



**Andīna SPRINCE**

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

**Promocijas darba kopsavilkums**

**METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF  
LONG-TERM PROPERTIES AND CRACK  
DEVELOPMENT RESEARCH IN EXTRA FINE  
AGGREGATE CEMENT COMPOSITES**

**Summary of the Doctoral Thesis**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības inženierzinātņu fakultāte  
Materiālu un konstrukciju institūts

**RIGA TECHNICAL UNIVERSITY**  
Faculty of Civil Engineering  
Institute of Materials and Structures

**Andīna SPRINCE**

Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorante  
PhD student of Doctoral program „Construction”

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

Promocijas darba KOPSAVILKUMS  
Dr. sc. ing. zinātniskā grāda iegūšanai Būvzinātnes nozarē  
Būvmateriālu un būvtehnoloģiju, būvkonstrukciju apakšnozarēs (RTU P-06)

**METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF LONG-TERM  
PROPERTIES AND CRACK DEVELOPMENT RESEARCH IN EXTRA  
FINE AGGREGATE CEMENT COMPOSITES**

**SUMMARY of the Doctoral Thesis**  
to Obtain the Degree of Dr. sc. ing. in Construction Science,  
Construction Materials and Technology, Structural Engineering (RTU P-06)

Zinātniskie vadītāji / Scientific supervisors:  
Dr. sc. ing. **Leonīds PAKRASTIŅŠ**  
Dr. sc. ing. **Aleksandrs KORJAKINS**

**Rīga 2015**

Sprince A. Metodoloģija īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei.

Promocijas darba kopsavilkums. — Rīga: RTU, 2015. — 108 lpp.

Sprince A. Methodology for determination of long-term properties and crack development research in extra fine aggregate cement composites.

Summary of the doctoral thesis. — Riga: RTU, 2015. — 108 p.

Iespiests saskaņā ar RTU Materiālu un konstrukciju institūta 2015. gada 26. janvāra lēmumu, protokols Nr. 01.

Printed according to RTU Institute of Materials and Structures Decision protocol Nr. 01 dated January 26, 2015.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā  
«Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

This work has been supported by the European Social Fund within the project  
«Support for the implementation of doctoral studies  
at Riga Technical University».

ISBN 978-9934-10-673-6

## VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA

**Promocijas darbs** izstrādāts Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības 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).

### Oficiālie recenzenti:

Dr. sc. ing. **Robertas BALEVIČIUS**, Viļņas Gedimina tehniskās universitātes, Dzelzsbetona un mūra konstrukciju katedras asociētais profesors (Lietuva);

Dr. sc. ing. **Bradley Justin PEASE**, COWI A/S — Betona tehnoloģiju grupas, Tuneļu un apakšzemes konstrukciju nodaļas eksperts (Dānija);

Dr. sc. ing. **Ainārs PAEGLĪTIS**, Rīgas Tehniskās universitātes, Transportbūvju institūta direktors, profesors (Latvija).

### Promocijas padomes RTU P-06 sastāvs:

Dr. sc. ing. Diāna BAJĀRE, promocijas padomes sekretāre;

Dr. habil. sc. ing. Jānis BRAUNS;

Dr. sc. ing. Andris ČĀTE;

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS;

Dr. sc. ing. Jānis KAMINSKIS;

Dr. sc. ing. Ainārs PAEGLĪTIS;

Dr. sc. ing. Ivars RADIŅŠ;

Dr. habil. sc. ing. Kārlis ROCĒNS, promocijas padomes priekšsēdētājs;

Dr. sc. ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr. sc. ing. Juris SMIRNOVS.

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2015. g. 10. aprīlī plkst. 14:15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības inženierzinātņu fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

Ar promocijas darbu un kopsavilkumu iespējams iepazīties RTU Zinātniskajā bibliotēkā Ķīpsalas ielā 10 un tiešsaistē [http://www.rtu.lv/sadaļa „Zinātne”](http://www.rtu.lv/sadaļa_zinatne).

## GENERAL INFORMATION

**The doctoral thesis** was developed at the Institute of Materials and Structures, Faculty of Civil Engineering, Riga Technical University from 2010 to 2015. It was financially supported by the European Social Fund, Contract No: 2009/0144/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/005.

### **Official reviewers:**

Dr. sc. ing. **Robertas BALEVICIUS**, associate professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures in Vilnius Gediminas Technical University (Lithuania);

Dr. sc. ing. **Bradley Justin PEASE**, concrete expert with COWI A/S — Concrete Technology Group, Tunnel and Underground Structures Department (Denmark);

Dr. sc. ing. **Ainārs PAEGLITIS**, professor, director of the Institute of Transport Infrastructure Engineering (Latvia).

### **Promotion board of RTU P-06:**

Dr. sc. ing. Diana BAJARE, secretary;

Dr. habil. sc. ing. Janis BRAUNS;

Dr. sc. ing. Andris CATE;

Dr. sc. ing. Modris DOBELIS;

Dr. sc. ing. Janis KAMINSKIS;

Dr. sc. ing. Ainars PAEGLITIS;

Dr. sc. ing. Ivars RADINS;

Dr. habil. sc. ing. Karlis ROCENS, chairman;

Dr. sc. ing. Dmitrijs SERDJUKS;

Dr. sc. ing. Juris SMIRNOVS.

The defense of the doctoral thesis will take place in a public meeting on Friday 10 April 2015 at 14:15, in the Assembly Hall at the Faculty of Civil Engineering of Riga Technical University, 16 Azenes Str., Riga, Latvia.

The doctoral thesis and the summary of the doctoral thesis are available at the RTU Scientific Library, 10 Kipsalas Street, Riga and online at <http://www.rtu.lv/> under the section „Research”.

## SATURS

VISPĀRĒJĀ INFORMĀCIJA .....	3
GENERAL INFORMATION.....	4
DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	7
Tēmas aktualitāte un pētījuma problēmas nostādne .....	7
Darba mērķis .....	8
Darba uzdevumi.....	8
Pētījuma zinātniskā novitāte .....	9
Promocijas darba praktiskais nozīmīgums.....	10
Pielietotie materiāli un pētīšanas metodika .....	11
Pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze.....	12
Pētījuma diapazons un iegūto rezultātu pielietojuma robežas.....	12
Aizstāvēšanai izvirzītie darba rezultāti.....	13
Promocijas darba rezultātu aprobācija.....	13
Dalība starptautiskajās konferencēs.....	13
Publikācijas .....	15
Promocijas darba sastāvs un apjoms.....	16
PROMOCIJAS DARBA SATURS .....	17
1. Literatūras apskats / pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums ..	17
2. Ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija .....	25
3. Jaunizveidotās metodoloģijas eksperimentālā aprobācija.....	33
4. Galvenie metodoloģijas eksperimentālās aprobācijas rezultāti un to analīze ....	39
5. Rekomendācijas.....	47
Secinājumi .....	50
GENERAL REVIEW OF THE DOCTORAL THESIS.....	52
Subject Actuality and Formulation of the Problem.....	52
Objective of the Study .....	53
The Tasks of the Doctoral Thesis .....	53
The Scientific Novelty of the Work .....	54
Practical Application of the Doctoral Thesis .....	56
The Methodology of the Research .....	57
Theoretical and Methodological Bases of the Research.....	58
Scope of the Study.....	58

Results Presented for the Defense .....	59
Approbation of the Results.....	59
List of Relevant International Conferences.....	59
List of Scientific Publications on the Topic of the Doctoral Thesis.....	60
Structure and Volume of the Doctoral Thesis.....	62
<b>CONTENTS OF THE DOCTORAL THESIS.....</b>	<b>63</b>
1. Literature Overview / Theoretical and Experimental Background.....	63
2. Methodology for Determining Long-term Properties and Crack Development Research .....	72
3. Experimental Approbation of the Newly-developed Methodology.....	80
4. The Main Results of Experim. Approbation of Methodology and Their Analysis	86
5. Recommendations.....	94
Conclusions.....	97
<b>PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES /</b> <b>LIST OF REFERENCES OF THE DOCTORAL THESIS.....</b>	<b>99</b>
Par promocijas darba autori .....	107
About the Author.....	107

## 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 daudzkomponenšu cementa kompozītu izstrādes — sākot ar samazinātu cementa daudzumu, samazinātiem pildvielu izmēriem, disperso stiegrojumu 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 nesadalošo 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 slogojumā. 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 stiepē. 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 zejas datu lielas neatbilstības dēļ ir nekorekti izmatot šos iepriekš izstrādātos modeļus.

Lai jaunus cementa kompozītus varētu izmantot, projektējot drošas, efektīvāku šķērsriezumu konstrukcijas, nepieciešams izstrādāt jaunu metodoloģiju, kurā būtu sniegta informācija par to, kā nosakāmas dažādu, īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu (kam pildvielas lielākais ģeometriskais izmērs  $\leq 5$  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 ( $\leq 5$  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 stendu cementa kompozītu šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanai stiepē un adaptēt esošo koka un polimērmateriālu šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stendu spiedē.
4. Izveidot jaunu stiepes pārbaudes stendu, kas būtu atbilstošāks ISCK plaisu rašanās, attīstības, plaisu rakstura, plaisu atvēruma lieluma noteikšanai ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzesmetodiku.
5. Veikt īpaši smalkgraudainu ( $\leq 5$  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 pārbaužu 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 ( $\leq 5$  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 ( $\leq 5$  mm) parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, dažāda vecuma un dažādas ģeometriskās formas paraugiem, divās mitruma koncentrācijās, pie konstanta sloģojuma.
- 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 ( $\leq 70$  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  $\leq 5$  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 nolāsīšanai, 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  $\pm 0,1$   $\mu\text{m}$ , izmantojot digitālo attēlu pārvietojumu 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 atbilstoši 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 × 150 × 12 un 100 × 50 × 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 „Societējuša 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 ( $\leq 5$  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 pārbaudžu veikšanas procedūru aprakstus, kā arī iegūto datu apstrādi un aparatūras izvēli.

Piedāvātā metodoloģija izmantojama mehānisko īpašību pārbažu 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 nesadalāmo materiālu daudzums, kas kopumā veicinās ilgtspējīgu un ekoloģiskāku būvniecību, dodot ieguldījumu pasaules globālā siltumnīcas efekta samazināšanai.

Sniegti priekšlikumi izmaiņām standartos EN 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  $\mu\text{m}$  un maksimālo gājienu  $\pm 5\text{ mm}$ , 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 svariem „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 sloģošanas 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 iezāģējumu vienā vai abās parauga pusēs;
- šļūdes pārbaužu spriegumu līmenis, nosakot deformācijas lineārajā šļūdes posmā, atrodas robežās līdz 40 % no graužošo spriegumu lieluma;
- sloģojuma 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,  $h$ -indekss — 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 4<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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. 11<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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 52<sup>nd</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 36<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 51<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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 4<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 36<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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.

## PROMOCIJAS DARBA SATURS

Promocijas darba ievaddaļā formulēta pētījuma problēma, izvirzītais mērķis un galvenie uzdevumi tā sasniegšanai, kā arī izcelta pētījuma zinātniskā novitāte un praktiskais nozīmīgums, definētas pētījuma robežas un pētījuma teorētiskā un metodoloģiskā bāze.

### 1. Literatūras apskats / pētījuma teorētiskais un eksperimentālais pamatojums

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 neprognozējamas 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 neatjaunojamās 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 patēriņa, 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).

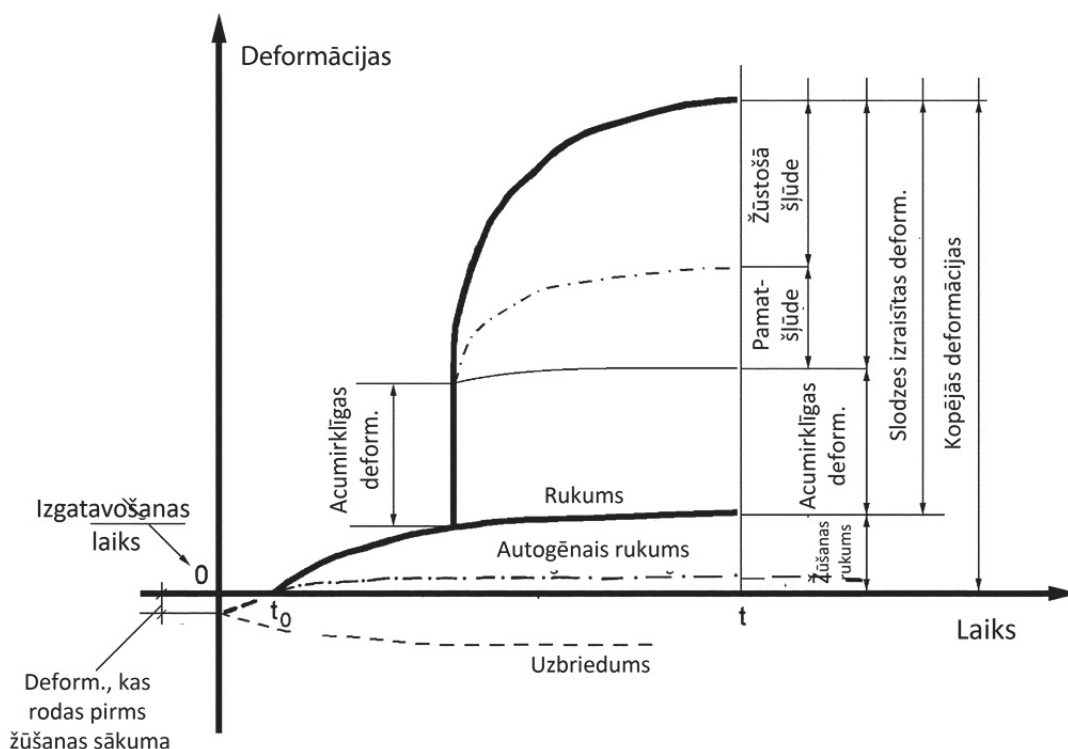
Domājot par pasaules ekoloģisko stāvokli, šobrīd īpaši aktuāla ir atkārtoto, otrreiz lietojamo materiālu izmantošana, jo katru gadu atkritumu apjoms pasaulē strauji pieaug (~5 % gadā; Taylor *et al.*, 2006). Eiropas kopiena vien rada aptuveni 200 miljonus tonnu sadzīves atkritumu gadā (Vilciņa, 2010). Izmantojot alternatīvus, otrreiz izmantojamus, reciklētos izejmateriālus, tiktu samazināts ne tikai atkritumu apjoms, bet arī šobrīd lietojamo izejmateriālu ražošanas apjoms, tādējādi samazinot arī CO<sub>2</sub> 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, 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 samazināti, plānāki, reizēm arī sarežģītākas formas šķērsriezumi, 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.

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 (sk. 1.1. att.).



1.1. att. Deformāciju iedalījums (ACI 209.1R-05, 2005)

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 apgrūtina 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 un šļūdes un rukuma īpašības tāpat ietekmē arī liels skaits dažādu citu faktoru, piemēram, cementa kompozīta sastāvs (hidratētas 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 cementa kompozīta 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 — acīmredzīgās 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 strauji pieaug pirmajās 2–4 nedēļās, pēc tam 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).

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 paredzētajiem darba apstākļiem un ilgmūžības prasībām. Lai apmierinātu šos kritērijus, tiek ņemtas vērā ne tikai deformācijas, kas rodas uzreiz pēc slodzes pielikšanas, 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 deformāciju — 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 aizturošas 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, paliekošajām 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 procesu 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), 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 stiegrojumu 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). 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.

Šādu materiālu izmantošana būvniecībā dotu iespēju samazināt materiālu patēriņu, kā arī konstrukciju kopējo svaru, būvēt augstākas būves, izmantot efektīvāka šķērsriezuma būvelementus un projektēt graciozākas plānsieniņu konstrukcijas, kā arī realizēt jaunas, sarežģītākas formas. Cementa kompozīta uzlabotās īpašības padara to par izdevīgāku materiālu no ekonomiskā viedokļa un par iespējams vienīgo materiālu specializētās būvniecības jomā.

Šobrīd daudz tiek pētītas šādu jaunizveidotu materiālu fizikālās un stiprības īpašības. Tie nodrošina augstākas pakāpes mehāniskās īpašības un ilgmūžību (paaugstinātu izturību pret koroziju, nodilumu, kā arī augstu gāzes un ūdens necaurlaidību, spēju pretoties ķīmiskajām un citām agresīvām iedarbēm), 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 šķēršļiem ir pagaidām nepietiekamā informācija par šādu cementa kompozītu ilglaicības rādītājiem un iespējamo palielināto jutīgumu pret plaisāšanu — šāda nepietiekama ilglaicīgo un ilgizturības īpašību izpēte būtiski var ietekmēt drošu un ilgu būvju ekspluatāciju. Tāpat nav izveidoti būvnormatīvi, kas atbilstu konstrukciju projektēšanai no šādiem uzlabotiem cementa kompozītiem.

Konstrukcijās cementa kompozīta šļūde ir vienlaikus 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 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 aptuvenš šļūdes deformāciju

novērtējums, ir iespējams novērtēt paredzamās šļūdes deformācijas, balstoties tikai uz pāris parametriem, — tādiem kā relatīvais gaisa mitrums, cementa kompozīta vecums un elementa dimensijas. Otra galējība ir konstrukciju, jutīgu pret deformācijām, aprēķins. Šajā 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 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 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 vērtības (spiedes sloojuma) 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 ir vairāk piemērotas parastās stiprības betoniem. Galvenokārt šļūdes deformācijas spiedē ieteikts noteikt, izmantojot cilindriskus paraugus, piedāvātās paraugu ģeometrijas attiecības svārstās no  $l/2$  līdz  $l/4$ , tāpat ir standarti, kas iesaka lietot prizmatiskas formas paraugus. Deformācijas galvenokārt tiek ieteikts noteikt, ieliekot paraugus atsperu standos, bet šiem stendiem ir būtiski trūkumi — paraugus nav iespējams pakļaut nemainīgai slodzei neierobežoti ilgā laika posmā, 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 sloojuma vienmērīgums var svārstīties atkarībā no elektriskās strāvas stipruma, turklāt ir papildizdevumi elektroenerģijas patēriņa dēļ. Tāpat šie standarti nav piemēroti smalkgraudainu un 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.

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. 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, iespējams novērtēt materiāla spēju pretoties stiepes spēkam un novērot galveno plaisu attīstību un plaisu atvēruma lielumu.

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 dažādu 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 ietekmējošo faktoru. Liela daļa empīrisko modeļu ņem vērā cementa tipu, spiedes stiprību, cementa kompozīta parauga vecumu, efektīvo parauga biezumu, relatīvo gaisa mitrumu, bet citus būtiskus ilglaicīgo īpašību faktorus, kā piemēram, cementa un granulometrisko sastāvdaļu daudzumu, ū/c attiecību, gaisa daudzumu, granulometrijas veidu, cementa kompozīta cietēšanas paņēmienu, žūšanas ilgumu, slodzes raksturu, sloojuma ilgumu, cementa kompozīta formu, gaisa temperatūru ievērtē nepilnīgi. Literatūrā kopā minēti ~30 dažādi iekšējie un ārējie ilglaicīgo īpašību ietekmējošie faktori. Vispilnīgāk, t. i., 21 faktoru no tiem, pielieto modelī RILEM Model B3 (1995), bet tas tāpat kā lielākā daļa no tiem stingri rekomendēts tikai parastas stiprības betoniem.

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.

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 klasiskām konstrukcijām. 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 īpašību 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.

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 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 parastas un augstas stiprības cementu kompozītiem.

EN 1992-1-1:2005 aprēķina modelis sniedz gatavus šļūdes koeficientu noteikšanas grafikus, bet nav atrodama informācija par cementa kompozītu, kam iegūti un apkopoti ilgstošie parametri un izejas dati, līdz ar to nav iespējams salīdzināt konkrētam projektam paredzēta betona atbilstību EN 1992-1-1:2005 betonam un tādējādi ir nekorekti izmantot šīs grafiski iegūtas vērtības konstrukciju aprēķinos.

Standarta ACI 209R-92 1997. gadā pārapsūtinātajā 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, apkopojot lielu skaitu dažādu autoru eksperimentālos datus no 1937.–1979. gadam. Dažādu faktoru ietekmes koeficienti izmantojami tikai parastas stiprības cementa kompozītam un šie koeficienti nebūtu korekti lietojami mūsdienu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu atšķirīgo iekšējo un ārējo faktoru iegūto, ilglaicīgo īpašību koriģēšanai un, lai tos tālāk korekti izmantojami inženieraprēķinos.

Mūsdienās nav veikts jauno, atšķirīgo cementa kompozītu 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 un, kas atvieglotu inženieru darbu.

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

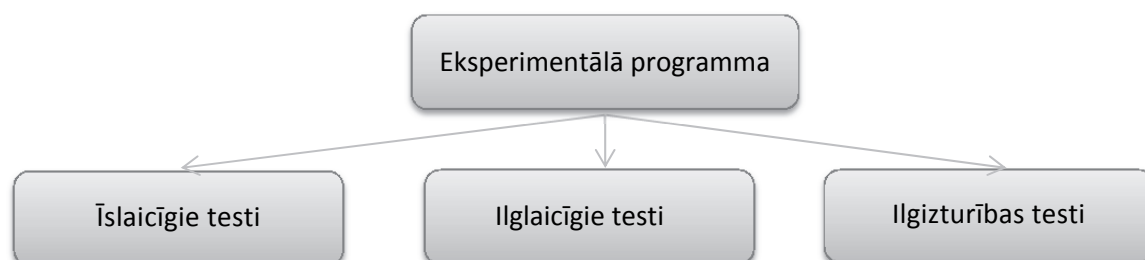
## 2. Ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija

Konstrukciju vai to modeļu eksperimentālo pārbaužu rezultātā var uzzināt patiesos dažādu īpašību raksturīgos lielumus. Laboratorijā veicamie eksperimenti dod iespēju iegūt paaugstinātas precizitātes rezultātus. Konstrukciju modelēšana un darbības prognozēšana savukārt nav iespējamā bez informācijas par atsevišķo komponentu īpašībām. Lai rastu iespēju noteikt cementa kompozītu īpašību raksturīgos parametrus, ir izstrādātā jauna ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģija, kas izmantojama mehānisko īpašību pārbaudes laboratorijās.

Metodoloģija vispārīgā gadījumā iedalās trīs daļās: pirmā — materiāla un paraugu izgatavošanas 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, to daudzuma noteikšanu un sajaukšanu, veidņu sagatavošanu un nepieciešamo formu, eksperimentālo paraugu betonēšanu, paraugu pirmapstrādi pēc atveidošanas un tālāku sagatavošanu eksperimentālajām pārbaudēm. Otrajā daļā veic pārbaudes iekārtu sagatavošanu un eksperimentālās pārbaudes, savukārt trešajā daļā veic datu detalizētu apstrādi.

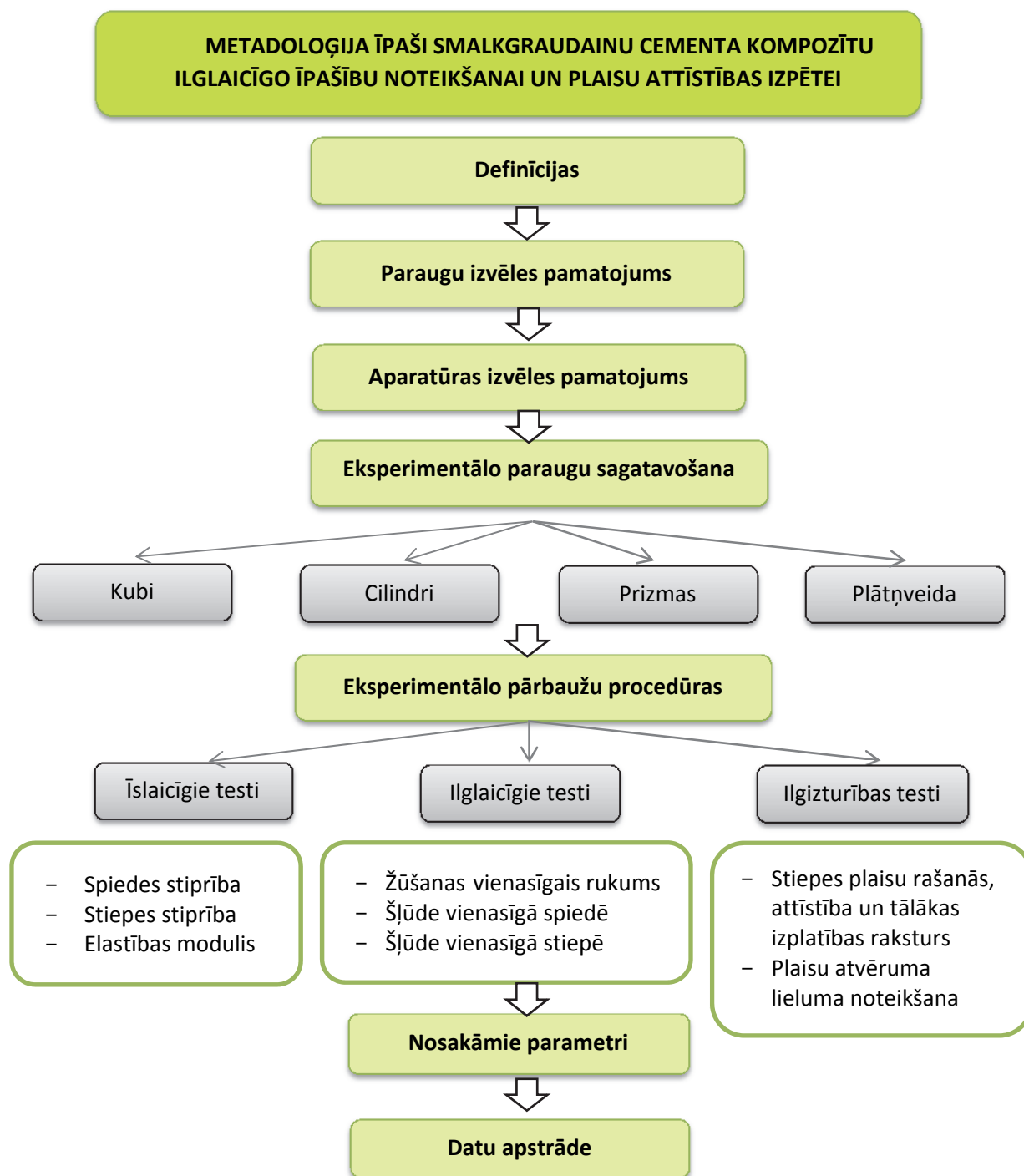
Eksperimentālā programma iedalās trīs daļās:



Eksperimentālās programmas 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 ilglaicīgajos testos. Otrajā daļā nosaka cementa kompozīta ilglaicīgos rādītājus ar un bez slodzes pielikšanas, atbilstoši šļūdes vienasīgās deformācijas spiedē, stiepē un žūšanas rukuma vienasīgās deformācijas. Trešajā daļā veic cementa kompozīta ilgzturības pārbaudes (plaisu izpēti — plaisu veidošanos, tālāko attīstību, raksturu un plaisu atvēruma lieluma noteikšanu). Metodoloģija strukturizēti parādīta shēmā, sk. 2.1. att.

Spiedes stiprības noteikšanai izmantot 100 × 100 × 100 mm kubus, 40 × 40 × 160 mm prizmas un Ø 47 × 190 mm cilindrus. Pielietojot pārejas koeficientus, stiprības noteikšanai var tikt izmantoti arī citu izmēru paraugi. Stiepes stiprību nosaka, izmantojot kuponveida (*Coupon*) — 100 × 50 × 12 un 150 × 70 × 12 mm (sk. 2.5. att.) vai koncentrētas slodzes (*Compact Tension* — *CT*) formas paraugus — 150 × 150 × 12 mm (sk. 2.4. att.). Eksperimentālā spiedes, stiepes stiprība nosakāma atbilstoši ilglaicīgo slodzes testu

sākuma dienai, jo, izejot no graujošās slodzes lieluma, tiek aprēķināts slodzes lielums, kas jāpieliek vienasīgai šļūdei pakļautajiem paraugiem.



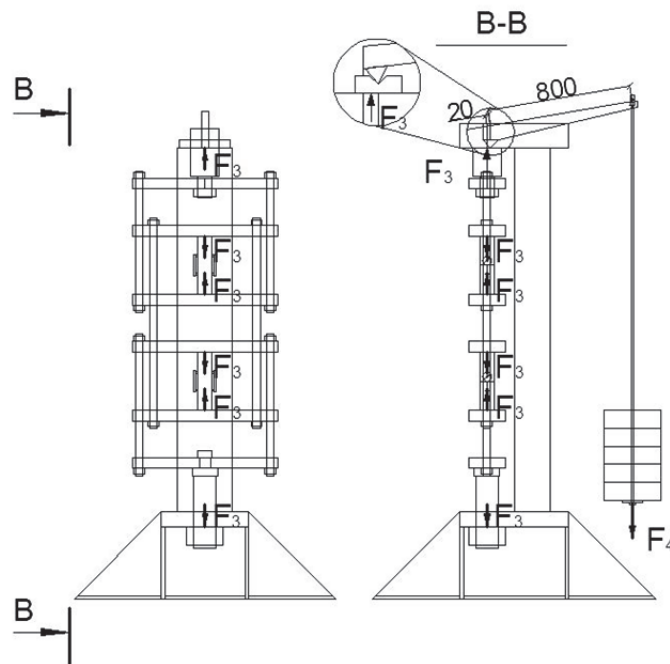
2.1. att. Īpaši smalkgraudainu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanas un plaisu attīstības izpētes metodoloģijas shēma

Elastības moduli nosaka no elastīgajām deformācijām, kas norisinās šļūdes pārbaudes sākumā.

Šļūdes vienasīgo deformāciju spiedē un žūšanas vienasīgo rukuma deformāciju noteikšanai izmanto  $\emptyset 47 \times 190$  mm izmēru cilindriskos paraugus vai  $40 \times 40 \times 160$  mm izmēru prizmatiskos paraugus. Visiem šļūdes un rukuma paraugiem uz sānu virsmām

uzlīmē alumīnija plāksnes ( $10 \times 15$  mm), kas izvietotas centriski un simetriski, lai nodrošinātu deformāciju mērinstrumentu „nažu” stabilu novietojumu. Vienam cilindriskajam paraugam uzlīmē sešas, bet prizmatiskajam paraugam — četras plāksnes. Attālums starp divu alumīnija plākšņu centriem ir 50 mm. Pamatšļūdes vērtības noteikšanai daļu paraugu, tai skaitā rukuma, ietin divās kārtās alumīnija folijas, tādējādi nodrošinot, ka neiestāsies žūšanas process un tajos norisināsies tikai pamatšļūde.

Visiem šļūdes paraugiem, pirms tos ievieto šļūdes sviru standā, uz sānu virsmām piestiprina deformāciju mērierīces — tenzometrus (*strain gauge*). Šļūdes sviru standu darbības principu sk. 2.2. att.

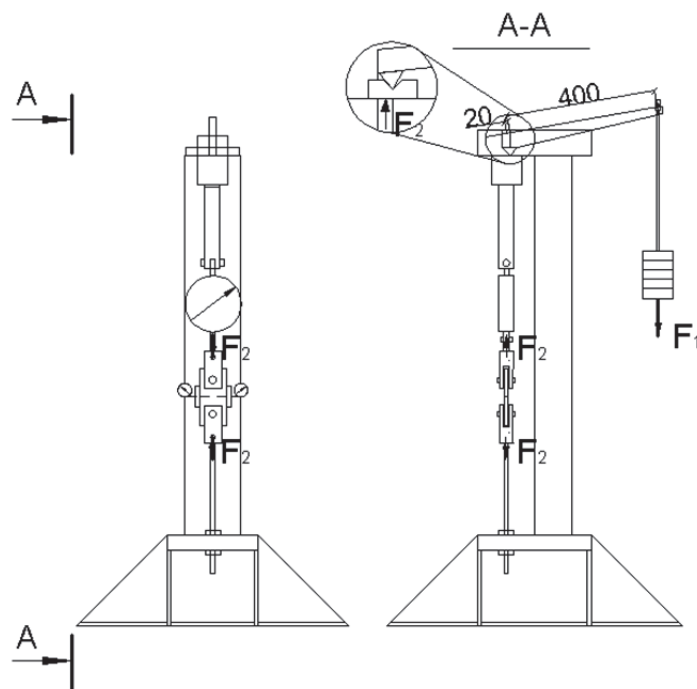


2.2. att. Vienasīgās šļūdes spiedē sviru stends ( $F_3 = F_4 \times \text{sviru plecs}$ )

Vienasīgo šļūdes deformāciju stiepē noteikšanai izmantojami kuponveida vai CT formas paraugi. Pirms eksperimentālajām pārbaudēm simetriski iezāgējumam pielīmē alumīnija plāksnes ( $10 \times 10$  mm; sk. 2.4. un 2.5. att.). Visiem paraugiem simetriski iezāgējumam piestiprina deformāciju noteikšanas mērierīces — Aistova tenzometrus vai HBM DD1 digitālos deformāciju mērītājus tā, lai to “naži” atrastos uz pielīmētajām plāksnēm; tenzometru bāze — 50 mm. Tenzometri pie paraugiem piestiprināti ar elastīgām gumijām. Paraugus ar pievienotiem deformāciju mērītājiem ievieto šļūdes stiepē sviru standos (sk. 2.3. att.), pa vienam paraugam katrā standā. HBM DD1 deformāciju mērījumus caur daudzkanālu reģistrēšanas iekārtu (*data logger*) HBM „Spider 8” reģistrē datorā, izmantojot HBM „CatMan” datorprogrammu.

Stends izveidots uz nekustīga nesošā rāmja ar 400 mm garu sviru. Stenda augšdaļā iekārts slodzes pārneses elements, kas pieļauj rotācijas kustību. Stenda apakšdaļā izveidots stings elements. Stenda slodzes pārneses elementu galos ar  $\varnothing 12$  mm skrūvēm tika pievienoti stiprināšanas adapteri, kas nepieciešami, lai standā varētu ievietot paraugu (sk. 3.2. att.). Adapteri un paraugs tiek savienoti ar  $\varnothing 20$  mm stieņiem. Kad paraugs ir ievietots standā, stenda apakšējās daļas elements ar uzgriežņa palīdzību tiek noregulēts, lai iztaisnotu paraugu. Paraugi tiek slogoti ar atsvaru palīdzību, liekot tos uz

stenda sviras galā iekārtā stieņa. Pieliktā slodze tiek reģistrēta un kontrolēta ar dinamometra palīdzību. Šļūdes absolūtās deformācijas stiepē ir aptuveni 10–20 reizes mazākas nekā šļūdes deformācijas spiedē, un to reģistrēšanai rekomendē lietot digitālos deformāciju mērītājus, kas ir pietiekami jutīgi un spēj uztvert mikrodeformācijas. Šļūdes sviru stends nemainīgu slodzi notur neierobežoti ilgu laika posmu.



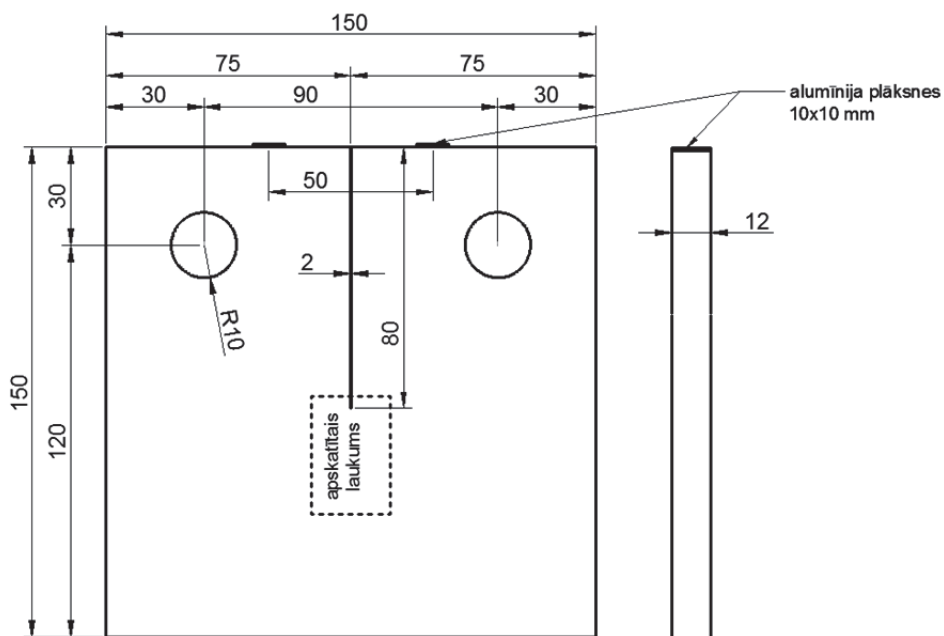
2.3. att. Vienasīgās šļūdes stiepē sviru stends ar ievietotu kuponveida paraugu  
( $F_2 = F_1 \times \text{sviru plecs}$ )

Visus šļūdes paraugus slogo ar konstantu statisko slodzi, regulāri veicot deformāciju nolasījumus. Sasniedzot interesējošo slogojuma ilgumu, slodzi pakāpeniski noņem un paraugu atstāj šļūdes sviru stendā, lai noteiktu atgriezeniskās deformācijas laikā. Lai noteiktu korektu šļūdes lielumu, no kopējām deformācijām jāatņem rukuma deformācijas, kas noteiktas paralēli identiskas ģeometrijas paraugiem un vienādos apkārtējās vides apstākļos, tikai bez slodzes. Testu laikā reģistrē arī telpas apkārtējās vides mitrumu un temperatūru.

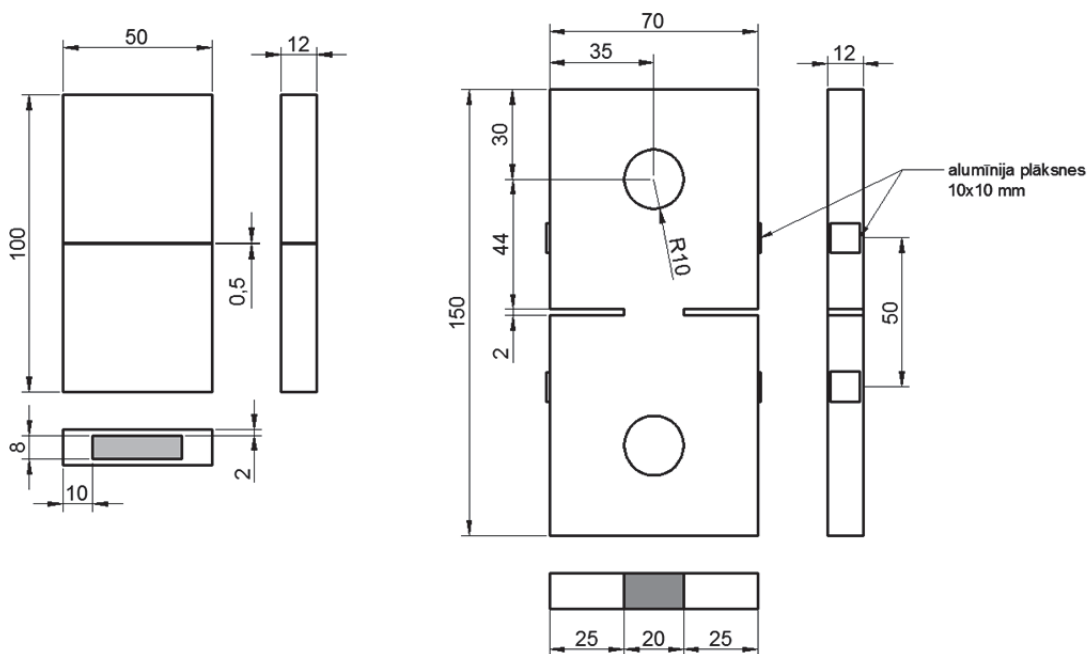
Stiepes slodzes un ilgzturības īpašību noteikšanai un izpētei sagatavo CT paraugus ar gala izmēriem  $150 \times 150 \times 12$  mm (sk. 2.4. att.) vai kuponveida paraugus —  $100 \times 50 \times 12$  un  $150 \times 70 \times 12$  mm (sk. 2.5. att.). CT formas paraugi ir adaptēti no metāla plaisu testa standarta ASTM-E647, 2005. 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. Plaisas parasti parādās maksimālo spriegumu zonā. Lai plīsums būtu prognozējams un tiktu konkretizēta plaisas parādīšanās vieta (tas ir arī ar fotoobjektīvu apskatāmais laukums), CT paraugam iezāgē 80 mm garu un 0,5–2 mm dziļu, bet kuponveida paraugam paralēli parauga īsākajai malai pa centrālās ass līnijas perimetru iezāgē vispirms 2 mm un tad 10 mm (parauga īsākā šķērsizmēra virzienā) dziļus iezāgējumus (Paegle, Fischer, 2011, 2013; Pereira *et al.*, 2012). Savukārt paraugam  $150 \times 70 \times 12$  mm iezāgē 20 mm garus un

2 mm šaurus iezāgējumus abās parauga pusēs. Iezāgējuma galā stiepes slogojuma laikā koncentrēties maksimālie spriegumi, šaurais iezāgējums papildus palielinās spriegumu intensitāti.

Pirms eksperimentālajām pārbaudēm paraugiem centriski un simetriski iezāgējumam pieliek vienu (CT paraugiem) vai divus (kuponveida paraugiem) deformāciju mērītājus, kas slogošanas laikā fiksē parauga iezāgējuma atvēruma lielumu — CMOD. Paraugus kopā ar deformāciju mērītājiem centriski ieliek stiepes iekārtas satvērējzokļos.



2.4. att. Koncentrētās stiepes (CT) paraugu ģeometrija



2.5. att. Kuponveida paraugu ģeometrija

Viens no veidiem, kā novērot cementa kompozīta mikroplaisu rašanos, attīstību un raksturu, veikt to analīzi, kā arī mērīt atvēruma lielumu, ir izmantot digitālo attēlu pārvietojumu mērīšanas un analīzes metodes — GOM „Aramis” un Imetrum LTD „Imetrum”, no kurām mikroplaisu mērīšanai atbilstošāka un precīzāka ir bezkontakta mērīšanas sistēma GOM „Aramis”. Eksperimentālie pētījumi apliecina, ka universālās, liela mērdiapa zona pārbaudes iekārtas nav piemērotas mikroplaisu un plaisu izpētei un plaisu atvērumu mērījumiem paralēli izmantojot liela tuvinājuma makro objektīvu, jo pat ļoti maza iekārtas darbības ātruma gadījumā —  $\sim 5 \mu\text{m/s}$ , pārbaudāmajā paraugā rodas pārāk lielas kustības, līdz ar to nav iespējams iegūt asus augstas izšķirtspējas fotoattēlus. Pārbaudītu laikā mikroplaisu novērošanai izmantotais makro objektīvs, ar aci neredzamo kustību dēļ, zaudē fokusā esošos parauga virsmas punktus un nespēj nodrošināt pietiekami kvalitatīvu fotoattēlu uzņemšanu, kurus tālāk spētu apstrādāt GOM „Aramis” datorprogramma.

Testā izmanto fiksēto objektīvu ar fokusa attālumu 60 mm. Testa veikšanai izmanto fotoaparāta uzstādījumus — diafragma F11, ekspozīcija 1/30, ISO 200. Ik sekundi uzņem vienu fotoattēlu ar 24 megapikseļu izšķirtspēju. Pirms testa uzsākšanas fotokameru novieto uz statīva un nolīmeņo, lai fotoaparāta matrica būtu paralēla parauga virsmai un lai maksimāli visi redzamie virsmas punkti būtu fokusā. Virsmas un matricas paralelītāti (t. i., skatu meklētājā redzamo virsmas visu punktu asumu) kontrolē, fotokameru sinhronizējot kopā ar datoru un izmantojot nekomerciālo Breeze Systems „NK Remote” datorprogrammu, lai datora ekrānā redzētu to pašu, ko fotoaparāta skatu meklētājā. Attālumam starp fotokameras matricu un parauga virsmu jābūt 175 mm, fiksējot  $36 \times 24$  mm lielu virsmas laukumu (sk. 2.4. att.). Testa veikšanai izmanto tālvadības pulti un fotokamerā iebūvēto automātisko fotoattēlu uzņemšanas taimeru ar laika intervālu 1 sekunde. Pirms slogojuma pielikšanas uzņem vienu fotoattēlu bez slodzes un vienu fotoattēlu kopā ar pie plaisas pieliktu lineālu vai milimetru papīru. Lai GOM „Aramis” datorprogrammā no fotoattēliem varētu nolasīt pārvietojumus jeb virsmas punktu attālināšanos, pirms testa parauga virsmu apsmidzina, izmantojot minikompresoru un aerogrāfu (*airbrush*) ar smalkiem melnas krāsas putekļiem. Lai iegūtu augstas kvalitātes fotoattēlus, testa laikā paraugus apgaismo ar intensīvas gaismas prožektoriem, kas novietoti tā, lai gaisma uz parauga virsmas būtu vienmērīga un neradītu ēnas. Ar universālo pārbaudes iekārtu „Instron” iegūtos slodzes datus sinhronizē ar GOM „Aramis” datorprogrammu, papildus izmantojot Mathworks „MatLAB” un „Timestamp” datorprogrammas.

Plaisu veidošanos un attīstību, kā arī plaisu atvēruma lielumu var noteikt arī ar digitālo pārvietojumu mērīšanas aparatūras komplektu „Imetrum”. Šajā metodē paraugs ar speciālas videokameras palīdzību pārbaudes laikā tiek nepārtraukti filmēts, mērot divu vai vairāku punktu savstarpējo attālumu izmaiņas — pārvietojumus. Ar „Imetrum” aparatūras komplektu, līdzīgi kā ar digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas 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 putekļiem. „Imetrum” videokameru pirms testa

nolīmeņo, noregulē asu fokusu uz interesējošo apgabalu — t. i. tur, kur prognozējami veidosies plaisa, un parauga virsmu apgaismo ar intensīvu gaismu.

Augstas stiprības cementa kompozītu stiepes stiprība ir salīdzinoši maza (~5–10 % no spiedes stiprības) un ir problemātiski piemeklēt testa iekārtas, kas būtu piemērotas plaisu jutīgiem, augstas stiprības cementa kompozītiem, mazām slodzēm un kuru darbības laikā iekārtā nerastos nepiemēroti lielas kustības, tāpēc tika izveidots jauns pārbaudes stends, sk. 2.6. att. (stenda autori G. Fischer un A. Sprince), kas ir speciāli projektēts un piemērots mazām stiepes slodzēm un ir precīzāks, strādājot ar nelieliem pārvietojumiem. Eksperimentāli pārbaudīts, ka, izmantojot šo iekārtu, ir iespējams iegūt precīzākas materiālus aprakstošās līknes un tā ir izmantojama mikroplaisu un plaisu novērošanai, mērīšanai un analīzei.

Pārbaudes stenda darbības princips idejiski aizgūts no skrūvspīļu darbības. Sākotnēji izvirzītas rāmja ģeometriskās un testam stabilās prasības: rāmis veidots ar minimālu, pēc iespējas mazāku kopējo augstumu, lai to vajadzības gadījumā varētu palikt zem mikroskopa, un izgatavots no masīva materiāla, lai testa laikā to nevarētu viegli izkustināt, bet tai pašā laikā tāds, 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 sk. 2.6. att.). Rāmis veidots tā, ka slogošanas laikā tikai tā kustīgā daļa pārvietojas horizontāli 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, zem un virs parauga uz skrūvēm uzlikti „SKF” gultņi un pēc tam uzskrūvēti uzgriežņi. Stiepes spēka reģistrēšanai pie rāmja kustīgās daļas ar  $\varnothing 12$  mm skrūvi tika pieskrūvēts nerūsošā tērauda S-tipa stiepes slodzes dinamometrs „HBM RSCC”, mērīdiapazons — 0–1000 N. Dinamometrs tika saslēgts ar datu reģistrēšanas iekārtu. Dinamometra otrs gals caur ļoti smalkas vītnes skrūvi ( $\varnothing 12$  mm), kas iziet caur stenda rāmi, tika pieskrūvēts pie mikrometra. Mikrometra gals pagriežams ar roku. Lai varētu kontrolēt pagriezienu leņķi, mikrometra galā izveidota skala; iedaļas vērtība —  $2^\circ$ . Mikrometrs griezt ar ātrumu  $\sim 5$   $\mu\text{m/s}$  ( $\sim 1$  skalas iedaļa/ sekundē).



### 3. Jaunizveidotās metodoloģijas eksperimentālā aprobācija

Izmantojot jaunizveidoto cementa kompozītu 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 faktoru, piemēram, cementa kompozītu vecuma un apkārtējās vides apstākļu ietekmi uz konstrukciju elementu darbību, ko nav iespējams novērtēt ar teorētiskiem aprēķiniem un kas maksimāli tuvu atbilst konstrukciju konkretizētajiem apkārtējās vides apstākļiem, slogojuma lielumam un ilgumam, kā arī konstrukciju ģeometriskajām atšķirībām. Šīs īpašības var tikt noteiktas projektā paredzētajam cementa kompozīta sastāvam, kas var atšķirties no standartos aprakstītā.

Jaunizveidotā metodoloģija nodrošina materiāla īpašību un drošu konstrukciju aprēķiniem nepieciešamo parametru noteikšanu. Tā ir universāla un derīga dažādu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai un plaisu attīstības izpētei, un aprobēta parastas, augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem, dažādā vecuma cementa kompozīta paraugiem, atšķirīgu ģeometrisku formu paraugiem divās mitruma koncentrācijās. Metodoloģijā ietilpstošās metodikas kopumā pārbaudītas 15 dažādiem cementa kompozītiem. Eksperimentālajos testos pārbaudīti: dažādu izmēru kubi, prizmas, cilindri un plātņveida iezāgētie paraugi (CT un kuponveida).

Cementa kompozītu sastāvi izgatavoti un iebetonēti, paraugu izgatavošana, apstrāde un eksperimentālās pārbaudes veiktas Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības inženierzinātņu fakultātes (BIF) Būvmateriālu un Būvizstrādājumu ( $B_m$  un  $B_i$ ), Būvkonstrukciju (BK), Būvmehānikas ( $B_M$ ) katedru un Dānijas Tehniskās universitātes (DTU) Civilo inženieru fakultātes (BYG) laboratorijās.

Kopumā izveidoti un pārbaudīti šādi cementa kompozīti (grafikos atspoguļoto dažādu cementa kompozītu apzīmējums un atšifrējums):

- PS — parastas stiprības cementa kompozīts. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~30 MPa, pārbaudīts tikai plaisu pārbaudēs, paraugu izmēri 150 × 150 × 12 mm;
- 20 % S — augstas stiprības cementa kompozīts, kam kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma, izmantots 20 % borsilikāta spuldžu stikla mikroizmēru daļiņu pulveris, kas iegūts no otrreiz pārstrādāta spuldžu stikla. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~60 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri 40 × 40 × 160 mm; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 diena; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graujošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskās (nemainīgas) slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;
- 40 % S — augstas stiprības cementa kompozīts, kam kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma, izmantots 40 % borsilikāta spuldžu stikla mikroizmēru daļiņu pulveris, kas iegūts no otrreiz pārstrādāta spuldžu stikla. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~55 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri 40 × 40 × 160 mm; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 diena; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graujošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;

- Ref S — augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar borsilikāta spuldžu stikla piedevu). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~63 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri 40 × 40 × 160 mm; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 51 diena; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 40 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;
- ECC — cementa inženierkompozīts (*Engineered Cementitious Composites*) — parastas stiprības cementa kompozīts, kas pieder pie šķiedrbetonu tipa cementa kompozītiem, bet, kam raksturīga augstāka stiepes izturība un daudz plaisu veidošanās (*multiple cracking*), palielinoties stiepes spriegumam. Cementa kompozīta sastāvs mikromehāniski veidots no smalkiem pelniem (*fly ash*), smiltīm (maksimālais izmērs 0,18 mm), kvarca pulvera, cementa un ūdens. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ir ~40 MPa, pārbaudīts tikai plaisu pārbaudēs, paraugu izmēri 150 × 150 × 12 mm;
- ECC PVA — cementa inženierkompozīts ar PVA (2 %) šķiedrām. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā 47 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri Ø 40 × 160 mm; eksperimentālo testu sākumā cementa kompozīta parauga vecums 28 dienas; spriegumu līmenis ilgstošajos slodzes testos 25 % no graužošajiem spriegumiem; ilglaicīgo īpašību testos paraugi turēti zem konstantas, statistiskās slodzes 815 dienas — 2 gadus un 3 mēnešus; gaissauss;
- NS M — augstas stiprības cementa kompozīts, kam kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma, izmantots 1 % montmorilonīta minerālu nanoizmēru daļiņas, kas būtībā ir ļoti smalks, speciāli apstrādātu māla daļiņu pulveris. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~55 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri 40 × 40 × 160 mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;
- Ref MS — augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar montmorilonīta minerālu nanopiedevu). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~78 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri 40 × 40 × 160 mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;
- HSC PVA MS — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA šķiedru „kokteili” (2 %) un mikrosilikas piedevu. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~112 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri Ø 47 × 190 mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;

- HSC PVA NS — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA šķiedru „kokteili” (2 %) un mikrosilikas un nanosilikas piedevu. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~110 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $\varnothing 47 \times 190$  mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 30 dienas; gaissauss;
  - HSC MS REF — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts bez šķiedrām (references sastāvs cementa kompozītam ar PVA šķiedru „kokteili” (2 %) un mikrosilikas piedevu). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~128 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $\varnothing 47 \times 190$  mm; 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, statistiskās slodzes 50 dienas; gaissauss;
  - HSC M — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts, kam kā piedeva, kas aizstāj daļu cementa daudzuma, izmantotas 1 % montmorilonīta minerālu nanoizmēru daļiņas, kas būtībā ir ļoti smalks, speciāli apstrādātu māla daļiņu pulveris. Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~103 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $40 \times 40 \times 160$  mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 40 dienas; gaissauss;
  - HSC R — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar monmorilonīta piedevu). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~100 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $40 \times 40 \times 160$  mm; 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, statistiskās slodzes 90 dienas, bet atslodzē — 40 dienas; gaissauss;
  - HSC PVA 0,6 % — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts ar PVA šķiedrām (0,6 %). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~78 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $40 \times 40 \times 160$  mm, 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, statistiskās slodzes 28 dienas, bet atslodzē — 7 dienas; gaissauss
  - HSC R (PVA) — sevišķi augstas stiprības cementa kompozīts (references sastāvs cementa kompozītam ar PVA šķiedrām). Kubiskā spiedes stiprība 28 dienu vecumā ~78 MPa. Ilglaicīgo pārbaužu parauga izmēri  $40 \times 40 \times 160$  mm, 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, statistiskās slodzes 28 dienas, bet atslodzē — 7 dienas; gaissauss;
- Cementa kompozītu sastāvi izgatavoti atbilstoši recepšu projektēšanas nosacījumiem. Pēc paraugu iebetonēšanas un noteiktā cementa kompozīta vecuma

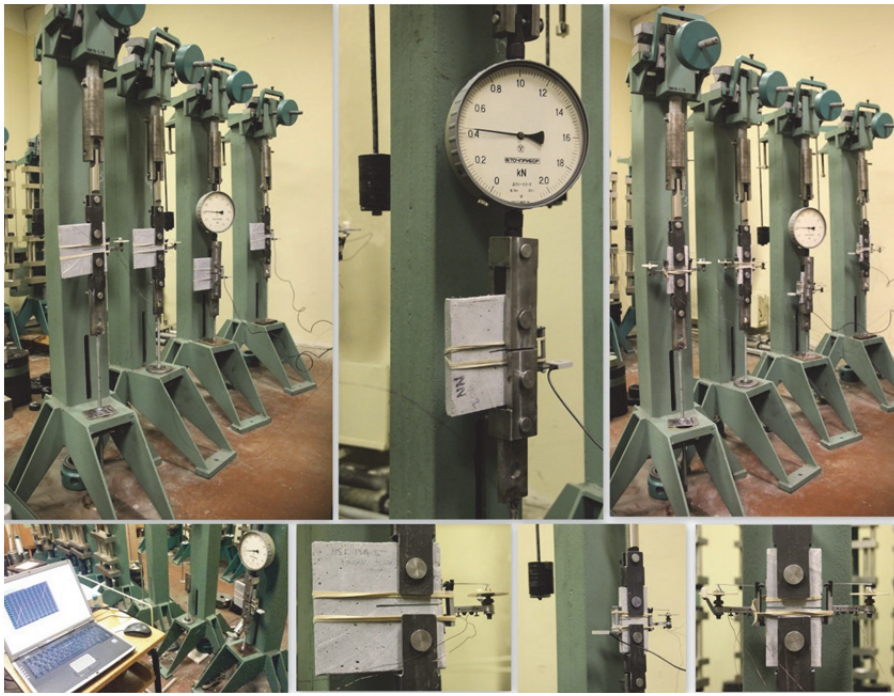
sasniegšanas, paraugi tika sagatavoti eksperimentālajām pārbaudēm, pirms tam nosverot un pārbaudot paraugu dimensionālo atbilstību.

Lai noteiktu cementa kompozītu stiprību, vismaz trīs paraugi no katras sastāva tika pakļauti spiedes vai stiepes pārbaudēm. Vidējā graužošā stiprības vērtība tika izmantota, lai aprēķinātu pieliktās slodzes lielumu vienasīgajiem šļūdes paraugiem.

Ilglaicīgo īpašību pārbaudes veiktas RTU laboratorijā. Vienasīgās šļūdes paraugi ievietoti šļūdes sviru standos (sk. 3.1. un 3.2. att.) un noslogoti ar konstantu sprieguma līmeni, kas bija 20–40 % no graužošās slodzes attiecīgajā cementa kompozīta vecumā. Vienasīgās šļūdes paraugi zem nemainīgas slodzes atstāti līdz 90 dienām, bet atslodzē (bez slodzes) līdz 30 dienām. Paralēli vienasīgās šļūdes pārbaudēm spiedē vienādos temperatūras un mitruma apstākļos tika veiktas arī žūšanas vienasīgās rukuma pārbaudes.



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



3.2. att. Šķīdes vienasīgo deformāciju stiepē noteikšana (RTU laboratorija)

Plaisu attīstības izpēte veikta DTU laboratorijā, izmantojot universālo pārbaudes iekārtu “Instron 8516” vai DTU jaunizveidoto pārbaudes stendu stiepē un paraugus sloģojot ar ātrumu 0,005 mm/s (sk. 3.3. un 3.4. att.). Paralēli plaisu atvēruma mērījumiem ar deformāciju mērītājiem, veikta plaisu sākšanās, attīstības, rakstura un plaisu atvēruma lieluma noteikšana, izmantojot digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodiku.



3.3. att. Plaisu rašanās un tālākas attīstības noteikšana, izmantojot arī bezkontakta digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodiku (DTU laboratorija)



3.4. att. Plaisu attīstības izpēte uz jaunizveidotā pārbaudes stenda stiepē, izmantojot arī bezkontakta digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodiku (DTU laboratorija)

Stiepes stiprība un plaisu atvēruma lielums noteikts arī RTU laboratorijā, sk. att. 3.5., izmantojot paraugus 150 x 70 x 12 mm; 150 x 150 x 12 mm ar iepriekš izveidotiem iezāgējumiem, paraugus ievietojot universālajā testa iekārtā "Instron E3000". Sloģšanas ātrums 0,03 mm/s.



3.5. att. Stiepes stiprības, stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma noteikšana ar kuponveida un koncentrētas stiepes paraugiem, izmantojot bezkontakta digitālo pārvietojumu noteikšanas metodi „Imetrum” (RTU laboratorija)

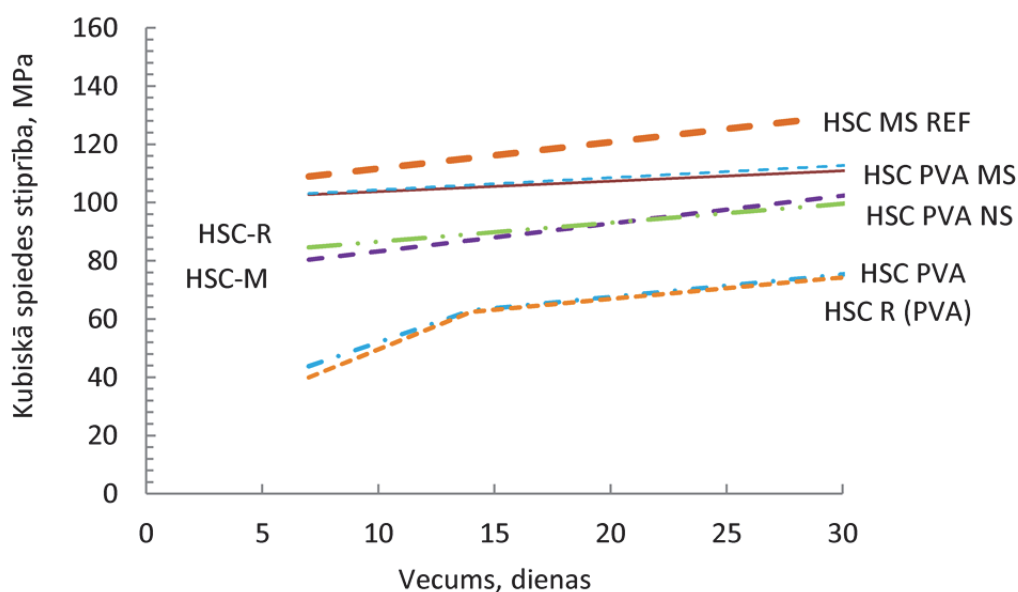
#### 4. Galvenie metodoloģijas eksperimentālās aprobācijas rezultāti un to analīze

Metodoloģijas aprobācijas gaitā eksperimentāli iegūtas dažādu jauno cementa kompozītu stiprības, deformējamības, ilglaicīgo un ilgizturīgo īpašību vērtības un noskaidroti drošu konstrukciju projektēšanas parametri, kādi līdz šim šiem materiāliem nav bijuši noskaidroti. Noskaidrota dažādu faktoru ietekme uz to īslaicīgajām un ilgstošajām īpašībām:

- dažādu cementa kompozītu stiprību (parastas, augstas un sevišķi augstas) ietekme;
- divu, dažādu mitruma koncentrāciju (gaissauss un mitrs) ietekme;
- dažādu cementa kompozīta piedevu (borsilikāta spuldžu stikla, montmorilonīta, nano- un mikrosilikas, PVA šķiedru) ietekme;
- dažāda cementa kompozītu aprūpes laika ietekme jeb eksperimentu veikšana dažādos cementa kompozīta vecumos;
- dažādas paraugu formas un izmēru ietekme jeb mēroga faktors.

Dažādu cementa kompozītu pārbaūžu eksperimentāli iegūtie rezultāti apstiprina daudzu vadošo pētnieku (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch u. c.) izteiktās hipotēzes. Iegūtie rezultāti liecina: jo cementa kompozīts ir blīvāks, jo tas ir stiprāks, jo ilgā laika periodā mazāk deformējas (tas izskaidrojams ar neaizpildīto gela telpas relatīvo lielumu cementa akmeņi: par cik lielāka ir šī telpa, par tik mazāka ir stiprība un lielāka šūde. Gela telpas lielums savukārt ir cieši saistīts ar cementa daudzumu un ū/c attiecību, kas, kā zināms, ir samazināts, lai sasniegtu cementa kompozīta stiprības pieaugumu). Tāpat apstiprinājās hipotēze, ka, jo cementa kompozīts ir sausāks un vecāks, jo tas deformējas mazāk, kas izskaidrojams ar cementa kompozīta ķīmiskajiem procesiem tā žūšanas laikā. Tāpat eksperimentāli pierādīts, ka cementa kompozīta gala stiprība pieaug līdz ar cementa kompozīta vecumu un to būtiski neietekmē tā pakļaušana slogojumam.

Attēlā 4.1. parādīta dažādu cementa kompozītu spiedes stiprība.



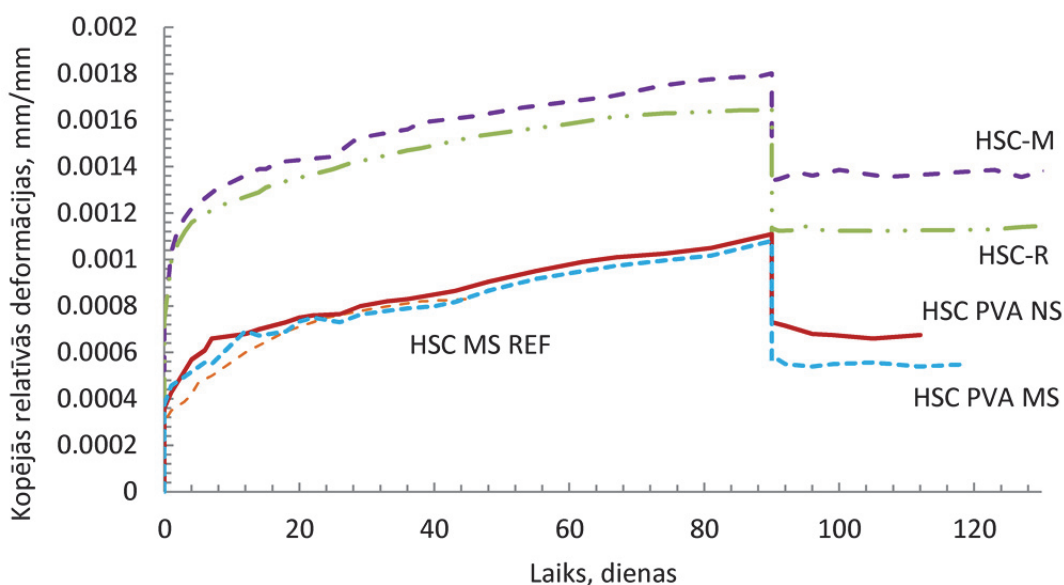
4.1. att. Dažādu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu kubiskā spiedes stiprība

Pārbaudot dažādu elastības moduļa vērtības dažādās mitruma koncentrācijās, konstatēts, ka mitriem paraugiem elastības modulis ir lielāks nekā gaissausiem, kas varētu būt izskaidrojams ar to, ka mitram paraugam nav nostiprinājušās saites starp cementa kompozīta matricas daļiņām. To pašu apstiprina arī eksperimentālie testi, kuros salīdzināts vienasīgās šļūdes deformāciju lielums dažādās mitruma koncentrācijās. Noskaidrots, ka mitrie paraugi šļūdē mazāk nekā žūšanai pakļautie paraugi.

Agrā cementa kompozīta vecumā vienasīgo šļūdes deformāciju spiedē pārbaudes apstiprina hipotēzi, ka, pieaugot cementa kompozīta vecumam, samazinās tā elastīgo deformāciju lielums un pieaug elastības moduļa vērtība, tāpat laika gaitā samazinās arī šļūdes deformāciju lielums un samazinās šļūdes moduļa vērtība, kas izskaidrojams ar gela daudzuma samazināšanos cementa akmenī.

Eksperimentālie dati tāpat apstiprina arī to, ka vispār augstas stiprības cementa kompozīti šļūdē mazāk nekā parastas stiprības cementa kompozīti un šī atšķirība ir ~50%. Tas izskaidrojams ar to, ka augstas stiprības cementa kompozīti ir smalkgraudaināki un to matricu pakojums ir blīvāks. Šādiem cementa kompozītiem ir mazāka ū/c attiecība, kas arī ietekmē ilglaicīgo īpašību deformāciju lielumu.

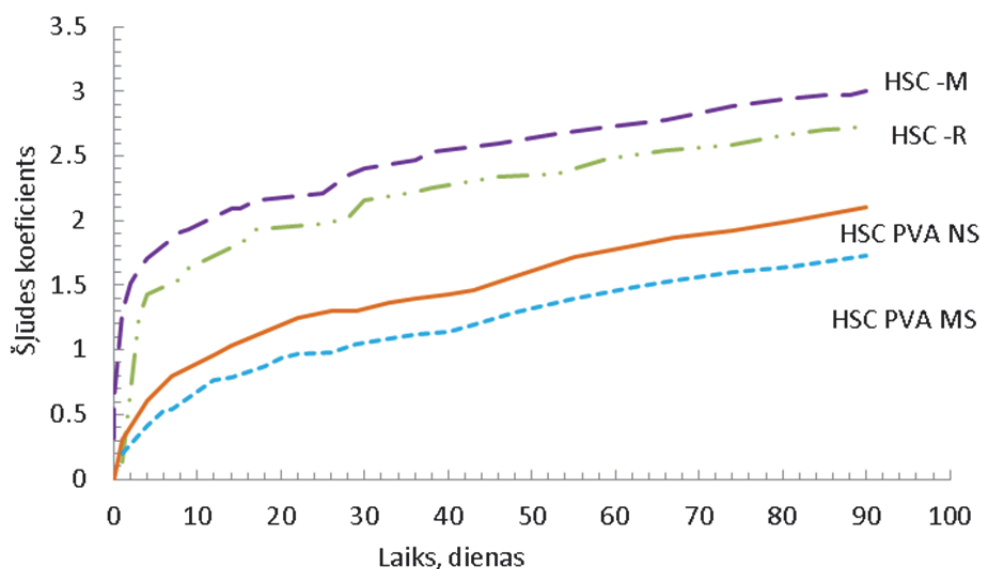
Attēlā 4.2. parādītas dažādu cementa kompozītu vienasīgās, kopējās, relatīvās deformācijas.



4.2. att. Dažādu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu vienasīgās, kopējās, relatīvās deformācijas spiedē

Šļūdes koeficients parāda šļūdes deformācijas un elastīgo deformāciju attiecību laikā. Dažāda sastāva un stiprības cementa kompozītu eksperimentāli iegūtie dati liecina, ka augstas stiprības cementa kompozīta šļūdes koeficients, tāpat kā parastas stiprības cementa kompozītiem tas ir robežās no ~0,5 līdz 3, kas nesaskan ar literatūras avotu datiem, kas līdz ar stiprības pieaugumu prognozē koeficienta būtisku samazināšanos. Iegūtie rezultāti parāda, ka parastas un augstas stiprības cementa kompozītu elastīgo un šļūdes deformāciju attiecība laikā saglabājas līdzīga.

Attēlā 4.3. parādīti dažādu cementa kompozītu šļūdes koeficienti spiedē.

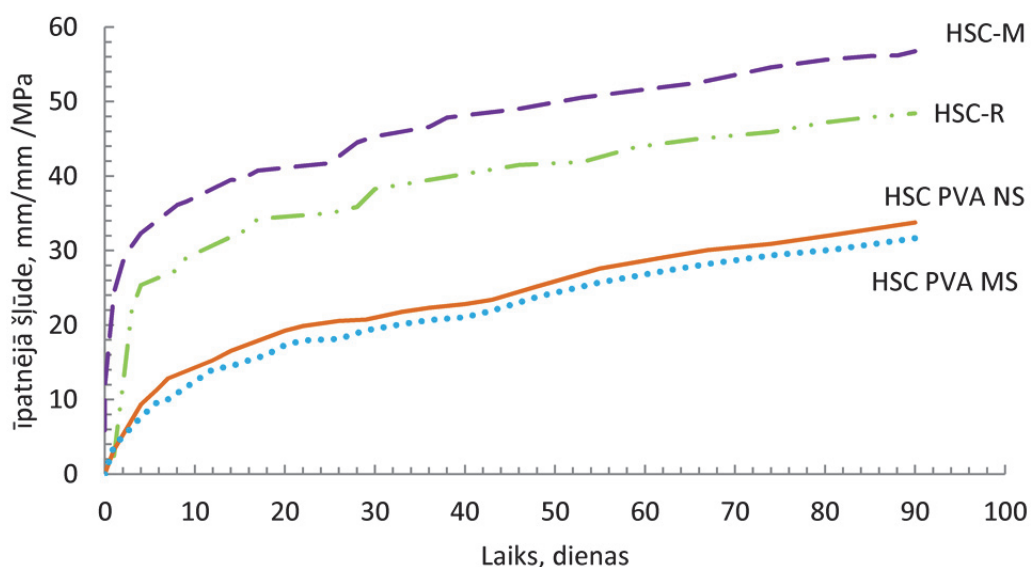


4.3. att. Dažādu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu šļūdes koeficients spiedē

Jaunizveidoto cementa kompozītu teorētisko un eksperimentālo, ilglaicīgo īpašību vērtību atšķirības pārsniedz 20 %, kas apstiprina iepriekš minēto, ka atšķirīgie ārējie un iekšējie faktori būtiski ietekmē cementa kompozītu īpašības. Esošie empīriskie modeļi ir lietojami tikai lielas faktoru sakritības gadījumā un droši izmantojami parastas stiprības betoniem, bet nav piemērojami atšķirīgu cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību prognozēšanai. Iegūtā, lielā rezultātu atšķirība apliecina, ka visprecīzākais veids jaunizveidoto cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību noteikšanai ir laboratoriskās pārbaudes.

Īpatnējā šļūde ir visobjektīvākais ilglaicīgais parametrs, jo tas izslēdz atšķirīgo, pārbaudēs izmantoto spriegumu ietekmi uz ilglaicīgo deformāciju vērtību lielumiem.

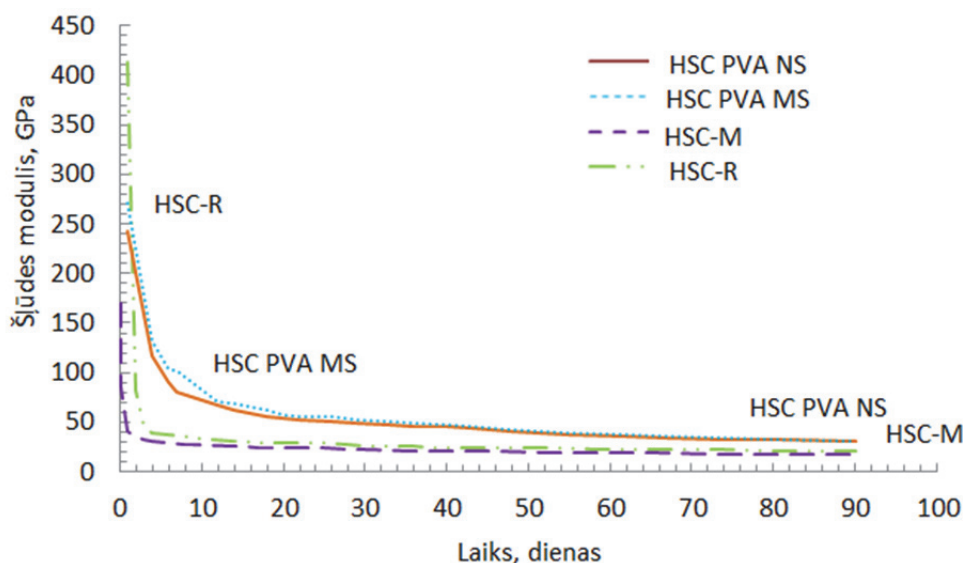
Attēlā 4.4. parādīta dažādu cementa kompozītu īpatnējā šļūde spiedē.



4.4. att. Dažādu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu īpatnējā šļūde spiedē

Šļūdes modulis ir pieliktā sprieguma un šļūdes deformāciju attiecība. Šis ilglaicīgais parametrs izmantojams ilglaicīgi slogotu konstrukciju deformāciju noteikšanai. Šļūdes modulis laikā samazinās, kas izskaidrojams ar šļūdes deformāciju pieaugumu. Jo šļūdes modulis ir mazāks, jo materiāls vairāk šļūdē.

Attēlā 4.5. parādīti dažādu cementa kompozītu šļūdes moduļi spiedē.



4.5. att. Dažādu augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītu šļūdes modulis spiedē

Tāpat eksperimentāli noskaidrots, ka cementa kompozītiem pievienotais montmorilonīts būtiski neietekmē cementa kompozīta mehāniskās un deformējamības īpašības.

Arī nanosilikas minerālai piedevai nav būtiskas ietekmes uz cementa kompozītu stiprības, deformatīvajiem, ilglaicības un ilgizturības rādītājiem. Rezultātu atšķirības starp cementa kompozītiem ar un bez nanosilikas ir 2–7 % robežās.

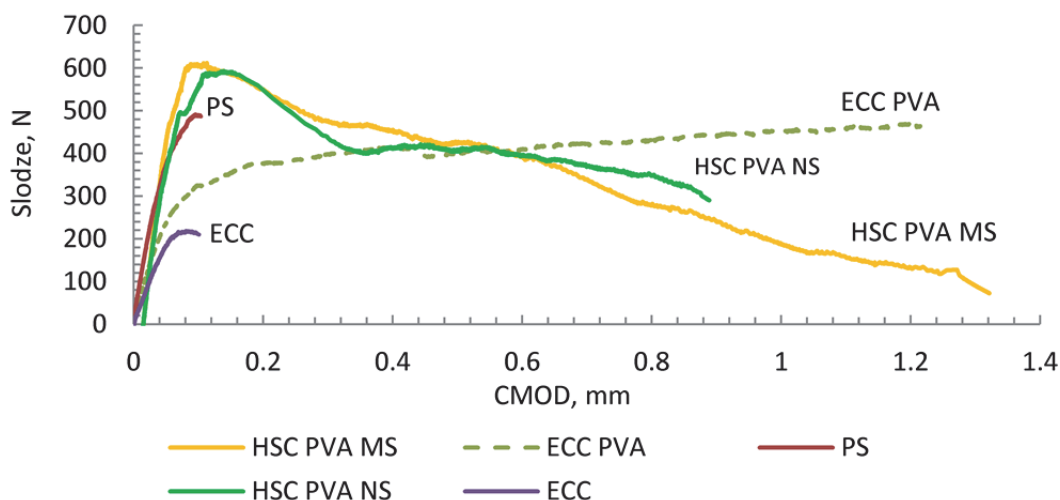
Bet borsilikāta spuldžu stikla mikropiedeņa, kas daļēji (20 %) aizvieto cementu, dod līdzvērtīgus rezultātus (atšķirība ir līdz 20 %) references cementa kompozīta rezultātiem. Tas liek secināt, ka šāda jaunizveidota cementa kompozīta, kas pagatavots izmantojot otrreiz pārstrādātus materiālus, izmantošana praktiskajā būvniecībā būtu ekoloģiskāka un dabai draudzīgāka.

Tāpat no eksperimentālajiem rezultātiem iegūts, ka PVA šķiedras uzlabo parastas stiprības cementa kompozītu ilglaicīgās un ilgizturīgās īpašības. Vienasīgās šļūdes deformāciju lielums spiedē samazinās par ~50–80 %, savukārt PVA šķiedru izmantošana augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem nesniedz, kas varētu būt izskaidrojams ar to, ka šķiedru izvietojums ir nevienmērīgs, ar gadījuma raksturu, kā arī ar to, ka iejaukšanas procesā tiek piesaistīts vairāk gaisa un veidojas tukšumi, un šādu šķiedrainu cementa kompozītu ir tehnoloģiski grūtāk viendabīgi iestrādāt cementa kompozīta veidņos, līdz ar to cementa kompozīta sastāvs ir poraināks.

Eksperimentālās plaisu pārbaudes skaidri parāda un apstiprina hipotēzi, ka, pielietojot šķiedru „kokteili”, tiek panākta lielāka materiāla darbības un sabrukuma efektivitāte nekā tad, ja izmanto tikai viena veida šķiedras, jo katram šķiedru garumam (tipam) ir sava funkcija: īsās šķiedras nostiprina cementa matricu un veic garo šķiedru iespīlēšanu, bet garās šķiedras savieno lielas plaisas, veidojot šķiedru tiltus starp plaisu

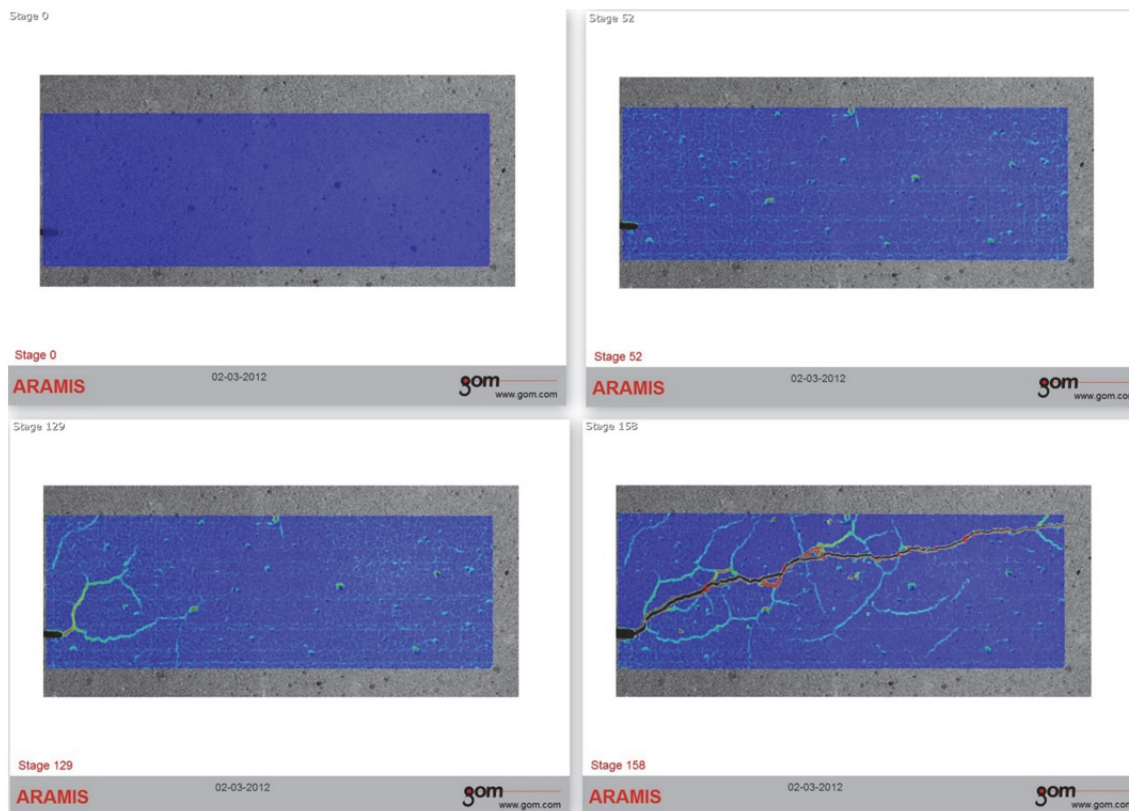
malām un nepieļauj cementa kompozīta trauslu, pēkšņu sabrukumu, kas īpaši svarīgi nesošo konstrukciju ekspluatācijā.

Attēlā 4.6. parādīta dažādu cementa kompozītu stiepes slodzes un plaisu atvēruma lieluma sakarība.

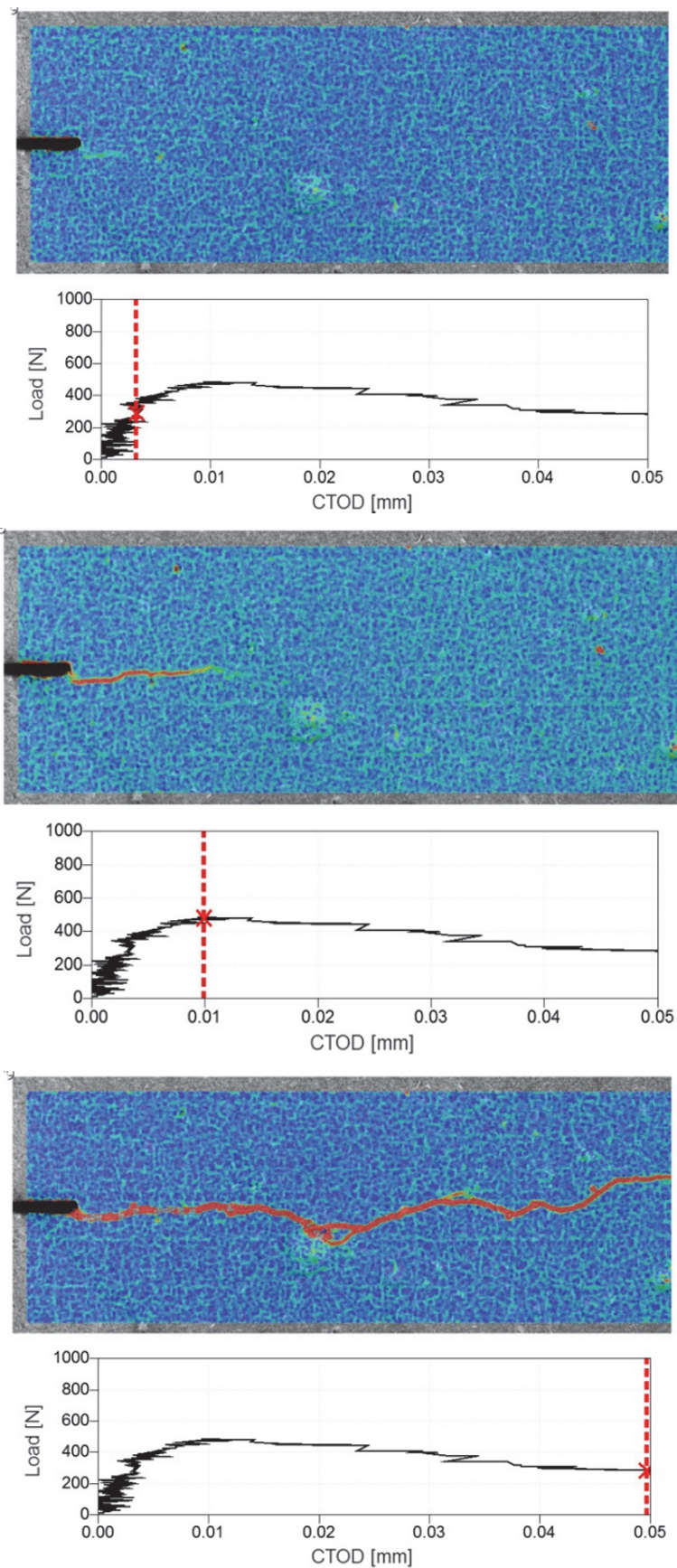


4.6. att. Dažādu cementa kompozītu stiepes slodze un plaisu atvēruma lielums (CMOD)

4.7. attēlā redzama ECC matricas daudzu plaisu veidošanās (*multiple cracking*), kas novērojama, izmantojot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodi — GOM „Aramis” datorprogrammu.



4.7. att. ECC matricas stiepes parauga skaidri redzamā daudzplaisainība (*multiple cracking*), kas novērota, izmantojot digitālo attēlu pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodi — „GOM Aramis” datorprogrammu

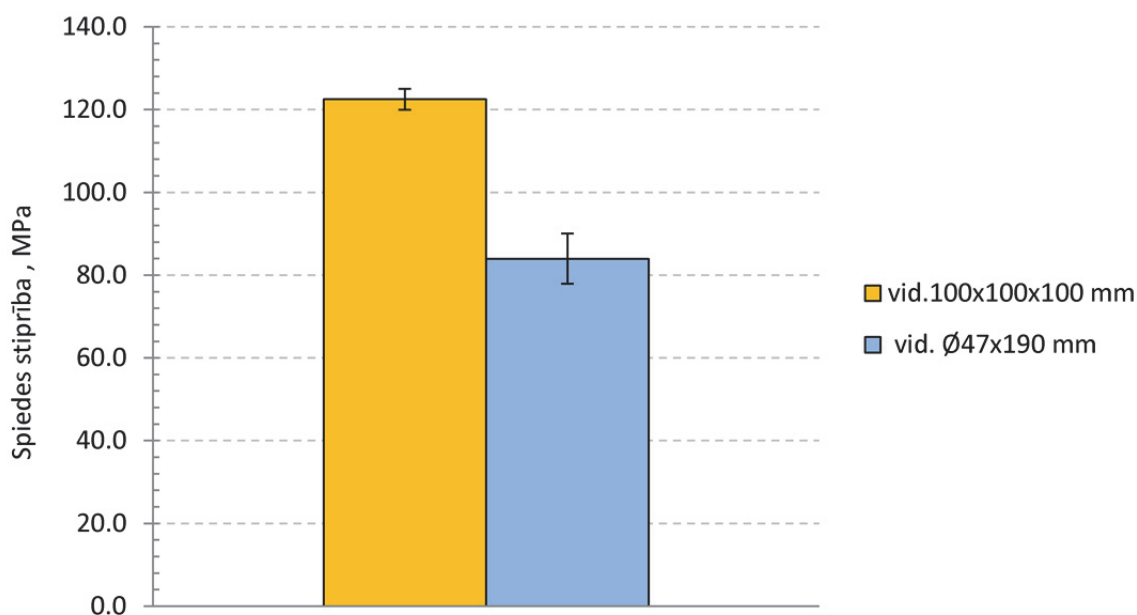


4.8. att. Plaisu attīstība paraugiem ar nonosiliku un PVA šķiedru kokteili noteikta, izmantojot digitālo pārvietojumu noteikšanas un analīzes metodi – GOM „Aramis” datorprogrammu

Cementa kompozītos mikroplaisas parādās, kad tas ir sasniedzis ~10–20 % no graužošās stiprības. Pieaugot spriegumiem, mikroplaisas palielinās, apvienojas un, sasniedzot materiāla specifisko kritisko vērtību  $K_{IC}$ , t. i., pie ~60–80 % no graužošās stiprības, sākas galvenās plaisas veidošanās (sk. 4.8. att.), kam seko plaisas stabilizēšanās. Kad spriegumi plaisas galā ir sasnieguši savu kritisko vērtību (materiāls ir sasniedzis graužošo stiprību stiepē), plaisa sāk atvērties un strauji aug līdz materiāla sabrukumam.

Lai novērtētu laboratorijā iegūto datu atbilstību, precizitāti un stabilitāti, tika veikta rezultātu statistiskā analīze. Eksperimentos iegūtās rupjās kļūdas tika izslēgtas ar  $3\sigma$  metodi. Rezultātu atbilstība un precizitāte noteikta ticamības intervālā 95 % ar standartnovirzes vērtību (vidējo, kvadrātisko novirzi)  $S_d$  un 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. Vispārīgā gadījumā materiāla īpašību izkliede ir saistīta ar materiāla neviendabību, izgatavošanas tehnoloģiju, parauga ģeometrisko nestabilitāti, pārbaudes metodes, iekārtas un mērierīces precizitāti un darbības korektumu.

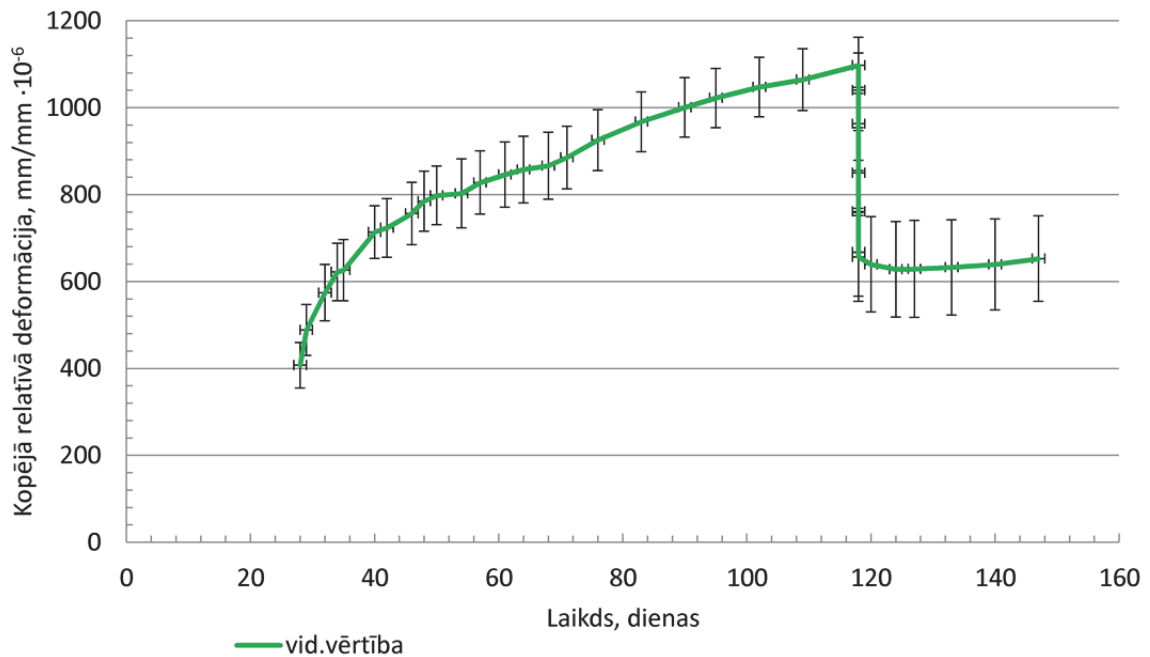
Uzskatāma statistisko datu apstrāde parādīta vienam cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili. Spiedes slogojumā kubiskajiem paraugiem  $S_d$  ir 2,5 MPa un  $V$  ir 2,1 %, bet cilindriskajiem paraugiem  $S_d$  ir 6 MPa un  $V$  ir 7,2 %, sk. 4.9. att.



4.9. att. Spiedes stiprības standartnovirze kubiskajiem (100 × 100 × 100 mm) un cilindriskajiem (Ø47 × 190 mm) paraugiem

Savukārt stiepes slogojumā plātņveida paraugu  $S_d$  ir 0,2 MPa un  $V$  ir 5,6 %. Elastības moduļa standartnovirze, kas noteikta cilindriskajiem paraugiem, ir 5,2 GPa un variāciju koeficients ir 10,7 %. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē 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 %, vidējais  $V$  — 10,7 % (sk. 4.10. att.). Žūšanas rukuma vienasīgo

deformāciju 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  $22,3 \%$ , vidējais  $V$  —  $8,5 \%$ . Literatūras avotos norādītais, pieļaujамais  $V$  kā stiprības, tā ilglaicīgajās pārbaudēs, ir  $15\text{--}20 \%$  (Omar *et al.*, 2008; Tarnopolskii, Kincis, 1985; Скудра *et al.*, 1971; Neville *et al.*, 1983).



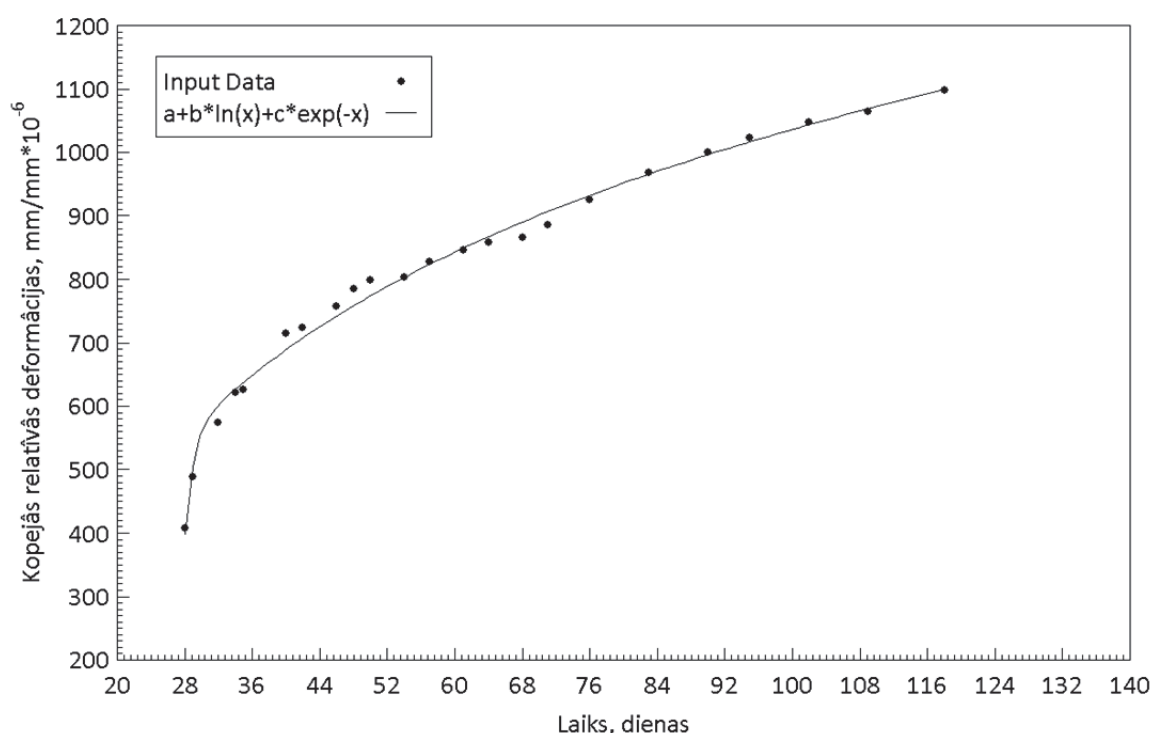
4.10. att. Kopējās, relatīvās, vienasīgās deformācijas spiedē standartnovirze, noteikta cilindriskajiem ( $\varnothing 47 \times 190 \text{ mm}$ ) paraugiem

## 5. Rekomendācijas

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

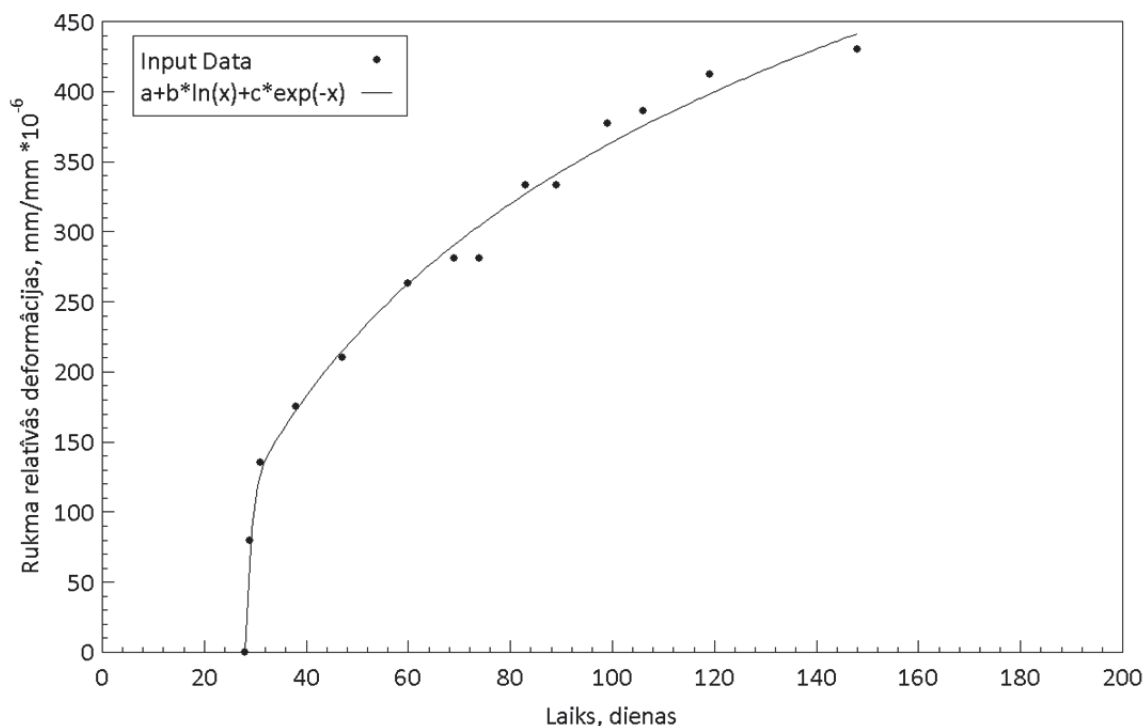
Autores sniegtie, aprakstošie vienādojumi uzskatāmi parādīti vienam cementa kompozītam — augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili.

Kopējo, relatīvo, vienasīgo deformāciju un žūšanas vienasīgo rukuma deformāciju rezultātu aprakstošās līknes (sk. 5.1., 5.2.) un tās eksponentvienādojums ir  $Y = a + b \cdot \ln(x) + c \cdot \exp(-x)$ , kur  $a$ ,  $b$  un  $c$  ir eksperimentālās konstantes,  $x$  — laiks (dienas), 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

Standartos un normās šļūdes un rukuma parādības ir nepietiekami izvērstas un tajos sniegtās vērtības ir izmantojamas tikai ierobežotas stiprības diapazona cementa kompozītiem. Lai būtu iespējams projektēt un būvēt konstrukcijas no augstas stiprības cementa kompozītiem, būtu jāveic izmaiņas esošajā, Eiropas reģionā reglamentētajā standartā EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām””. Izmaiņas būtu saistītas ar stiprības klase palielināšanu, lai tā kubiskā stiprība būtu lielāka par šobrīd norādīto 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 vienasīgo, reālīvo rukuma deformāciju aprakstošā līkne un tās vienādojums augstas stiprības cementa kompozītam ar mikrosilikas minerālo piedevu un PVA šķiedru kokteili

Svarīgi būtu pievienot norādi, ka sarežģītu un nozīmīgu, kā arī deformāciju jutīgu konstrukciju ilglaicīgo un ilgzturīgo īpašību prognozēšanai papildus jāveic laboratoriskās īpašību noteikšanas pārbaudes, ieteicams tādos apkārtējās vides apstākļos, kādos konstrukcijām prognozēts atrasties to ekspluatācijas laikā, lai pārliecinātos par aprēķināto vai shematiski noteikto vērtību pareizību. Tāpat arī nepieciešama papildus norāde, ka standartos norādītie šļūdes koeficienti, kā arī esošās standartizētās empīriskās līknes nav izmantojamas gadījumos pie lielas iekšējo un ārējo ietekmes faktoru nesakritības, kā arī ilglaicīgo deformāciju prognozēšanai deformāciju jutīgām un nestandarta konstrukcijām.

Lai varētu veikt korektus inženieraprēķinus, paredzot jaunos, uzlaboto sastāvu un īpašību cementa kompozītus, būtu nepieciešams izveidot eksperimentālo datu bibliotēku, apkopjot un izanalizējot dažādu autoru eksperimentālos rezultātus un atrodot ģeometrisku formu, cementa kompozīta vecuma, slogojuma ilguma, apkārtējo vides apstākļu un citu ietekmējošo faktoru pārejas koeficientus, kas būtu izmantojami ilglaicīgo parametru precīzāku vērtību noteikšanai.

Eiropas standartā EN 1992-1-1:2005 „Betona konstrukciju projektēšana. 1-1. daļa: „Vispārīgie noteikumi un noteikumi ēkām”” konstrukciju darbības prognozēšanai rekomendējams papildus ieviest ilglaicīgo parametru — šļūdes moduli, kas izmantojams, veicot ilgstoši slogotu konstrukciju deformāciju noteikšanu. Tāpat ieteicams sniegt norādi, kā šāds parametrs aprēķināms.

Ar mērķi veikt laboratoriskās pārbaudes, Eiropā reglamentētais standarts EN 12390 „Societējuša betona testēšana” būtu jāpapildina ar societējuša betona šļūdes deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām, kurās būtu aprakstītas testa procedūras un datu ieguve, kā arī tālākā datu izmantošana šļūdes koeficienta, īpatnējās

šļūdes un šļūdes moduļa aprēķināšanā. Standarts jāpapildina arī ar plaisu attīstības izpētes veikšanas metodiku — digitālo attēlu pārvietošanu noteikšanas un analīzes metodiku.

Konstrukciju darbības prognozēšanai ilglaicīgas slodzes ietekmē, rekomendējams lietot kopējo, relatīvo, vienasīgo šļūdes (spiedes gadījumā) un žūšanas vienasīgo rukuma deformāciju vērtību, jo abas parādības summējas, tādējādi sniedzot nelabvēlīgāko gadījumu, kas būtu vērsti uz konstrukciju projektēšanas drošības pusi.

Lai noteiktu korektas vienasīgās šļūdes deformācijas stiepē un spiedē, īpaši attiecināms uz cementa kompozītiem agrā vecumā, kad tie vēl nav sasnieguši savu nosacīto gala stiprību, no kopējām, relatīvajām, vienasīgajām deformācijām jāatņem žūšanas vienasīgās rukuma deformācijas, kas noteiktas identiska sastāva, identisku paraugu cementa kompozītiem vienādos apkārtējās vides apstākļos, deformācijas mērot tāpat kā šļūdes paraugiem — parauga vidusdaļā.

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

Promocijas darba gaitā eksperimentāli noskaidrotas dažādu jauno cementa kompozītu īslaicīgās, ilglaicīgās un ilgizturības īpašības, kādas līdz šim nav bijušas noskaidrotas. Lai veiktu jauno cementa kompozītu sastāvu uzlabošanu un to izmantošanu praktiskajā būvniecībā, palielinot paraugu statistisko daudzumu jāveic atkārtotas eksperimentālās pārbaudes.

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 nolūkā atrast racionālākus, optimāli labākus 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. Tāpat būtu jāturpina veidot eksperimentālo datu, statistisko bibliotēku, kas nepieciešama pārejas koeficientu noteikšanai un augstākas stiprības cementa kompozītu ilglaicīgo īpašību prognozēšanai, un precīzāku aprakstošo vienādojumu noteikšanai.

## Secinājumi

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

Promocijas darba rezultātā ir iegūti šādi galvenie secinājumi.

1. Izstrādātā īpaši smalkgraudainu ( $\leq 5$  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 ilglaiņīgi 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 stends stiepē un adaptētais šļūdes vienasīgo deformāciju noteikšanas stends spiedē dod iespēju pārbaudīt cementa kompozītus ar pildvielu maksimālo izmēru līdz 5 mm, izmantot paraugus ( $\leq 70$  mm), kas vairāk raksturīgi augstas un sevišķi augstas stiprības cementa kompozītiem un to konstrukciju izmēriem. Izmantojot šos stendus, 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. Izveidotais, 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 pārvietojumu 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 slogošanas 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 nolaišanai 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 pārvietojumu noteikšanas 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 — ekspoentvienādojumi, 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 „Societējaša betona testēšana” ar šļūdes deformāciju spiedē un stiepē noteikšanas metodikām.

## GENERAL REVIEW OF THE DOCTORAL THESIS

### Subject Actuality and Formulation of the Problem

Nowadays the construction material industry is developing rapidly, with an ever increasing tendency towards the use of high-strength materials. Since the beginning of the 20<sup>th</sup> century, scientists and cement composite technologists are working on developing new, various types of structural multi-component cement composites, the solutions ranging from mixtures with a reduced quantity of cement and smaller aggregate dimensions, to fibers being used as disperse reinforcement, introduction of various chemical additives and a lowered cement-water ratio, as well as substituting some of the cement with recycled materials, etc. The new cement composite matrixes are much stronger, more durable and more environmentally friendly, as the production of high-strength cement composites requires less cement due to smaller dimensions of the structural elements, as well as due to partial substitution of the cement with recycled materials, thus reducing the amount of non-renewable resources used in production and providing recycling opportunities for non-biodegradable waste. The use of the new composite materials would promote sustainable and ecological construction, contributing to a reduction of the global greenhouse effect (Prisco *et al.*, 2009; Bajare *et al.*, 2012; Korjakins *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2010; Batayneh *et al.*, 2007; Mageswari, Vidivelli, 2010, etc.). The use of these new high-strength structural cement composites in construction would allow to also reduce the overall consumption of the material, and to substantially decrease the total weight of the structures, to build higher structures and to use structural elements with a more effective cross-section. It would allow the designers to produce more elegant thin-walled structures, implementing new, more complex forms. The improved properties of the cement composite materials would make them more convenient from the economical point of view, and could even make them the only material used in specialized construction.

The newly developed cement composite matrixes, in general, have improved physical properties, e.g., their microstructure — cement paste accounts for a larger part of the volume, and the porosity is reduced, leading to cement composites with smaller water absorption and better frost resistance properties (Graybeal, 2006; Neville, Brooks, 2010; Gilbert, Ranzi, 2011; Justs, Shakhmenko, 2010, etc.), as well as improved behavior of the material under compression loading. Although the effect on these properties has been conscious, there are still several obstacles that prevent a more widespread use of these newly developed, modern high and ultra-high strength cement composites in construction. One of the main problems is insufficient information about the long-term properties and durability parameters of these cement composites, which are essential in ensuring safe and prolonged exploitation of structures.

Across the world, there have been various standards for experimental determination of concrete creep and shrinkage developed properties, but, upon reviewing the available standards and models, it becomes evident that the provided information is ambiguous and incomplete, and that the developed methodologies are suitable for normal strength concrete and not suitable for specimens with reduced cross-sections, which are characteristic to structures made of high and ultra-high

strength cement composites. In addition, it must be noted that nowhere in the world there have been any standardized methods developed for determining tensile creep strains in cement composites. In regards to cement composite cracks, there are only standards for determining the size of the crack mouth opening displacement; however, there is no standardized methodology available for researching cracks and providing information about the initiation, propagation, development, and characteristics of cracks and micro-cracks. Unfortunately, the standard applicable to the European region — EN 12390 “Testing hardened concrete” — does not provide any information about how to determine the long-term properties and durability-related parameters of cement composites, i.e. creep and shrinkage strains, research of crack development.

Another major obstacle is the delayed introduction of design standards. The approved calculation procedures that are used for the traditional concretes cannot be applied to the new cement composites. The existing standards and calculation models allow evaluating the creep and shrinkage strains only in the traditional, normal strength concretes used for conventional structures. However, the actual composition of the cement composites, the raw materials used, the environmental conditions, the geometry and age of the specimens can be substantially different from the factors taken into consideration in these models. Due to the discrepancies of the input data, it is not permissible to use these previously developed models.

For the new cement composites to be used in the design of safe structures with a more efficient cross-section, it is necessary to develop a new methodology that would provide information on how to determine the characteristics of various extra fine aggregate cement composites (with the largest aggregate dimension  $\leq 5$  mm). The obtained data on long-term properties and crack development research would advance the progression of increasingly rational new cement composites that would be better suited to the stress fields in each particular application.

### **Objective of the Study**

The objective of the doctoral thesis is to develop and experimentally verify a methodology for determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as to research and analyze tensile crack development in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites (EFACC).

### **The Tasks of the Doctoral Thesis**

In order to achieve the objective of the research, the following tasks were defined:

1. To prepare the theoretical and experimental basis of the methodology. To summarize, research and analyze the methodologies and models used for the determination of creep, shrinkage strains, and crack development.
2. To develop a new methodology that is specifically suited for EFACC and that allows to determine uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as to research the development of tensile cracks and to determine the size of their mouth opening displacement.
3. To modified a cement composite testing stand for the determination of uniaxial tensile creep strains, and to adopt an existing timber and polymer material testing

stand for the determination of uniaxial compressive cement composite creep strains.

4. To develop a new uniaxial tensile testing stand that would be more suitable for the determination of the initiation, propagation, characteristics and crack mouth opening displacement size in EFACC using a digital image-based monitoring system.
5. To experimentally approbate the methodology for determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as tensile crack development research and analysis in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites.
6. To analyze the main approbation results obtained from the experimental tests on various — normal, high and ultra-high strength cement composites with borosilicate lamp glass, montmorillonite, micro- and nano silica mineral additives and polyvinyl alcohol (PVA) fibres — and to define the equations describing the long-term behavior of EFACC materials.
7. To develop recommendations for improving the standards EN 1992-1-1:2005 “Design of concrete structures” and EN 12390 “Testing hardened concrete”.

### **The Scientific Novelty of the Work**

- A methodology has been developed for the determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as for research of tensile crack development in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites (EFACC), which allows to determine, in laboratory conditions, the actual values of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as the tensile crack mouth opening displacement in normal, high and ultra-high strength EFACC, which cannot be determined with the existing standardized methodologies and models.
- During the process of methodology approbation, the compressive and tensile strength values, the moduli of elasticity, the values of uniaxial tensile and compressive creep strains, the values of uniaxial drying shrinkage strains, and the displacements of tensile crack mouth openings of the new, innovative structural cement composites were obtained from experiments, and research on the initiation, development, propagation and characteristics of the cracks was performed, which has not been done for these materials before. The methodology has been approbated with 15 various extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) normal, high and ultra-high strength cement composites, using specimens of different age and different geometric shape, under two different humidity conditions and by applying constant loading.
- A testing stand has been modified for the determination of uniaxial tensile creep strains (at the moment, no standardized methods exist in the world for the determination of tensile creep strains), and another testing stand was adopted for the determination of uniaxial compressive creep strains, which allows to use specimens ( $\leq 70$  mm) more characteristic to the dimensions of high and ultra-high strength cement composite structures. With these stands, it is possible to apply

constant loading on the specimens and to keep it uniform over a long period of time. In addition, it is not necessary to adjust the stress level during the experiments, the calibration curves are linear, no energy resources are consumed, and it is possible to test cement composites with the maximum aggregate dimension  $\leq 5$  mm, simultaneously ensuring economic use of materials.

- It has been proposed to determine the uniaxial tensile creep strains, using a Compact Tension (CT) specimen, which allows to reduce the scattering of the experiment data and to determine the deformation data by using only one digital strain gauge, unlike in the methods suggested by other authors that use two or more strain gauges.
- The problem of determining tensile strains has been solved to a precision of  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ , by using a digital image-based monitoring system, as the tension-induced absolute strains in cement composites are 10–20 times smaller than the strains caused by compression, and the registration of such small strains is problematic.
- A new uniaxial tensile testing stand has been developed, ensuring the research of the development of cracks and micro-cracks. The characteristics of the stress-strain curves obtained from experiments performed on the new stand are more compatible with the theoretical assumptions and the results obtained by other authors, and they show good correlation with the results obtained using the digital image-based monitoring system. The experimental approbation proves that the new testing stand is better suited for small specimens ( $150 \times 150 \times 12$  and  $100 \times 50 \times 12$  mm) of high and ultra-high strength EFACC in comparison with the universal testing equipment, which is not suitable for small specimens and the low speed of loading, resulting in initial idle running of the equipment. The universal equipment is also not suited for research of micro-cracks, as it creates too much movement, which prohibits taking sharp, high resolution photos.
- Models — exponential equations describing the uniaxial strain processes of the total long-term strain and drying shrinkage of EFACC materials and providing the best correlation with the experiment data — have been proposed, allowing the prediction of long-term strain values in structural elements made of a similar material. The coefficient of determination is  $R^2 = 0.993$ , which indicates a very high level of correlation between the experiment data and the describing curve. The currently used creep and shrinkage strain approximation models cannot be applied, and they describe the uniaxial creep and uniaxial drying shrinkage strain processes of the new, different EFACC materials incorrectly, because there is a large discrepancy between the actual internal and external factors of influence.
- It has been recommended to supplement the European standard EN 12390 „Testing hardened concrete” with methodologies for determining compressive and tensile creep strains. It has been proven that the methods for determining uniaxial compressive and tensile creep strains yield reliable results ( $V \leq 22 \%$ ), and are suitable for cement composites of various strength.

## Practical Application of the Doctoral Thesis

In assessing the importance of the doctoral thesis, three main directions for successful application of the obtained results can be noted.

The doctoral thesis presents and appropates a methodology for the determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as for research of tensile crack development in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites (EFACC), which allows to determine, in laboratory conditions, the actual values of uniaxial compressive and tensile creep strains, uniaxial drying shrinkage strains, and the tensile crack mouth opening displacements in normal, high and ultra-high strength EFACC, as well as to research the initiation, development, propagation and characteristics of tensile cracks.

The equipment of the developed methodology includes a modified testing stand for determination of uniaxial tensile creep strains and an adopted testing stand for determination of uniaxial compressive creep strains. It also includes a new tensile test stand for crack development research. The methodology proposes to determine tensile creep strains using Compact Tension (CT) specimens.

The newly developed methodology for 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.

The proposed methodology can be used in laboratories testing the mechanical properties of materials, in order to determine the uniaxial compressive and tensile creep strain values, the uniaxial drying shrinkage strain values, the tensile crack mouth opening displacements, and the data related to crack initiation, propagation and characteristics that is required for the development of new, more rational and environmentally friendly structural cement composites and for the engineers, to enable them to design safe structures using these materials. The doctoral thesis also provides technical recommendations for the determination of cement composite properties.

The digital image-based monitoring system is the most suitable solution for registering the small strains, micro-cracks and cracks caused by tension. These processes are essential for structures with specific use conditions.

The new methodology will also have an indirect positive effect on the global environment, as, by increasing the use of EFACC and by reducing the dimensions of the cross-sections of structures, the total amount of cement consumption will decrease and, by substituting part of the cement with recycled mineral fillers, the use of non-renewable resources and non-biodegradable waste will also be reduced. It will promote sustainable and more environmentally friendly construction in general, contributing to reducing the global greenhouse effect.

The doctoral thesis also provides recommendations for changes to standards EN 1992-1-1:2005 "Design of concrete structures" and EN 12390 "Testing hardened concrete".

The summary of literature presented in the doctoral thesis can be used in a specialized course on reinforced concrete when preparing lecture materials on the

determination of creep and shrinkage properties, as well as on crack development research in various cement-based materials.

### **The Methodology of the Research**

For the approbation of the methodology, strength values, uniaxial compressive and tensile creep deformation values, uniaxial drying shrinkage values were determined and crack initiation, development, propagation, characteristics and crack mouth opening displacements were studied for the following EFACC — with borosilicate lamp glass filler, with montmorillonite mineral additive, with micro- and nano silica mineral additives and with polyvinyl alcohol (PVA) fibers and “cocktail” of the two types of PVA fibers.

The cement composite mixtures were prepared using a double shaft laboratory mixer (BHS, 3 kW, 20–100 rpm).

The compressive strength of the specimens was determined in the compression machine “Controls”, model No. C56G2, with accuracy of  $\pm 1\%$  and a measurement range of 0–3 kN; the loading speed was 0.8 MPa/s.

The tensile strength of the cement specimens was determined in the universal testing equipment “Instron 8516” with a measurement range of 1–120 kN, or in “MTS 858 Bionix Test System” with a measurement range of 0–100 kN and loading speed of 0.005 mm/s, or in the universal testing equipment “Instron E3000” with a measurement range of 0–3 kN and loading speed of 0.03 mm/s. The experiment data was registered using “WaveMaker” and “Instron” software applications.

The lever arm ratio of the creep testing stand was 1:40 in compression and 1:20 in tension. The accuracy of the counterweights was 1/100 kg or 0.01 % in compression and 1/10'000 kg or 0.0001 % in tension. Therefore, the accuracy of creep levers is  $0.01 \times 40 = \pm 0.4$  kg in compression and  $0.0001 \times 20 = \pm 0.002$  kg in tension.

The strains were measured using Aistov electrical strain gauges with a scale interval of 1  $\mu\text{m}$  and maximum range of  $\pm 5$  mm; mechanical clock gauges “ИЧ” with a scale interval of 1/100 mm and maximum range of 10 mm; and a digital strain gauge HBM DD1 with accuracy of  $\pm 0.5$   $\mu\text{m}$  and maximum range of  $\pm 2.5$  mm; as well as data logger “Spider 8”. The measuring instruments had been calibrated by the manufacturer.

Weight changes of the specimens were measured using a “Kern” weighing scale with accuracy of  $\pm 0.001$  kg.

The displacements of crack mouth openings in the cement composite specimens were determined in the universal testing equipment “Instron 5500R” with a measurement range of 0–100 kN, or in the new DTU uniaxial tensile testing stand with the loading speed of 5  $\mu\text{m}/\text{s}$ . The crack mouth openings displacement were measured using the digital strain gauge “Instron Extensometer” with accuracy  $\pm 2.5$   $\mu\text{m}$  and maximum range  $\pm 25$  mm.

The initiation, development, propagation and characteristics of a tensile crack were monitored using a high resolution digital camera Nikon 3D with 24 mega pixel resolution and a fixed macro lens AF-S MICRO NIKKOR 60 mm 1:2:8G ED. Focal length of the camera — 60 mm. Cracks were monitored using a ring-shaped Macro LED Light projector.

The experiment data was processed using MS “Excel”, MathWork “Matlab”, GOM “Aramis”, Imetrum LTD “Imetrum”, HBM “CatMan“, Breeze Systems “NKRemote”, Oakdale Engineering “DataFit” and “Time Stamp” software.

### **Theoretical and Methodological Basis of the Research**

The doctoral thesis is based on the following scientific fields and sub-fields:

- Construction Materials and Technology;
- Structural analysis;
- Structural Engineering;
- Material Science;
- Material mechanics and strength of materials;
- Material physics;
- Optics;
- Environmental engineering;

### **Scope of the Study**

The developed methodology for determining EFACC long-term properties and researching crack development is valid under the following conditions:

- The smallest dimension ( $b$ ) of the cement composite specimens used for the determination of compressive creep strains is limited to five times the dimension ( $\emptyset$ ) of the largest aggregate used in the matrix —  $b_{min} \geq 5 \emptyset$ ; the largest dimension ( $l$ ) is limited by the maximum length of the specimen that can be put into the testing stand.
- Compressive creep and shrinkage strains must be determined by selecting the same geometry of the specimen to be used in the two parallel tests; it is recommended to use specimens with geometric dimensions corresponding to  $\frac{b}{l} \leq \frac{1}{4}$ , where  $b$  — largest dimension of the specimen cross section;  $l$  — length of the specimen.
- For the determination of tensile strength and tensile creep strains, as well as for research of crack development, it is recommended to use plate-shaped specimens with a notch cut on one or both edges of the specimen.
- The long-term testing stress level when determining strains in the stage of linear creep must not exceed 40 % of the ultimate stress value.
- The beginning and duration of loading, as well as the duration of the relaxation period in long-term tests depends on the defined goal and can be unlimited.
- The long-term tests can be performed on specimens in two different humidity concentrations — air-dry and moist.
- It is recommended to maintain constant ambient conditions (temperature and air humidity) in the laboratory.

## **Results Presented for the Defense**

- Methodology that is specifically suited for research of EFACC long-term properties — uniaxial compressive and tensile creep strains, uniaxial drying shrinkage strains, as well as tensile crack development and determination of crack mouth opening displacements.
- Obtained characteristics of new, different structural cement composites — uniaxial compressive and tensile creep strain values, uniaxial drying shrinkage strain values, and performed research of tensile cracks — their initiation, propagation, characteristics and determined crack mouth opening displacements.
- Modified testing stand for determination of uniaxial tensile creep strains and adopt stand for determination of uniaxial compressive creep strains.
- New uniaxial tensile testing stand specifically suited to EFACC and ensuring the study of crack and micro-crack development in EFACC materials.
- Exponential equations for predicting the total EFACC uniaxial long-term strains and uniaxial drying shrinkage strains occurring in structural elements made of similar materials.
- Recommendations for supplementing the European standard EN 12390 “Testing hardened concrete” with methodologies for determining compressive and tensile creep strains.

## **Approbation of the Results**

The results of the doctoral thesis have been reported and discussed in 15 international conferences.

The main results of the study have been presented in 15 scientific publications. Six of them have been indexed in SCOPUS database. The number of cited publications — 4; number of citations — 26, *h*-index is 4.

## **List of Relevant International Conferences**

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 4<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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. 11<sup>th</sup> 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 9<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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 52<sup>nd</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 36<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 51<sup>th</sup> 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).

### **List of Scientific Publications on the Topic of the Doctoral Thesis**

1. Sprince A., Pakrastinsh L., Vatin N., Crack Formation in Cement Based Composites // Proceeding of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Competitive Materials and

- Technology Processes ic-cmtp3, Miskolc — Lillafüred, Hungary, October 6–10, 2014. (submitted for publication).
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 (will be indexed in SCOPUS database).
  3. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A., Behaviour of Fibre Reinforced Cement Based Composites // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference “Advanced Construction” of Kaunas University of Technology, Kaunas, Lithuania, October 9–10, 2014, PP. 103–107 (will be indexed in SCOPUS database).
  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 (indexed in **SCOPUS** database).
  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 (indexed in **ISI Web of Science** and **SCOPUS** databases).
  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 (indexed in **SCOPUS** database).
  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 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2013, Volume II, PP. 79–84 (indexed in **SCOPUS** database).
  9. Sprince A., Pakrastinsh L., Korjakins A. Experimental creep tests on concrete made with montmorillonite nano particles // Proceedings of the 8<sup>th</sup> 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 3<sup>rd</sup> 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 7<sup>th</sup> 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 36<sup>th</sup> 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 (indexed in **SCOPUS** database).
  14. Sprince A., Korjakins A., Pakrastinsh L. Creep behaviour of concrete with glass waste microfiller // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference „Environment. Technology. Resources”, Rezekne, Latvia, June 20–22, 2011, Volume II, PP. 125–131 (indexed in **SCOPUS** database).
  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.

### **Structure and Volume of the Doctoral Thesis**

The doctoral thesis consists of an annotation, an introduction, five main sections divided into subsections, a conclusion section, a list of references, and two annexes.

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

**Section One** provides a summary and analysis of the existing methodologies, their advantages and disadvantages. The objective and tasks of the research are clarified.

**Section Two** presents the new methodology for determining EFACC long-term properties and crack development research.

**Section Three** describes the experimental approbation performed for the new methodology.

**Section Four** reflects and analyzes the main results of the experimental approbation.

**Section Five** summarizes and details the recommendations for practical application of the results of the research, including also recommendations for improvement of standards and design rules.

In the end a summary of the main conclusions is provided.

## CONTENTS OF THE DOCTORAL THESIS

The introductory part of the doctoral thesis formulates the actuality of the research, its objective and the main tasks defined for achieving it, as well as highlights the scientific novelty and practical application of the thesis, methodology and its theoretical and methodological bases of the research, scope of the study and results presented for the defense.

### 1. Literature Overview / Theoretical and Experimental Background

Nowadays, in the end of the 20<sup>th</sup> and beginning of the 21<sup>st</sup> century, a worldwide problem is global heating caused by an increasing concentration of greenhouse effect gases in the atmosphere. This increase is mainly attributed to exhaust fumes and various emissions. Scientists predict that if nothing changes, the average global temperature will continue to rise sharply, affecting the climate on a global scale, causing the rising of sea levels and increasingly unpredictable storms, flooding, etc.

The European Union has decided that climate change is an issue that requires special attention. One of the industries related to climate change is ecological construction (green building), which has attracted a lot of attention and support in the whole world.

People involved in construction need to understand that any building, any populated place also contributes to the environmental pollution, same as transport or industrial equipment. Production and transportation of construction materials, as well as the construction process itself and the following operation of the building, result in consumption of resources and energy, atmospheric and water pollution, noise, waste, and changes in the microclimate and the environment. All buildings and residential settlements as a whole have a substantial role in the consumption of non-renewable natural resources and constitute an impact on the environment (Kruše, 1995).

The task of ecological construction is to operate and make do with renewable resources, bringing the consumption of non-renewable natural resources to a minimum. Ecological construction includes a number of conditions that must be taken into consideration, including the selection of appropriate construction materials, limiting the use of non-renewable resources and the amount of waste, etc. (Bokalders, Bloka, 2013). One of the branches of ecological construction is sustainable construction, the main principle of which is a waste-free construction process. Latvia also started working on legislation supporting sustainable construction in 2008. In 2010, the Latvian Sustainable Building Council was established, and its tasks include the education of the public, the promotion of sustainable construction, and activities related to the implementation and evaluation of sustainable projects, etc. (Latvian Sustainable Building Council, 2015).

Considering the environmental situation in the world, one of the current priorities is the use of recycled materials, because each year the amount of waste continues to grow sharply (approx. 5 % annually; Taylor *et al.*, 2006). The European Community alone accounts for 200 million tons of household waste per year (Vilcina, 2010). The use of alternative, recycled materials would not only decrease the total amount of waste but also reduce the production of the currently used raw materials. This would result in a

smaller amount of CO<sub>2</sub> emissions caused to the production of various materials used in construction. For example, the cement production process accounts for up to 10 % of the total amount of carbon dioxide released into the atmosphere every year, thus contributing to the global warming. Another example is that, e.g., in Latvia, the amount of collected glass waste is 300–500 tons a year, and it is well-known that glass is not biodegradable (Korjakins, 2011).

Cement composites are important structural materials that are used all over the world — both, above and under the ground, as well as in water, forming various types of structures. Nowadays, the clients have become more demanding, and the architects more daring, proposing new, increasingly complex building forms, designing structures with increasingly larger spans and heights, larger consoles. Often in such projects it is necessary to use load-bearing structures with a reduced, thinner and sometimes, more complex cross-sections, e.g. spans of varying height. Therefore, more attention is paid not only to the strength properties of the cement composites, but also to their deformation, long-term and durability-related properties and their effects, to ensure that the structures designed and used are safe.

Cement composites are artificial stone-type composites — cement/aggregate construction materials that exhibit such long-term properties as shrinkage, creep strains, and initiation and propagation of cracks related to shrinkage and creep. These properties have a substantial effect on the ability of the structures to perform in accordance with the defined tasks. Creep in cement composites describes the dimensional changes in the material over time due to live and dead loads. In addition to creep and regardless of whether the cement composite is loaded, its drying causes shrinkage strains. Shrinkage is defined as a reduction of volume of a non-loaded cement composite at a constant temperature. Shrinkage strains continue to develop even after the cement composite has hardened.

In relation to the effect of time, cement composite deformations can be divided into two categories — time-dependent and time-independent deformations, while from the point of view of the effect from loading, cement composites can be divided into load-dependent and load-independent deformations (see Fig. 1.1).

Mechanisms of cement composite creep processes are complex and have not been entirely researched. There is still lack of unified, universal theory explaining cement composite creep and shrinkage approved by supporting experimental research. None of the proposed theories can be completely attributed to all the obtained creep and shrinkage observation results. It is possible that creep includes simultaneously within two or more mechanisms, but there is no experimental evidence also for this combined theory. It must be noted that creep research in majority of cases is empirical. The interpretation of data in form of analytical models is substantially inconvenienced by the fact that when changing one parameter, in the composition of cement composite at least one more changes.

The amount of creep strain is mostly dependent on the amount of load, as well as on cement composite strength, and creep and shrinkage properties are also affected by a large number of other various factors, for example, the composition of cement composite (the amount of hydrated cement paste in cement composite, type, amount of aggregates, their geometry and properties, chemical additives, type, amount and

geometry of fibers), environmental conditions (humidity, temperature), as well as geometrical shape and dimensions of the cement composite element.

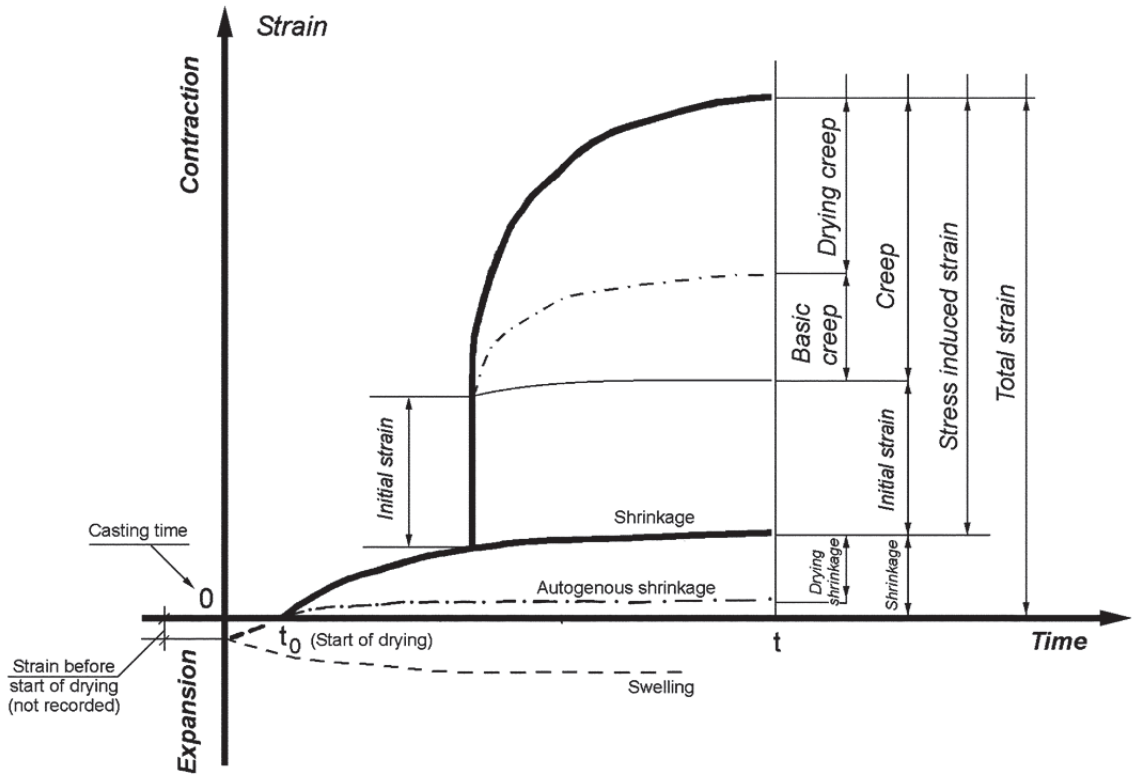


Fig. 1.1. Classification of deformations (ACI 209.1R-05, 2005)

Experimental research conducted by many leading researchers (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch, Александровский and others) have proved that for cement composites of normal strength the creep strains can be many times greater than the initial — instant strain. Also, that approximately 50 % of the final value of creep is formed within the first 2–3 months since the beginning of loading and approximately 90 % — within the 2–3 years, but its final value is reached after approximately 10 years (assumed for practical purposes), but in theoretical calculations it is assumed that creep reaches its final value after approximately 30 years. Shrinkage strain, for its turn, rapidly increases within the first 2–4 weeks, after that the increase of strains in time is small and shrinkage strain reaches its final value after approximately a year.

When removing load for a long-term loaded cement composite element elastic strain reversibility takes place which is followed by gradual creep strain recovery (~20 %) within 2 to 3 weeks, but the majority of creep strains (80 %) are residual and irrecovery (Theryo, Parson, 2011).

Creep and shrinkage significantly affect the behavior of cement composite structures and impact their durability. In practice it is assumed that creep and shrinkage are two mutually complementing phenomena in the impact of which such unwanted phenomenon as crack initiation can appear and continue. Therefore, size and rapidity of long-term strain is of substantial importance in designing.

When designing cement composite structures, they are made economic and rational; moreover, the structures must comply with the intended working conditions and durability requirements. To satisfy the said criteria, not only strains that appear directly after applying the load, but also strains which develop during loading, i.e., creep strains, are taken into account.

If these properties are unknown or the permissible values given in the rules are not observed, generally structures and their elements, in majority of cases due to creep and shrinkage, excessively deflection, change their geometric dimensions irregularly, become unstable, show inadmissible amount of cracks. Long-term strain can cause losses in stress of prestressed structures, division of internal stress or division of reactions in statically indeterminable members that can dramatically decrease the capability of load carrying and lead to economic losses and unsafe further exploitation of structures. Similarly long-term strain — creep and shrinkage — can cause irregular deformation not only in separate parts and elements of the building, but also for the whole building — due to different times of concreting, inconsistent environmental conditions and various, geometrical dimensions of structural elements. If the discrepancies are noticed in a timely manner, they are timely prevented, but if the damages are not noticed or are ignored, they can lead to destruction of structures. Often such structures are removed long before the end of the intended exploitation time (Ping, 1992; Rusch, 1983; Neville, 1983, 2002; Bazant, Wittmann, 1983; Bazant, Murphy, 1992; Branson, 1977; Gilbert, 1988 and others).

Creep caused by both compression and tension load and it is a substantial property of a long-term structure. The unwanted consequences of creep strain in compression have been noted before. Creep caused by tension is important in evaluating the crack initiation risk, especially at an early age of cement composites, as well as evaluating the resistance of cement composite to cracking caused by shrinkage and temperature stress that can further cause excessive deflection. The amount of creep strain in tension must also be known when calculating tensile stress in prestressed beams, designing water-retaining structures, chemical substance reservoirs etc. (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 and others).

As it is known, cracks in cement composites in majority of cases initiate due to tensile stress; therefore, it is important to predict the action of structural elements, the caused reaction and development of possible consequences during structure loading. As cement composite creep and shrinkage are little reversible processes, in majority of cases they, similar to cracks, can be added to the permanent, structural behavior aggravating consequences.

Cracking in any kind of cement composite is a substantial loss. Due to cracks the cement composite becomes inhomogeneous, its strength and long-term durability decreases. Stress-strain connection is directly related to micro-crack development as these are the cracks that form during the cement composite bonding processes (bonding cracks) and propagation in the adjacent mortar. As researchers (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 and others) admit micro-cracks have substantial effect on cement

composite behavior and fracture characteristics. One of the ways how to limit this imperfection is application of various types and materials of fiber that help divide the stress using fiber bridges between cement composite crack edges thus decreasing the total amount of cracks, their forming rapidity and development, crack mouth opening displacement, as well as changing the character of cracks (Li, Liang, 1986; Fischer, Li, 2007; Pereira, 2012; Hillerborg *et al.*, 1976; Karihaloo, 1995; Bažant, Oh, 1983; Stang *et al.*, 2006; Bazant, 2001, 2008 and others).

In the last decades even more new, different cement composites are made beginning with decreased amount of cement, decreased dimensions of aggregates, disperse reinforcement in type of fibers, chemical additives and decreased proportion of water and cement etc., making cement composite matrixes that are more stronger, durable and environmentally friendly as the consumption of cement is decreased and reused materials are used, for instance, borosilicate lamp glass (Prisco *et al.*, 2009; Bajare *et al.*, 2012; Korjamins *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2010; Batayneh *et al.*, 2007; Mageswari, Vidivelli, 2010 and others). One of the most perspective directions is development and use of High Strength Cement Composite — HSCC, High Performance Cement Composite — HPCC and Ultra High Strength Cement Composite — UHSCC.

Application of such materials in construction would provide a possibility to decrease the consumption of materials, as well as the total weight of structures, build higher buildings, use construction elements of more effective cross-section and design more graceful thin-walled structures as well as implement new, more complex forms. The improved properties of cement composite make it a more profitable material from an economic standpoint and possibly the only material in field of specialized construction.

At the moment physical and strength properties of many such newly developed materials are being researched. They provide higher level mechanical properties and durability (increased durability against corrosion, wear, as well as high gas and water-tightness, capability of resisting chemical and other aggressive effects), but their behavior in effect of stress can differ from behavior of the traditional, normal strength concrete.

Although impact of various factors on these properties is conscious, the increasing volume of using cement composites is being limited as obstacles exist that delay extensive use of these new, in their own way modern, high and ultra-high strength and improved properties' cement composites in construction (Graybeal, 2006; Neville, Brooks, 2010; Gilbert, Ranzi, 2011; Justs, Shakhmenko, 2010 and others).

One of the main obstacles is the currently insufficient information on durable parameters of such cement composites and the possible sensitiveness to cracking — such insufficient research of durability properties can substantially impact safe and prolonged exploitation of buildings. Similarly building codes have not been produced that would comply with the design of structures of such improved cement composites.

In structures cement composite creep is simultaneously both a preferable and unwanted phenomena. On one hand, it is preferable as it ensures the necessary level of elasticity for the cement composite decreasing the stress caused by external load and preventing concentration of stress, but on the other hand — creep strain due to working loads often causes extensive deflection that in its turn can cause instability

(e.g., in arches), cracking, deflection of long columns, loss of stress in prestressed structures and division of internal stress and reaction in statically indeterminable members. If the structure is unstable, creep and shrinkage strains can substantially decrease the load carrying capacity. Therefore, it is important to determine the maximum increase of strains in time.

Predictable creep and shrinkage strains have substantial significance to evaluate the persistence of cement composite structures against cracks and unacceptably large deflection.

The magnitude of creep necessary for structural calculations can be evaluated in various levels. The level depends on the type of structure to be calculated and the quality of data available for calculation. In cases when only approximate evaluation of creep strain is necessary, it is possible to evaluate the predictable creep strains based only on a few parameters — such as relative air humidity, cement composite age, and dimensions of an element. Other extreme is calculation of structures sensitive to deformations. In such case evaluation of creep strain is based on extensive, laboratory obtained totality of results and computer analysis (Fanourakis, Ballim, 2003). In an ideal case a compromise between a simple prediction of results and preciseness of data obtained in a laboratory is searched for.

The effect of creep on structures mostly must be taken into account in control of serviceability limit state. The exploitation defects of cement composite elements, for instance, excessive cracking and/ or too large deflection are common. In the ultimate limit state impacts of creep are to be considered only in cases when they are extremely large, for instance, checking the stability of a ultimate limit state in cases when the effects of second order are also important (the effects of second order are additional impact caused by structural deformations).

It is generally considered that in reinforced concrete structures compression stresses are usually taken by the cement composite, but tension stresses — by the steel reinforcement bars. It also explains the fact in all kinds of scientific literature it is possible to find extensive range of information on creep in compression, but creep in tension has been researched insufficiently which is amplify also by the fact that no standard on defining the experimental determination of long-term parameters in tension can be found. Similarly, it is essential to note that only for traditional, normal strength concrete extensive, experimental research has been carried out and the values of long-term parameters (in compression loading) are to be found in various standards and empirical data libraries.

In the world many standards have been developed for experimental determination of concrete long-term properties, but by examining all the available standards and models for determining creep strain in compression it must be concluded that the rendered information is not unambiguous, is incomplete and the developed methodologies are appropriate for normal strength cement composite. It is mainly advised to determine creep strain in compression using cylindrical specimens, the offered geometrical proportions of specimens differ from 1/2 to 1/4; similarly there are standards which propose using specimen of prismatic shape. It is mainly advised to determine strains by placing the specimen in helical spring, but these stands have significant imperfections — it is impossible to subject the specimen for permanent load

in an unlimited time period as the stress in the spring in time decreases and it is necessary to apply corrections of stress level during the experiments. The main drawback of hydropneumatic accumulator is their dependence on electrical power; therefore, the uniformity of loading can fluctuate depending on the electrical current intensity; moreover, there are additional costs due to electric power consumption. Similarly these standards are not appropriate for fine and extra fine aggregate cement composite and small sized specimens that are characteristic of high and ultrahigh strength cement composites. The majority of standards provided that in parallel to creep tests also drying shrinkage strains should be determined; however, no unambiguous information is given in regard to geometry of the shrinkage specimens, as well as it is not indicated in which part of the specimens these strains are to be determined.

Unfortunately standard EN 12390 "Testing of hardened concrete" applying to European region does not provide information how the long-term and durability properties — creep, shrinkage, crack research — are to be determined. Also standards ISO 1920-9:2009 "Testing of concrete — Part 9: Determination of creep of concrete cylinders in compression" providing information on determining only creep strain in compression and ISO 1920-8:2009 "Testing of concrete — Part 8: Determination of drying shrinkage of concrete for specimens prepared in the field or in the laboratory" where drying shrinkage strains are calculated can be applied for European region. It is essential to add that nowhere in the world a standard for determining creep strain in tension has been developed. Until now only a few authors have carried out such experiments using their own developed methodology and equipment.

For cement composite crack research only standards for determining crack mouth opening displacement are available, including adopted standards from methodologies of testing other materials, for instance, from metal testing standard (ASTM-Standard E399). Until now no standardized crack research methodology providing information on initiation, development and character of cracks and micro-cracks has been developed. The main principle for all the crack durability determination methodologies is a previously cut notch with the purpose of maximizing the stress intensity at the tip of the notch. At the same time, the stress intensity achieved at the tip of the notch limited the area where the crack initiates. By such previously prepared terms it is possible to evaluate the ability of a material to resist tensile strength and observe the main development of the crack and the crack mouth opening displacement.

Very many various empirical calculation models for predicting creep in tension and drying shrinkage exist, intended for normal strength concretes and that are based on extensive range of experimental cement composite creep and shrinkage data, which is obtained collecting experiment results carried out by various researchers in the world. Any mathematical or empirical predicting model gives an approximate value of long-term properties as in every one of them only a part of factors affecting the significant cement composite properties are taken into account. In major part of empirical models cement type, compression strength, cement composite specimen age, effective specimen thickness, relative air humidity are taken into account, but other significant long-term factors, for instance, amount of cement and grading components, water/cement proportion, amount of air, type of grading components, cement

composite curing method, drying period, load character, loading period, cement composite shape, air temperature are taken into account insufficiently. In total there are over ~30 internal and external factors affecting long-term properties mentioned in literature. The most thorough application, i.e., 21 factor out of all of them, are applied in RILEM Model B3 (1995), but it, as the majority of them, is strictly recommended only for normal strength concretes.

Cement composite creep and shrinkage tests are time-consuming and prior to them additional information has to be given to the choice of function that will be applied to choose the experimentally obtained curve. Following functions obtained in relatively fast creep tests strains in a very long time period must be predicted.

Another substantial obstacle is the delay of introducing design rules. The approved calculation procedures used for traditional concrete are not applicable for the new cement composites. High and ultra-high strength cement composites have different compression strength and modulus of elasticity — the main factors taken into account in designing. Cement composite strength is taken into account in calculations of the ultimate limit state, but their elasticity and deformability — mainly in determining the serviceability limit state. The existing standards and calculation models provide a possibility for evaluating creep and shrinkage strains for the traditional, normal strength concrete applicable for conventional structures. It must also be noted that by examining various models proposed by authors all over the world it was concluded that their values in empirical schemes are very approximate and are applicable only for predicting long-term properties of conventional buildings. The actual compositions of cement composites, used raw materials, environmental conditions, specimen geometry and age can differ significantly from the parameters taken into account in the models. If there is no quite large correspondence in parameters, it is incorrect to apply these previously developed models as inaccuracies in calculations may occur.

The construction structures design standard set for Europe is EN 1992-1-1:2005 Design of concrete structures. Part 1-1: “General rules and rules for buildings” and regulation (1) of chapter 3.1.1. states that this standard is applicable for normal and high strength concrete the cubic strength of which does not exceed 105 MPa (referring to table 3.1. within the standard). Similarly, regulation (2) of chapter 3.1.4. of EN 1992-1-1:2005 states that the creep coefficient values provided in Fig. 3.1. of the standard are applicable only in cases when high precision is not necessary and the cylindrical strength does not exceed 90 MPa, but it is not indicated what course of action is to be taken if the project requires the highest precision and the highest strength cement composites are applied.

Standard EN 1992-1-1:2005 applied for Europe region provides creep coefficient values that are incorrect to be applied for cement composite and structural calculations which differ from the model. In order for the creep coefficient provided in the EN 1992-1-1:2005 to be applicable, significant effect factor reducing coefficients should be applied. However, for their determination extensive experimental research is to be carried out for different types of normal and high strength cement composites.

EN 1992-1-1:2005 calculation model provides ready creep coefficient determination graphs, but there is no information on cement composite for which the long-term parameters and data output have been obtained and collected; therefore, it

is impossible to compare the compatibility of the concrete intended for a particular project with the EN 1992-1-1:2005 concrete, and thus it is incorrect to apply these graphically obtained values in structural calculations.

In the 1997 reapproved annex of standard ACI 209R-92 (ACI 209R-92 “Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures”) various creep and shrinkage affecting factor coefficients have been collected. This annex of standard is the only aid material for engineering calculations of this kind, collection a large amount of experimental data from various authors for the time period of 1937 to 1979. Coefficients of impact of various factors are applicable only for normal strength cement composite and it would be incorrect to apply these coefficients for correcting properties of different internal and external factors for contemporary high and ultra-high strength cement composites and their further application in engineering calculations.

Nowadays a collection of experimental, long-term parameters of the new, different cement composite composition and improved properties has not been aggregated — there is no library for experimental data and coefficients for various internal and external, creep and shrinkage affecting factors that should be used for structural calculations and that could ease work of engineers have not been found.

In order for the new cement composites to be applicable in designing safe structures, it is necessary to develop new methodology where information on how to determine various parameters charactering the material is given.

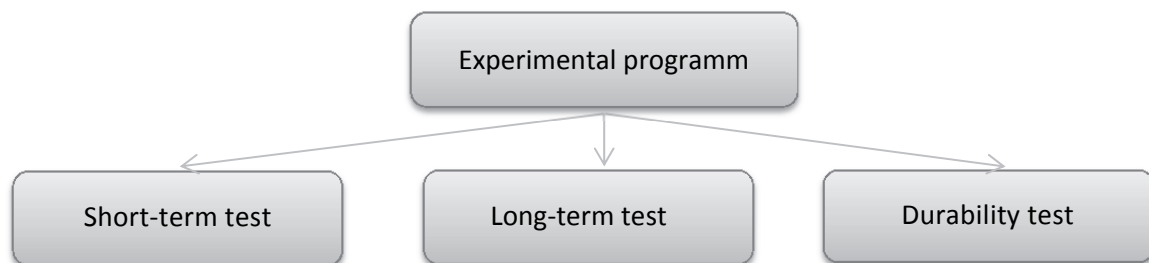
## 2. Methodology for Determining Long-term Properties and Crack Development Research

As a result to experimental tests of structures or their models the actual characteristic values of various properties can be found out. Experiments to be carried out in a laboratory provide a possibility to obtain results of increased precision. Modeling of structures and prediction of behaviour, for their part, are impossible without information on the properties of different components. To find a possibility to determine the characteristic parameters of cement composites, a new methodology for determining long-term properties and crack development research was developed and that can be applied in mechanic properties' test laboratories.

In a general case methodology is divided in three parts: the first — description of material and specimen preparation, the second — description of various types of experimental test procedures, and the third — processing of obtained data and determination of required parameters. The methodology comprises the technical background, definitions, basic principles for choosing equipment and devices, as well as the list of parameters to be registered.

In the first part designing of various cement composite compositions, preparation of components, their amount determination and mixing, preparation of moulds and casting of the necessary form experimental specimens, pre-processing of specimens after their re-moulding and further preparation for experimental tests is carried out. In the second part tests for preparation of equipment and experimental tests are carried out, whereas in the third part detailed data processing is carried out.

Experimental program is divided in three parts:



In the first part short-term tests are carried out and cement composite strength properties — compression and tensile strength, as well as modulus of elasticity — are determined. Cement composite strength properties are necessary for further determination of load level, which, in turn, is necessary for the long-term tests in the second part. In the second part cement composite long-term properties are determined by applying and without applying a load, accordingly for creep uniaxial strains in compression, tension and drying shrinkage uniaxial strain. In the third part cement composite durability tests (crack research — determination of crack initiation, further development, characters and crack mouth opening displacement) are carried out. Structured methodology is shown in Fig. 2.1.

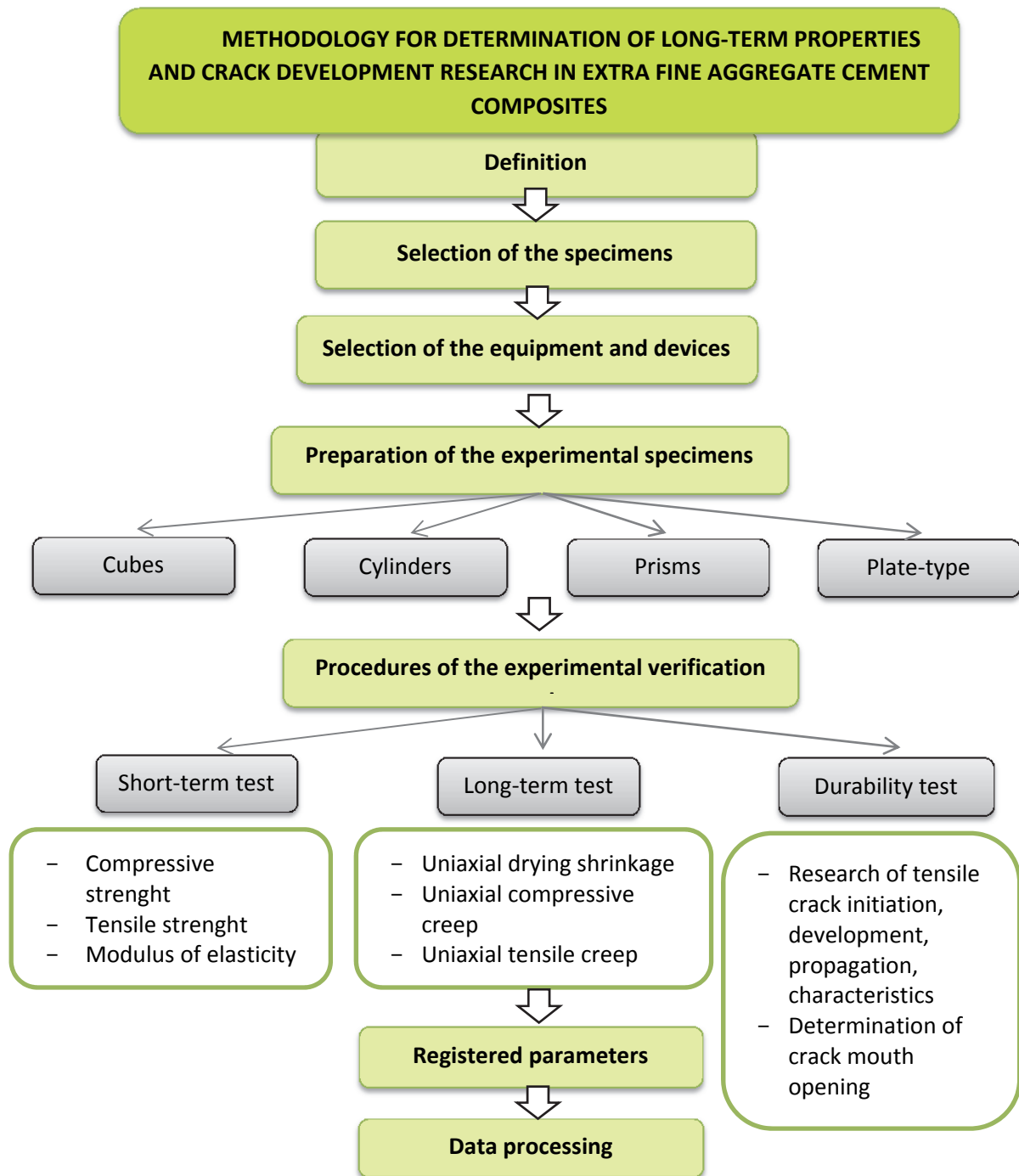


Fig. 2.1. Scheme for methodology for determination of long-term properties and crack development research in extra fine aggregate cement composites

For determination of compression strength cubes of  $100 \times 100 \times 100$  mm, prisms of  $40 \times 40 \times 160$  mm and cylinders of  $\varnothing 47 \times 190$  mm are to be used. By application of reduction coefficients, specimens of different dimensions can be applied in determining the strength. Tensile strength is determined by using coupon —  $100 \times 50 \times 12$  and  $150 \times 70 \times 12$  mm (see Fig. 2.5.) or Compact Tension — CT specimens —  $150 \times 150 \times 12$  mm (see Fig. 2.4.). Experimental compression, tensile strength is to be determined in accordance with the long-term test for the beginning day, as following the amount of ultimate load, the amount of load to be applied for specimens subjected to uniaxial creep is calculated.

The modulus of elasticity is determined from the elastic strains that take place in the beginning of creep test.

For determining creep strain in compression and shrinkage strain  $\varnothing 47 \times 190$  mm cylindrical specimens or  $40 \times 40 \times 160$  mm prismatic specimens are used. For all the creep and shrinkage specimens aluminum plates ( $10 \times 15$  mm) are centrally and symmetrically glued to side surfaces in order to provide a basis for the strain gauges. Six aluminum plates are glued to one cylindrical specimen, four — to the prismatic specimen. The distance between the centers of the two plates was 50 mm. For determining the basic creep a part of specimens, including shrinkage, are wrapped up in two layers of aluminum foil, thus ensuring that drying process will not begin and only the drying creep will take place in them.

For all the creep specimens before placing into creep lever test stand strain gauges are attached to the side surfaces. For the operating principles of creep lever test stand see Fig. 2.2.

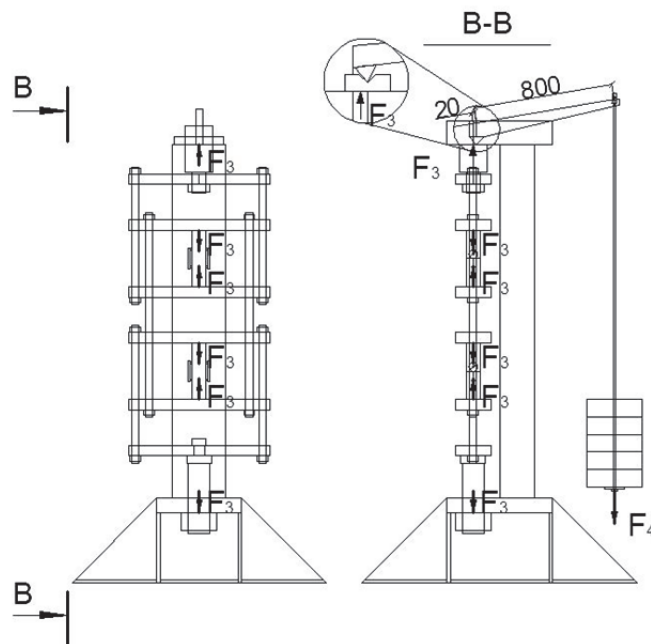


Fig. 2.2. Creep lever test stand for determination of uniaxial compression creep strains  
 $(F_3 = F_4 \times \text{lever arm})$

For creep in tension coupon type or CT specimens are used. Before experimental tests aluminum plates ( $10 \times 10$  mm) (see Fig. 2.4. and 2.5.) are glued symmetrically to the notch. For all the tests strain determination devices — Aistovs strain gauges or HBM DD1 digital strain gauges are attached in such a way that their “knives” are located on the glued plates; strain gauge base — 50 mm. Strain gauges are attached to the specimens with elastic rubber. Specimens with attached strain gauges are put into creep lever test stands (see Fig. 2.2. and 2.3.), one specimen in each test stand. HBM DD1 strain measurements are recorded in a computer via data logger HBM “Spider 8” using HBM “CatMan” software.

Test stand is made on a stationary bearing frame with a 400 mm long lever. In the upper side of the test stand load transition element is hanged that allows rotation

movement. In the lower part of the test stand a fixed element is placed. At the ends of load transition elements fixing adapters were attached with  $\varnothing 12$  mm screws that are necessary for placing a specimen in the test stand (see Fig. 3.2.). Adapter and specimen are connected with  $\varnothing 20$  mm bars. When the specimen is placed in the test stand, the lower part element of the test stand is regulated so that the specimen is leveled. Specimens are loaded with the help of counterweights. The applied load is recorded and controlled via dynamometer. Creep absolute strains in tension is approximately ten to twenty times smaller than creep strains in compression, and digital strain gauge are recommended for their recording that are sensitive enough and can detect micro strains. Creep lever test stand maintains permanent load for unlimited time period.

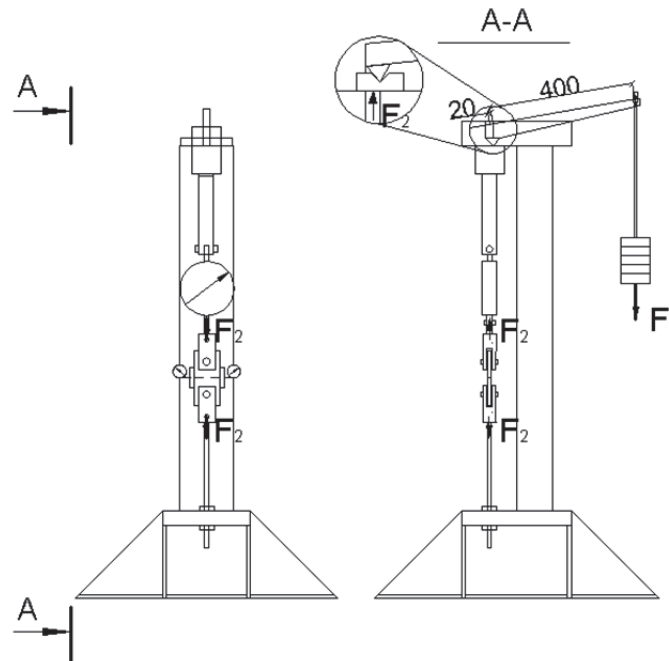


Fig. 2.3. Creep lever test stand for determination of uniaxial tensile creep strains  
 $(F_2 = F_1 \times \text{lever arm})$

All the creep specimens are loaded with constant static load, regularly performing strain readings. Reaching the length of loading in the interests of the experiment, the load is gradually taken off and the specimen is left in the creep lever test stand to determine strains' recovery in time. To determine correct amount of creep, shrinkage strains determined in parallel to geometry specimens and in equivalent environmental conditions, only without the load, are subtracted from the total strains. During the tests the environmental humidity and temperature of premises is recorded.

For determination and research of tension load and durability properties CT specimens with final dimensions of  $150 \times 150 \times 12$  mm (see Fig. 2.4.) or coupon type specimens —  $100 \times 50 \times 12$  and  $150 \times 70 \times 12$  mm (see Fig. 2.5). CT shape specimens are adapted from the metal crack test standard ASTM-E647, 2005. In order to increase the tensile stress intensity, tension specimens are made as thin as possible.

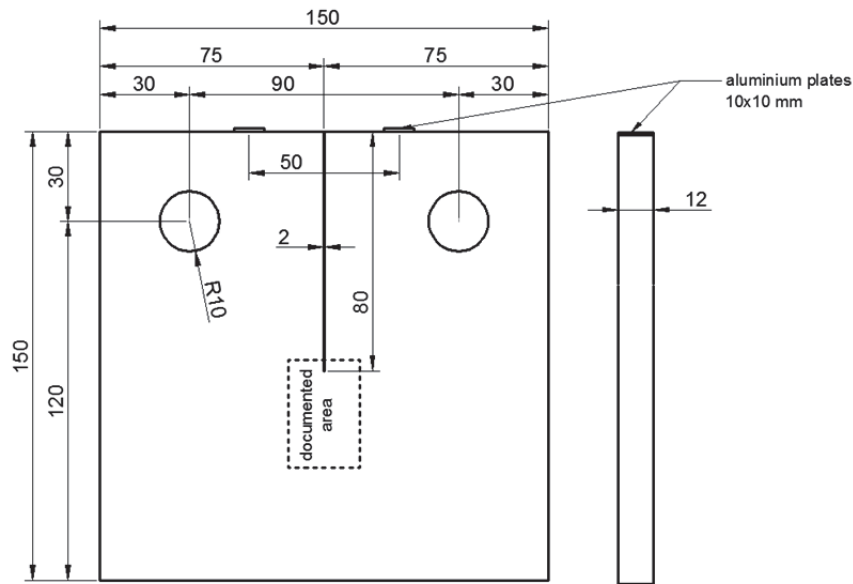


Fig. 2.4. Geometry of the Compact Tension (CT) specimen

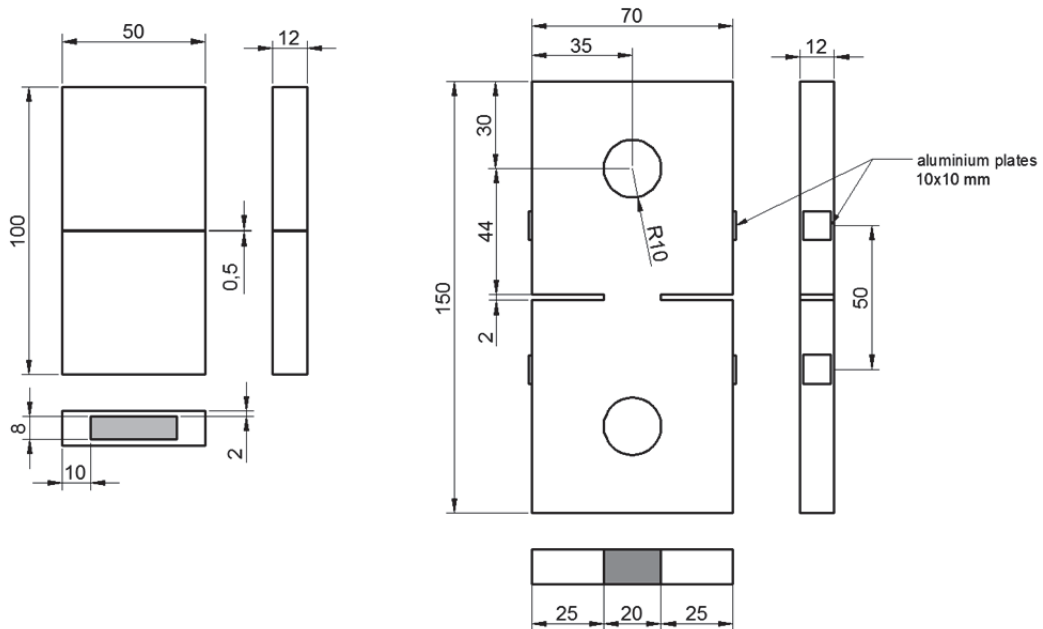


Fig. 2.5. Geometry of the Coupon specimen

To be able to observe the crack initiation, development, and character, it is substantial that the surface of the specimen is smooth. Cracks usually initiate in the area of maximum stress. In order for the fracture to be predictable and the location of initiation of the crack is particularized (it is also the area observed by the lens), CT specimen has a 80 mm long and 0.5–2 mm deep notch made, but the Coupon type specimen has notches made in parallel to the shortest specimen edge by the perimeter of the central axis line at first in 2 mm and then 10 mm (in the direction of the shortest cross-dimension) (Paegle, Fischer, 2011, 2013; Pereira *et al.*, 2012). The specimen of 150 × 70 × 12 mm has notches of 20 mm in length and 2 mm in width made on both sides of the specimen. During tension loading the maximum stresses will concentrate in the tip of the notch, the narrow notch will additionally increase the intensity of stresses.

Before the experimental tests one (CT specimens) or two (Coupon specimens) strain gauges are attached centrally and symmetrically to the notch, which fixes the opening displacement of the specimen's notch — CMOD. The specimens with strain gauges are centrally placed in grips.

One of ways how to observe initiation, development, and character of cement composite micro-cracks, as well as to measure crack mouth opening displacement, is to use the digital image-based monitoring system — GOM “Aramis” and Imetrum LTD “Imetrum” of which the more applicable for measuring micro-cracks and more precise is no-contact GOM “Aramis” measuring system. Experimental research confirms that universal testing equipment of large measuring range are not applicable for research of micro-cracks, cracks and crack mouth opening displacements by using macro lens, as even in the case of very slow equipment working speed —  $\sim 5 \mu\text{m/s}$ , too many movements initiate in the specimen to be tested; therefore, it is impossible to obtain sharp high resolution pictures. The macro lens used during the tests of observing micro-cracks loses focus of the points of specimen surface due to movement unseen to eye and cannot provide taking of pictures of high enough quality that could be later processed by GOM “Aramis” system.

In the test lens with the focus distance of 60 mm was used for the test. For implementing the test the following photo camera setup was done — diaphragm F11, exposure 1/30, ISO 200. Every second one picture of 24 mega pixel resolution was taken. Before the test photo camera was placed on a stand and leveled so that the photo camera matrix was parallel to the specimen's surface and so that maximum all the visible points of surface could be in focus. The parallelism of surface and matrix (i.e., the sharpness of all the visible surface area points) is controlled by synchronising the photo camera with a computer and using non-commercial software by Breeze Systems “NK Remote”, so that the same picture could be seen both on a computer screen and the finder. The distance between the photo camera matrix and surface of the specimen is to be 175 mm, fixing a surface area of  $36 \times 24 \text{ mm}$  (see Fig. 2.4). For execution of the test remote control and automatic photo camera built-in picture taking timer with an interval of 1 second are used. Before loading one picture without the load is taken and one picture by placing a ruler of millimeter paper by the crack. In order to be able to read the displacements of surface points in GOM “Aramis” software from the pictures, before the test the surface of the specimen is sprayed by using mini compressor and airbrush with fine black-coloured dust. In order to obtain high-quality pictures, during the test the specimens are lighted with intensive light projector that are placed in a way that the light on the surface of the specimen would be uniform and would not make shadows. With the universal testing equipment “Instron” the obtained load data is synchronized with GOM “Aramis” system in addition using Mathworks “MatLAB” and “Timestamp” software.

Crack initiation and development as well as crack mouth opening displacement can be determined also with the digital displacement measurement equipment set “Imetrum”. In this method the specimen with the help of a special video camera is continuously filmed, measuring displacements or difference between two or more points. With the “Imetrum” equipment set, similarly as with the digital image-based system GOM “Aramis”, the displacement can be determined in various areas of the

specimen. In this method universal test equipment “Instron” load data instantly synchronizes with the “Imetrum” software recorded readings. By using this method, the specimens do not have to be sprayed with black-coloured dust. “Imetrum” video camera is leveled and sharp focus is regulated for the area of interest — where the crack will initiate — before the test, and the specimen surface is lightened with intensive lighting.

Tensile strength of high strength cement composite is relatively low (~5–10 % of compression strength) and it is a problematic issue to find test equipment that would be appropriate for crack sensitive, high strength cement composites, small loads and during the operation of which inadequately large movements would not initiate; therefore, a new test stand was made see Fig. 2.6. (authors G. Fischer and A. Sprince) that is specially designed and is appropriate for small tension loads and is more precise when working with small displacements. It has been experimentally proved that by applying this equipment it is possible to obtain more precise curves of describing and it is applicable for observing and measuring micro-cracks and cracks.

The operating principle of test stand on the level of idea is taken from c-clamps. Initially frame geometry and test stable requirements were put: the frame is made with minimal, as low as possible total height, so that it could be placed under the microscope, and it is made out of massive material, so that it could not be moved during the test, but at the same time so that it would be movable without additional human resources.

Basis for the stand is a stable stainless steel frame that consists of movable and immovable part (its geometry and dimensions see in Fig. 2.6.). The frame is made in a way that during loading only its movable part moves horizontally by previously cut rails. In both parts screws —  $\varnothing$  18 mm,  $l = 80$  mm were put, which are meant for CT specimen to be placed on them. In order for the specimen to be able to turn freely during loading, below and above the specimen “SKF” bearings are put and after that nuts are screwed on. For recording the tensile strength S-type tension load dynamometer “HBM RSCC”, measuring range — 0–1000 N, was attached to the moving part of the frame with  $\varnothing$  12 mm screw. Dynamometer was connected with a data logging device. The other end of the dynamometer was attached to the micrometer with a very small thread screw ( $\varnothing$  12 mm) that goes through the test stand’s frame. The end of the micrometer can be turned manually. In order to control the turn angle, a scale was made at the end of micrometer; unit value —  $2^\circ$ . Micrometer was turned with the speed of  $\sim 5 \mu\text{m/s}$  ( $\sim 1$  scale unit/second).

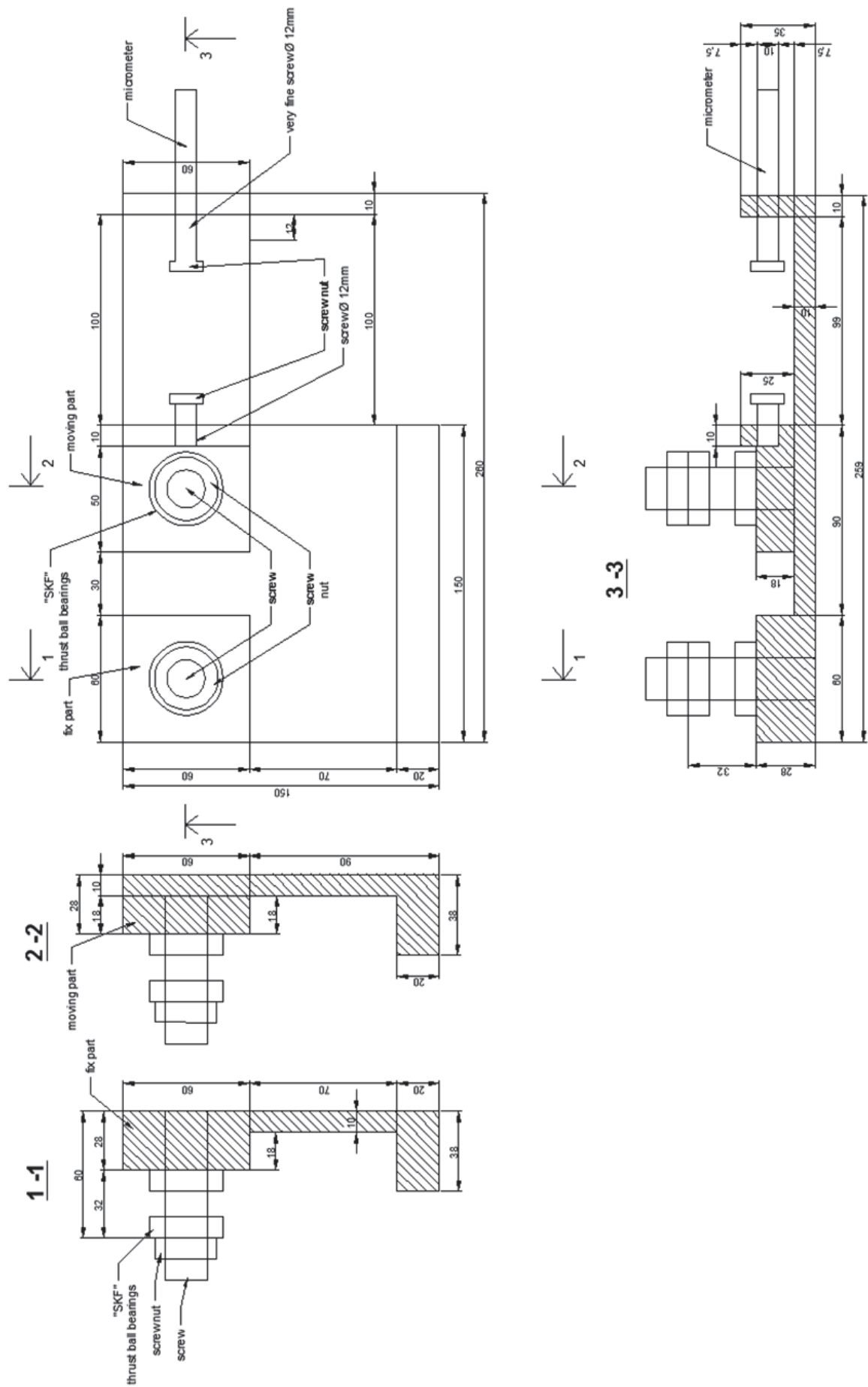


Fig. 2.6. New DTU uniaxial tensile test stand

### 3. Experimental Approbation of the Newly-developed Methodology

By using the new methodology of determining long-term properties and crack development in cement composites in laboratory conditions characteristic values of increased precision for actual properties of materials can be obtained. Similarly it can be used to evaluate effect of various internal and external factors, for instance, cement composite age and impact of environmental conditions on the operation of structural elements that cannot be assessed by theoretical calculations and that is maximally close to the environmental conditions, loading amount and duration of the structures, as well as geometric properties of structures. These properties are determined for the cement composite composition intended in the project that can differ from the information in standards.

The new methodology ensures determining the necessary properties of a material and parameters necessary for safe structural calculations. It is universal and applicable for determining long-term properties and crack development research for various cement composites and it is approbated for ultra-high strength cement composites, cement composite specimens of various age, specimens of different geometric shapes in two humidity concentrations. The methods within the methodology were tested on 15 various cement composites. In the experimental tests cubes, prisms, cylinders and plate-type notched specimens (CT and Coupon) were tested.

The compositions of cement composites were made and concreted, the preparing and experimental tests of specimens were done in laboratories of Riga Technical University (RTU) Faculty of Civil Engineering (BIF) Departments of Construction Materials and Construction Product ( $B_m$  un  $B_i$ ), Structural Engineering (BK), Structural Analysis ( $B_M$ ) and Denmark Technical University (DTU) Civil Engineering Faculty (BYG)

In total the following cement composites were made and tested (graphs show designation and transcription of various cement composites):

- PS — normal strength concrete. Cubic compression strength at 28-day age ~30 MPa, tested only in crack tests, specimen dimensions 150 × 150 × 12 mm;
- 20 % S — high strength cement composite that has 20 % borosilicate lamp glass micro size part powder obtained from reused lamp glass and used as an additive replacing a part of cement amount. Cubic compressive strength at 28-day age ~60 MPa. Long-term test specimen dimensions 40 × 40 × 160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 51 day; loading level in long-term load tests 40 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static (permanent) load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry.
- 40 % S — high strength cement composite that has 40 % borosilicate lamp glass micro size part powder obtained from reused lamp glass and used as an additive replacing a part of cement amount. Cubic compressive strength at 28-day age ~55 MPa. Long-term test specimen dimensions 40 × 40 × 160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 51 days; loading level in long-term load tests 40 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests

the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;

- Ref S — high strength cement composite (reference composition for cement composite with borosilicate lamp glass additive). Cubic compressive strength at 28-day age ~63 MPa. Long-term test specimen dimensions 40 × 40 × 160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 51 days; loading level in long-term load tests 40 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;
- ECC — engineered cement composites — normal strength cement composite belonging to fibrous concrete type cement composited, but it is characterized by higher tensile strength and multiple cracking when tensile stress increases. Cement composite composition is micromechanically made of fly ash, sand (maximum size 0.18 mm), quartz powder, cement and water. Cubic compressive strength at 28-day age ~40 MPa, tested only in crack tests, specimen dimensions 150 × 150 × 12 mm;
- ECC PVA — engineered cement composites with PVA (2 %) fibres. Cubic compressive strength at 28-day age 47 MPa. Long-term test specimen dimensions Ø 40 × 160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 28 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static load for 815 days — 2 years and 3 months; air-dry;
- NS M — high strength cement composite with a 1 % montmorillonite mineral nano size particles that in their essence is a powder of very fine, specially processed clay particles as an additive replacing a part of cement amount. Cubic compressive strength at 28-day age ~55 MPa. Long-term test specimen dimensions 40×40×160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 57 days; loading level in long-term load tests 40 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;
- Ref M — high strength cement composite (reference composition for cement composite with montmorillonite mineral nano additive). Cubic compressive strength at 28-day age ~78 MPa. Long-term test specimen dimensions 40 × 40 × 160 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 57 days; loading level in long-term load tests 40 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;
- HSC PVA MS — ultra-high strength cement composite with PVA fiber “cocktail” (2 %) and micro silica additive. Cubic compressive strength at 28-day age ~112 MPa. Long-term test specimen dimensions Ø 47 × 190 mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 28 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties' tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;

- HSC PVA NS — ultra-high strength cement composite with PVA fibre “cocktail” (2 %) and micro silica and nano silica additive. Cubic compressive strength at 28-day age ~110 MPa. Long-term test specimen dimensions  $\varnothing 47 \times 190$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 2 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;
- HSC MS REF — ultra-high strength cement composite without fibers (reference composition for cement composition with PVA fiber “cocktail” (2 %) and micro silica and nano silica additive). Cubic compressive strength at 28-day age ~128 MPa. Long-term test specimen dimensions  $\varnothing 47 \times 190$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 28 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 50 days; air-dry;
- HSC M — ultra-high strength cement composite an 1 % montmorillonite mineral nano size particles that in their essence is a powder of very fine, specially processed clay particles glass as an additive replacing a part of cement amount. Cubic compressive strength at 28-day age ~103 MPa. Long-term test specimen dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 51 days; loading level in long-term load tests 30 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 40 days; air-dry;
- HSC R — ultra-high strength cement composite (reference composition for cement composite with montmorillonite additive). Cubic compressive strength at 28-day age ~100 MPa. Long-term test specimen dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 51 days; loading level in long-term load tests 30 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 90 days, but in recovery — 30 days; air-dry;
- HSC PVA 0.6 % — ultra-high strength cement composite with PVA fibers (0.6 %). Cubic compressive strength at 28-day age ~78 MPa. Long-term test specimen dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 1, 4, 7 and 14 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 28 days, but in recovery — 7 days; air-dry.
- HSC R (PVA) — ultra-high strength cement composite (reference composition for cement composite with PVA fibres). Cubic compressive strength at 28-day age ~78 MPa. Long-term test specimen dimensions  $40 \times 40 \times 160$  mm; in the beginning of experimental tests the age of cement composite specimen 1, 4, 7 and 14 days; loading level in long-term load tests 25 % of ultimate stresses; in the long-term properties’ tests the specimens were placed under constant static load for 28 days, but in recovery — 7 days; air-dry;

Cement composite compositions were made in accordance with the design rules of recipe. After becoming of the certain age the specimens were prepared for experimental tests, prior to that weighting them and checking the dimensional compatibility of specimens.

In order to determine the strength of cement composites at least three specimens of each composition were subjected to compression or tension tests. The average ultimate strength value was applied to calculate the amount of applied loads to creep specimens.

The long-term properties' tests were carried out at RTU laboratory. Creep specimens were placed in lever test stands (see Fig. 3.1. and 3.2.) and loaded with a constant stress level that was 20–40 % of ultimate load in the appropriate cement composite age. Creep specimens were left under permanent load until 90 days, but in recovery (without load) up until 30 days. In parallel to tests of creep in compression also shrinkage tests were carried out at the same temperature and humidity conditions.



Fig. 3.1. Determination of uniaxial compression creep strains (RTU lab)



Fig. 3.2. Determination of uniaxial tensile creep strains (RTU lab)

Crack development research was carried out in DTU laboratory, using universal test equipment “Instron 8516” or DTU newly made test stand in tension and loading the specimens with the speed of 0.005 mm/s (see Fig. 3.3. and 3.4). In parallel to crack mouth opening displacement with strain gauge, determining of crack initiation, development, character and crack mouth opening displacement, using digital image-based monitoring system.



Fig. 3.3. Determination of tensile strength and uniaxial tensile crack development research (DTU lab)



Fig. 3.4. Determination of tensile strength and uniaxial tensile crack development research with the new DTU tensile test stand (DTU lab)

Tensile strength and crack mouth opening displacement were also determined at RTU laboratory, see Fig. 3.5. on specimens  $150 \times 70 \times 12$  mm;  $150 \times 150 \times 12$  mm with notches, placing the specimens in the universal test equipment "Instron E3000". Loading speed 0.03 mm/s.

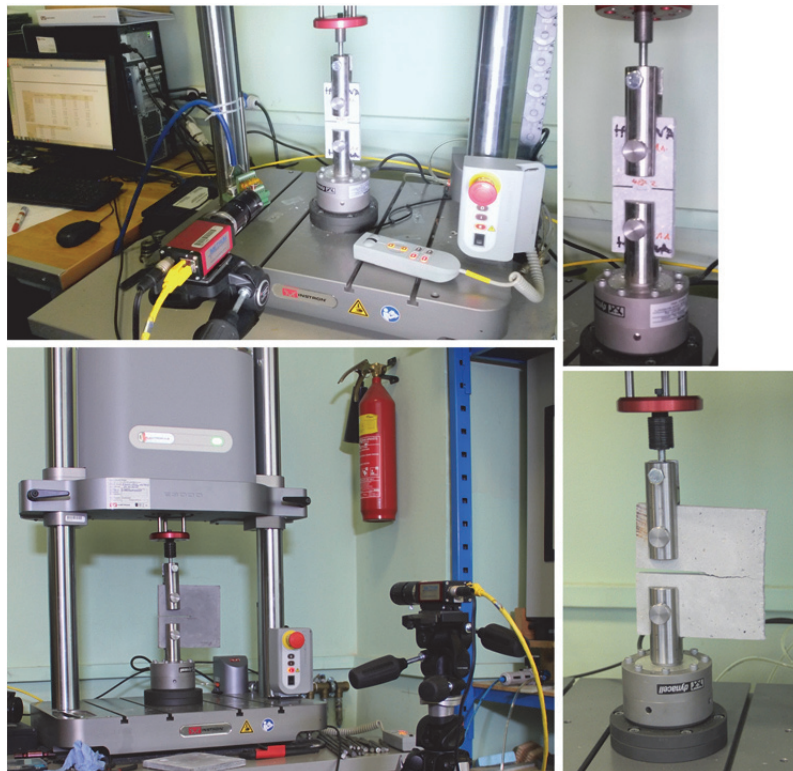


Fig. 3.5. Determination of tensile strength and crack mouth opening displacements (RTU lab)

#### 4. The Main Results of Experimental Approbation of Methodology and Their Analysis

During approbation of methodology the values of strength, deformability, long-term and durability properties of various new cement composites were found and parameters for designing of safe structures were determined, which have not been found out up until now. Influence of various factors on their short-term and long-term properties:

- influence of various strength (normal, high, and ultra-high);
- influence of two humidity concentrations (air-dry and moist);
- influence of various cement composite additives (borosilicate lamp glass, montmorillonite, nano- and micro silica, PVA fibres);
- influence of various cement composite maintenance time or execution of experiments in various cement composite ages; various specimens' shapes;
- influence of dimensions or the scale factor.

Experimentally obtained results for various cement composite tests confirm the hypothesis by various leading researchers (Neville, Brooks, Bazant, Gardner, Lockman, Fanourakis, Gilbert, Ranzi, Baweja, Kim, Wittmann, Rusch and others). The obtained results indicate: the higher density of cement composite, the stronger it is and strain is lesser (it can be explained by the unfilled gel space relative amount in the cement stone: by the amount of empty space in the cement stone larger, by the strength is lower and the creep strain larger. Amount of gel space is in its turn closely related to the amount of cement and water/cement proportion, which, as it is known, is decreased to obtain increase in cement composite strength). Similarly, hypothesis that the dryer and older the cement composite, the smaller the strain was confirmed, which can be explained with cement composite chemical processes during its drying. Similarly, it has been experimentally proved that cement composite final strength increases with cement composite age and it is not substantially affected by its subjection to loading.

Figure 4.1. shows compression strength of various cement composites.

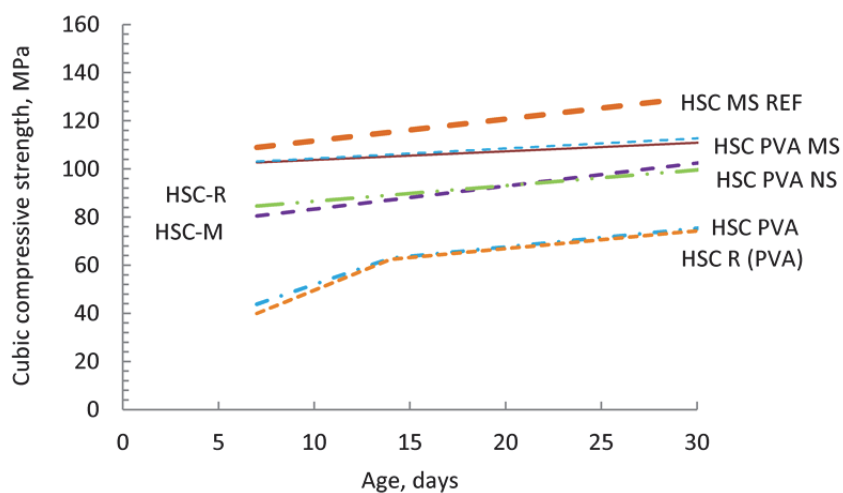


Fig. 4.1. Cubic compression strength of different kind of high and ultra-high strength cement composites

Checking the modulus of elasticity in various humidity concentrations, it was established that for moist specimens the modulus of elasticity was higher than for air-dry specimens that could be explained by the fact that for moist specimen the linking among cement composite matrix particles have not yet occurred. The same is proved by experimental tests in which amount of creep strain in various humidity concentrations has been compared. It has been established that moist specimens creep less than specimens subjected to drying.

Tests of young age cement composite creep strain in compression confirm the hypothesis that by increase of cement composite age, amount of elastic strain decreases and value of modulus of elasticity increases, similarly amount of creep strains decrease in time and value of creep modulus decreases which can be explained with decrease of gel amount in cement stone.

Experimental data also confirm that high strength cement composites creep less than normal strength cement composites, and this difference is ~50%. It is also explained by the fact that high strength cement composites are more fine-aggregated; therefore, their cement composite matrix packaging is denser and in such cement composites water/cement proportion is lower, which also affect amount of long-term properties' strains.

Figure 4.2. shows total, relative strains of various cement composites.

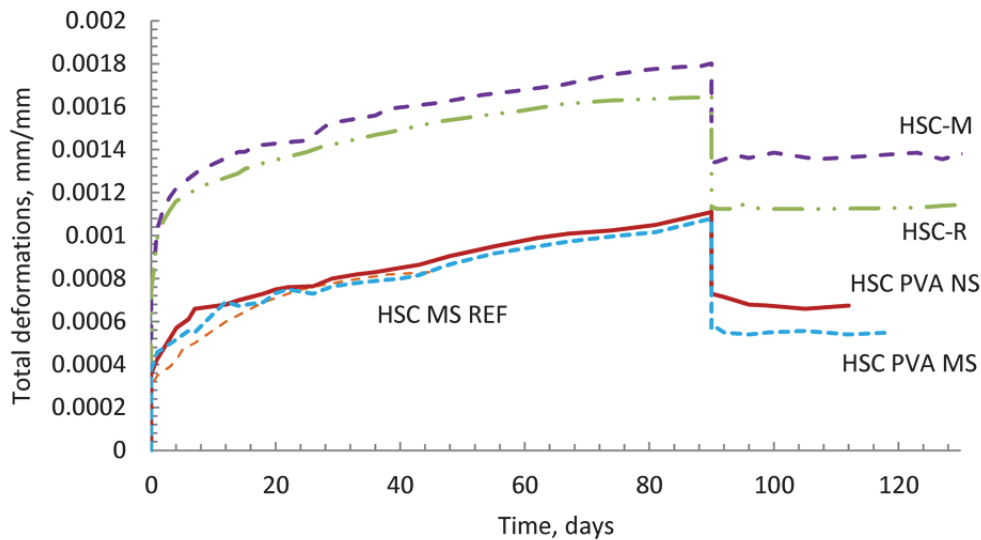


Fig. 4.2. Total, relative uniaxial strain in compression of different kind of high and ultra-high strength cement composites

Creep coefficient shows proportion of creep strain and elastic strain. Experimental data for various composition and strength cement composites show that for high strength cement composite creep coefficient, the same as for normal strength cement composite, is within margins of 0.5 to 3, which does not comply with data of literary sources which predict significant decrease of this coefficient. The obtained results show that proportion of elastic and creep strain for normal and high strength cement composites maintain similar proportions. Figure 4.3. shows creep coefficients of various cement composites.

The difference of values of theoretical long-term properties for newly made RTU and DTU cement composite composition to the experimental data exceeds 20 % which confirms that different internal and external factors significantly affect properties of cement composite and existing empirical models are not applicable and can be applied only for normal strength cement composites and only in case of large correspondence can be applied. The obtained large difference in results confirms that the most precise way of determining the long-term properties of newly made cement composites is laboratory tests.

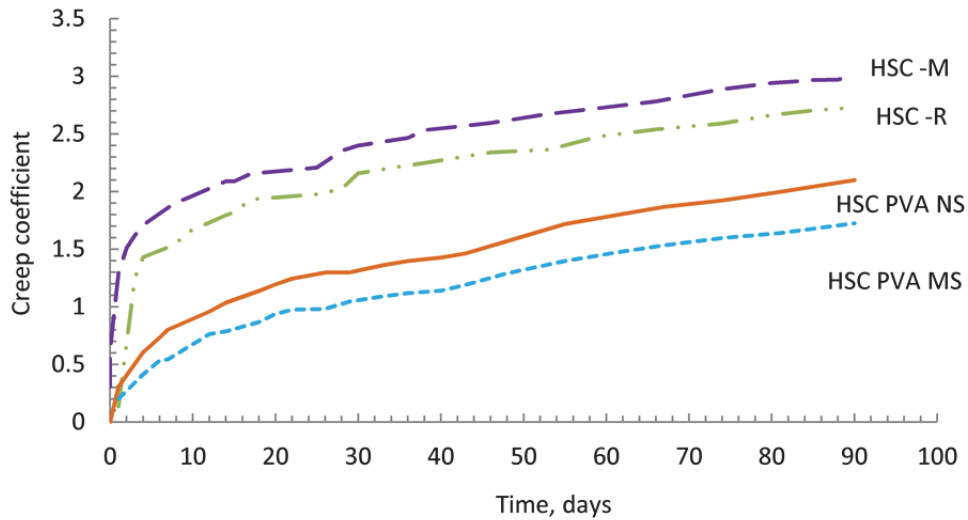


Fig. 4.3. Creep coefficient in compression different kind of high and ultra-high strength cement composites

Specific creep is the most objective parameter of long-term loading as it excludes stress effect on long-term strains. Figure 4.4. shows specific creep of various cement composites

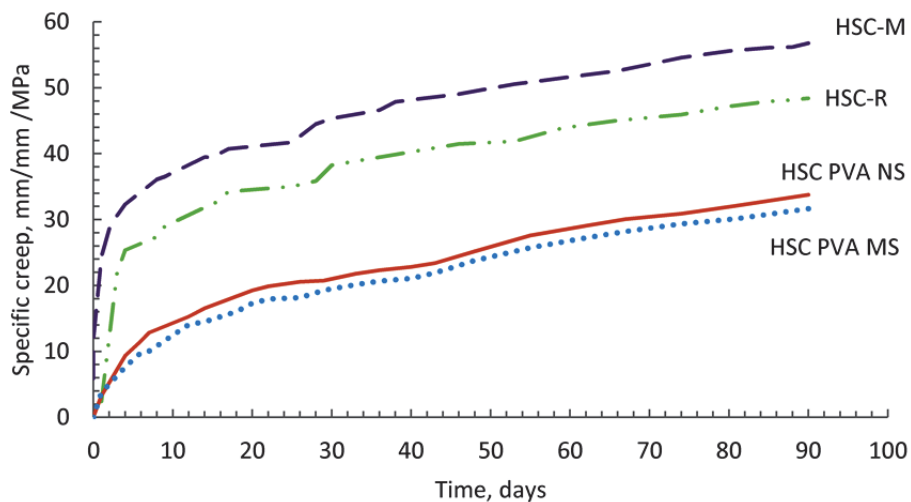


Fig. 4.4. Specific creep in compression of different kind of high and ultra-high strength cement composites

Creep modulus is the proportion of applied stress and creep strain. This long-term parameter can be used for determining displacement of long-term loaded structures after a long time period. Figure 4.5. shows creep modulus of various cement

composites. As it can be seen, creep modulus has the tendency to decrease in time which can be explained by increase of creep strain and total strain. The lower the creep modulus, the less creep in the material. Displacement amount rapidly increases in the first week, then the displacement speed in time decreases and approximately after 60 days significant changes in displacement cannot be observed anymore.

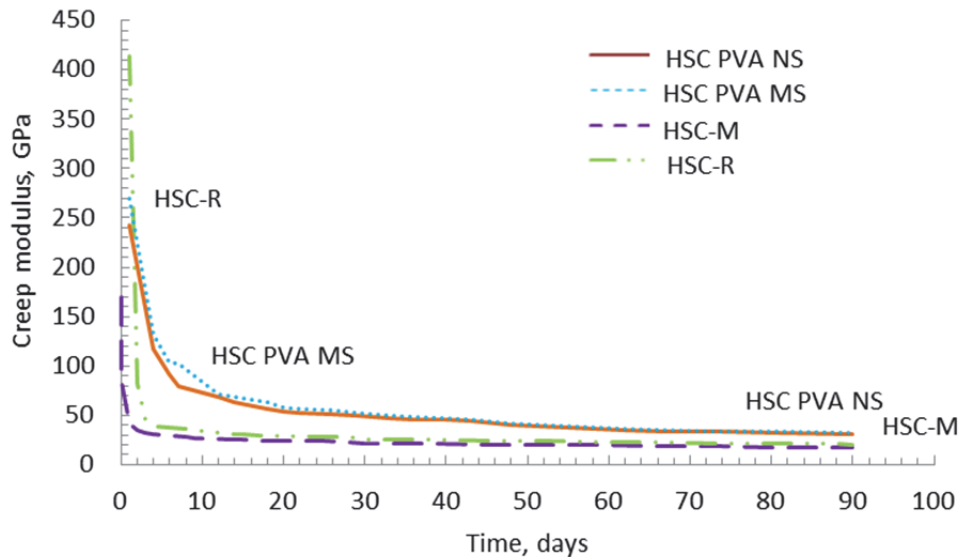


Fig. 4.5. Creep modulus in compression of different kind of high and ultra-high strength cement composites

Similarly it was experimentally determined that montmorillonite added to cement composites neither significantly improves nor decreases the mechanical and deformability properties.

Micro additive of borosilicate lamp glass which partially (20 %) replaces cement provides results of equal value (difference is up to 20 %) to the reference cement composite results; therefore, it must be concluded that the use of such new cement composite made with alternative, more ecologic, nature-friendly mineral additive of recycled material in construction is permissible.

Nano silica mineral additive does not have significant effect on parameters of cement composites strength, deforming, long-term and durability. The difference in results between cement composites with and without nano silica is within 2–7 % margins.

Similarly, it can be seen from the experimental results that PVA fibers improve long-term and durability properties of normal strength cement composites. The amount of creep strain decreases for ~50–80 %, whereas application of PVA fibers in high and ultra-high strength cement composites does not provide improvements neither in strength, nor long-term properties, which can be explained by the fact that distribution of fibers is irregular, random in character, as well as the fact that in mixing process more air is attracted and gaps are formed, and it is technologically harder to work such fibrous cement composite in cement composite moulds; therefore, the cement composite composition is not uniform, more porous.

Experimental durability tests clearly prove and confirm the hypothesis that by applying fiber “cocktail” higher material behavior and destruction effectiveness is

reached than when using only one type of fibers, as every length (type) of fibers has their own function: the short fibers strengthen cement matrix and perform clamping of long fibers, but long fibers connect large cracks, making a fiber bridge between edges of cracks and does not allow brittle, instant failure of cement composite, which is extremely important in exploitation of load-bearing structures. Figure 4.6. shows relationship of tension load and crack mouth opening displacement of various cement composites.

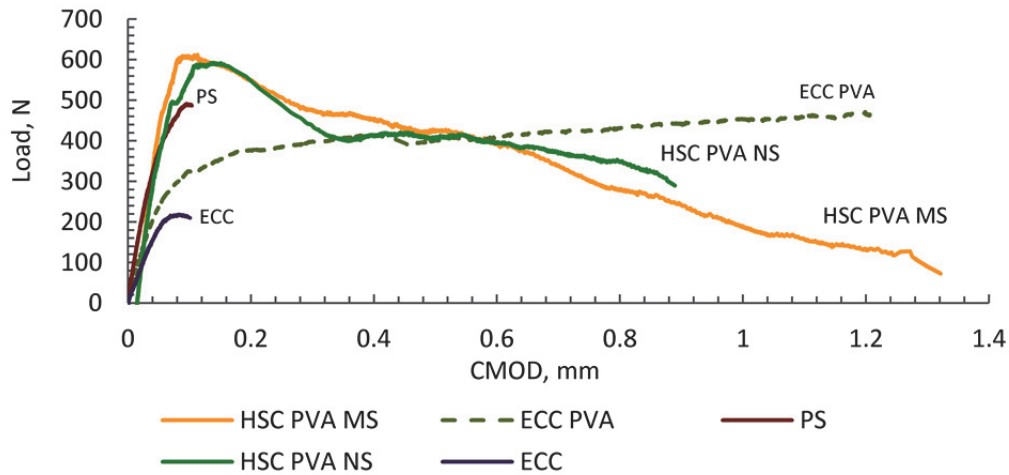


Fig. 4.6. Tensile strength and crack mouth opening displacement (CMOD) of different kind of cement composites

Figure 4.7. shows the tensile multiple cracking of ECC matrix by using digital image-based monitoring system "Aramis".

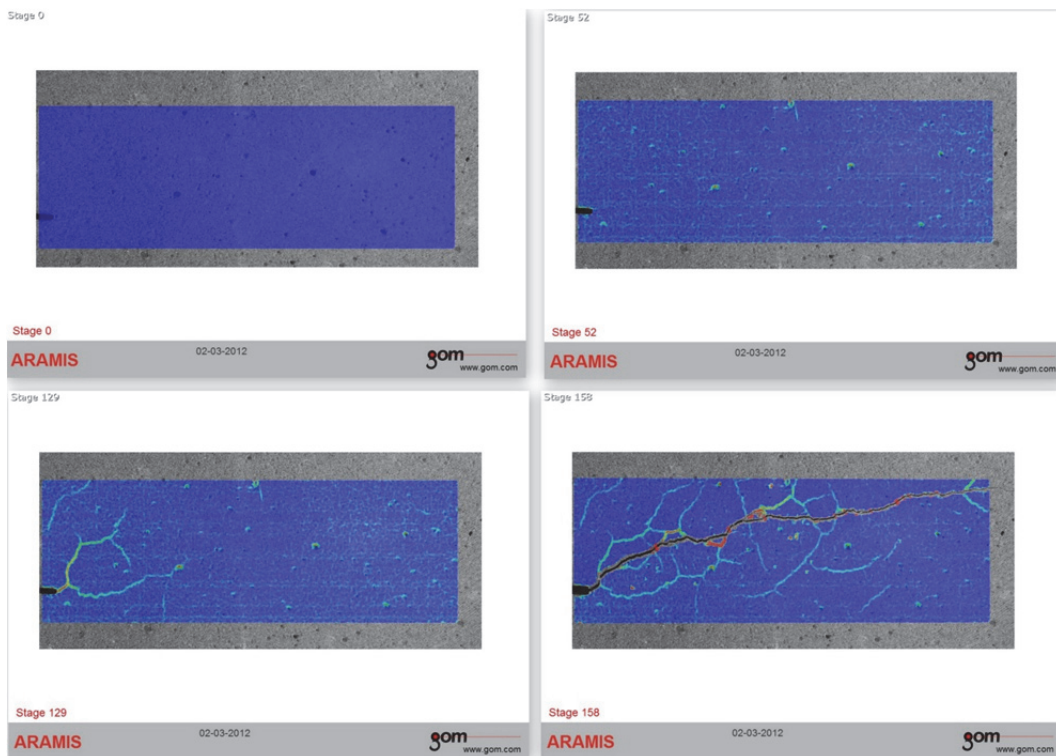


Fig. 4.7. Tensile multiple cracking of ECC matrix by using digital image-based monitoring system "Aramis"

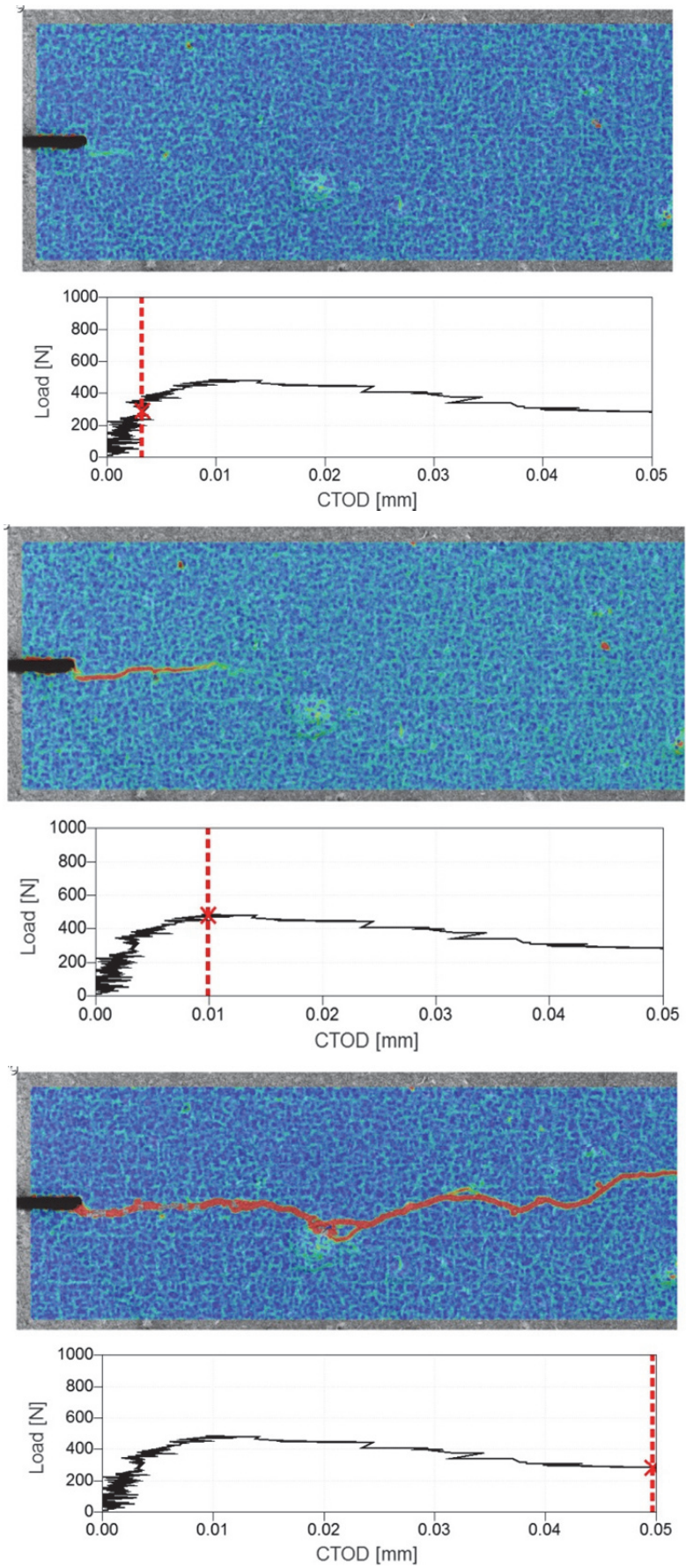


Fig. 4.8. Crack development of cement composite with nano silica mineral filler and the "cocktail" of two types of PVA fibers by using digital image-based monitoring system "Aramis"

Micro-cracks formed in cement composites when it has reached ~10–20 % of ultimate strength. By increase of stresses, micro-cracks increase, combine and, reaching material specific critical value  $K_{IC}$ , i.e., ~60–80 % of ultimate strength, initiation of the main crack initiate (see Fig. 4.8.) which is followed by stabilization of the crack. When stresses at the end of the crack have reached their critical value (material has reached the ultimate strength in tension), the crack begins to open and rapidly increases until failure of material.

To evaluate the compliance, precision and stability of laboratory obtained data statistical analysis of materials was carried out. Errors obtained in experiments were excluded by  $3\sigma$  method. Compliance and precision of results was determined in the interval of confidence probability 95 % with standard deviation value  $S_d$  and variation coefficient  $V$ . Standard deviation shows cement composite dispersion around average value. The closer the obtained result to the average value, the smaller the number of standard deviation. Variation coefficient is the proportion of standard deviation and average value of results, showing the variability of values around the average value. In a general case the dispersion of material properties is related to heterogeneous of a material, production technology, geometric instability of a material, testing methods, precision of equipment and measuring device and proper behavior.

Demonstrative processing of statistical data is shown for one cement composite with micro silica mineral additive and PVA fiber “cocktail”. In tension loading for cubic specimens  $S_d$  is 2.5 MPa and variation coefficient is 2.1 %, but for cylindrical specimens  $S_d$  is 6 MPa and  $V$  is 7.2 %, see Fig. 4.9.

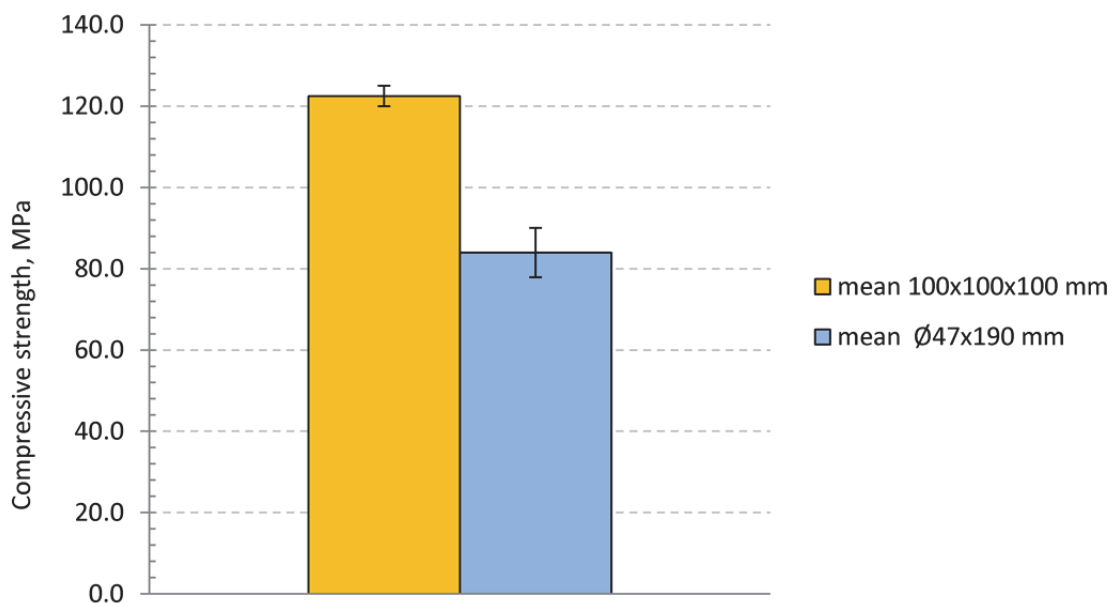


Fig. 4.9. The standard deviation of compressive strength determined with cubic (100 × 100 × 100 mm) and cylindrical (Ø 47 × 190 mm) specimens

Whereas is tension loading in plate-type specimens  $S_d$  is 0.2 MPa and  $V$  is 5.6 %. Standard deviation of modulus of elasticity determined for cylindrical specimens is 5.2 GPa and variation coefficient is 10.7 %. The total relative uniaxial strain in compression maximum  $S_d$  value is  $111.5 \text{ mm/mm}\cdot 10^{-6}$ , but average  $S_d$  value is  $79.7 \text{ mm/mm}\cdot 10^{-6}$  and the maximum variation coefficient is 17.7 %, average  $V$  —

10.7 % (see Fig. 4.10). Shrinkage uniaxial strain maximum  $S_d$  value is  $43 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$ , but average  $S_d$  value is  $24.8 \text{ mm/mm} \cdot 10^{-6}$  and the maximum variation coefficient is 22.3 %, average  $V$  — 8.5 %. The permissible variation coefficient indicated in literary sources for strength, as well as long-term tests is 15–20 % (Omar *et al.*, 2008; Tarnopolskii, Kincis, 1985; Скудра *et al.*, 1971; Neville *et al.*, 1983).

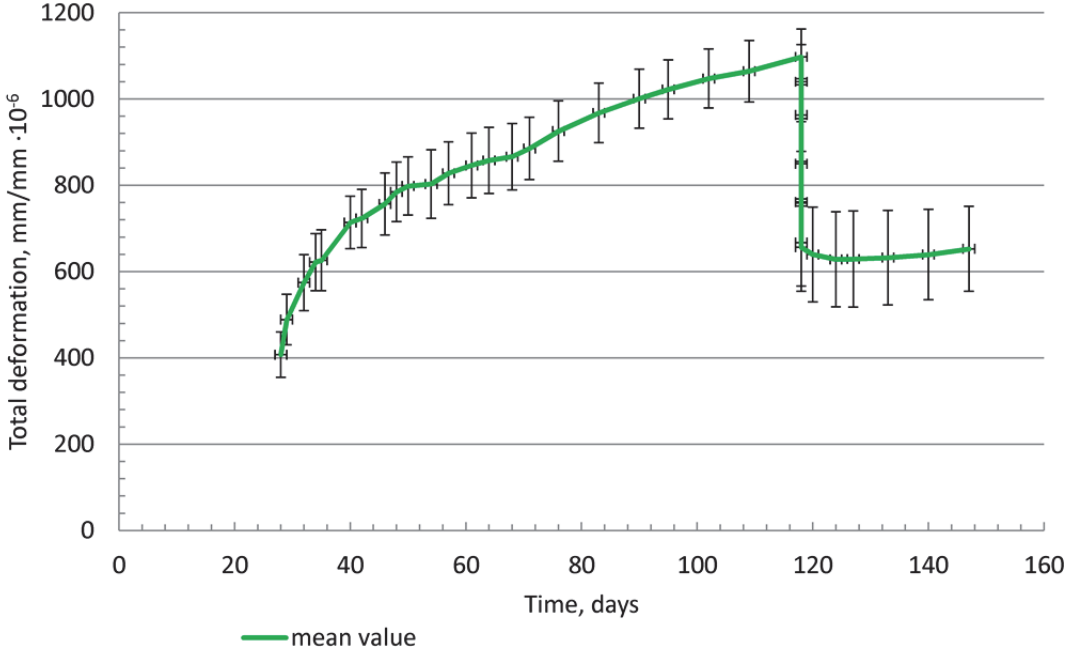


Fig. 4.10. The standard deviation of total uniaxial long-term strain in compression determined with cylindrical ( $\varnothing 47 \times 190 \text{ mm}$ ) specimens

## 5. Recommendations

Based on the experimental results obtained in the work, new descriptive equations of new, high strength cement composites have been determined that are to be used for predicting of creep and shrinkage strains for structures of similar material.

The descriptive equations provided by the author are demonstrated for single cement composite — high strength cement composite with micro silica mineral additive and PVA fiber "cocktail".

The descriptive curves of total relative, uniaxial strain and uniaxial drying shrinkage strain results (see 5.1., 5.2) and their exponent equations are  $Y = a + b \cdot \ln(x) + c \cdot \exp(-x)$  where  $a$ ,  $b$  and  $c$  are experimental constants,  $x$  — time (days), determination coefficient  $R^2 = 0.9932$ .

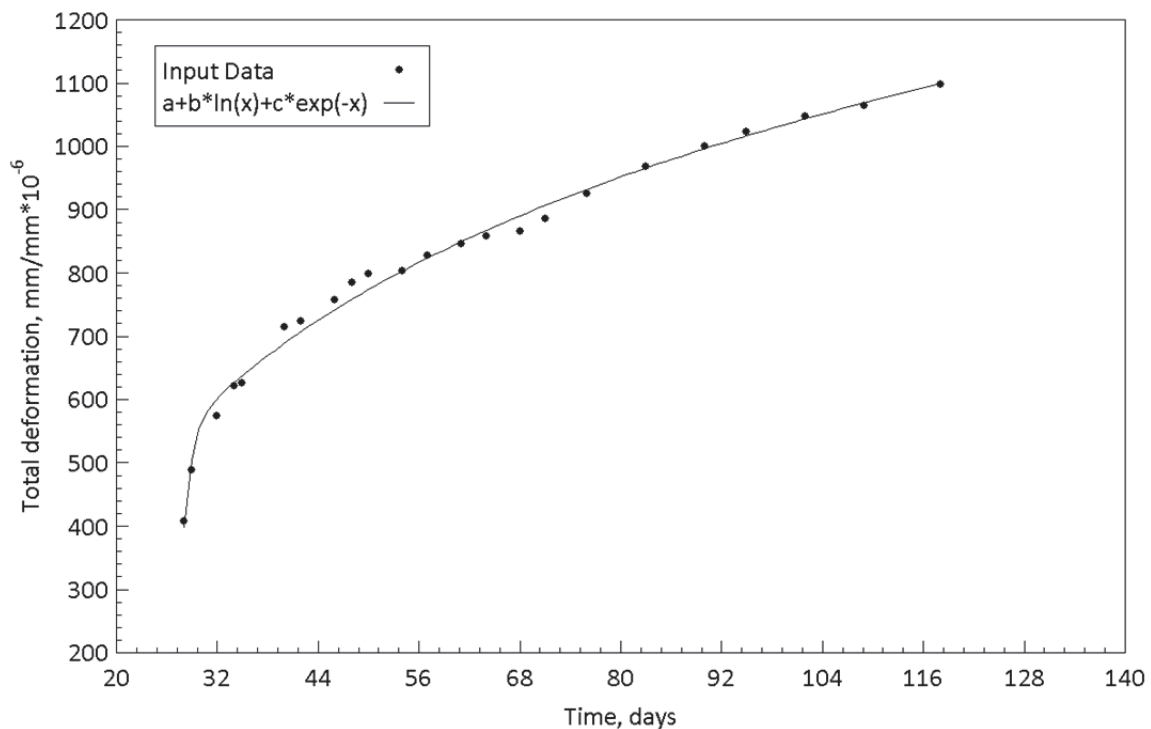


Fig. 5.1. Describing curve of total relative, uniaxial long-term strain and exponent equation of high strength cement composite with micro silica mineral additive and PVA fibres "cocktail"

In standards and norms phenomena of creep and shrinkage are insufficiently expanded and the values provided can be applied only for cement composites of limited strength range. To be able to design and build structures of high strength cement composites, changes in the existing European standard EN 1992-1-1:2005 "Design of concrete structures. Part 1-1: "General rules and rules for buildings"" must be establish. Changes to regard to limited concrete strength class should be established to the standard. The strength class should be increased so that the cubic strength would exceed 105 MPa. Similarly, the existing scheme for determining creep coefficients should be remade, provided for it also for higher strength cement composites or by introducing additional coefficients that are to be applied to recalculate the available normal and high strength cement composite creep coefficients to higher strength cement composite creep coefficients.

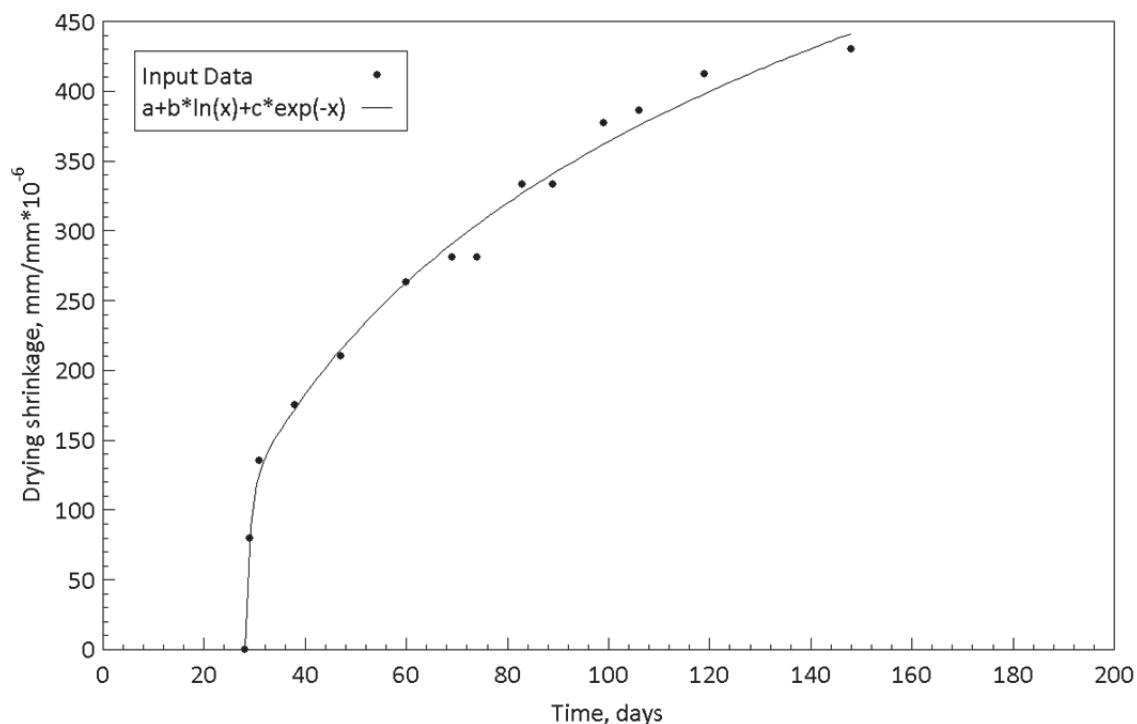


Fig. 5.2. Describing curve of uniaxial drying shrinkage strains and exponent equation of high strength cement composite with micro silica mineral additive and PVA fibres "cocktail"

Similarly, a reference should be added that in addition to predicting long-term and durability properties of complex and significant as well as deformation sensitive structures, laboratorial properties' determination tests executed in conditions similar to environment in which the structure is predicted to operate, to verify the correctness of calculated of schematically determined values. The existing creep coefficients, as well as standardized empirical curves are not to be applied for deformation sensitive and nonstandard — thin-walled and large-span structures.

To be able to perform correct engineering calculations for the new cement composites of improved composition and properties, it would be necessary to create experimental data library, collecting and analyzing the experimental results and finding the coefficients for geometric shapes, cement composite age, loading duration, environmental conditions and other affecting factors, which should be applied in determining precise values of long-term parameters.

It is necessary to establish in the European Standard EN 1992-1-1:2005 "Design of concrete structures. Part 1-1: "General rules and rules for buildings"" additional long-term properties for predicting structural behavior — creep modulus that is to be applied by executing determining of long-term loaded structure deformations. Creep modulus is the proportion of applied stress and creep strain. Similarly, a reference should be added when such parameter is to be calculated.

With an aim to implement of laboratorial tests, standard EN 12390 "Testing of cured concrete" regulated in Europe should be supplemented with cured concrete creep strain in compression and in tension determination methods, where the test procedures and data acquisition would be described, as well as further data application in calculating creep coefficient, specific creep, and creep modulus. Standard should also

be supplemented with information on crack development research implementation methods — digital image-based monitoring system.

For predicting structural behavior in effect of long-term load it is recommended to apply total creep (in case of compression) and shrinkage strain value, as both phenomena are summarized and thus provide a more disadvantaged case that would be directed to safety side of structural design. Whereas creep strains in tension and shrinkage strain are with an opposite sign and are mutually reducing occurrences.

To determine creep strains, which is especially attributed to cement composites at an early age when they have not yet reached their conditional final strength and, especially, by implementing correct determination of creep strain in tension, from the total strains shrinkage strain are to be subtracted, which were determined for cement composites of identical composition and specimens' shape and dimensions and in equal environmental conditions as for creep strain, measuring strains in the same way as for creep specimens — in the middle of specimen.

Cement composite strains caused by tension are many times smaller than strains caused by compression; therefore, recording of such amount of strains is problematic; to determine precise strain values for creep and shrinkage strains it is recommended to use digital image-based monitoring systems.

During the development of the doctoral thesis, short-term, long-term, and durability properties of various new cement composites were determined that had not been determined before. To implement improvement of new compositions and their further application in practical construction, it is necessary to repeat the experimental tests increasing the statistical number of specimens.

It would be necessary to continue the experimental and analytical research in regard to high strength cement composites commenced in the doctoral thesis, checking other types of high and ultra-high strength cement composites with an intention to find more rational, optimally better cement composite compositions for the contemporary increased structural requirements — for increased loads, increased spans of structural elements, decreased cross-section dimensions, increasing geometrical complexity of elements and safe exploitation and sustainability of structures. Development of statistical library of experimental data, which is necessary for determining precise transition coefficients and long-term properties of higher strength cement composites, should also be continued.

## Conclusions

The objective and tasks defined for the doctoral thesis have been achieved. The research has resulted in a methodology for determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as for research and analysis of tensile crack development in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites (EFACC).

The research performed for the doctoral thesis has yielded the following main conclusions.

1. The developed methodology for determination of uniaxial compressive and tensile creep strains and uniaxial drying shrinkage strains, as well as for research and analysis of tensile crack development in extra fine aggregate ( $\leq 5$  mm) cement composites allows to measure in laboratory conditions the actual uniaxial compressive and tensile creep strains, uniaxial drying shrinkage strains and crack mouth opening displacement values in normal (w/c ratio  $\geq 0.45$ ;  $f_{ck28} \approx 12$ –40 MPa), high (w/c ratio  $\leq 0.4$ ;  $f_{ck28} \approx 40$ –120 MPa) and ultra-high (w/c ratio  $\geq 0.2$ ;  $f_{ck28} \approx 120$ –400 MPa) strength EFACC, which cannot be determined using the existing standardized methodologies and empirical models.
2. The methodology has been approbated using specimens of 15 normal, high and ultra-high strength EFACC, at different ages and with different geometrical shapes, in two different humidity conditions, under constant loading. During the approbation process, the compressive and tensile strength values, the moduli of elasticity, the values of uniaxial tensile and compressive creep strains, the values of uniaxial drying shrinkage strains, and the displacements of tensile crack mouth openings of the new cement composites were experimentally obtained, and research on the initiation, development, propagation, and characteristics of the tensile cracks was performed, which has not been done for these materials before. It has been determined that at the confidence probability of 95 %, the maximum compressive strength variation coefficient ( $V$ ) is within an interval of 2–8 %, and the maximum  $V$  of total uniaxial strains of specimens placed under long-term load is within an interval of 16–22 %, which is a very good indicator for cement-based materials.
3. The obtained results prove that in both normal and high strength cement composites the time laps of the ratio between elastic strains (at the moment of the loading) and creep strains is between 0.5 and 3.0, which does not correspond to EN 1992-1-1:2005 “Design of concrete structures” which provides that with the strength increasing the value of the creep coefficient should decrease.
4. The modified stand for determining uniaxial creep strains under tension and the adopt stand for determining uniaxial creep strains under compression allows testing cement composites with the maximum aggregate size of 5 mm, to use specimens ( $\leq 70$  mm) that are more characteristic to the dimensions of high and ultra-high strength cement composite structures. By using these stands, it is possible to apply constant loading on the specimens and to keep it unchanged for a longer period of time. During the experiments, it is not necessary to adjust for

stress levels, the calibration curves are linear, no energy resources are consumed and at the same time material savings are ensured. It is important to note that a standard for the determination of tensile creep strains in cement composites has not been developed anywhere in the world.

5. The developed new uniaxial tensile testing stand enables the research of crack and micro-crack development. The characteristics of the experimentally obtained stress-strain curves are closer to the theoretical assumptions and the results of other authors, and they show good correlation with the results obtained using the digital image-based monitoring system. The experimental approbation proves that the new uniaxial testing stand is better suited for research of cracks and micro-cracks in small specimens ( $150 \times 150 \times 12$  and  $100 \times 50 \times 12$  mm) of high and ultra-high strength EFACC in comparison with the universal testing equipment, which is not suitable for small specimens and the low speed of loading. The universal equipment is also not suited for research of micro-cracks, as it creates too much movement, which prohibits taking sharp, high resolution photos.
6. The proposed method for determining the uniaxial tensile creep strains using Compact Tension (CT) specimens allows to reduce the scattering of the experiment data. By using CT specimens, the failure of the them can be predicted, and strain data can be collected by using only one digital strain gauge, unlike in the methods suggested by other authors that use two or more strain gauges.  
The problem of determining tensile strains has been solved by using a digital image-based monitoring system with an accuracy of  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ , as the tension-induced absolute deformations in cement composites are 10–20 times smaller than the strains caused by compression, and the registration of such small strains is problematic. This method allows identification and research of the initiation, growth, branching, joining, stabilization, and opening stages of cracks and micro-cracks. Methods of this type are probably the only solution how to determine the properties of materials for structures with specific use conditions, on which it is not admissible to perform crack initiation and development tests.
7. The currently used creep and shrinkage strain approximation models cannot be applied, and they describe the uniaxial creep and uniaxial drying shrinkage strain processes of the new, different EFACC materials incorrectly, because there is a large discrepancy between the actual internal and external factors of influence. Therefore models describing the uniaxial strain processes of the total long-term strain and drying shrinkage strain of EFACC materials — exponential equations providing the best correlation with the experiment data (coefficient of determination  $R^2 = 0.993$ ) — have been proposed, allowing the prediction of long-term uniaxial total and drying shrinkage strain values in structural elements made of a similar material.
8. It has been proven that the methods for determining uniaxial compressive and tensile creep strains yield reliable results ( $V \leq 22 \%$ ), and are suitable for cement composites of various strength; therefore it has been recommended to supplement the European standard EN 12390 “Testing hardened concrete” with methodologies for determining compressive and tensile creep strains.

## PROMOCIJAS DARBA LITERATŪRAS ATSAUCES / LIST OF REFERENCES OF THE DOCTORAL THESIS

1. Aalborg White: CEM I 52,5R / Internets. — [http://www.aalborgwhite.com/media/pdf\\_files/aalborg\\_white\\_cem\\_i\\_52.5r.pdf](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, 3<sup>rd</sup> 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 // 5<sup>th</sup> 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. Eirokodekss 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, Radiņš I. Būvmehānikas ievadkurss. — Rīga: RTU izdevniecība, 2006.

44. Bumanis G., Sprince A. Betona agrās šķūdes 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. Cajs 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. 3<sup>rd</sup> 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, 11<sup>th</sup> 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. — 2<sup>nd</sup> 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 // 5<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> 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 2<sup>nd</sup> 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 // 37<sup>th</sup> 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 2<sup>nd</sup> 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, 4<sup>th</sup> 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: LIPM/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: LIPM/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. lpp.
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](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 Zaļa 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 5<sup>th</sup> 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. 6<sup>th</sup> Edition. Pearson Education, Inc., New Jersey, 2012. — PP. 67.
151. William D., Callister J. Materials Science and Engineering. 4<sup>th</sup> 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.

### **Par promocijas darba autori**

Andīna Sprince ir dzimusi 1983. gada 26. aprīlī Jelgavā, Latvijā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Būvniecības fakultātē 2006. gadā iegūts zinātņu bakalaura grāds būvniecībā, bet 2009. gadā iegūts profesionālā maģistra grāds būvniecībā (Mg. Sc. Ing.) un būvinženiera kvalifikācija.

A. Sprince ir Latvijā sertificēta inženiere. Pašreizējā darbavieta — docente RTU Būvkonstrukciju katedrā.



### **About the Author**

Andina Sprince was born in Jelgava, Latvia, on 26 April 1983. In 2006 she obtained a Bachelor of Science degree in Civil Engineering from Riga Technical University (RTU), Faculty of Civil Engineering, and in 2009 she obtained a Professional Master's degree in Civil Engineering (Mg. Sc. Ing.), as well as a civil engineer's qualification.

A. Sprince is an engineer certified to work in Latvia, and she is currently working as a lecturer at the Department of Structural Engineering of RTU.

## APSTIPRINĀJUMS / CONFIRMATION

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

I certify that the doctoral thesis I have presented for obtaining the doctor degree of engineering science of the Riga Technical University is my own work. The thesis has not been submitted to any other university for obtaining the scientific degree.

Andīna Sprince

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'A. Sprince', with a long horizontal flourish extending to the right.

27.01.2015.

Promocijas darbs satur ievadu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 92 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 172 lappuses, 2 pielikumi. Literatūras sarakstā ir 158 nosaukumi.

The doctoral thesis contains introduction, 5 chapters, conclusion and bibliography, 92 figures and illustrations, in total 172 pages, 2 appendices. There are 158 references in bibliography.