

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

Vadims GOREMIKINS

RACIONĀLA LIELLAIDUMA IEPRIEKŠ
SASPRIEGTA TROŠU KONSTRUKCIJA

Promocijas darba kopsavilkums

**Rīgas Tehniskās universitātes Būvzinātnes, Transporta un
satiksmes zinātņu nozaru Promocijas padome „RTU P-06”**

Zinātniskie vadītāji
Dr. sc. ing., profesors
D. SERDJUKS

Dr. habil. sc. ing., profesors
K. ROCĒNS

Rīga 2013

UDK 624.071.232(043.2)

Go 600 r

Goremikins V. Racionāla liellaiduma iepriekš
saspriegta trošu konstrukcija. Promocijas darba
kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2013. – 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Būvniecības un
rekonstrukcijas institūta 2012. g. 13. novembra
lēmumu, protokols Nr. 02/12

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



ISBN 978-9934-8235-6-5

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Aktuāla tautsaimniecības problēma ir ierobežotie izejvielu un enerģētiskie resursi. Šīs problēmas risināšanā nozīmīgu vietu ieņem slodzi nesošo konstrukciju svāra samazināšana, to laiduma un ilgmūžības palielināšana, ko iespējams sasniegt, izmantojot augstas stiprības materiālus kompleksi ar tradicionālajiem konstrukciju materiāliem, veidojot iepriekš saspriegtās stieptās konstrukcijas, kam spriegumu sadalījums pa šķērsriezumu ir vienmērīgs. Izmantojot augstas stiprības konstrukciju materiālus ar daudz lielāku īpatnējo stiprību (atbilstošās stiprības attiecība pret masas vienību) nekā tradicionālajiem materiāliem iepriekš saspriegtām un stieptām konstrukcijām, iespējams būtiski samazināt lietderīgās slodzes un konstrukciju pašvara attiecību (pie fiksēta laiduma), kas savukārt nodrošina izejvielu un enerģētisko resursu ekonomiju, veidojot šīs konstrukcijas.

Vislielākais laidums (1991 m) ir sasniegts, izmantojot iekārtās konstrukcijas. Bet iekārto konstrukciju trūkums ir kinemātisko pārvietojumu izraisītā lielā deformējamība. Efektīvākā kinemātisko pārvietojumu samazināšanas iespēja ir iepriekš saspriegto trošu kopņu izmantošana. Iepriekš saspriegtās trošu kopnes bez spiestiem elementiem paver iespējas nodrošināt lielu īpatnējo nestspēju, palielināt konstrukcijas stingumu, kā arī pēc vajadzības mainīt konstrukcijas pašsvārstību frekvences. Tomēr vairākos gadījumos, lai būtu racionāls sasprieguma līmenis, ar tradicionālajiem trošu kopņu veidiem nav iespējams nodrošināt vajadzīgo stingumu. Nepieciešams izstrādāt trošu kopnes, kam nebūtu spiestu stieņu – tas dotu iespēju palielināt iekārtās iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas stingumu.

Iepriekš saspriegtās trošu kopnes plaši lieto liellaiduma pārsegumu konstrukcijās, bet tiltu būvniecībā trošu kopņu izmantošanas tehnoloģijas ir izstrādātas gājēju un cauruļvadu tiltiem, kam salīdzinājumā ar autoceļu tiltiem raksturīga maza lietderīgā slodze. Nav detalizētu pētījumu par iepriekš saspriegto trošu kopņu lietošanas priekšrocībām un trūkumiem autoceļu tiltu būvniecībā.

Dinamisko aprēķinu veikšana ir reglamentēta tiltu projektēšanas sastāvdaļa. Iepriekš saspriegto iekārto tiltu pašsvārstību frekvenču noteikšana pašlaik tiek veikta, izmantojot darbietilpīgas diskrētās metodes. Trūkst vienkāršotas iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodes, kas pavērtu iespēju atvieglot aprēķinus konstrukciju variantu izstrādes procesā.

Tā, kā ar oglekļa šķiedrām stiegrotam plastikam (CFRP) salīdzinājumā ar tēraudu ir daudzkārt lielāka īpatnējā stiprība, izmantojot šos materiālus, var vairākkārt palielināt iekārto konstrukciju laidumu. Minēto konstrukciju drošumu iespējams palielināt, izmantojot hibrīdo kompozīto trosi, kam CFRP slānis ir pastiprināts ar tērauda joslām, kuru šķērsgriezums dažādos troses posmos ir dažāds, tā nodrošinot tikai minimālas spriegumu atšķirības visā troses garumā.

Tātad aktuāli ir izstrādāt aprēķina metodiku un noskaidrot iepriekš saspriegtās trošu kopnes stinguma palielināšanas un kompozītmateriālu izmantošanas iespējas, kā arī izstrādāt vienkāršotu iepriekš saspriegto iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču aprēķina metodi, kas kopumā pavērtu iespējas šo būvkonstrukciju plašākai projektēšanai, it īpaši liellaiduma nesošo konstrukciju variantu izstrādē.

Darba mērķis un uzdevumi

Izstrādāt racionālu liellaiduma iepriekš saspriegtās trošu konstrukcijas risinājumu, kas nodrošinātu trošu kopnes mazākus pārvietojumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo iekārto trosi, nepalielinot materiālu patēriņu, šādas kopnes aprēķina algoritmu, noskaidrot šādas kopnes priekšrocības, iekārtā tilta konstrukcijā galveno nesošo trosi aizstājot ar izstrādāto iepriekš saspriegto trošu konstrukciju, kā arī eksperimentāli pārbaudīt iegūtos rezultātus.

Mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus.

- Izstrādāt racionālu no pārvietojumu viedokļa trošu kopnes elementu izvietošanu iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai, tās aprēķina algoritmus GEM programmatūrai ANSYS un optimizēšanas algoritmus ar ģenētisko algoritmu MatLAB un ANSYS programmēšanas vidēm un atrast racionālus parametrus trošu kopnei, kā arī izstrādāt racionālu no materiālu patēriņa viedokļa hibrīdo kompozīto trosi iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai un pārbaudīt tās drošumu CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā.
- Izpētīt iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas darbību dažāda veida iedarbību gadījumā, noteikt izstrādātās trošu kopnes priekšrocības un trūkumus salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi un izstrādāt racionālu piekārto konstrukciju.
- Eksperimentāli pārbaudīt iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas modeļus gan ar atsevišķo nesošo trosi, gan trošu kopni un salīdzināt tos, eksperimentāli pārbaudīt izstrādātos iepriekš saspriegtās iekārtās trošu konstrukcijas skaitliskos modeļus, kā arī eksperimentāli pārbaudīt temperatūras maiņas un iepriekšējā sasprieguma zuduma ietekmi uz iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas fizisko modeli.

- Izstrādāt iepriekš sasprieltas iekārtās konstrukcijas vienkāršotu pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodi un eksperimentāli pārbaudīt to, izmantojot iepriekš sasprieltas iekārtās konstrukcijas modeli, kā arī noteikt vertikālās pašsvārstību frekvences iepriekš saspriegtam iekārtajam tiltam.

Zinātniskā novitāte

Izstrādāts jauns liellaiduma iepriekš sasprieltas trošu kopnes bez spiestiem stiepiem elementu izvietojums, kam salīdzinājumā ar eksistējošiem risinājumiem raksturīgi mazāki kinemātiskie pārvietojumi un samazināts materiālu patēriņš.

Izstrādāti iepriekš sasprieltas iekārtās konstrukcijas jaunās trošu kopnes aprēķina un optimizēšanas algoritmi ar GEM programmatūru ANSYS un programmēšanas vidi MatLAB, kas dod iespēju tos izmantot arī dažādu citu uzdevumu risināšanai.

Noteikts, ka laiduma intervālā no 50 līdz 350 m izstrādātā trošu kopne ar racionāliem parametriem dod iespēju par 26–30% samazināt vertikālos pārvietojumus visneizdevīgākās tiltiem raksturīgās slodžu kombinācijas gadījumā iepriekš saspriegtai iekārtai konstrukcijai salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi. Iegūtie rezultāti pārbaudīti eksperimentāli.

Piedāvāta no materiālu patēriņa viedokļa racionāla hibrīdā kompozītā trosē iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar palielinātu drošumu salīdzinājumā ar kompozītām trosēm un palielinātu īpatnējo stiprību salīdzinājumā ar tērauda trosēm.

Izstrādāta pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršota metode iepriekš saspriegtai iekārtajai konstrukcijai ar precizitāti 20%, un tā pārbaudīta eksperimentāli.

Darba praktiskais nozīmīgums

Izstrādātā liellaiduma iepriekš saspriegtā trošu kopnes konstrukcija, tās aprēķina un optimizācijas algoritmi paver iespēju projektētājiem veidot pārsegumu un tiltu konstrukcijas ar mazākiem pārvietojumiem un samazinātu materiālu patēriņu salīdzinājumā ar līdz šim zināmajām trošu konstrukcijām. Savukārt izstrādātā iepriekš saspriegtās konstrukcijas pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršotā metode dod iespēju to izmantot šādu konstrukciju darbības novērtēšanai.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- Izstrādātā liellaiduma iepriekš saspriegtā trošu kopne ar ielikstām joslām un krusta režģi ar racionāliem parametriem (no pārvietojumu viedokļa), kurai visi elementi ir stiepti, un tās izmantošanas iespējas iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas veidošanai. Šāda konstrukcija tika arī pārbaudīta arī eksperimentāli.
- Izstrādātie algoritmi trošu kopnes aprēķiniem un optimizācijai.
- Hibrīdās kompozītās troses racionāla no materiālu patēriņa un drošuma viedokļa uzbūve iepriekš saspriegtai iekārtai liellaiduma konstrukcijai.
- Izstrādātā iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršotā metode, kura tika pārbaudīta arī eksperimentāli.

Pētīšanas metodika un izmantotie materiāli

Aptuvenie aprēķini trošu kopnes veida novērtēšanai veikti ar galīgo elementu metodes (GEM) programmu LIRA 9.6, izmantojot ģeometriski nelineāro aprēķinu, kā arī ģeometriski nelineāros trošu tipa elementus FE310. Iepriekšējais saspriegums modelēts ar domkrata tipa galīgiem

elementiem FE308, kam var piešķirt sastiepuma spēku.

Trošu kopņu aprēķini ir veikti ar GEM datorprogrammas ANSYS palīdzību, kas dod iespēju ievērot konstrukcijas ģeometrisku nelinearitāti. Trošu kopne modelēta ar divpunktu galīgiem elementiem LINK10, kas darbojas tikai stiepē. Iepriekšējais trošu saspriegums uzdots, galīgajiem elementiem piešķirot relatīvo deformāciju.

Trošu kopņu optimizācijai uzrakstīta speciāla programma MatLAB programmēšanas vidē, kura izmanto ģenētiskā algoritma funkciju.

Aprēķinu rezultāti validēti, pārbaudot iepriekš saspriegas iekārtās konstrukcijas samazinātu izmēru fiziskos modeļus statiskā un dinamiskā slogojumā. Modeļi veidoti no tērauda trosēm. Temperatūras maiņas ietekme uz troses elementiem un troses moduļa palielināšanas iespējas pārbaudītas, izmantojot tērauda trošu paraugus. Trosēm ir firmas SIA „Certex Latvia” sertifikāti. Trošu elastības modulis ir vienāds ar 60 GPa, stieplu stiepes stiprība ir 1770 MPa.

Hibrīdās kompozītās troses slāņu kopdarbības pārbaudei izmantoti trīs slāņu paraugi, kas veidoti no tērauda slāņiem, savā starpā salīmēti ar epoksīdlīmi.

Pētījumu teorētiskais un metodoloģiskais pamats

Darbā izmantota teorētiskā metodoloģija, ko sniedz šādas inženierzinātnes:

- kompozīto materiālu mehānika;
- būvstatika;
- konstrukciju pašsvārstību teorija;
- pārsegumu un tiltu konstrukcijas;
- stiepto konstrukciju teorija;

- konstrukciju optimizācijas teorija.

Pētījumu ierobežojumi

Izstrādātās iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas ir racionālas tiltiem raksturīgajām slodžu kombinācijām un stingiem balstījuma veidiem laiduma intervālā no 50 līdz 350 m.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām, secinājumiem un bibliogrāfijas. Darba apjoms – 155 lappuses, 157 attēli, 29 tabulas un literatūras saraksts ar 152 avotiem.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ir ziņoti un apspriesti šādās zinātniskajās konferencēs:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge. ICCSEE 2012: International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering. January 14-15, 2013, Zurich, Switzerland;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Behavior of Prestressed Suspension Bridge. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, October 11-12, 2012, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Analysis of Hybrid Composite Cable for Prestressed Suspension Bridge. 17th International Conference „Mechanics of Composite Materials”. May 28-June 1, 2012, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge. 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”. May 24-25, 2012, Jelgava, Latvia;

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Prestressed Suspension Bridge. 8th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering. April 19-21, Tallinn, Estonia;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss. ICCEE 2012: International Conference on Civil and Environmental Engineering. March 28-29, 2012, Madrid, Spain;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Daži racionāli konstrukciju risinājumi inženierbūvēm. Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku 3. kongress un letonikas 4. kongress "Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte". Sekcija Būvniecība: zinātne, teorija un prakse, 2011. gada 24-27. oktobrī, Rīga, Latvija;
- Rocens K., Goremikins V., Sliseris J. Some rational structures and macrostructures of composites. International Scientific Conference "The Aleksandrs Malmeisters memorial Symposium: "Actual problems in mechanics of heterogeneous materials"", October 20-23, 2011, Riga, Latvia;
- V. Goremikins, K. Rocēns, D. Serdjuks. Rational Structure of Cable Truss for Unsymmetrically Loaded Suspension Bridge. RTU 52st International Scientific Conference. Section "Construction Science", October 13, 2011, Riga, Latvia;
- V. Goremikins, K. Rocēns, D. Serdjuks. Experimental Testing of Cable Truss. RTU 52st International Scientific Conference. Section "Construction Science", October 13, 2011, Riga, Latvia;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Geometrical Parameters of Cable Truss for Suspension Bridge. OAS 2011: International Conference on Optimization and Analysis of Structures. August 25-27, 2011, Tartu, Estonia.
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge. International Scientific Conference Civil Engineering '11. May 12-13, 2011, Latvia, Jelgava;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss. ICBSE 2011: "International Conference on Building Science and Engineering", April 27-29, 2011, Venice, Italy;
- Goremikins V., Rocēns K., Serdjuks D. Režģojuma veida ietekme uz vanšu kopņu darbu. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2010.gada 11.-15. oktobris;
- Goremikins V., Rocēns K., Serdjuks D. Šprengesijas no pultrūzijas kompozītiem racionāla liellaiduma konstrukcija. RTU 51. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, 2010.gada 11.-15. oktobris;

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Structure of Composite trussed beam. 16th international conference „Mechanics of Composite Materials”. May 24-28, 2010, Latvia;
- Goremikins V. and Serdjuks D. Rational Structure of Trussed Beam. 10th international conference “Modern building materials, structures and techniques”. May 19-21, 2010, Lithuania;
- Goremikins V., Grabis J. un Serdjuks D. Telpisko tērauda kopņu izmantošana pārsegumā. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference. 12.-16. oktobris, 2009, Latvija;
- Goremikins V. un Serdjuks D. Šprengēlsijas racionāla konstrukcija. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference. 12.-16. oktobris, 2009, Latvija.

Galvenie darba rezultāti izklāstīti šādās publikācijās.

Zinātniskajos žurnālos:

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues (pieņemts publicēšanai);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing Displacements of Prestressed Suspension Bridge // Journal of Civil Engineering and Management. – 2012. – Volume 18, Issue 06. – pp. 858-866 (žurnālu citē Scopus un Ebsco datu bāze);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // International Journal of Civil and Environmental Engineering. – 2012. – Issue 6. – pp. 291-299;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues. – 2012. – Issue 63. – pp. 554-562;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss // Journal “World Academy of Science, Engineering and Technology”. Special Journal Issues. – 2011. – Issue 76. – pp. 571-578 (citē Scopus un Ebsco datu bāzes).

RTU zinātnisko rakstu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. and Gaile L. Experimental Determination of Natural Frequencies of Prestressed Suspension Bridge

Model // Scientific Journal of RTU. Construction Science (pieņemts publicēšanai);

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Evaluation of Rational Parameters of Trussed Beam // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 21-25 (citē Ebsco datu bāzē);
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Large Span Structure of Composite Pultrusion Trussed Beam // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2010. – Vol. 11. – pp. 26-31 (citē Ebsco datu bāzē);
- Goremikins V., Grabis J. and Serdjuks D. Using of spatial steel trusses in the roof // Scientific Journal of RTU. Construction Science. – 2009. – Vol. 10. – pp. 50 – 56 (citē Ebsco datu bāzē).

Zinātnisko konferenču pilna teksta rakstu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Topology Optimization of Cable Truss Web for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the ICCSEE 2013: “International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering”, Zurich, Switzerland, January 14-15, 2013, pp. 180-186;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of 10th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Latvia, Jelgava, May 24-25, 2012, – Vol. 11. – pp. 228-233 (citē Scopus un Ebsco datu bāzes);
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the 8th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, April 19-21, 2012, pp. 45-50;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss // Proceedings of the ICCEE 2012 : “International Conference on Civil and Environmental Engineering”, Madrid, Spain, March 28-29, 2012, pp. 554-562;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of the International Scientific Conference “Civil Engineering ‘11”, Jelgava, Latvia, May 12-13, 2011 (pieņemts publicēšanai);
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Structure of Cable Truss // Proceedings of the ICBSE 2011 : "International Conference on

Building Science and Engineering", Venice, Italy, April 27-29, 2011, pp. 513-520;

- Goremikins V. and Serdjuks D. Rational Structure of Trussed Beam // Proceedings of the 10th international conference "Modern building materials, structures and techniques", Lithuania, May 19-21, 2010, pp. 613-618.

Zinātnisko konferenču tēžu krājumos:

- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Behavior of Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Latvia, Riga, October 11-12, 2012, p. 384;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Analysis of Hybrid Composite Cable for Prestressed Suspension Bridge // Proceedings of the 17th International Conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 28-June 1, 2012, p. 93;
- Goremikins V., Rocēns K un Serdjuks D. Daži racionāli konstrukciju risinājumi inženierbūvēm // Apvienotā pasaules latviešu zinātnieku III un Letonikas IV kongresa „Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte” sekcijas „Tehniskās zinātnes” tēžu krājums, Rīga, 2011. gada 24.-27. oktobris. – Rīga: RTU, 2011. – 61.-62. lpp;
- Goremikins V., Rocens K., Serdjuks D. Rational Geometrical Parameters of Cable Truss for Suspension Bridge // Abstracts of OAS 2011: International Conference on Optimization and Analysis of Structures. Estonia, Tartu, August 25-27, 2011, p. 12;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Cable Truss Analyses for Suspension Bridge // Proceedings of the International Scientific Conference “Civil Engineering ‘11”, Latvia, Jelgava, May 12-13, 2011, p. 32;
- Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Structure of Composite trussed beam // Proceedings of the 16th international conference „Mechanics of Composite Materials”, Latvia, Riga, May 24-28, 2010, p. 75.

Mācību metodiskajā izdevumā:

- Goremikins V., Rocēns K., Serdjuks D. Konstruktīvo elementu no plastmasām (pultrūzijas kompozītmateriāliem) aprēķins (aprēķinu pamatprincipi un piemēri). Metodiskie norādījumi. – Rīga: RTU, 2010, – 34. lpp. (ISBN 978-9934-8151, www.goremikins.com).

DARBA SATURS

Darba sākumā pamatota tēmas aktualitāte, formulēti darba mērķi, zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme.

Pirmajā nodaļā apskatīti liellaiduma konstrukciju risinājumi un secināts, ka vislielākie laidumi ir sasniegti ar iekārtajām konstrukcijām (līdz 1991 m). Iekārto konstrukciju trūkums ir palielinātā deformējamība lielo kinemātisko pārvietojumu dēļ. Šo problēmu var atrisināt, pieslogojot konstrukciju, palielinot stinguma sijas stingumu, kā arī lietojot papildu atsaites. Tomēr šīs metodes izraisa materiālu patēriņa palielināšanos, turklāt vairākos gadījumos nav iespējams sasniegt vajadzīgo stingumu. Racionālāks paņēmiens ir iepriekš saspriegto kopņu izmantošana. Ar sasprieguma lielumu var pēc vajadzības mainīt kā konstrukcijas stingumu, tā arī tās pašsvārstību frekvences.

Nodaļā ir sniegts pārskats par pašreiz izplatītākajiem trošu kopņu veidiem, to galvenajām priekšrocībām un trūkumiem. Pastāv dažādi trošu kopņu risinājumi: ar spiestiem spraišļiem, ar stieptiem lokaniem piekariem, ar spiestiem spraišļiem un stieptiem piekariem, ar centrālo spiesto statni un stieptiem piekariem. Racionālākās ir trošu kopnes, kam ir tikai stieptie elementi.

Nodaļā sniegts iekārto tiltu kā konstrukciju ar vislielākajiem laidumiem apskats. Aplūkota īsa iekārto tiltu attīstības vēsture, apskatīti dažādi iekārto tiltu risinājumi, to galvenās sastāvdaļas un izpildījuma variācijas, kā arī iepriekš saspriegto trošu kopņu izmantošanas piemēri iekārto tiltu veidošanā.

Metodes, ar kurām tiek veikts iekārto konstrukciju statiskais aprēķins, var iedalīt tuvinātās, analītiskās un skaitliskās. Tuvinātās aprēķina metodes var izmantot konkrētiem gadījumiem. Analītiskās metodes ievērtē balstu

atrašanos dažādos līmeņos, balstu pārvietojumus, temperatūras ietekmi un iepriekšējo sasprīgumu, tomēr aprēķini ar šīm metodēm ir ļoti darbietilpīgi. Precīzus, samērā mazas darbietilpības rezultātus ar var iegūt, lietojot automatizētās skaitliskās metodes. Viena no spēcīgākajām GEM programmām ir ANSYS komplekss. Troses modelēšanai ANSYS programmā izmanto divmezglu telpisko elementu, kurš darbojas tikai stiepē. Elementu raksturo bilineārā stinguma matrica, kas atkarīga no deformāciju virziena. Trošu konstrukciju aprēķins ir ģeometriski nelineārs aprēķina uzdevums, kas realizēts ar Ņūtona-Rapsona pieeju. Iekārto trošu konstrukcijām raksturīga ģeometriskā nelinearitāte, ko ievērtē ar speciālas formas deformāciju-pārvietojumu sakarību matricas palīdzību.

Nodaļā ir aprakstīta iekārto konstrukciju pašsvārstību frekvenču noteikšanas vienkāršota metode un secināts, ka jāizstrādā vienkāršota pašsvārstību frekvenču noteikšanas metode arī iepriekš sasprīgtām iekārtajām konstrukcijām.

Labāko konstrukcijas risinājumu var atrast, izmantojot optimizācijas algoritmus. Optimizācijas algoritmus var iedalīt divās pamatklasēs: deterministiskie algoritmi un varbūtiskie algoritmi. Deterministiskos algoritmus visbiežāk lieto, ja starp vadāmajiem faktoriem un optimizācijas parametriem pastāv skaidra sakarība. Ja sakarība starp šiem faktoriem un parametriem vai nu nav skaidra, vai ir pārāk sarežģīta, vai arī meklēšanas lauks ir pārāk liels, tad problēmu risina, izmantojot varbūtiskos algoritmus. Lai paaugstinātu algoritmu efektivitāti, lieto adaptīvo meklēšanu, kad vadāmo faktoru vērtību noteikšanai nākamajai iterācijai algoritms lieto heuristikās funkcijas, kas izmanto informāciju, ko algoritms ieguvis iepriekšējās iterācijās. Viens no varbūtiskajiem algoritmiem ar adaptīvo meklēšanu ir ģenētiskais algoritms. Metodes pamatā ir dabiskā selekcija,

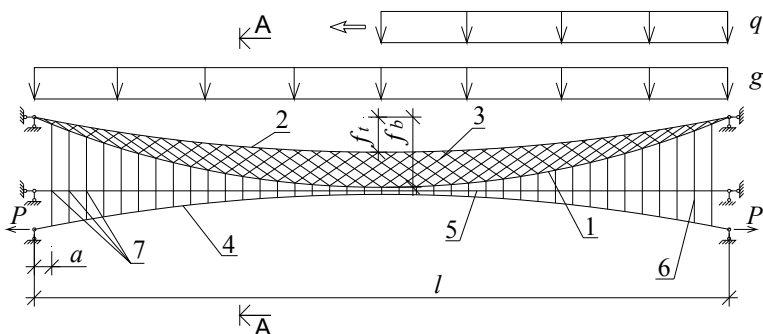
process, kurš vada bioloģisko evolūciju. Ar šīs metodes palīdzību var risināt uzdevumus, kam ir liels vadāmo faktoru skaits.

Otrajā nodaļā veikta dažādu trošu kopņu salīdzinošā analīze un noteikts, ka vislabāk savu sākotnējo formu var saglabāt trošu kopne ar divām ieliektām joslām, un tā var darboties arī bez iepriekšējā sasprieguma (1. att.). Šai trošu kopnei tika noteiktas racionālas augšjoslas nokares, apakšjoslas nokares un laiduma attiecības, kā arī racionāls slodzes pielikšanas punktu skaits un režģa veids.



1. att. Trošu kopne ar divām ieliektām joslām

Trošu kopnes ar ieliektām joslām un krusta režģi priekšrocības un trūkumi ir apskatīti, izmantojot iepriekš saspriegtas iekārtās konstrukcijas, kuras laidums ir 200 m, piemēru (2. att.). Pieņemts, ka konstrukcija ir slogota ar tiltiem raksturīgo slodzi saskaņā ar Eurokodeksu un slodze var būt pielikta visos iespējamajos variantos visā laiduma garumā.



2. att. Iepriekš saspriegtas iekārtās konstrukcijas aprēķina shēma:

- 1 – apakšjosla; 2 – augšjosla; 3 – režģa elementi; 4 – stabilizācijas trose; 5 – klājs; 6 – piekari; 7 – slodzes pielikšanas punkti (no 1 līdz 39); q – lietderīgā slodze; g – pašsvara slodze; P – iepriekšējais saspriegums; f_b – apakšjoslas nokare; f_i – augšjoslas nokare; l – laidums; a – piekaru solis

Iepriekš saspriegtajai iekārtai konstrukcijai ar trošu kopni ir izstrādāts speciāls aprēķina algoritms ANSYS programmatūrai, kas automātiski pēc ievadītajiem parametriem veido konstrukcijas ģeometriju, definē elementu materiālus un šķērsriezumu, sadala konstrukciju galīgos elementos, kā arī aprēķina deformācijas un spriegumus. Izstrādāto algoritmu var viegli un ātri transformēt dažādu (piem., optimizācijas) uzdevumu risināšanai, kā arī izmantot lielāku konstrukciju aprēķiniem, kur trošu kopne ir tikai šo konstrukciju sastāvdaļa.

Trošu kopnes optimizēšanai izstrādāts algoritms MatLAB programmēšanas vidē, kas realizēts ar ģenētisko algoritmu. Optimizācijas uzdevums – minimizēt vertikālos pārvietojumus visneizdevīgākās pieliktās slodzes gadījumā. Par mainīgajiem faktoriem ir pieņemti attālumi s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 , kas nosaka režģa elementu izvietojumu, attiecības g_1 un g_2 , kuras nosaka materiālu sadalījumu starp trošu kopnes apakšjoslu, augšjoslu un režģa elementiem, kā arī sakarība starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm f_i/f_b . Režģa elementu izvietojumu apraksta vienādojumi (1) un (2).

$$x_2 = x_1 - (root1 \cdot x_1^2 + root2 \cdot x_1 + root3), \quad (1)$$

$$x_4 = x_3 + (root4 \cdot x_3^2 + root5 \cdot x_3 + root6), \quad (2)$$

kur x_2 un x_4 – attālumi no pilona līdz attiecīgā režģa elementa savienojumam ar augšjoslu;

x_1 un x_3 – attālumi no pilona līdz attiecīgā režģa elementa savienojumam ar apakšjoslu;

$root1 \dots root6$ – vienādojumu sistēmu (3) un (4) saknes.

$$\begin{cases} s_1 = \text{root}1 \cdot a_1^2 + \text{root}2 \cdot a_1 + \text{root}3 \\ s_2 = \text{root}1 \cdot a_2^2 + \text{root}2 \cdot a_2 + \text{root}3 \\ s_3 = \text{root}1 \cdot a_3^2 + \text{root}2 \cdot a_3 + \text{root}3, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} s_4 = \text{root}4 \cdot a_4^2 + \text{root}5 \cdot a_4 + \text{root}6 \\ s_5 = \text{root}4 \cdot a_5^2 + \text{root}5 \cdot a_5 + \text{root}6 \\ s_6 = \text{root}4 \cdot a_6^2 + \text{root}5 \cdot a_6 + \text{root}6, \end{cases} \quad (4)$$

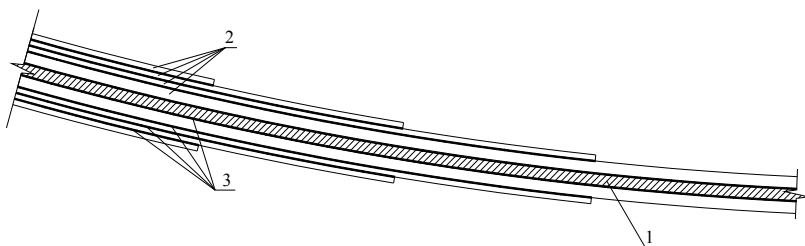
kur $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ – attālumi no balstījuma punktiem līdz attiecīgo režģa pamatelementu savienojumam ar augšjoslu

Optimizācija ar ģenētisko algoritmu tika veikta ar 10 populācijām, populācijas izmērs ir 50 gadījumi, no kuriem nākamās populācijas veidošanai izvēlēti pieci labākie varianti. Katrā eksperimentā bija jāveic pa 39 ANSYS aprēķiniem dažādām slodžu kombinācijām. Racionāla attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokarēm: $f_i/f_b=0.5089$. Racionāla attiecība starp apakšjoslas materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_b/g=0.4512$. Racionāla attiecība starp režģa elementu materiālu patēriņu un trošu kopnes materiālu patēriņu: $g_w/g=0.0673$. Racionālas attālumu s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 vērtības ir attiecīgi 4.8147, 16.3004, 16.3190, 0.9800, 12.6897 un 16.2324 m.

Ar izstrādāto algoritmu veikta trošu kopnes režģa topoloģijas optimizācija pēc 47 mainīgajiem faktoriem. Par mainīgajiem faktoriem pieņemtas 20 masas daļas režģa elementiem, vēršiem uz kopnes malām ($g_{w01}-g_{w20}$), 19 masas daļas režģa elementiem, vēršiem uz kopnes centru ($g_{w21}-g_{w39}$), kuri nosaka režģa elementu materiālu sadalījumu starp režģa elementiem, attālumi s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 un s_6 , kuri definē režģa elementu

izvietojumu, kā arī kopnes augšjoslas un apakšjoslas nokaru attiecība (f_i/f_b) un apakšjoslas masas daļa (g_i) no kopnes kopējās masas. Visneizdevīgāk pieliktās slodzes gadījumā, veicot trošu kopnes optimizāciju pēc 47 faktoriem, trošu kopnes vertikālos pārvietojumus salīdzinājumā ar trošu kopni, optimizētu pēc 9 faktoriem, izdevās samazināt par 4.5%.

Lai samazinātu iekārtās konstrukcijas pašsvaru un palielinātu laidumu, nesošo tērauda trosi var aizvietot ar hibrīdo kompozīto trosi, veidotu no CFRP (ar oglekļa šķiedrām stiegrots polimērs) vidējā slāņā un ārējiem tērauda aizsargslāņiem (3. att.), kas samazina tādas CFRP trūkumus kā mazs pagarinājums pie sabrukšanas, virsmas sabrukšanas iespējamība, sliktas īpašības perpendikulāri šķiedrām un savienojumu veidošanas sarežģītība, tā paverot iespēju plašākai CFRP izmantošanai.



3. att. Hibrīdās kompozītās troses shēma:
1 – CFRP josla; 2 – tērauda joslas; 3 – līme

Piepūļu sadalījums pa troses garumu nav vienmērīgs, tāpēc, lai samazinātu troses materiālu patēriņu, ar ģenētisko algoritmu ir noteikts racionāls tērauda sadalījums pa troses garumu (5) un minimālais tērauda joslu šķērsriezuma laukums (6), kāds var nodrošināt konstrukcijas kalpošanu ārkārtējā situācijā vidējā CFRP slāņa sabrukšanas gadījumā. Vidējā un malējo slāņu kopdarbība vidējā slāņa sabrukšanas gadījumā vienā

trošes vietā ir analītiski un eksperimentāli pārbaudīta, un ir noteikts, ka sabrukšanas gadījumā vidējais slānis pilnībā izstāsies no darba. Noteikts, ka tad, ja ievēro dinamiskos efektus, tērauda joslu šķērsgriezuma laukums jāpalielina par 58%, bet CFRP joslas šķērsgriezuma laukums jāsamazina 2 reizes.

$$A_{steel,i} = 0.002798 + 0.0000824 \cdot i + 0.0000194 \cdot i^2, \quad (5)$$

$$A_{CFRP} = 1.0978 \cdot A_{steel,i=0}, \quad (6)$$

kur i – attiecīgā trošes posma numurs.

Trešajā nodaļā salīdzināta trošu kopnes un atsevišķās nesošās trošes darbība dažādiem složošanas gadījumiem (1. tabula). Trošu kopnes un atsevišķās nesošās trošes materiālu patēriņš ir vienāds. Parādīts, ka, izmantojot trošu kopni atsevišķās nesošās trošes vietā 200 m liela laiduma iepriekš saspriegtās iekārtās konstrukcijas veidošanā, par 27% var samazināt pārvietojumus visneizdevīgākās slodzes gadījumā. Noteikts, ka atsevišķajai trosei šie pārvietojumi, kad slodze ir pielikta visam laidumam, ir par 87% mazāki par pārvietojumiem, kad slodze ir pielikta laiduma pusei, savukārt trošu kopnei šī starpība ir tikai 9%, tātad trošu kopnei pārvietojumi gandrīz nav atkarīgi no slodzes pielikšanas vietas, t. i., konstrukcija nav labila.

Trošu kopnes priekšrocības no pārvietojumu viedokļa novērtētas arī citiem laidumiem. Pierādīts, ka laiduma intervālā no 50 līdz 350 m trošu kopnes pārvietojumi ir mazāki par atsevišķās nesošās trošes pārvietojumiem par 26–30%.

Trošu kopņu galvenie trūkumi salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi ir

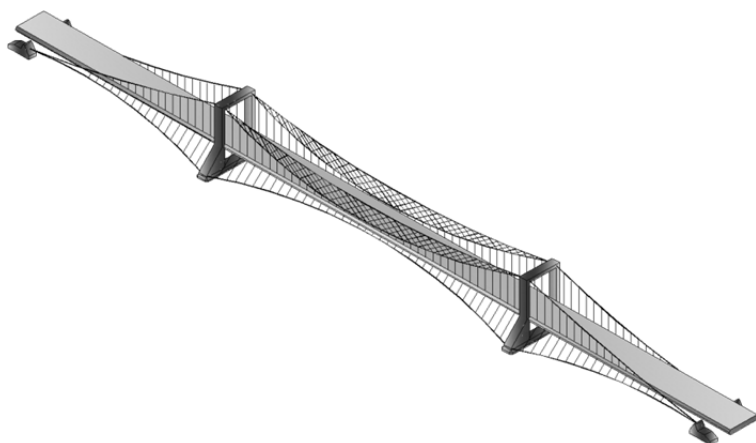
laika un darbaspēka resursu palielinājums to izgatavošanas, montāžas un apkalpošanas procesā.

1. tabula

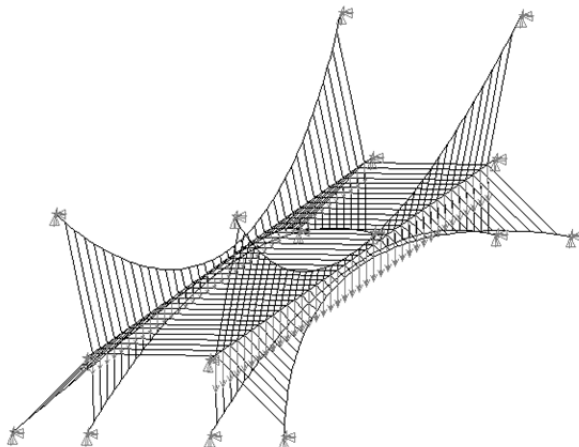
Iepriekš sasprieltas iekārtās konstrukcijas ar atsevišķo nesošo trosi un trošu kopni pārvietojumi

Iepriekš saspriegta iekārtā konstrukcija	Slodzes pielikšanas punkti	Maksimālie klāja pārvietojumi uz apakšu, mm	Maksimālie klāja pārvietojumi uz augšu, mm	Maksimālie klāja kopējie pārvietojumi, mm
Atsevišķā nesošā trose	1–20	629.3	291.7	921.0
	1–39	492.0		492.0
Trošu kopne	1–17	514.5	122.0	636.6
	1–34	623.3	1.9	625.2
	1–22	572.8	103.1	675.9
	1–39	620.8	0.0	620.8

Trošu kopnei ar krusta režģi var samazināt elementu skaitu, izņemot no 1. līdz 11. uz centru vērstos elementus katrā kopnes pusē; pārvietojumi šajā gadījumā palielināsies par 3.5%. Iepriekš saspriegto trošu kopnes konstrukciju var izmantot iekārtā tilta centrālā laiduma pārsegšanai (4. att.), kam nevienmērīgas slodzes izraisītie kinemātiskie pārvietojumi ir būtiski. Pārbaudīta temperatūras maiņas un horizontālo slodžu iedarbība uz konstrukciju un noteikts, ka tā atbilst pastāvošajām prasībām. Novērtēta pilonu pārvietojumu ietekme uz konstrukcijas vertikālajiem pārvietojumiem un noteikts, ka atkarībā no pilonu stinguma trošu kopnes priekšrocības no pārvietojumu viedokļa mainās no 10 līdz 35%. Horizontālo slodžu uzņemšanai stabilizācijas trose jāizvieto ar nokari arī horizontālajā plaknē. Labākai nevienmērīgas šķērsvirziena slodzes uzņemšanai var izveidot četras apakšjoslas (5. att.).



4. att. Iepriekš saspriegtais iekārtais tilts ar trošu kopnēm kā galvenajām nesošajām elementiem

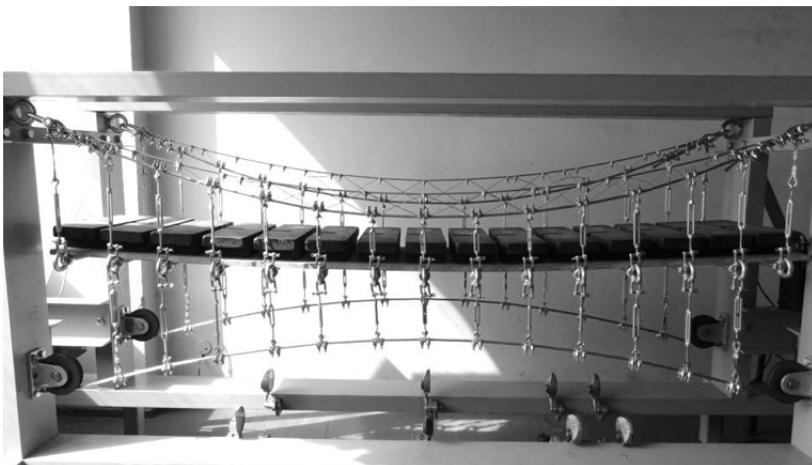


5. att. Trošu izvietojums nevienmērīgo šķērsvirziena slodžu labākai uzņemšanai

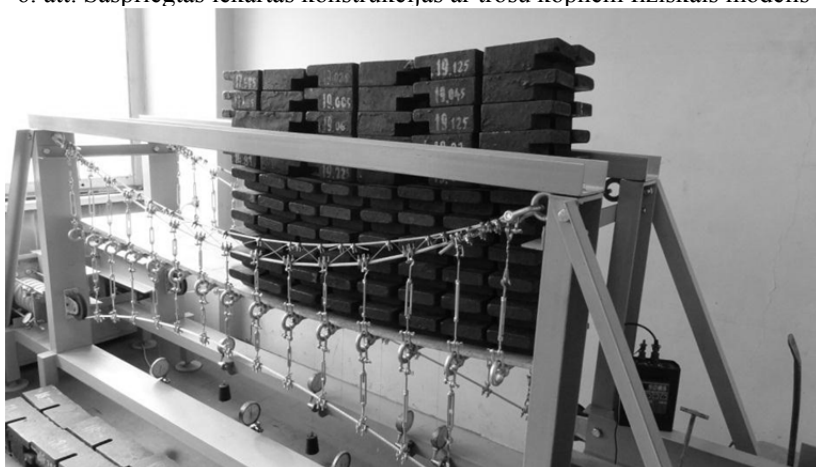
Trešajā nodaļā ir parādīta pultrūzijas kompozītmateriālu izmantošanas iespēja liellaiduma konstrukcijām, kurus var lietot iekārtā tilta klāja balstīšanai. Šādas konstrukcijas var realizēt kā šprungeļsiju, kur pultrūzijas kompozītmateriālu augšjosla ir pastiprināta ar kompozītmateriālu statņiem

un savilci, veidotu no tērauda troses. Darbā noteikts, ka, aizvietojot taisnos špreņģeļsijas elementus ar slīpiem, materiālu patēriņu var samazināt par 5%.

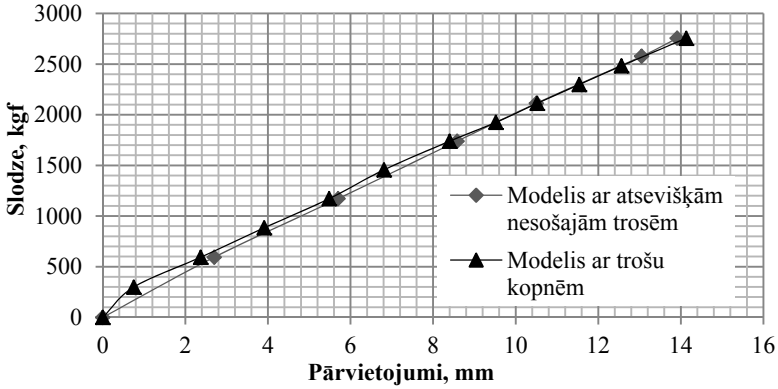
Ceturtajā nodaļā eksperimentāli pārbaudītas trošu kopnes priekšrocības salīdzinājumā ar atsevišķo nesošo trosi. Izveidoti iekārtās konstrukcijas modeļi ar trošu kopnēm (6. att.) un atsevišķām nesošajām trosēm. Trošu materiālu patēriņš abiem modeļiem ir vienāds. Konstrukcijas tika iepriekš saspriegtas līdz sasprieguma līmenim 1000 kgf (0.4 no stabilizācijas troses aprēķina stiepes stiprības). Modeļi slogoti ar simetrisku slodzi līdz 2755 kgf (puse no nesošās troses aprēķina stiepes stiprības) un nesimetrisku slodzi līdz 1495 kgf (7. att.). Modeļu testēšanas rezultāti parādīti 8. att. un 9. att. attiecīgi simetriskajam un nesimetriskajam slogojumam. Eksperimentālie rezultāti parāda, ka nesimetriskajā slogošanas gadījumā, aizvietojot atsevišķās nesošās troses ar trošu kopnēm, var par 16% samazināt pārvietojumus uz augšu un par 12% – uz apakšu. Tajā pašā laikā kopējie pārvietojumi samazinās par 13%. Eksperimentālie rezultāti ir tuvi skaitliski aprēķinājumiem, kas liecina par izstrādātās trošu kopnes aprēķina algoritmu pareizību. Darbā tika noteikta arī sakarība starp temperatūras maiņu un modeļu pārvietojumiem, kā arī starp temperatūras maiņu un iepriekšējā sasprieguma līmeni. Eksperimentāli noteikts, ka, iepriekš saspriedzot konstrukciju ar spēku, kas par 20% lielāks par aprēķina sasprieguma līmeni un pēc vienas dienas pazeminot saspriegumu līdz aprēķina līmenim, iepriekšējā sasprieguma zudumi 88 dienu laikā ir tikai 0.5%.



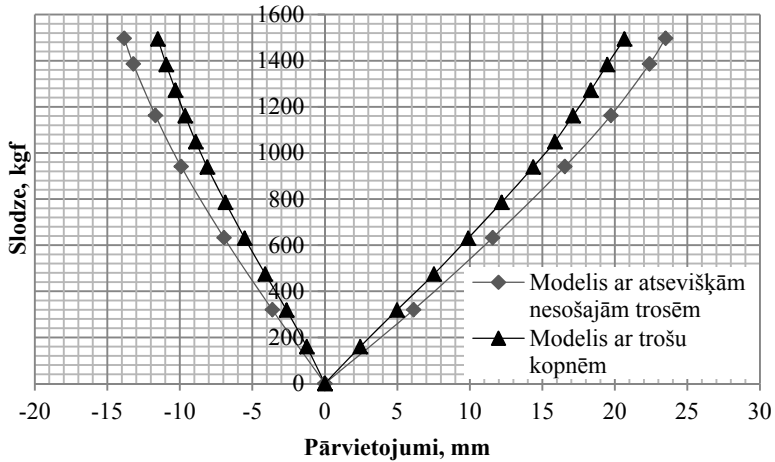
6. att. Saspringtas iekārtās konstrukcijas ar trošu kopnēm fiziskais modelis



7. att. Nesimetriski slogots modelis



8. att. Iepriekš saspiestu iekārto konstrukciju modeļu testēšanas rezultāti simetriskas slodžošanas gadījumā



9. att. Iepriekš saspiestu iekārto konstrukciju modeļu testēšanas rezultāti nesimetriskas slodžošanas gadījumā

Piektajā nodaļā izstrādāta pašsvārstību frekvenču noteikšanas aptuvena metode. Ir sastādīti vienādojumi pašsvārstību frekvenču noteikšanai 1, 3, ...

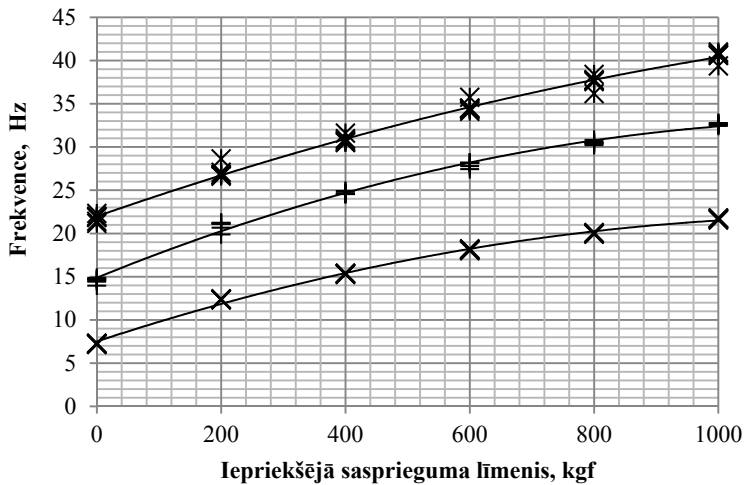
svārstību formai (7) un 2, 4, ... svārstību formai (8):

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_5}{2}}, \quad (7)$$

$$\omega_{v,i} = \sqrt{\alpha_1 + \frac{\alpha_2 + \alpha_4}{2}}, \quad (8)$$

- kur α_1 – komponente, kas atkarīga no stinguma sijas;
 α_2 – komponente, kas atkarīga no nesošās troses balstbīdes;
 α_3 – komponente, kas atkarīga no nesošās troses parametriem;
 α_4 – komponente, kas atkarīga no stabilizācijas troses balstbīdes;
 α_5 – komponente, kas atkarīga no stabilizācijas troses parametriem.

Izstrādātā metodika eksperimentāli pārbaudīta, izmantojot iekārtās konstrukcijas modeli. Modelim ir noteiktas pašsvārstību frekvences un svārstību formas dažādiem sasprieguma līmeņiem. Sakarība starp iepriekšējā sasprieguma līmeni un pašsvārstību frekvenci, kā arī datu aproksimācijas līknes un 2. kārtas polinomi ir parādīti 10. att. Starpība starp rezultātiem, kas iegūti ar izstrādāto metodi, un eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem ir 18%, kas ir pieņemami dinamiskiem konstrukciju iepriekšējiem aprēķiniem.



×1. pašsvārstību frekvence $y = -7E-06x^2 + 0.0251x + 21.978$
 $R^2 = 0.9916$

+2. pašsvārstību frekvence $y = -1E-05x^2 + 0.0292x + 14.888$
 $R^2 = 0.995$

×3. pašsvārstību frekvence $y = -1E-05x^2 + 0.0236x + 7.5182$
 $R^2 = 0.9966$

10. att. Sakarības starp iepriekšējā sasprieguma līmeni un pašsvārstību frekvencēm, kā arī aproksimācijas vienādojumi

SECINĀJUMI

Izstrādāts risinājums liellaiduma iepriekš saspriegtai divjoslu konstrukcijai, kuras nesošā josla veidota kā trošu kopne, kurā ietilpstošie stieņi neuzņem spiedes piepūles. Darba ietvaros ir optimizēts šīs kopnes apveids un topoloģija nolūkā iegūt risinājumu ar materiālu patēriņu, kas ekvivalents atsevišķai nesošai trosei, bet kas nodrošina ievērojami lielāku konstrukcijas stingumu. Darba ietvaros izstrādāti trošu kopnes aprēķina un optimizācijas algoritmi, noskaidrotas šādas kopnes priekšrocības uz iekārta tilta piemēra bāzes.

- Iepriekš saspriegtas tērauda trošu kopnes ar ieliektām joslām, optimizētu joslu apveidu un ar krustveida režģi ar optimizētu topoloģiju izmantošana būtiski samazina iepriekš saspriegtas iekārtas konstrukcijas pārvietojumus – laiduma intervālā no 50 līdz 350 m iepriekš saspriegtas divjoslu trošu konstrukcijas ar piedāvātājām trošu kopnēm teorētiskie pārvietojumi ir par 26–30% mazāki salīdzinājumā ar konstrukciju, kurā izmantotas atsevišķas nesošās troses. Izstrādātais šādas kopnes aprēķina algoritms GEM programmatūrai ANSYS automātiski pēc dotajiem parametriem veic minētās konstrukcijas aprēķinu, un tas var tikt operatīvi pārveidots citu, ar piedāvāto trošu kopni saistītu, uzdevumu risināšanai. Izmantojot ģenētisko algoritmu MatLAB programmēšanas vidē, izstrādātais trošu kopnes optimizācijas algoritms ātri nosaka konstrukcijas racionālus parametrus liela faktoru skaita gadījumā. No konstrukcijas stinguma viedokļa racionāli trošu kopnes parametri laidumiem 50, 200 un 350 m pie apakšjoslas nokares 1/10 laiduma ir: attiecība starp augšjoslas un apakšjoslas nokari šiem laidumiem ir attiecīgi 0.429, 0.510 un 0.536; attiecība starp apakšjoslas materiāla

patēriņu un trošu kopnes kopējo materiāla patēriņu – attiecīgi 0.587, 0.451 un 0.468.

- Iepriekš sasprieltas divjoslu trošu konstrukcijas tērauda nesošās atsevišķās troses aizvietošana ar hibrīdu kompozītu trosi, kas sastāv no vidējā CFRP (ar oglekļa šķiedrām stiegrots plastiks) slāņa un pa troses garumu mainīga šķērsriezuma tērauda ārējiem slāņiem, ievērojami samazina trošu pašsvaru – 200 m laiduma un statiskas slodzes gadījumā pašsvara samazinājums sasniedz trīs reizes. Viens no iemesliem, kas rada šādu samazinājumu, ir racionāls tērauda sadalījums pa troses garumu, kas nodrošina praktiski vienmērīgu spriegumu sadalījumu troses komponentēs pa visu laidumu. Turklāt šāda troses struktūra nodrošina konstrukcijas kalpošanu arī ārkārtas gadījumā, ja tiek sagrauts CFRP slānis – tad, realizējoties tērauda plūstamības procesam, nesošās troses nokare momentāni palielinās, bet piepūles trosē samazinās. Optimizācijas procesā racionāls tērauda un CFRP joslu materiālu sadalījums pa troses garumu ir pieņemts polinoma veidā, kura koeficienti noteikti ar ģenētisko algoritmu. Ievērtējot dinamiskos efektus, tērauda sastāvdaļas laukums jāpalielina par 58%, bet CFRP laukums jāsamazina divas reizes salīdzinājumā ar statisko slogojumu.
- Iepriekš sasprieltas iekārtas konstrukcijas ar trošu kopnēm izmantošana iekārtiem tiltiem dod iespēju izmantot vieglus kompozītmateriālus stinguma sijās konstrukcijai un nodrošina konstrukcijas drošu ekspluatāciju horizontālo slodžu iedarbībā. Šīs konstrukcijas nesošo un stabilizējošo joslu racionāls izvietojums šķērsvirzienā nodrošina nepieciešamo stingumu šķērsvirzienā nesimetriskas, tiltiem raksturīgas lietderīgas slodzes, kā arī vēja slodzes pielikšanas gadījumā.

- Iepriekš saspriegtu iekārto konstrukciju fizikālo modeļu eksperimentālās pārbaudes rezultāti apstiprina skaitlisko modeļu adekvātumu, rezultātu atšķirība ir 10%. Izmantojot fiziskos modeļus, eksperimentāli apstiprināti analītiski iegūtie rezultāti par trošu kopnes priekšrocībām no pārvietojumu viedokļa salīdzinājumā ar atsevišķu nesošo trosi nesimetriska slogojuma gadījumā. Nesimetriska slogojuma gadījumā izmantotā modeļa ar trošu kopnēm pārvietojumi ir par 13% mazāki nekā modelim ar atsevišķām nesošajām trosēm. Temperatūras izmaiņu izraisītie pārvietojumi un tiem atbilstošās iepriekšējā sasprieguma izmaiņas ir vērtējami kā būtiski faktori, un tie jāievērtē iepriekš saspriegto trošu konstrukciju projektēšanā. Eksperimenta laikā (88 dienas) pie praktiski pastāvīgas temperatūras (20 ± 3 °C) iepriekšējā sasprieguma līmeņa zudums nepārsniedz 0.5%, ja konstrukcija iepriekš tiek izstiepta un izturēta ar saspriegumu, kas par 20% lielāks par aprēķina saspriegumu, un tas uzskatāms par nenozīmīgu faktoru.
- Atšķirība starp rezultātiem, kas iegūti ar izstrādāto vienkāršoto pašsvārstību frekvenču noteikšanas metodi un eksperimentāli uz modeļa, nav lielāka par 20%, un tāpēc šī metode ir lietojama konstrukciju dinamiskiem aprēķiniem variantu izstrādes stadijā. Ar izstrādāto metodi noskaidrotās pašsvārstību frekvences iepriekš saspriegtai iekārtai trošu konstrukcijai atbilst pastāvošo tiltu projektēšanas normu prasībām (pašsvārstību periods neatrodas bīstamajā intervālā no 0.3 līdz 1 s).

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. 5. aprīlī plkst. 14.15 Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātē, Āzenes ielā 16, sēžu zālē.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Prof., Dr.sc.ing. Juris Naudžuns, Rīgas Tehniskā Universitāte

Prof., Dr. Algirdas Juozapaitis, Vilnius Gediminas Technical University

Prof., Dr.habil.sc.ing. Jānis Vība, Rīgas Tehniskā Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Vadims Goremikins(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur darba vispārējo raksturojumu, 5 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 157 attēlus, kopā 155 lappuses. Literatūras sarakstā ir 152 nosaukumi.