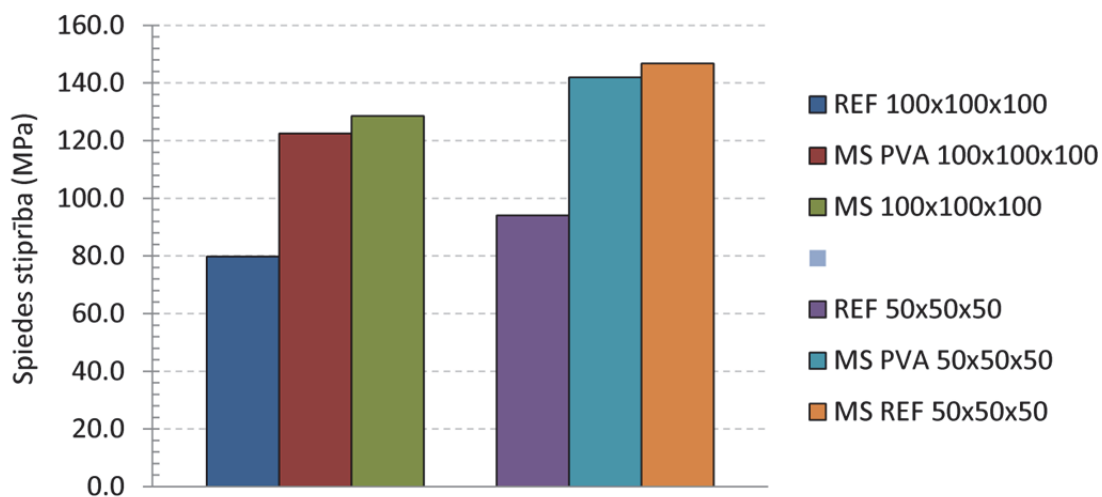
Tomēr pašreizējās aprēķina metodes, izmantojot tērauda stieģrojumu plaisu ierobežošanai, bieži ir pārāk vienkāršotas un nespēj pienācīgi ievērtēt rukuma radīto plaisu attīstību un platumu.

DAŽĀDU CEMENTA KOMPOZĪTU APVIENOTIE EKSPERIMENTĀLO PĀRBAUŽU REZULTĀTI

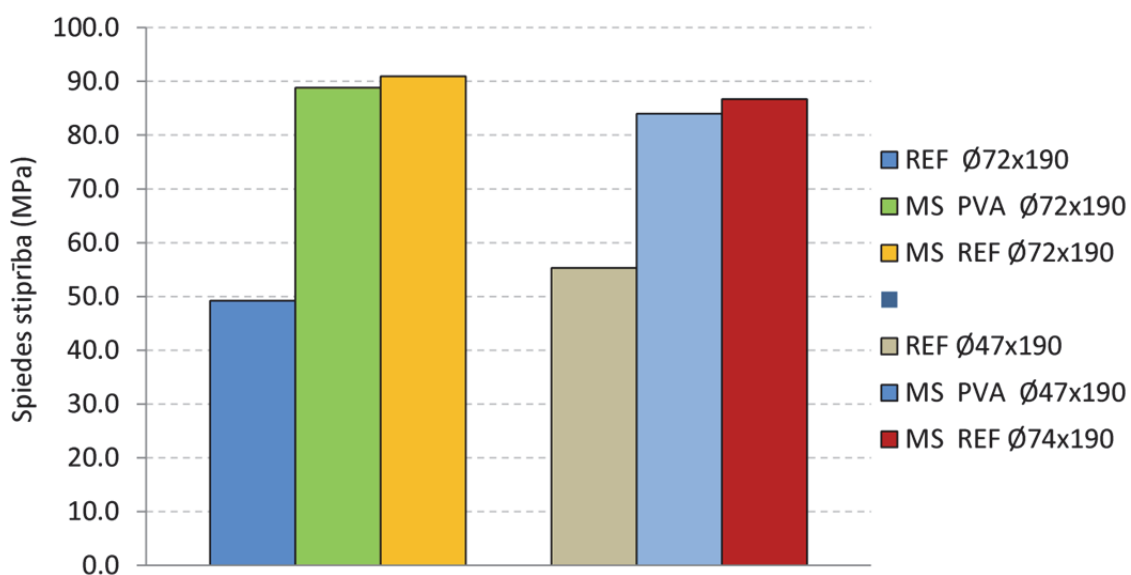
Zemāk lietoto apzīmējumu atšifrējums:

- PS – parastas stiprības cementa kompozīts
- Ref MS – parastas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar montmorilonīta piedevu); parauga ģeometrija 40 × 40 × 160 mm; gaissauss; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 57 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- NS M – parastas stiprības cementa kompozīts ar montmorilonīta piedevu; parauga ģeometrija 40 × 40 × 160 mm, gaissauss, eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 57 dienas, spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- Ref S – parastas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar borsilikāta – spuldžu stikla piedevu); parauga ģeometrija 40 × 40 × 160 mm; gaissauss; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- 20 % S – parastas stiprības cementa kompozīts ar 20 % borsilikāta – spuldžu stikla piedevu; gaissauss; parauga ģeometrija 40 × 40 × 160 mm; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- 40 % S – parastas stiprības cementa kompozīts ar 40 % borsilikāta – spuldžu stikla piedevu; parauga ģeometrija 40 × 40 × 160 mm; gaissauss; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- ECC PVA – cementa inženierkompozīts ar PVA (%) šķiedrām; parauga ģeometrija Ø40 × 160 mm; gaissauss; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 28 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25 % no graužošajiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 815 dienas – 2 gadus, 3 mēnešus;
- ECC – cementa inženierkompozīts

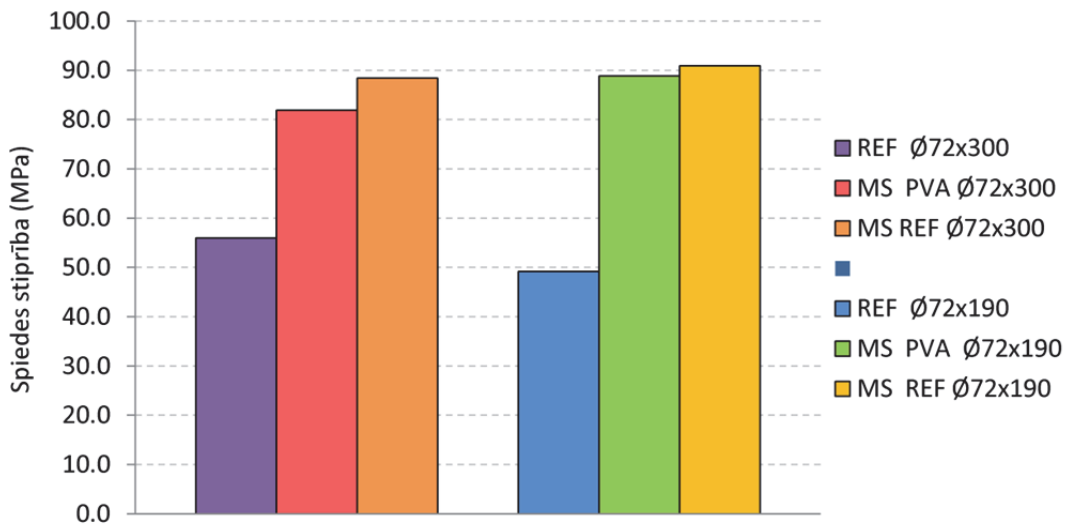
- HSC PVA MS – augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA (2 %) šķiedru „kokteili”, un ar mikrosilikas piedevu; parauga ģeometrija $\varnothing 47 \times 190$ mm; gaisssaus; eksperimentālo, testu sākumā cementa kompozīta paraugu vecums 28 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- HSC PVA NS – augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA (2 %) šķiedru „kokteili”, un ar mikro- un nanosilikas piedevu; parauga ģeometrija $\varnothing 47 \times 190$ mm; gaisssaus; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta paraugu vecums 28 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25% no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 30 dienas;
- HSC R – augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar monmorilonīta piedevu), parauga ģeometrija $40 \times 40 \times 160$ mm; gaisssaus; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta paraugi 51 dienu veci; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 30% no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 40 dienas;
- HSC M – augstas stiprības cementa kompozīts ar monmorilonīta (1 %) piedevu; parauga ģeometrija $40 \times 40 \times 160$ mm; gaisssaus; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta paraugi 51 dienu veci; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 30 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē – 40 dienas;
- HSC R (PVA) – augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar PVA šķiedrām), parauga ģeometrija $40 \times 40 \times 160$ mm, gaisssaus, eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta paraugi 1; 4; 7 un 14 dienu veci, spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 28 dienas, bet atslodzē – 7 dienas;
- HSC PVA 0,6% augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA (0,6%) šķiedrām, parauga ģeometrija $40 \times 40 \times 160$ mm, gaisssaus, eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta paraugi 1; 4; 7 un 14 dienu veci, spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskas (nemainīgas) slodzes 28 dienas, bet atslodzē – 7 dienas;



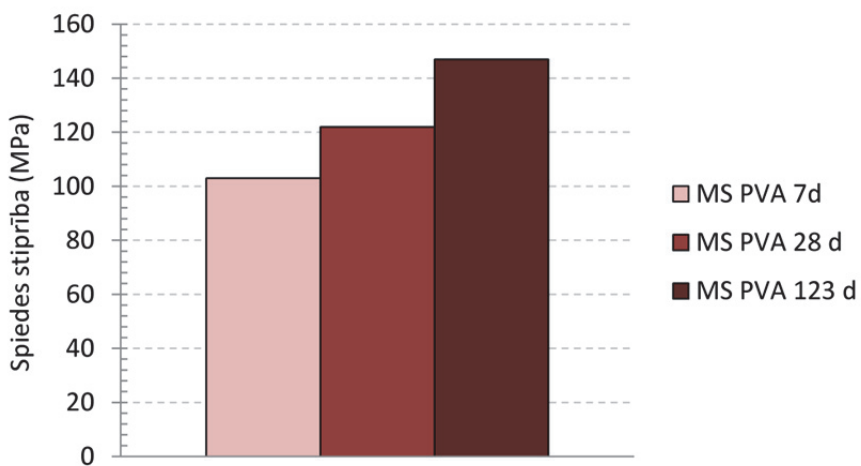
P2.1. att. Eksperimentālās, dažādu ģeometrisku izmēru (100 × 100 × 100 mm un 50 × 50 × 50 mm), dažādu cementa kompozītu kubiskā spiedes stiprības 28 dienu vecumā



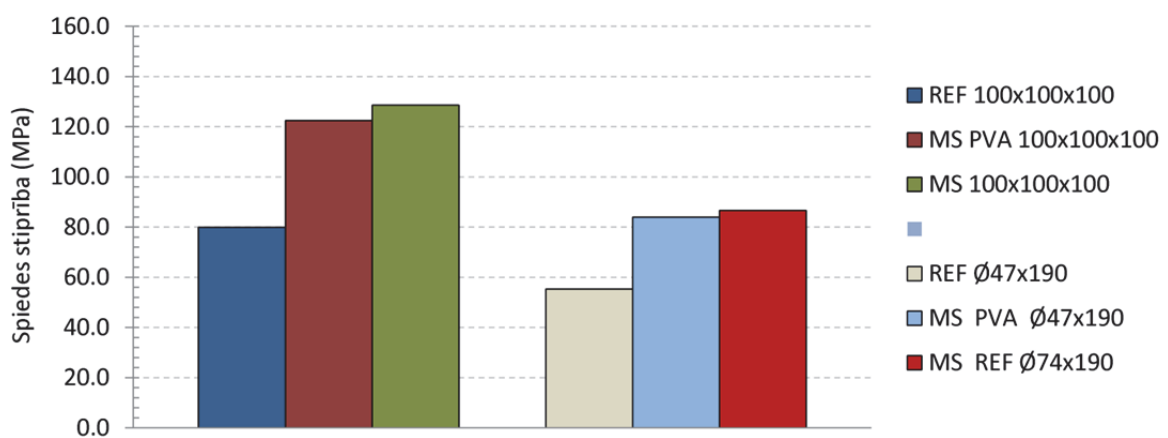
P2.2. att. Eksperimentālās, dažādu paraugu diametru (Ø47 un Ø72 mm,) dažādu cementa kompozītu cilindriskās spiedes stiprības 28 dienu vecumā



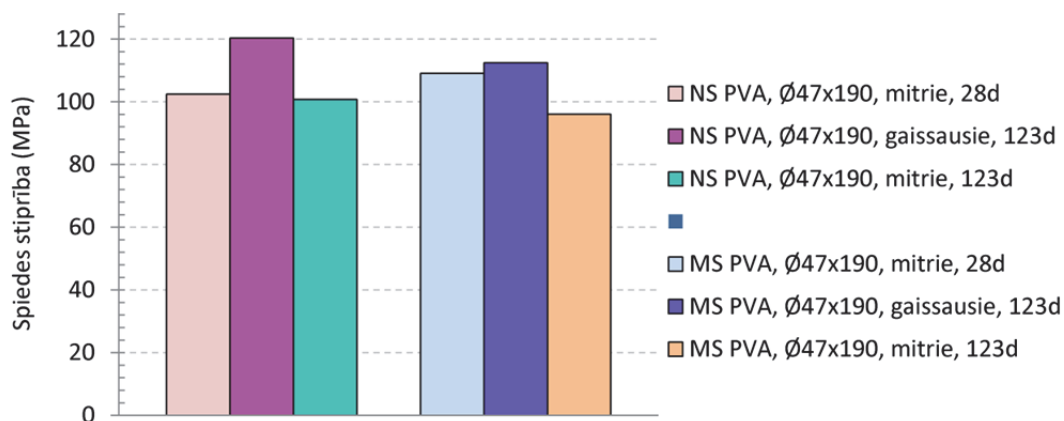
P2.3. att. Eksperimentālās, dažādu paraugu garumu (190 mm un 300 mm), dažādu cementa kompozītu cilindriskās spiedes stiprības 28 dienu vecumā



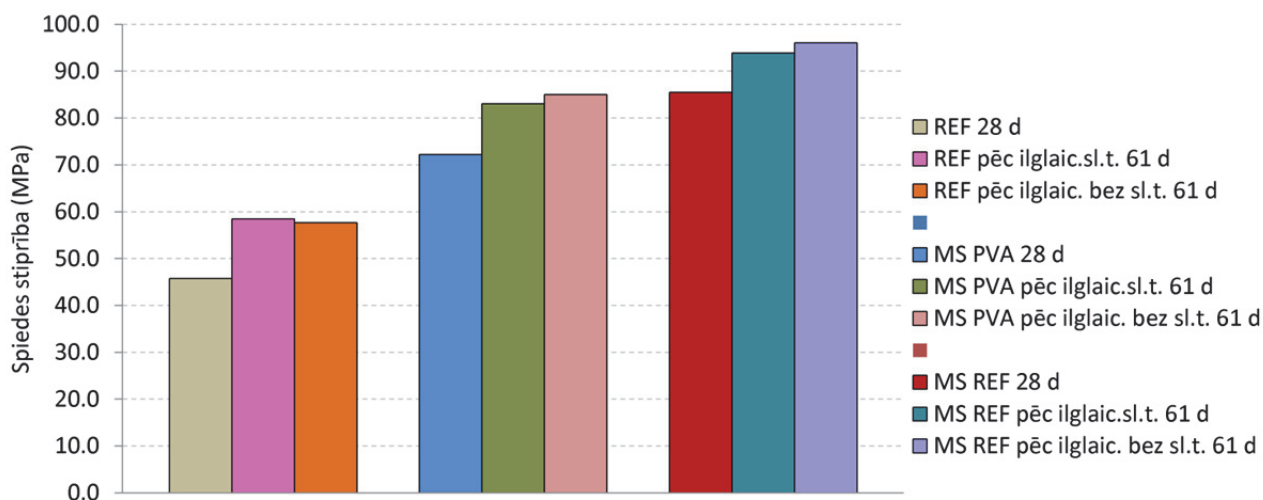
P2.4. att. Eksperimentālās sevišķi augstas stiprības cementa kompozīta kubiskās (100 × 100 × 100 mm) spiedes stiprības dažādos vecumos (7, 28 un 123 dienas)



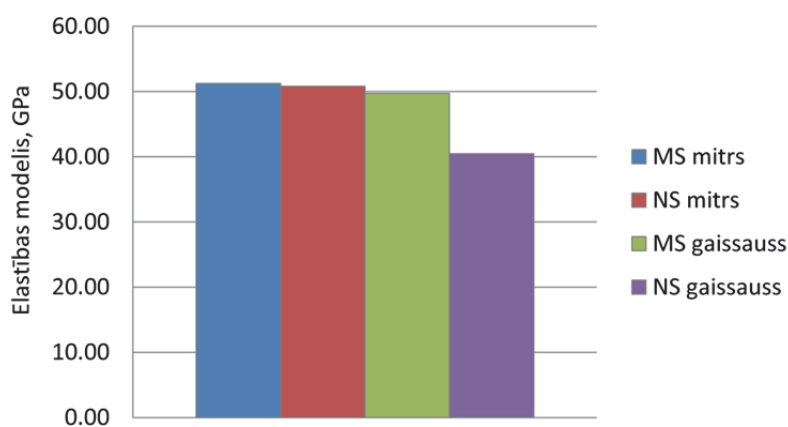
P2.5. att. Eksperimentālās cementa kompozīta kubiskās (100 × 100 × 100 mm) un cilindriskās (Ø47 × 490 mm) spiedes stiprības 28 dienu vecumā



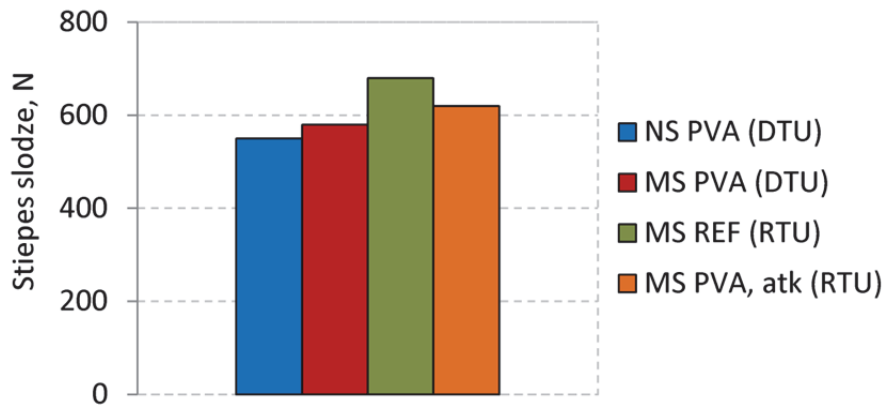
P2.6. att. Eksperimentālā cementa kompozīta cilindriskā ($\varnothing 47 \times 190$ mm) spiedes stiprība dažādās mitruma koncentrācijās (mitrā un gaissausā) un dažādos cementa kompozīta vecumos (28 un 123 dienas)



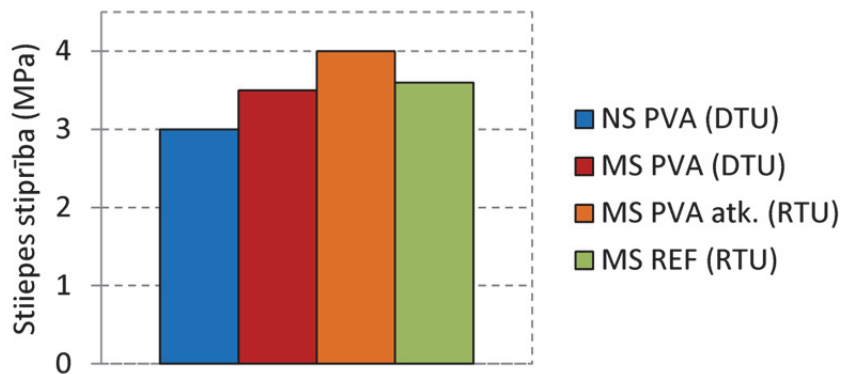
P2.7. att. Eksperimentālās cementa kompozīta cilindriskās ($\varnothing 47 \times 190$ mm) spiedes stiprības pirms un pēc ilglaicīgajiem testiem, t.i., dažādos cementa kompozīta vecumos (28 un 61 dienas), stiprībai pieaugot ar un bez slogojuma



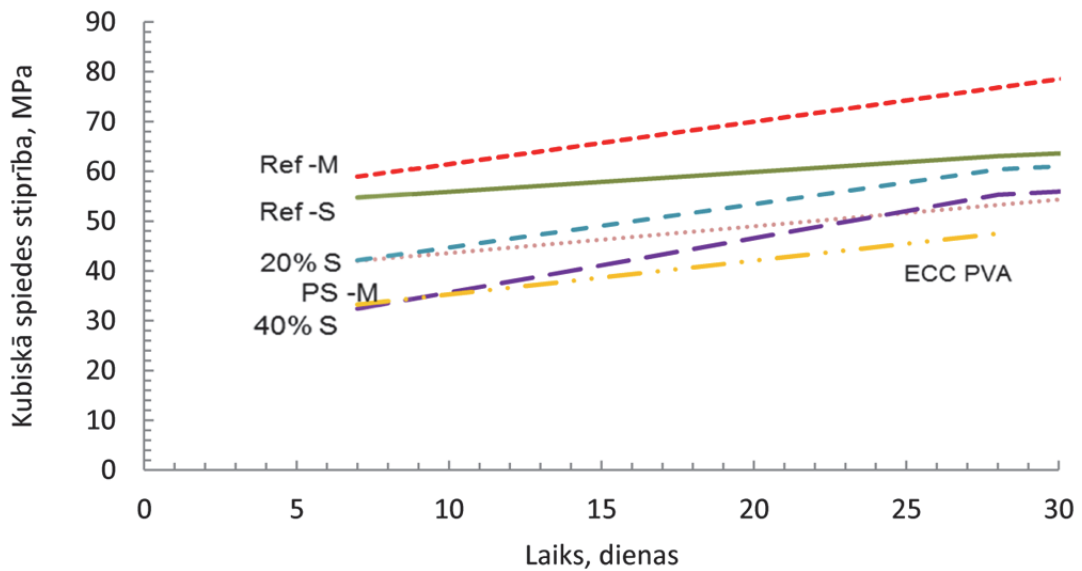
P2.8. att. Vidējo elastības moduļa vērtību salīdzinājums sevišķi augstas stiprības cementa kompozītam ar un bez nanosilikas, 28 dienu vecumā, divās mitruma koncentrācijās (mitrā un gaissausā)



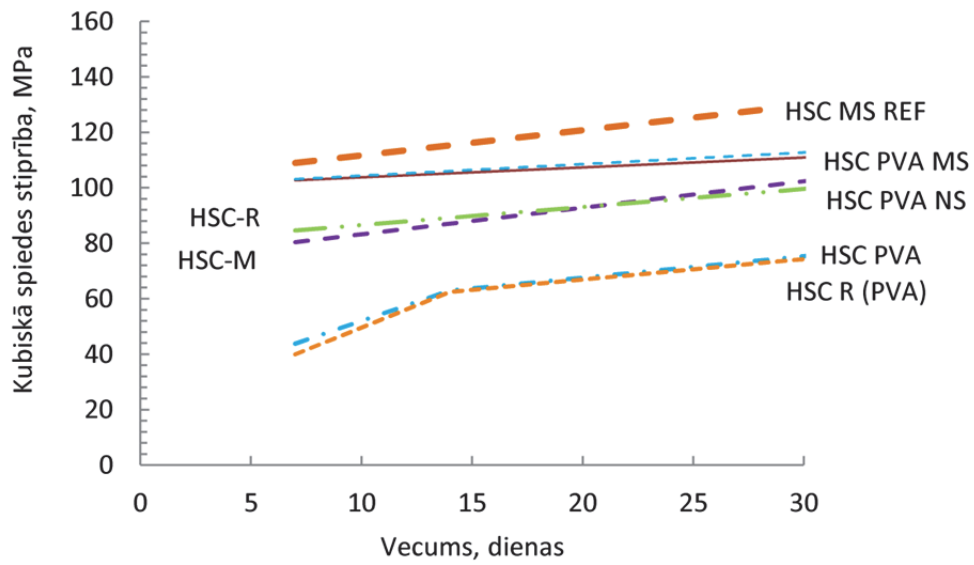
P.2.9. att. Stiepes slodzes lielums noteikts ar CT paraugiem („atk” – atkārtotās pārbaudes)



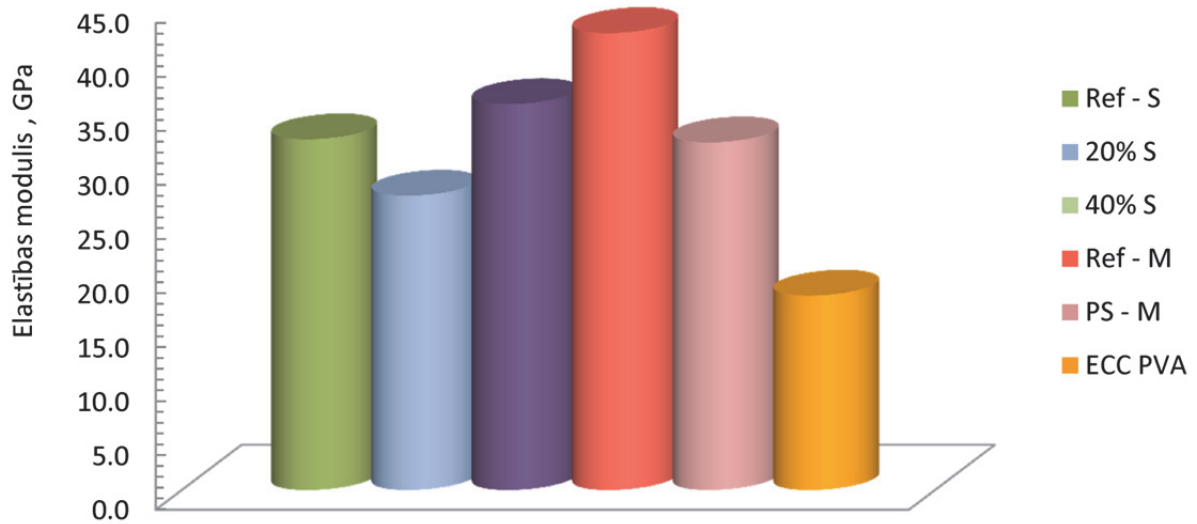
P2.10. att. Stiepes stiprība noteikta dažādiem cementa kompozītiem ar kuponveida paraugiem („atk” – atkārtotās pārbaudes)



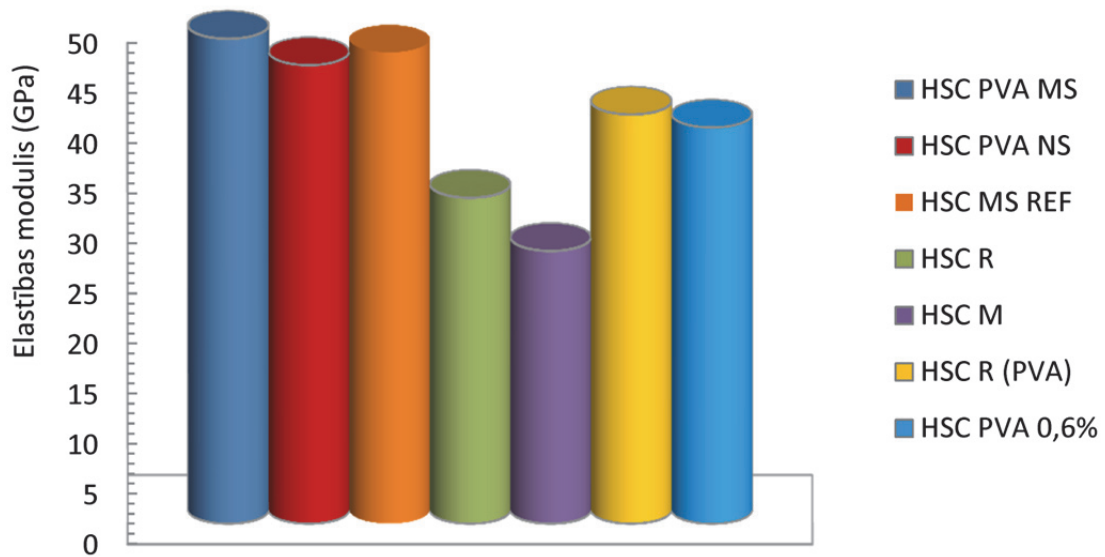
P2.11. att. Kubiskā spiedes stiprība dažādiem parastas stiprības cementa kompozītiem



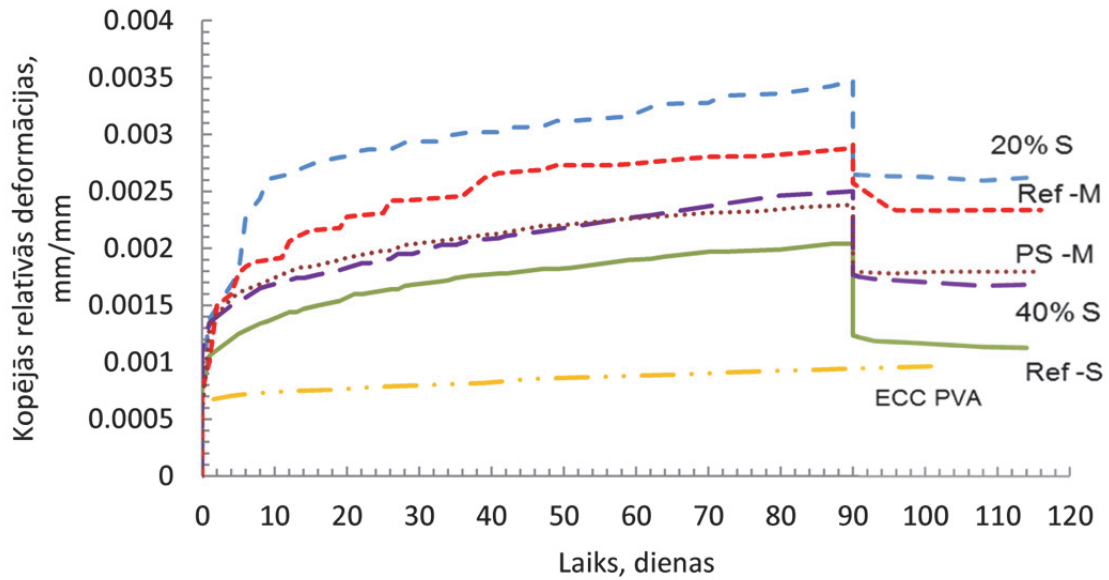
P2.12. att. Kubiskā spiedes stiprība dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



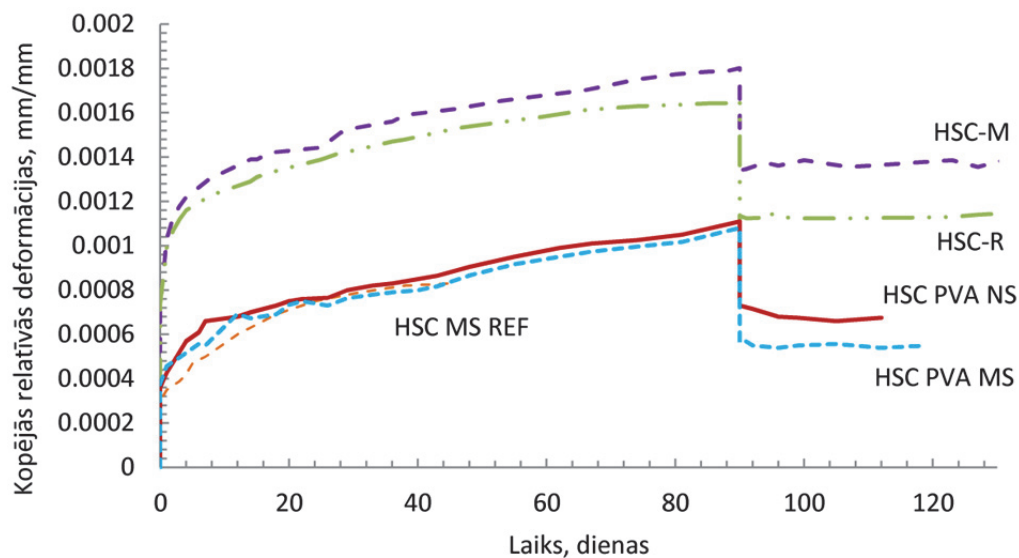
P2.13. att. Elastības modulis dažādiem parastas stiprības cementa kompozītiem



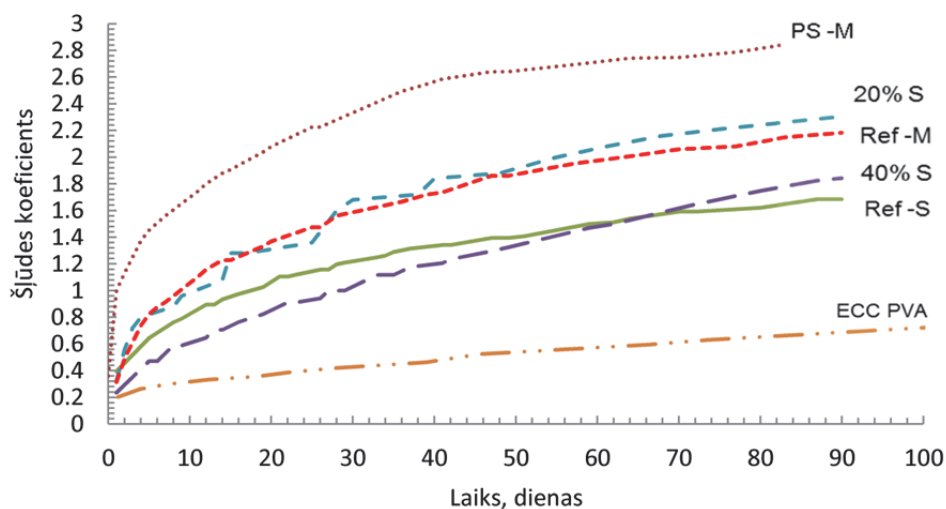
P2.14. att. Elastības modulis dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



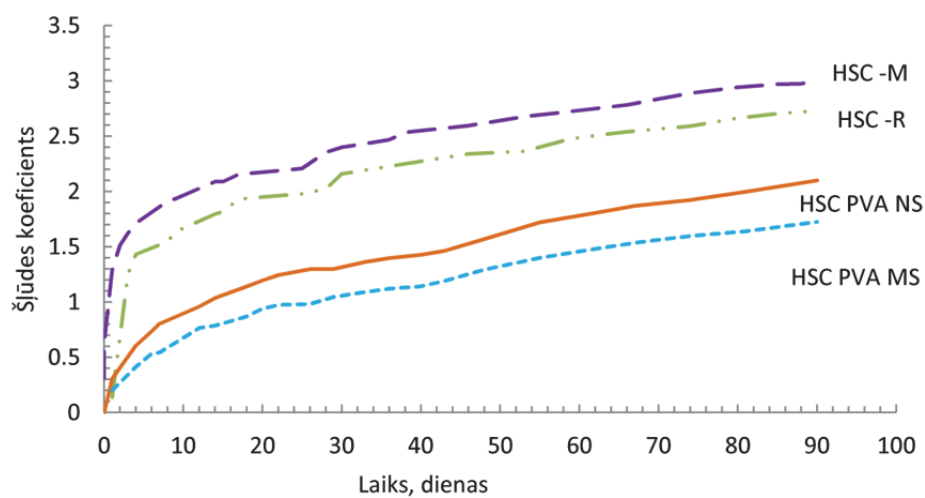
P2.15. att. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas dažādiem parastas stiprības cementa kompozītiem



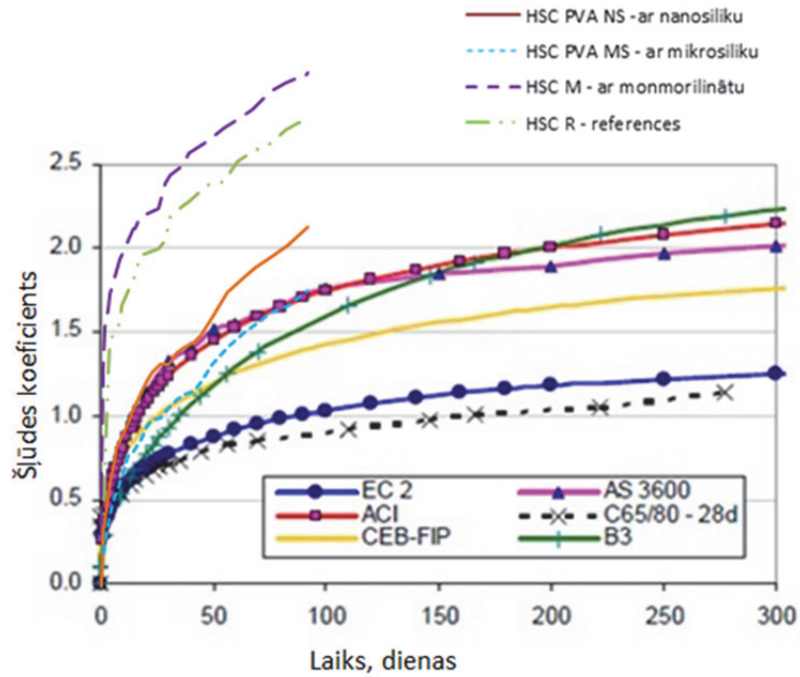
P2.16. att. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



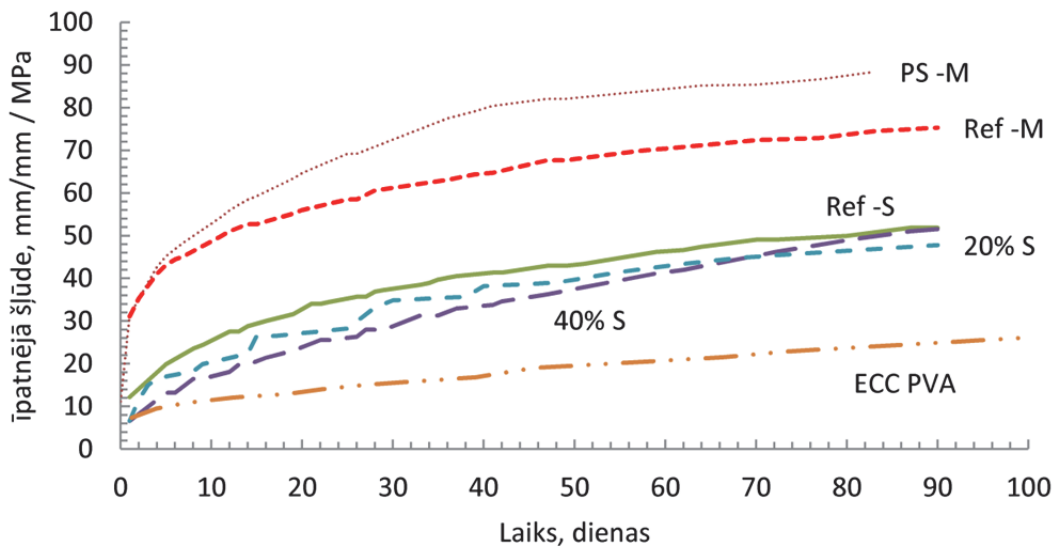
P2.17. att. Šķūdes koeficients spiedē dažādiem parastas stiprības cementa kompozītiem



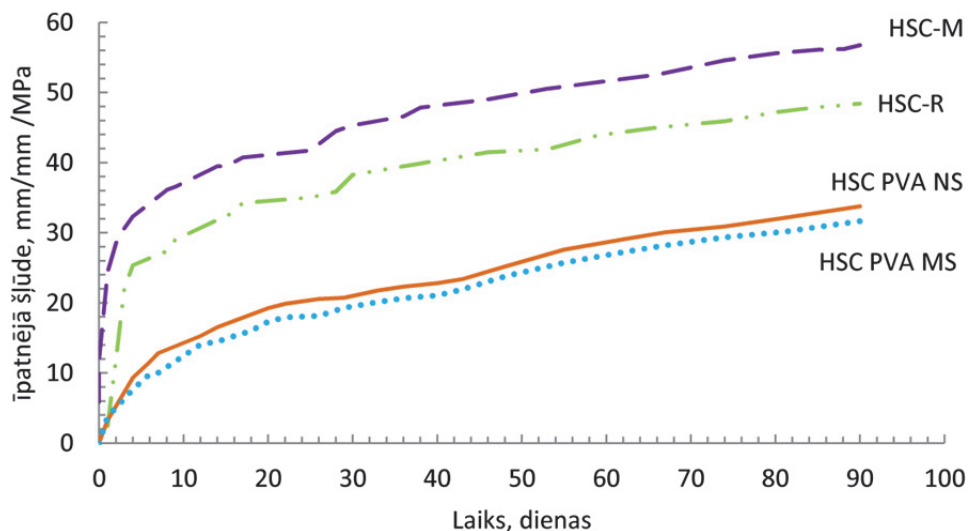
P2.18. att. Šķūdes koeficients spiedē dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



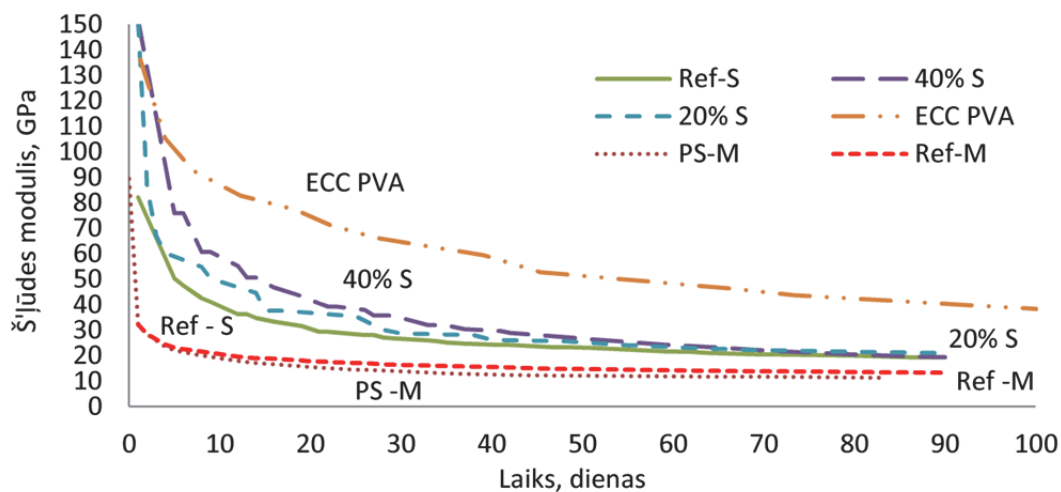
P2.19. att. Šķūdes koeficients spiedē dažādiem cementa kompozītiem, salīdzināti ar empīriskos modeļos iegūtajiem (Apvienotās – Sprinces A. un Omar *et al.*, 2008)



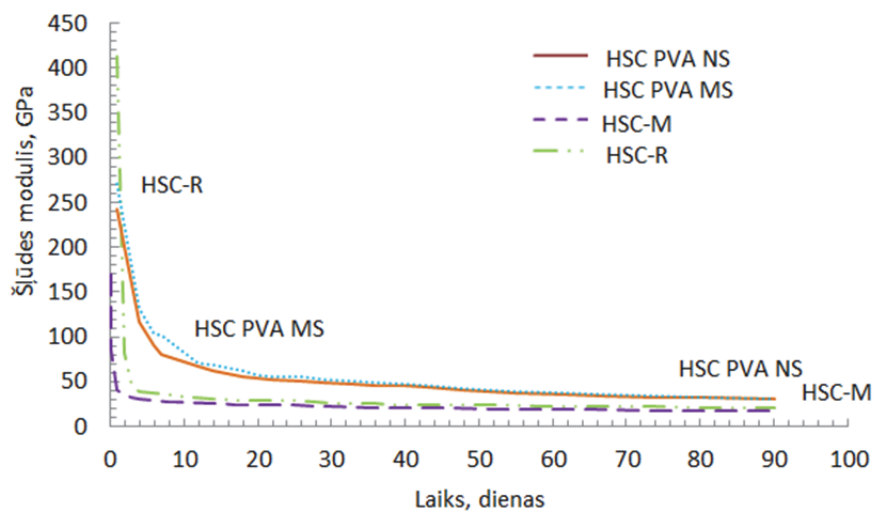
P2.20. att. Īpatnējās šķūde spiedē dažādiem parastās cementa kompozītiem



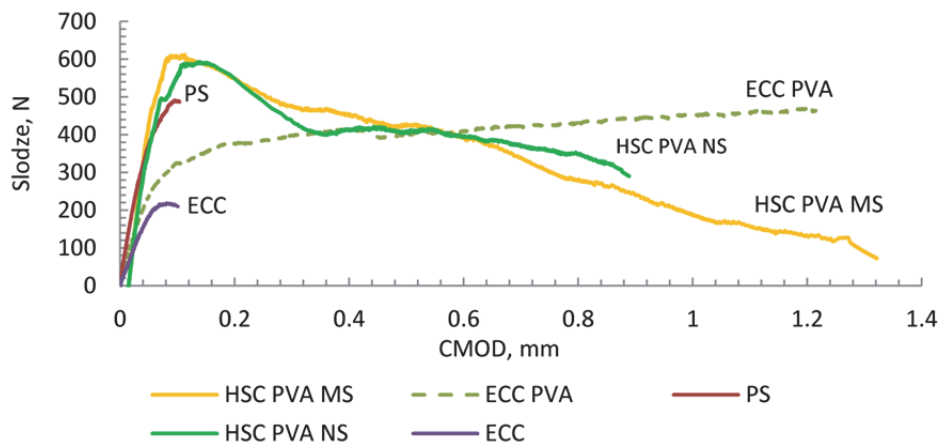
P2.21. att. Īpatnējās šļūde spiedē dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



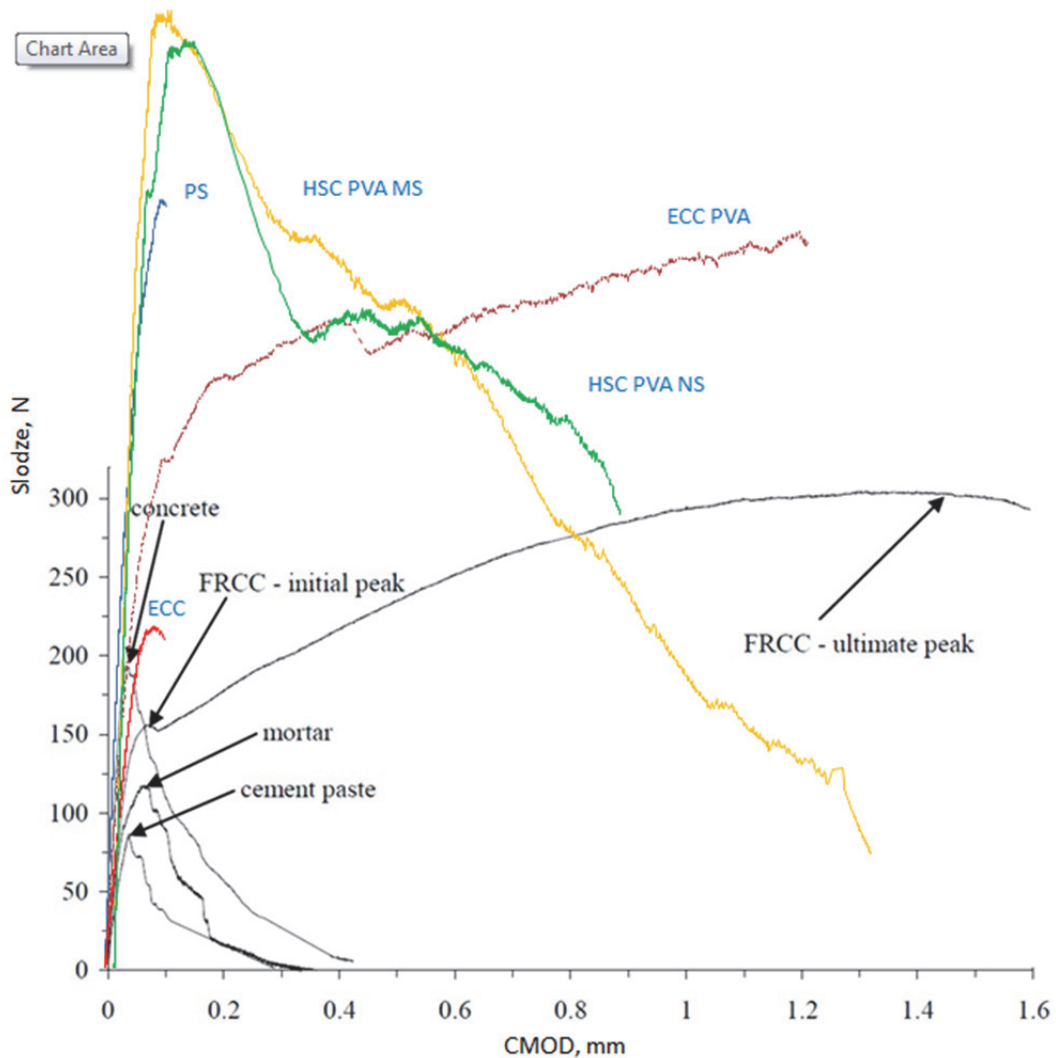
P2.22. att. Šļūdes moduļi spiedē dažādiem parastas stiprības cementa kompozītiem



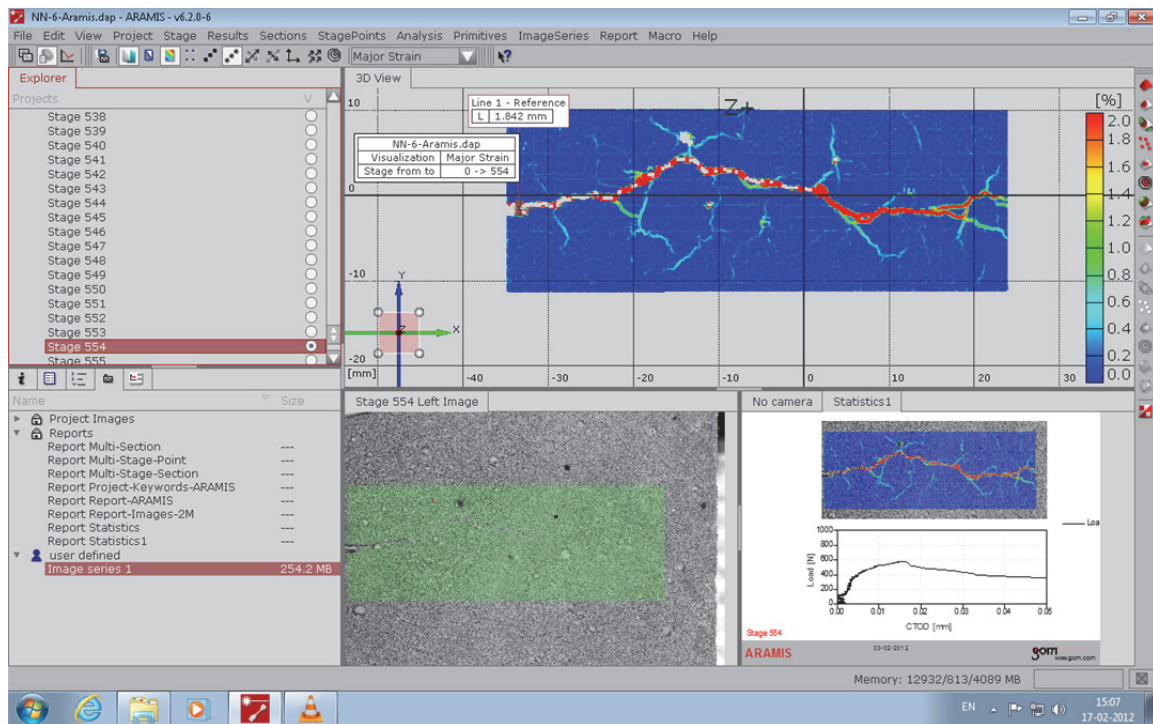
P2.23. att. Šļūdes moduļi spiedē dažādiem augstas stiprības cementa kompozītiem



P2.24. att. Stiepes stiprība un CMOD līknes dažādiem parastas un augstas stiprības cementa kompozītiem



P2.25. att. Apvienotās – Sprinces A. un Pereira E.B. *et.al.* (2011) eksperimentālās stiepes stiprības un CMOD līknes dažādiem parastas un augstas stiprības cementa kompozītiem, kas noteiktas pēc vienādas metodikas un ar vienādu tehnisko aprīkojumu



P2.26. att. Bezkontakta digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodes programma GOM „Aramis” plaisu attīstības izpētes gaitā.

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka promocijas darbu „Metodoloģija īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei”, kas iesniegts Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai, esmu izstrādājusi patstāvīgi un tas nav viltojums vai plaģiāts. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Andīna Sprince



2015. gada 27. janvārī