

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības fakultāte
Būvmehānikas katedra

Normunds TIRĀNS

**LIEKTU DZELZSBETONA ELEMENTU PASTIPRINĀŠANA
AR KOMPOZĪTO MATERIĀLU UZLIKĀM**

Būvzinātņu nozare, Būvmehānikas apakšnozare

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Habil.inž.zin. doktors, profesors
F. BULAVS

Rīga 2006

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pēdējos gados ir atzīta nepieciešamība rekonstruēt mūsu novecojušo infrastruktūru. Liektu dzelzsbetona elementu ekspluatācijas prakse rāda, ka to nestspēja daudzos gadījumos neatbilst mūsdienu tehniskajām prasībām. Līdz ar to ir aktualizējies problēma par nolietotu vai konstruktīvi nepilnīgu būvelementu pastiprināšanu gan nestspējas, gan arī stingrības virzienā. Bieži sastopamas situācijas, kad esošās konstrukcijas ir nevis fiziski, bet morāli novecojušas. Sevišķi tas attiecināms uz konstrukcijām, kuras projektētas pēc novecojušām normām ar visai zemu pieļaujamo ekspluatācijas slodžu līmeni. Tas aktualizē nepieciešamību veikt esošu konstrukciju atsevišķu liektu elementu pastiprināšanu.

Sloojuma gaitā liekti dzelzsbetona elementi deformējas, pie kam deformēšanās procesu pavada nepārtraukts plaisu veidošanās un attīstības process. Plaisu veidošanās procesā notiek nepārtraukta piepūļu pārdalīšanās betona spiestajā zonā un stieptajā stiegrojuma, līdz izveidojas kritiski stāvokļi, kas ir par pamatu liektu elementu nestspējas zudumam. Nestspējas zuduma cēloņi var būt arī ilglaicīgas ekspluatācijas rezultātā izveidojušies bojājumi, kā arī materiāla novecošanas efekti. Pieaugot ekspluatācijas slodzēm, bieži vien arī kvalitatīvu konstrukciju elementu nestspēja izrādās nepietiekama.

Pēdējo gadu būvniecības praksē dzelzsbetona elementi tiek pastiprināti ar oglekļa šķiedru lentām vai plātnēm. Šāda pastiprinājuma mērķis ir paaugstināt attiecīgo būvelementu nestspēju un stingumu konkrētajos ekspluatācijas apstākļos. Plašu pielietojumu guvuši oglekļplasta materiāli ar dažāda veida oglekļu šķiedrām un saistvielām. Variējot ar šķiedru un saistvielu īpašībām iespējams atrast optimālos pastiprinājuma veidus dzelzsbetona liektiem elementiem. Papildus stiegrojums liektu siju stieptajā zonā kompozītmateriālu veidā iespaido plaisu atvēršanās procesu betonā, paaugstina liektu elementu nestspēju un stingumu.

Liektu dzelzsbetona elementu stingumu iespaido plaisu attīstība betona stieptajā zonā. Plaisu pieauguma rezultātā samazinās liektā elementa spiestā betona zona un izmainās spriegumstāvoklis sijas šķērsgriezumā. Tā kā betonam ir izteikti nelineāra spriegumu deformāciju sakarība, tad pieaugot spriegumiem to pārdalīšanās dēļ pieaug tā betona daļa, kur ir izteikts nelineārs deformēšanās raksturs.

Būvdarinājumu konstruktīvo elementu lielākajai daļai raksturīga īpatnība, ir to neviendabīgā un bieži vien arī nesimetriskā struktūra. Pilnā mērā tas attiecināms uz pastiprinātiem liektiem dzelzsbetona elementiem. Nesimetriskas struktūras dēļ šajos elementos veidojas komplicētas piepūļu un pārvietojumu savstarpējam sakarībām.

Neviendabīgai, bet parasti orientēti veidotai pastiprinātu būvelementu struktūrai ir slāņainības raksturs un tādēļ šādu darinājumu aprēķinu shēmas veiksmīgi var veidot slāņainas struktūras modeļu veidā. Līdz ar to šādu būvelementu aprēķinos izmantojamas slāņainainu stieņu mehānikas hipotēzes un risinājumu metodes.

Slāņainu struktūru pielietošana konstruktīvo elementu izveidē paver plašas iespējas šādu kombinētu būvelementu fizikāli - mehānisko īpašību regulēšanā. Slāņainības princips ļauj maksimāli izmantot atsevišķu slāņu potenciālās iespējas jaunu ar regulējamām īpašībām apveltītu materiālu veidošanā. Būtiskākās regulējamās mehāniskās īpašības ir stiprība un stingums, bet reālās konstrukcijās konkrētos ekspluatācijas apstākļos svarīgas ir arī tādas īpašības kā pašsvars, korozijas noturība, termo un skaņas izolācija u.c. Kombinēto tipu konstrukcijas var tikt veidotas to izgatavošanas periodā, atbilstoši prognozējamiem ekspluatācijas apstākļiem. Tradicionāli slāņainas struktūras tiek veidotas simetriskas pret vidusplakni (piem., saplāksnis, polimēru vai cementu bāzes kompozīti).

Tomēr atsevišķos gadījumos daudz racionālākas ir nesimetriskas struktūras. Nesimetrijas princips plaši tiek izmantots liektos dzelzsbetona elementos, kompensējot betona krasi atšķirīgās stiprības īpašības stiepi un spiedi ar neregulāri izvietotu metāla stiegrojumu. Nesimetriskas slāņainas struktūras veidojas arī esošo, bieži vien jau ekspluatējamu konstrukciju pastiprināšanas gadījumos.

Tiltu būvniecības praksē uzsāktā liekto siju pastiprināšana ar to stieptajā zonā pielīmētiem ogļplastu slāņiem guvusi visai plašu pielietojumu. Lai radītu zinātniski pamatotus liekto dzelzsbetona elementu pastiprināšanas principus un iegūtu uz slāņainu stieņu strukturālās mehānikas atziņu pamata balstītas sakarības racionāla pastiprinājuma struktūras un kvantitatīvā sastāva prognozēšanai, darbā tiek veikti pētījumi izmantojot daudzkomponenšu slāņainu struktūru mehānikas pamatnostādnes un metodes. Šo pētījumu galvenās problēmas saistītas ar iekšējo piepūli sadalījuma mijiedarbības un izmaiņas likumsakarību noteikšanu kombinētos daudzkomponenšu stieņos ar nesimetrisku struktūru un slogojuma gaitā mainīgām deformatīvajām un stiprības īpašībām.

Darba gaitā pētīt slāņainu profilēta šķērsriezuma stieņu un stieņu sistēmu mehāniskās īpašības, ņemot vērā šķērsriezuma profilu, struktūras nesimetriju un atsevišķu slāņu mehāniskās īpašības, izstrādāta metodika sijas lieces spriegumu noteikšanai. Iegūtie teorētiskie rezultāti salīdzināti ar eksperimentālajiem.

Iespējami divi principiāli atšķirīgi ekspluatēto siju pastiprināšanas varianti. Viens no tiem saistīts ar ekspluatēto siju atslogošanu un pastiprināšanu atslogotā stāvoklī. Tādā gadījumā lielā mērā tiek samazinātas ekspluatācijas gaitā uzkrātās izlieces, praktiski atslogotas visas sijas komponentes un aizvērtas plaisas. Veicot pastiprināšanu ar pielīmētām ogļplasta lentām, tiek radīta jauna konstruktīva sistēma ar izteikti slāņainu struktūru. Šīs struktūras pamatelementi ir spiestās zonas betons un metāla stiegras, saplaisājušais betona slānis, stieptās metāla stiegras un stieptās ogļplasta lēntas. Gadījumos, kad iepriekšējās ekspluatācijas rezultātā netika pārsniegta stiegru tecēšanas robeža, pastiprināto siju nestspējas un stingrības aprēķini veicami ar iepriekš izklāstīto metodiku ievērtējot reāli eksistējošo sijas struktūru, pastiprina

Otrs pastiprināšanas variants ir saistīts ar kombinēto siju izveidošanu neatslogotā stāvoklī. Tādā gadījumā sija saglabājas ekspluatācijas gaitā uzkrātās deformācijas un slogojuma gaitā izveidojies slāņainās struktūras komponentu spriegumstāvoklis. Tātad tiek pastiprināta dzelzsbetona sija ar sākumspriegumiem un sākumdeformācijām. Uzsākot pastiprinātās sijas ekspluatāciju, jāreķinās ar to, ka ar izklāstīto metodiku prognozējamās izlieces sastādīs tikai daļu no kopējam izliecām, bet piepūles komponentēs daļu no reālajām piepūlēm.

Darba gaitā pētītas liekto dzelzsbetona elementu deformatīvās īpašības visā slogojuma diapozonā līdz sabrukumam. Izstrādātā metodika piemērojama lieces stinguma noteikšanai lineārajā, plaisu veidošanās un metāla stiegru tecēšanas diapazonos. Metodika realizēta skaitļojamās programmas veidā un dod iespēju ievērtēt gan sijas komponentu elastīgās īpašības, gan betona deformatīvo īpašību nelinearitāti, plaisu attīstību un metāla stiegru tecēšanu stieptajā sijas zonā un spriegumu pārdalīšanos starp komponentēm slogojuma gaitā. Pētījumu rezultāti rāda, ka dzelzsbetona siju pastiprinājums ar ogļkļaplasta slāņiem būtiski samazina siju izlieces un atslogo metāla stiegras. To tecēšana sākas pie būtiski lielākām slodzēm. Tas ir cēlonis pastiprināto siju nestspējas pieaugumam. Iegūtie rezultāti izmantojami liekto elementu pastiprināšanā ar stieptajā zonā pielīmējamiem papildus slāņiem nosakot nepieciešamos šo slāņu raksturlielumus, to daudzumu un pietiprinājuma veidu.

Liekto kombinētu siju bīdes plaisu atvēršanās un attīstības pētījumi pierāda, ka kombinēto siju bīdes stingrības un stiprības paaugstināšanai racionāli ir sijas neitrālai asij perpendikulāri izvietoti pastiprinošie slāņi ar augstām bīdes nestspējas īpašībām.

Izstrādātās metodikas pamatotību apstiprina salīdzinot teorētiski prognozēto un eksperimentāli iegūto rezultātu salīdzināšana.

Eksperimentālie pētījumi rāda, ka pastiprinot dzelzsbetona sijas ar pielīmējamiem ogļplasta slāņiem, iespējams būtiski palielināt to lieces stiprību, ja tiek nodrošināta kvalitatīva saķere starp siju un pielīmētajiem slāņiem. Pastiprināto siju nestspējas zudums lielā mērā ir saistes sabrukums līmējumu galos. Šī sabrukuma novēršana vai arī ierobežošana dod iespēju paaugstināt siju nestspēju. Tas attiecas kā uz ekspluatācijā esošām pastiprinātām sijām, tā arī uz iepriekš neslogotām sijām, veidojot to ārējo stiebrojumu pastiprinošo slāņu veidā.

Izstrādātā ; metodika ļauj, izmantojot slāņainu stieņu strukturālo mehāniku, prognozēt un regulēt dzelzsbetona konstrukciju elementu izlieces un pārvietojumus, kuri ir primārie normētie būvkonstrukciju kvalitātes rādītāji.

Darbā izstrādātā liektu dzelzsbetona elementu pastiprināšanas metodika ir pielietota 20 gadus ekspluatētām dzelzsbetona tilta sijām tiltam Latvijā, Rīgas rajonā uz Jūrmalas apvadceļa pār Varkaļu kanālu, kurš savieno Lielupi ar Babītes ezeru.

Darba mērķis

Izstrādāt ar kompozītmateriālu slāņiem pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu stinguma un nestspējas aprēķinu metodiku, kura dotu iespēju ievērtēt slogojuma gaitā mainīgo darinājuma struktūru un komponentu deformatīvās īpašības un veikt tās realizāciju konkrētās ekspluatācijā esošas konstrukcijas nestspējas paaugstināšanai.

Darba zinātniskā novitāte

Izstrādāta jauna "ai" kompozītmateriāla slāņiem pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu nestspējas un stinguma aprēķinu metode.

Radīts kombinētas struktūras būvelementa slogojuma gaitā mainīgs aprēķinu modelis un tā realizācijas algoritms skaitliskā formā.

Noteikta betona plaisu veidošanās dinamikas atkarība no pastiprinošo slāņu kvantitatīvām un kvalitatīvām īpašībām.

Izstrādāta spriegumu sadalījuma un pārdalīšanās noteikšanas metodika statiskas lieces gadījumā, ņemot vērā betona nelineārās deformatīvās īpašības un plaisu veidošanās un attīstības procesus slogojuma gaitā.

Izstrādāta metodika pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu deformāciju prognozēšanai mainīgas struktūras apstākļos.

Darba praktiskā vērtība

Radīta iespēja prognozēt ekspluatējamu liektu elementu nestspējas rezervi un izstrādāta metode to pastiprināšanai līdz nepieciešamajam nestspējas līmenim.

Iegūtie rezultāti realizēti veicot trīslaidumu dzelzsbetona tilta pār Varkaļu kanālu pastiprināšanai atbilstoši normatīvajām slodzēm.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts:

spriegumu sadalījuma aprēķins liektos, ar kompozītmateriālu uzlikām pastiprinātos dzelzsbetona elementos, kas izmantojot slāņainu materiālu mehānikas pamatprincipus, ievērtē kā betona plaisāšanu slogojuma gaitā, tā nelineārās betona deformatīvās īpašības,

aprēķinu metodika pastiprinātu dzelzsbetona elementu lieces stinguma izmaiņu likumsakarību noteikšanai;
attiecības starp pastiprinošo elementu kvantitatīvi kvalitatīvajiem rādītājiem un pastiprinātā elementa nestspēju liecē;
izstrādātās aprēķinu metodikas realizācija divdesmit gadus ekspluatēta tilta dzelzsbetona siju pastiprināšanai par 40 %.

Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, 5 nodaļām, slēdziena un bibliogrāfijas. Darba apjoms ir 130 lappuses, 67 zīmējumi, 10 tabulas un literatūras saraksts, kas satur 107 nosaukumus.

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti starptautiskās konferencēs:

- RTU, Arhitektūra un Būvzinātne, Rīga, Latvija, 2002. „Cracking Criteria of Reinforced Concrete Beams Strengthened for Shear”
- RTU, Arhitektūra un Būvzinātne, Rīga, Latvija, 2003. „Method of Prediction of the Deflections of Reinforced Concrete Beams Considering Cracking”
- SDSMS'03 Internacional Confarence, Klaipēda, Lithuania, 2003. „Model of Nonlinearly Deforming Laminated Material”
- 13. International Confarence Mechanics of Composite Materials, Jūrmala, Latvija, 2004. „Deformability Prediction for Ferroconcrete Beams Strengthened with Carbon-Filled Plastic Lavers”
- 8. International Confarence of Modern Building Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania, 2004. „Forecasting of Deflections of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Plastic Sheets”
- RTU 45th International Scientific Conference, Rīga, Latvija, 2004. „Recovery and Enhancement of Load Carrying Capacity of Bent Operating Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Plastic Sheets”
- RTU 46th International Scientific Conference, Rīga, Latvija, 2005. „Saistes īpašības ar kompozītiem materiāliem pastiprinātos liektos dzelzsbetona elementos”

Galvenie darba rezultāti izklāstīti 9 publikācijās.

Darbs veikts Rīgas Tehniskās universitātes Būvmehānikas katedrā laika posmā no 2000. līdz 2006. gadam.

DARBA SATURS

Darba ievadā tiek izklāstīta problēmas nostādne novecojušas infrastruktūras ekspluatācijas jomā un formulēti darba mērķi, uzdevumi, zinātniskā novitāte un praktiskā nozīme.

Pirmajā nodaļā dota liektu dzelzsbetona konstrukciju pastiprināšanas metožu un tehnoloģiju stāvokļa analīze un klasifikācija, eksistējošo aprēķina metožu apskats, to iespējas un nepilnības.

Pieaugot ekspluatācijas slodzēm, kā arī stiegru un betona korozijas rezultātā konstrukciju elementu nestspēja bieži izrādās nepietiekama. Liektu dzelzsbetona konstrukciju pastiprināšanas vēsture ir gandrīz tik par sena kā pašu dzelzsbetona konstrukciju vēsture.

Vai izdalīt sekojošus pastiprinājumu tehniskos risinājumus.

1) Konstrukcijas statiskās shēmas mainīšana.

Šis ir viens no efektīgākajiem dzelzsbetona konstrukciju pastiprināšanas risinājumiem. Tā, piemēram, iespējams veikt sijas balstu sabiezīšanu samazinot aprēķina laidumu, jeb pat izveidot papildus balstus.

Pie šiem risinājumiem pieskaitāma sijas pārveidošana par šprengelveida konstrukcijas augšjoslu. Tā rezultātā sijā ievērojami tiek samazināti lieces spriegumi, tā tiek pieslogota ar spiedes spriegumiem, uz ko betona konstrukcijai ir ievērojami lielāka rezerves, salīdzinot ar stiepes spriegumiem. Jāatzīmē, ka šie risinājumi ir iespējami, ja liektajam elementam ir gan stieptā, gan arī spiestā armatūra, kas var kļūt stiepta lieces momentam mainot virzienu.

2) Dzelzsbetona elementa šķērsriezuma palielināšana.

Izplatīts dzelzsbetona šķērsriezumu pastiprināšanas paņēmiens ir šķērsriezuma palielināšana papildus piebetonējot augstāku betona spiesto zonu. Tā rezultātā iespējams palielināt stieptā stiegrojuma spēka plecu un lieces momentu, ko spēj uzņemt šķērsriezums.

Veicot šķērsriezuma pastiprināšanu ar "spiestās zonas palielināšanu, svarīgi ir nodrošināt esošās sijas betona un jaunā piebetonējuma kopdarbu. Piebetonējuma paņēmiens ir mazefektīgs, ja šķērsriezumu jāpastiprina uz šķērsspēkiem.

Šis pastiprinājuma veids ir drošs, korozijas noturīgs un vienkāršs, taču palielina konstrukcijas gabarītus un papildus pieslogo konstrukciju. Tomēr konstrukciju iespējams pastiprināt par tik, lai pastiprinātā konstrukcija uzņemtu gan jaunās (palielinātas) ekspluatācijas slodzes, gan arī konstrukcijas pastiprinājuma svaru. Svarīgi ņemt vērā, pastiprinājuma gadījumā jāreķinās ar papildus slodzi arī uz sijas balstiem. Tādēļ bieži šāda veida pastiprinājums nav piemērots tiltiem, ja tilta balsti spēj uzņemt tikai papildus ekspluatācijas slodžu pieaugumu bez rezervēm konstrukcijas slodžu pieaugumam.

3) Stieptas armatūras šķērsriezuma palielināšana.

Liekta dzelzsbetona šķērsriezuma stiepto armatūru iespējams palielināt stieptajā betonā urbjot un stiprinot aptveres, kas darbā iekļauj papildus garenstiegras.

Šādā gadījumā garenstiegras nepieciešams apbetonēt. Arī šādu pastiprinājumu varam uzskatīt par korozijas noturīgu, un arī par drošu, ja kvalitatīvi tiek izpildīti visi tehniski sarežģītie pastiprināšanas darbu etapi. Tomēr šāds pastiprināšanas paņēmiens nav populārs, jo ir tehniski sarežģīts, bez tam šī risinājuma pielietojumu ierobežo dažādi, tam nepieciešamie tehniskie nosacījumi, kas bieži konstruktīvu apsvērumu dēļ nespēj izpildīties.

Daudz plašāku pielietojumu guvusi metode veicot tērauda lokšņu līmēšanu ar epoksīda līmju palīdzību sijas stieptajā zona. Šāda pastiprināšanas tehnoloģija ir līdzīga šajā darbā apskatītajam siju pastiprināšanas paņēmienam ar kompozītmateriālu uzlikām. Šādas pastiprināšanas gadījumā grūtības sagādā korozijas aizsardzības nodrošināšana un pastiprināšanas netehnoloģiskums, kaut arī šāda pastiprināšana ir salīdzinoši tehnoloģiskāka par iepriekš, minēto stieptā stiegrojuma iestrādāšanu šķērsriezumā.

4) Pastiprināšana ar kompozītmateriālu uzlikām.

Līdzīgi kā gadījumā kad palielina sijas stiepto armatūru zem tās pielīmējot tērauda loksnes, sija var tikt pastiprināta zem tās pielīmējot kompozītmateriālu slāņus.

Jāatzīmē, ka kaut arī šis pastiprinājuma veids ir gan tehnoloģisks, gan arī korozijnoturīgs, pagaidām tas vēl ir salīdzinoši dārgs. Tomēr pēdēja laikā šāda veida

pastiprināšana ir guvusi pielietojumu daudziem lielgabarīta tiltu laidumiem Šveicē, Vācijā, ASV, ka arī vairākos tiltos Latvijā.

- Jāizšķir vairāki pastiprināšanas veidi. Pirmais ir pastiprinājuma izveidošana piestiprinot uz dzelzsbetona sijas virsmas vienu vai vairāku slāņu kompozītmateriālu. Praksē visplašāko pielietojumu guvuši oglekļplasta slāņi, kuri tiek piestiprināti dzelzsbetona siju stieptajai virsmai ar specializētu epoksīda sveķus saturošu līmi. Oglekļplastu slāņi tiek realizēti konstantu biezumu un platuma slokšņu veidā, kuras tiek paralēli izvietotas uz sijas virsmas. Šādu slokšņu standartplatums parasti ir 50 mm un tās tiek izvietotas ar 5 - 10 mm atstarpēm. Slokšņu biezums ir 1 - 8 mm un tās tiek piestiprinātas vienā vai vairākās kārtās. Otrs sijas pastiprinājuma veids ir plānu (0,15-1 mm) oglekļplasta slāņu piestiprinājums visā sijas platumā vairākās kārtās. Šādas kārtas var būt kā vienā virzienā ar oglekļa šķiedrām armētas uzlikās, tā arī audumplastiki. Trešais papildus stiegrojuma veids ir leņķveidīgi oglekļplasta profili, kuri pamīšus tiek piestiprināti sijas malām.

Kompozīto materiālu iespējamā struktūras daudzveidība ļauj būtiski regulēt šo materiālu mehāniskās īpašības atbilstoši ekspluatācijas apstākļu prasībām. Otrs kompozīto materiālu mehānisko īpašību pilnveidošanas un bagātināšanas ceļš ir daudzkomponenšu struktūru veidošana ar vairākām dažāda tipa šķiedrām, t.i. hibrīdie materiāli. Hibrīdu materiālu struktūra un sastāvs tiek veidots ar mērķi apvienot vienā materiālā vairāku tos veidojošo komponenšu tipiskās īpašības. Tā, piemēram, oglekļa-organo-epoksīda kompozītos tiek apvienotas oglekļa šķiedru augstās stiprības un stingrības īpašības ar organisko šķiedru viskozajām īpašībām, pie tam nezaudējot augstās stiprības un deformatīvās īpašības. Galvenie šķiedru tipi ir stikla, augstas stiprības oglekļa, augsta moduļa oglekļa un augsta moduļa organiskās šķiedras.

Tāpat pielietojot kompozītas tievas šķiedras (ne tikai stikla) tiek izmantotas pirmām kārtām to augstās stiprības īpašības. Varam atzīmēt, ka līdzīgs efekts - stiprības pieaugums samazinot šķiedras diametra — vērojams arī metāliem. Diemžēl šī principa pielietojuma efektivitāti metāliem samazina to augstais blīvums.

Pagājušā gadsimta otrajā pusē ir uzsākti plaši eksperimentāli pētījumi ar kompozītmateriāliem (gan oglekļplastiem, gan arī ar stiklaplastiem) pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu izpētei. Eksperimentālie pētījumi ar dažādas konstrukcijas pastiprinātām dzelzsbetona sijām rāda, ka oglekļa slāņi pozitīvi iespaido sijas izlieces, t.i. tie ļauj būtiski samazināt maksimālās izlieces pie konkrētas lieces momenta vērtības. Pētījumi rāda, ka īpašu uzmanību jāvērs pastiprinājuma un pastiprināmā savienojuma nodrošināšanai visā tā garumā.

Ar kompozītmateriālu uzlikām dzelzsbetona stieptajā zonā pastiprinātu siju nestspējas zuduma iemeslus varam iedalīt divās grupās:

- Konstrukcijas nestspējas zudums, ko izsauc pastiprinājuma un sijas atslāņošanās.
- Konstrukcijas nestspējas zudums, ko izraisa spiestā betona sabrukums jeb pastiprinājuma sabrukums stiepē, tā sauktais „klasiskais” konstrukcijas sabrukums.

Tā sauktais „klasiskais” konstrukcijas sabrukums notiek pēc sijas nestspējas pārsniegšanas. Taču konstrukcijas nestspējas zudums, ko izsauc pastiprinājuma atslāņošanās, bieži notiek vēl pirms sijas nestspējas pārsniegšanas, un to izraisa kļūdas pastiprināmās konstrukcijas apsekošanā, tehnoloģiskas nepilnības, un citi faktori.

Par pareizi realizētu ar kompozītmateriāla uzlikām pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu var uzskatīt tādu šķērsgriezumu, kurā ir realizēts sekojošs pastiprinājumu komplekss:

- ir pareizi novērtēti betona aizsargslāņa nestspējas parametri, nepieciešamības gadījumā to pastiprinot ar betona sanācijas materiāliem;
- ir paredzēta betona virsmas sagatavošanas un lentas pielīmēšanas tehnoloģija, kas nodrošina pielīmētajam materiālam adekvātu līmējumu,

- ir nodrošināts nepieciešamais lentas gala enkurojums.

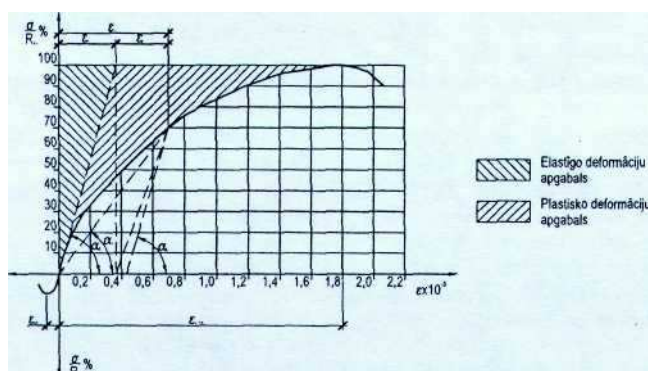
Šādi pastiprinātā liektā dzelzsbetona elementā pārsniedzot kritiskās piepūles iespējams tā sauktais klasiskais šķērsriezuma sabrukums, kā rezultātā sākas tērauda tecēšana, sabrūk spiestās zonas betons vai arī oglekļplasta uzlika.

Pēdējā desmitgadē visai plaši izvērtušie eksperimentāli pētījumi par nepastiprinātu un ar kompozītmateriālu uzlikām pastiprinātu siju deformēšanās un sabrukuma atšķirībām. Eksperimentālo pētījumu rezultāti tiek salīdzināti ar teorētiskos aprēķinos rezultātiem. Teorētiskiem aprēķiniem plaši tiek izmantotas būvnormatīvos piedāvātās aprēķinu metodikas un galīgo elementu metode.

Izmantojot galīgo elementu metodi tiek veikti aprēķini pielietojot gan lineāri deformējamus plakaniskus galīgos elementus kompozītmateriālu uzliku gala enkurojumu spriegumu aprēķinos, kur sagaidāms, ka betons darbojas elastīgajā darba stadijā, gan pielietojot nelineāri deformējamus plakaniskus galīgos elementus, kas ievērtē betona nelinearitāti, gan arī pielietojot telpiskus galīgos elementus. Iegūtie rezultāti uzskatāmi raksturo spriegumu sadalījuma galvenās īpatnības liekā daudzkomponenšu nepārtrauktā vidēs.

Teorētiski aprēķini tiek veikti arī izmantojot slāņainu materiālu struktūras modeli, taču jāatzīmē, ka tas tiek pielietots tikai neplaisājušam dzelzsbetonam vai arī, nosakot betona plaisu dziļumu un neitrālās ass stāvokli pēc būvnormatīvos rekomendētas aprēķina metodikas.

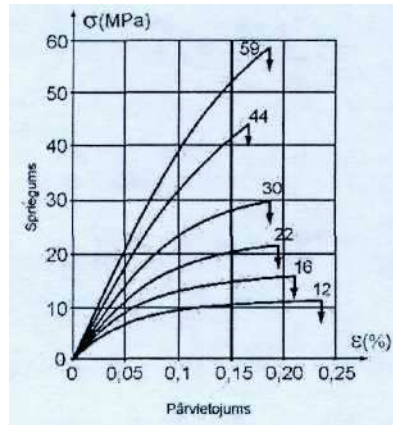
Otrā nodaļā tiek formulēta betona deformatīvās īpašības aprakstošās sakarības un analizēti rezultāti, kuri iegūstami izmantojot normatīvo metožu principus.



1. att. Betona relatīvā spiesto spriegumu - deformāciju sakarība.

Betons ir deformējams materiāls ar elastīgām un plastiskām īpašībām, kam raksturīgi augsti spiedes nestspējas rādītāji, bet zema stiepes pretestība. Eksperimentālos pētījumos iegūtās betona deformāciju līknes liecina par to, ka deformāciju raksturs lielā mērā ir atkarīgs no materiālam pieliktās slodzes lieluma (1. att.).

Sprieguma un tam atbilstošās relatīvās deformācijas attiecība ($E_c = \sigma/\epsilon$), ir mainīgs lielums un ir atkarīgs no sprieguma līmeņa materiālā. Parametru E_c bieži sauc par šķeļošo, jeb sekanto moduli. Jāņem vērā, ka betona nelinearitātes raksturs atkarīgs no betona klases. To ilustrē 2. att.



2. att. Dažādu klašu betonu spriegumu - deformāciju sakarības.

Liektas dzelzsbetona konstrukcijas, tas pakāpeniski slogojot, veidojas trīs tipiskas deformēšanās stadijas. To pamatā ir dzelzsbetona konstrukcijām raksturīga īpašība - plaisu atvēršanās. Nemot vērā to, ka betona stiepes stiprība ir būtiski zemāka par spiedes stiprību, liektā dzelzsbetona elementā notiek nevienmērīga deformēšanās. Pakāpeniskas plaisu veidošanās dēļ betona stieptajā zonā notiek tērauda stiegru pieslogošanās un spriegumu pārdalīšanās visā elementa šķēsgriezumā..

Liektiem dzelzsbetona elementiem raksturīgas vairākas principiāli atšķirīgas darba stadijas. Pirmo stadija uzskatāma par elastīgās deformēšanās stadiju. Pie relatīvi mazām piepūlēm un to izraisītiem nelieliem lieces momentiem, liektā dzelzsbetona elementā veidojas elastīgas deformācijas visos tā komponentos. Sakarība starp spriegumiem un deformācijām ir lineāra gan spiestajā gan stieptajā zonā un spriegumu epīrām ir trīsstūrveida raksturs. Pieaugot piepūlēm, betona stieptajā zonā spriegumi sasniedz robežstiprību stiepē un betona stiepes spriegumu epīra veidojas liklīnijas formā. Spiestajā betona zonā deformācijām ir elastīgs raksturs un spriegumu epīra saglabā trīsstūrveida formu. Spiestais stiegrojums deformējas kopā ar betonu un uzņem spiedes spriegumus.

Otrā stadija saistīta ar plaisu veidošanos un to attīstību stieptā betona zonā. Palielinoties slodzei, plaisu atvērums pieaug, līdz tas sasniedz maksimālo atvērumu. Šajā situācijā attiecīgajā sijas šķēlumā stiepes spriegumus uzņem tikai stieptais stiegrojums (σ_s), spiedē strādā betons (σ_c) un spiestais stiegrojums. Spriegumu epīra spiestajā zonā pakāpeniski iegūst arvien izteiktāku liklīnijas formu, maksimālie spriegumi veidojas šķēsgriezuma ārpalā.

Par trešo stadija uzskatāma liektā dzelzsbetona šķēsgriezuma nestspējas zuduma stadija. Par nestspējas zuduma cēloni vai" būt kritiski spriegumi (σ_v) stieptajā tērauda stiegrojumā, kuri izraisa šo stiegru tecēšanu, vai arī spiestās betona zonas sabrukums. Ja pirmā gadījumā stiegru tecēšana novērojama kā intensīvs izliecu pieaugums, tad otrais sabrukuma veids praktiski nav vizuāli paredzams. Tādēļ nav vēlams pieļaut otrā gadījuma sabrukuma iespēju, jo par pilnīgu sijas sabrukumu liecina tikai grūti pamanāmas plaisas betona stieptajā zonā.

Sakarības starp deformācijām un spriegumiem betonam spiedē reglamentē Eirokodekss dzelzsbetona konstrukcijām (EN 1992-1, Eurocode 2: Design of Concrete Structures; Part 1: General Rules and Rules for Buildings). Eirokodeksā tiek dotas

sākotnējās elastības moduļa vērtības E_b dažādām betona klasēm un tiek reglamentēts lietot sekojošās sakarības:

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k \cdot \eta + \eta^2}{1 + (k-2) \cdot \eta} \quad (1)$$

kur $\eta = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}$, kur ϵ_c - relatīvā deformācija, ϵ_{c1} - asimptotiskā deformācijas vērtība, kura

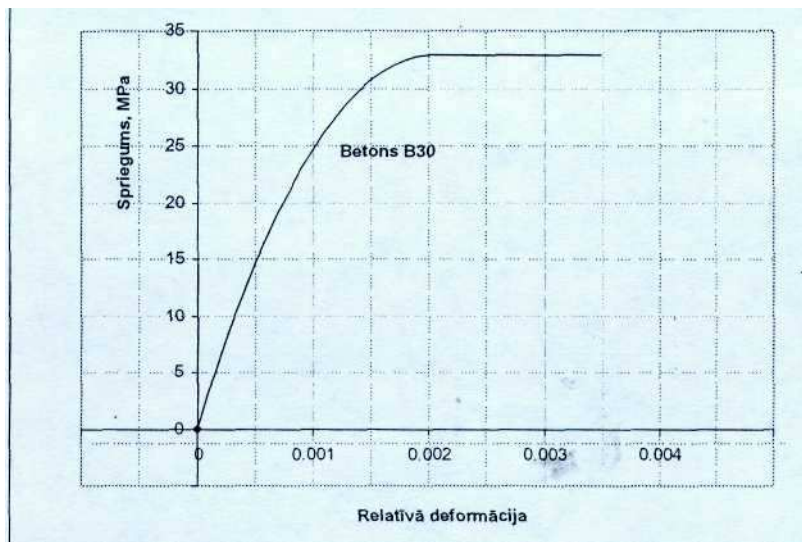
atbilst maksimāli iespējamiem spriegumiem betona, pie kuriem betona deformācijas turpina pieaugt nepalielinoties spriegumiem (atkarīga no betona klases un tiek dota Eirokodeksa tabulā 3.1. Stress and deformation characteristics for normal concrete, EN1992-1);

$k = 1,1 \cdot \frac{E_{cm} \cdot \epsilon_{bl}}{f_{cm}}$, kur E_{cm} - sākotnējais betona elastības modulis (parasti 27 - 44MPa);

$f_{cm} = f_{ck} + 8$ - betona aprēķina pretestības vērtība, dota Eirokodeksa tabulā 3.1. (Stress and deformation characteristics for normal concrete, EN1992-1);

f_{ck} - betona aprēķina spiedes robežpretestības vērtība cilindriskā spiedē, kas tiek izmantota lai noteiktu betona klasi;

Saskaņā ar Eirokodeksa nosacījumiem, sakarība (1) ir izmantojamas diapozonā no nulles līdz normatīvai deformācijai $\epsilon_{c2} = 0,002$ atbilstoši maksimālo normatīvo spriegumu vērtībai. Būvnormatīvs paredz, ka robežās no 0,002 līdz 0,0035 deformācijas turpina pieaugt spriegumiem nepalielinoties. Pie deformācijas $\epsilon_c = 0,0035$ betons sabrūk.

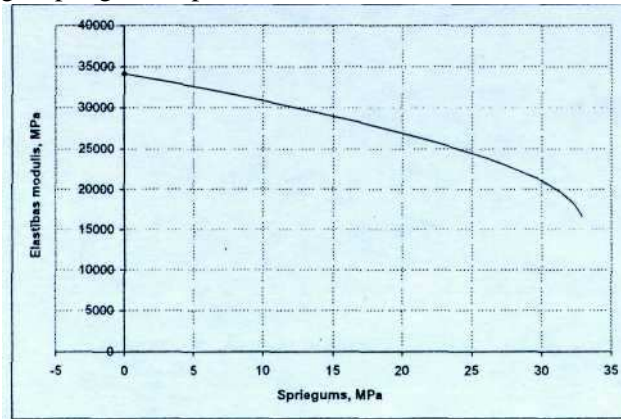


3. att. Aprēķiniem rekomendējama spriegumu-deformāciju līkne betonam B30 spiedē pēc EN1992-1.

Izmantojot sakarību (1) nosakāms betona deformatīvais parametrs E_a — betona sekantais modulis:

$$E_a = \frac{2 \cdot f_{cm} \cdot \sigma_c}{\left(-(k \cdot \sigma_c - 2 \cdot \sigma_c - f_{cm} \cdot k) - \sqrt{(k \cdot \sigma_c - 2 \cdot \sigma_c - f_{cm} \cdot k)^2 - 4 \cdot f_{cm} \cdot \sigma_c} \right)} \quad (2)$$

No iegūtās spriegumu - deformāciju sakarības iespējams sastādīt grafiku, kas saista šīs vērtības betonam konstrukciju aprēķinu veikšanai. B30 klases betonam sekantā moduļa izmaiņa pieaugot spriegumam parādīta 3. attēlā.



4. att. Moduļa E_a atkarība starp spriegumiem B30 klases betonam spiedē aprēķiniem pēc EN1992-1

Līdzīgi dati par dzelzsbetona konstrukcijās izmantojamo betonu deformatīvajām īpašībām iestrādāti jaunajā (2004. gada) Krievijas un arī ASV būvnormatīvā.

Projektējot pastiprinātus liektus dzelzsbetona elementus Latvijas būvpraksē nākas vadīties pēc metodikas, kuru rekomendē Starptautiskā Betona Federācija - FIB (Federation Internationale du Beton), jo Latvijas Būvnormatīvos nav iestrādāta metodika par dzelzsbetona konstrukciju pastiprināšanu ar kompozītiem materiāliem.

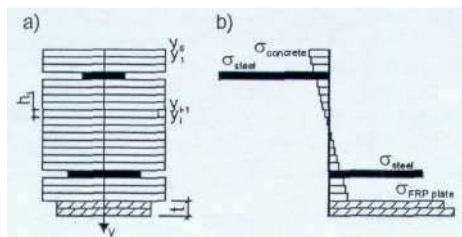
Metodika veidota reglamentējot pieļaujamās betona, stiegrojuma un pastiprinošā kompozītmateriāla relatīvās garendeformācijas. Šī metodika paredz risinājumu meklēt tuvinājumu ceļā, katram pieņemtajam pastiprinājuma šķērsgriezumam pārbaudot, vai netiek pārsniegtas pieļaujamās garendeformācijas. Šajos aprēķinos paredzētie tuvinājumi izkropļo teorētiski sagaidāmo spriegumu sadalījumu. Spriegumu sadalījuma vienkāršotā aprēķina radušās neprecizitātes tiek kompensētas ar drošuma koeficientu palīdzību.

Trešā nodaļā tiek izveidots uz slāņainas struktūras mehānikas principiem balstīts sloģojuma gaitā mainīgs ar kompozītmateriāla slāņiem pastiprinātu liektu dzelzsbetona elementu aprēķinu modelis.

Tā kā daudziem būvkonstrukcijās izmantojamiem liektiem elementiem ir stienveida forma, tad pamatoti ir pieņemt, ka šo izstrādājumu lieces teorija un tās sakarības būtībā reducējamas uz viendimensiālu aprēķina modeli.

Praktiski pielietojamas slāņainas struktūras stieņu lieces teorijas sakarības iegūstamas izmantojot virkni hipotēžu attiecībā uz atsevišķo slāņu un stieņu deformācijām kopumā.

Slāņainas struktūras stieņu mehānikā būtiska loma ir atšķirīgu slāņu izvietojuma ģeometrijai. Ar mērķi izslēgt iespēju stienim pie vienkāršākajiem slogojumiem (stiepe, spiede, liece) iegūt nevēlamas deformācija, piemēram, savērpi, stieņu struktūra bieži vien tiek veidota simetriska attiecībā pret vidusplakni. Ar mērķi maksimāli izmantot stienus veidojošo slāņu potenciālās iespējas, bieži vien tiek veidotas nesimetriskas struktūras sistēmas, t.i. attiecībā pret stieņa vidusplakni tiek izvietoti slāņi ar atšķirīgām deformatīvajām īpašībām. Šāda situācija veidojas arī ar kompozītmateriāla slāņiem stieptajā zonā pastiprinātās dzelzsbetona sijās. Būtiska kombinēto siju struktūras īpatnība ir tā, ka slogojuma gaitā stieņa slodzei uzņemošā struktūra mainās. Tā cēlonis ir plaisu veidošanās un attīstība stieptajā betona zonā.



5. att. Slāņainas struktūras stieņveida elementa šķērsriezums (a) un tam atbilstošie lieces spriegumi (b)

Tā kā uz stieņa stieptās virsmas izveidojusies plaisa nepārtraukti attīstās virzienā uz spiesto stieņa zonu, tad slogojuma gaitā aizvien lielāka šķērsriezuma daļa tiek izslēgta no stiepes spriegumu uzņemt. Šāda procesa rezultātā notiek nepārtraukta spriegumu pārdalīšanās starp stieni veidojošajām komponentēm, gan betonā. Slodzei pieaugot aizvien lielākā betona daļā spriegumi stipri pārsniedz lineārās deformēšanās robežu. Izmantojot slāņainas struktūras stieņa modeli, liels slāņu skaits veicina aprēķina rezultātu precizitāti nodrošināšanai.

Sastādot katra slāņa līdzsvara nosacījumus, izmantojot atsevišķo slāņu fizikālos vienādojumus nosakām slāņainas struktūras stieņu membrāno, jaukto un lieces stingumu. Patvaļīga slāņu skaita n gadījumā šos stingumus nosaka sakarības:

$$A = \sum_{i=1}^n b_i E_i h_i = \sum_{i=1}^n E_i F_i ; \quad (3)$$

$$B = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n E_i F_i (y_i + y_{i-1}) (2y_i - h_i) - y_n A ; \quad (4)$$

$$D = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n E_i F_i (3y_i (2y_i - h_i) + h_i^2) - y_n (2B + y_n A) . \quad (5)$$

Šajās sakarībās izmantoti apzīmējumi: F_i - i -tā slāņa šķērsriezuma laukums, h_i b_i - i -tā slāņa biezums un platumas, y_i - i -tā slāņa ierobežojošās virsmas koordināte (maksimālā), y_n - slāņainās paketes neitrālās ass stāvoklis, E_i - i -tā slāņa deformatīvā konstante.

Izmantojot nosacījumu, ka lineāra pa stieņa asi slogojuma gadījumā nenotiek stieņa izliece iegūstam nosacījumu, ka jauktais stingums ir nulle ($B = 0$). No šī nosacījuma tie noteikts liektā elementa neitrālās ass stāvoklis:

$$y_n = \frac{\sum_{i=1}^n b_i E_i (y_i^2 - y_{i-1}^2)}{2 \cdot \sum_{i=1}^n b_i E_i (y_i - y_{i-1})} \quad (6)$$

Slāņainas struktūras modeļa priekšrocība liektu dzelzsbetona šķērsriezumu aprēķinos ir tā, ka piešķirot katram slānītim konkrētas deformatīvās īpašības, iespējams diskrētā veidā ievērtēt betona nelineārās deformatīvās īpašības. Tas ir sevišķi būtiski tādēļ, ka spriegumu sadalījums pa šķērsriezuma augstumu lieces gadījumā ir mainīgs gan mainoties slodzei, gan arī plaisu veidošanās un attīstības rezultātā.

Analizējot dzelzsbetona siju izlieces un to komponentu spriegumstāvokli, varam konstatēt, ka zemiem slodzes līmeņiem atbilst lineāras nepārtrauktas slāņainas vides modelim atbilstošs aprēķins, kurš plaši izmantots slāņainu struktūru deformatīvo īpašību prognozēšanā. Diemžēl liektu dzelzsbetona elementu gadījumā šī modeļa pielietošanas robežas ir visai šauras, jo tam ir pamatojums tikai līdz pirmo betona plaisu rašanās brīdim šķērsriezuma stieptajā zonā. Plaisas rodas spriegumiem sasniedzot betona stiepes stiprību, kura dažādu klašu betoniem atšķiras un sastāda 1/7 ... 1/15 daļu no betona spiedes stiprības.

Kombinēto siju gadījumā ar lieces plaknei paralēlu slāņu struktūru, kuru veido atšķirīgi materiāli, bieži vien veiksmīgi tiek pielietota reducētā šķēluma metode. Saskaņā ar šo metodi kompozītās sijas šķēlums tiek aizstāts ar ekvivalentu viena materiāla šķēlumu. Šķēlums uzskatāms par ekvivalentu dotās sijas šķēlumam, ja tam neitrālās ass atrašanās vieta un lieces momenta nestspēja ir tādas pat kā dotajam šķēlumam. Reducēta šķēluma metodes pielietojuma robežas ar kompozītmateriāliem pastiprinātu dzelzsbetona elementu gadījumos ir visai šauras. Tā lietojama tikai elastīgas komponentu deformēšanās gadījumā, t.i. līdz pirmajām betona plaisām. Tādēļ aprēķinu algoritms pēc plaisu parādīšanās tika veidots izmantojot struktūras modeli, kura pamatā ir sekojoši principi -sijas šķērsriezumā stiegtie slāņi aizstāti ar metāla slāņiem; betons, kas atrodas starp stiegrām, nosacīti tiek sadalīts uz betona slāņiem abās pusēs no attiecīgā stiegtā slāņa.

Metodikas realizācija veicama skaitliskā formā ar datorprogrammās izveidojamām elektroniskām tabulām (Microsoft Excel jeb OpenOffice Calc). Nepieciešamie rezultāti iegūstami skaitliskā pakāpeniskā tuvinājumu veidā vairākkārtēji atkārtojot aprēķinus ar izmainītām (precizētām) slāņu īpašībām.

Praktiski dzelzsbetona siju spriegumu aprēķinu izmantojot slāņainas struktūras modeli iespējams veikt sekojošā veidā:

1. Attiecīgais sijas šķērsriezums tiek aizstāts ar paralēlu dažāda platuma slāņu paketi Slāņu skaitu un biežumu izvēlas lietotājs. Slāņu stingumi E_i F_j ir atkarīgi no slāņu ģeometrijas (laukuma) F_i un deformatīvās konstantes E_i .

Metāla stiegras saturoši slāņi tiek iekļauti slāņainajā paketē reducējot to šķērsriezuma laukumu uz tāda platuma slāņiem, kuru laukums atbilst metāla stiegru kopējam šķērsriezuma laukumam.

2. Pielietojot izveidotajam dzelzsbetona sijas slāņainas struktūras modelim slāņainu materiālu aprēķina algoritmu, kas aprakstīts iepriekš, iegūstam spriegumu sadalījumu komponentēs pa šķērsriezuma augstumu.

Iegūtais rezultāts atbilst slogojuma gadījumam, kad slodzes izraisītie stiepes spriegumi betonā nepārsniedz tā stiepes lineārās deformēšanās robežas. Rezultāti iegūstami skaitliskā formā vai arī datorprogrammas radītu grafiku veidā.

3. Gadījumos, kad kādā no betona slāņiem tiek sasniegts spriegums, kurš pārsniedz lineārās deformēšanās robežu, aprēķins tiek atkārtots ar izmainītu deformācijas modeļa vērtību attiecīgajā slānī. Šāds aprēķins tiek atkārtots vairākkārtīgi, līdz tiek panākta nepieciešamā precizitāte. Šāda aprēķina procedūra tiek realizēta konkrētai lieces piepūlei.

4. Gadījumā, kad betona stieptajā zonā kādā no slāņiem tiek sasniegts betona stiepes stiprībai atbilstošs spriegums, betonā parādās plaisa. Šīs situācijas ievērtēšanai aprēķinu modelī attiecīgajam slānim tiek piemērota deformēšanās moduļa vērtība vienāda ar nulli (respektīvi - attiecīgais slānis no aprēķina tiek uzslēgts), un aprēķins tiek atkārtots ievērtējot izdalīto korekciju.

5. Gadījumos, kad ālējās slodzes izraisītie spriegumi betonā sasniedz betona robežstiprību, dzelzsbetona sijas tiek uzskatītas par nestspēju zaudējušām.

6. Gadījumos, kad ārējās slodzes izraisīti spriegumi stiegrās sasniedz metāla tecēšanas robežu, dzelzsbetona sijas tiek uzskatītas par nestspēju zaudējušām.

7. Ar kompozītmateriālu slāņiem pastiprinātām dzelzsbetona sijām statiskā slodzes gadījumā metāla stiegru tecēšana vēl nav uzskatāma par sijas nestspējas zudumu. Ja aprēķina uzdevumā metāla stiegru tecēšana ir pieļaujama, aprēķina modelī iespējams paredzēt tērauda deformatīvo modeli, kas ļauj ievērtēt tērauda tecēšanu. Kritiskais stāvoklis šādā gadījumā iestājas kompozītmateriāla slāņa stiepes sabrukuma rezultātā.

Ceturtnā nodaļā izklāstīta ar kompozītiem materiāliem pastiprinātu liektu dzelzsbetona sijū nestspējas un padevīguma prognozēšanas metodika.

Veicot dzelzsbetona sijū pastiprināšanu, jāreķinās ar to, ka šīs sijas ne vienmēr var tikt atslogotas un no plaisu attīstības viedokļa atgrieztas savā sākumstāvoklī. Tas nozīmē, ka sijas pastiprināšanas brīdī tās komponentes - betons un stiegras ir deformētas un tajās izveidojies noteikts spriegumstāvoklis. Iespējams arī gadījums, kad sijas tiek atslogotas un sagatavotas «otrrreizējai» izmantošanai. Šādos gadījumos var uzskatīt, ka sijas ir praktiski atslogotas, to deformācijas likvidētas un spriegumi komponentēs nepastāy. Protams, nevar uzskatīt, ka izzudušas ir arī visas plaisas, kuras rodas sijū stieptajā zonā. Šīs plaisas var būt aizvērušās, bet ne likvidētas. Līdz ar to veicot šādu sijū pastiprināšanu un to turpmākās nestspējas prognozēšanu ir jābūt sākotnējai informācijai par atslogotās sijas struktūras stāvokli attiecībā uz plaisu dziļumu.

Trešais dzelzsbetona sijū pastiprināšanas gadījums ar ārēja tipa papildus stiegrojumu iespējams neslogotām nocietējošām dzelzsbetona sijām pielīmējot kompozītu materiālu slāņus uz to ārējās virsmas (parasti uz stieptās zonas).

Izmantojot slāņainās struktūras modeli, tika iegūta sakarība liektā elementa stinguma noteikšanai:

$$D_{pl} = D_k + D_s + D_b, \quad (7)$$

kur

$$D_k = E_k F_k h(h - h_k) + \frac{1}{3} h_k^2$$

$$D_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n_s} E_{si} F_{si} (y_{si}^2 + y_{si} y_{si-1} + y_{si-1}^2)$$

$$D_b = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n_b} E_{bi} F_{bi} (y_{bi}^2 + y_{bi} y_{bi-1} + y_{bi-1}^2) - \frac{y_n}{2} \sum_{i=1}^n E_i F_i (y_i + y_{i-1})$$

Normālspriegumu sijas ass virzienā sadalījumu pa sijas augstumu nosaka sakarība:

$$\sigma_{yw} = E_i \frac{(y_{iw} - y_n)}{D_i} M \quad (8)$$

Spriegumu izmaiņai ir lēcienveidīgs raksturs uz slāņu robežām. Lēcienu lielums samazinās palielinot slāņu skaitu.

Lieces momenta vērtību, pie kuras parādās pirmās plaisas stieptajā betonā nosaka sakarība:

$$M_{pl} = \frac{d_l}{h - h_c - y_n} f_b^* \quad (9)$$

Šī sakarība dod iespēju noteikt, kā siju pastiprinošo slāņu daudzums iespaido pirmo plaisu rašanos betonā.

Analīze rāda, ka kombinēto un dzelzsbetona siju plaisu rašanās robežu attiecība nebūtiski izmainās pie neliela kompozīto slāņu daudzuma.

Spriegumu izmaiņas raksturs liektas sijas komponentēs slogojuma gaitā parādīts attēlā ar nepārtrauktām līnijām.

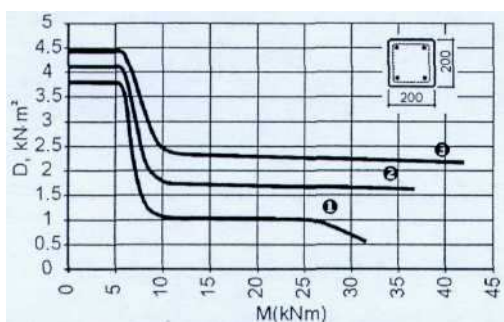
Izklāstītā aprēķinu metodika, kuras pamatā ir slāņainas struktūras modelis tika realizēta skaitļošanas programmas veidā un tā izmantota divu veidu ar oglekļa plastu slāņiem pastiprinātu dzelzsbetona siju aprēķinam. Komponentu mehānisko īpašību raksturlielumi apkopoti 1. tabulā.

1. tabula. Komponentu

mehānisko īpašību raksturlielumi

Komponentu raksturlielumi	Pirmā veida sijām	Otrā veida sijām
E_b , GPa	25	25
R_b^+ , MPa	2,6	1,9
R_b^- , MPa	33	30
E_m , GPa	200	200
R_{mT} , MPa	540	340
E_k , GPa	267	400
R_k^+ , MPa	2900	3000
Kompozīta elementārslāņa (lentas) biezums mm	1,3	0,17

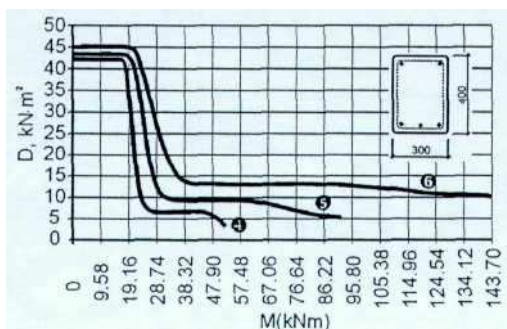
Pirmā veida siju šķērs griezumam ir kvadrātveida forma ar izmēriem 200 x 200 mm, kurā izvietotas četras metāla stiegras ar $\varnothing 14$ mm. Siju pastiprinājumam izmantotas 50 mm platas un 1,3 mm biezas oglekļa plasta lentas, kuras ar epoksīda sveķu līmi tiek pielīmētas dzelzsbetona sijas virsmai trijās paralēlās kārtās. Pirmā veida siju lieces stinguma izmaiņu raksturo 6. att. dotais grafiks.



6. att. Pirmā veida siju lieces stinguma atkarība no lieces momenta lieluma.

Līkne 1 attiecas uz pirmā veida sijām bez oglekļa pastiprinājuma. Līkne 2 raksturo lieces stinguma maiņu dzelzsbetona sijām, kurām stieptajā zonā pielīmētas trīs paralēlas oglekļplasta lentas ar platumu 50 mm un biežumu $h_k = 1,3$ mm, bet līkne 3 atbilst gadījumam, kad oglekļa lentas biežums ir divas reizes lielāks, t.i. $h_k = 2,6$ mm.

Otra veida dzelzsbetona siju šķērssgriezuma izmēri ir 400 x 300 mm, kurā izvietotas piecas metāla stiegras ar $\varnothing 13$ mm, no kurām divas atrodas spiestajā sijas daļā, bet trīs stieptajā. Siju pastiprināšanai izmantoti vienvirziena oglekļplasta slāņi visā sijas platumā ar elementārslāņa biežumu 0,17 mm. Otrā veida siju lieces stinguma izmaiņu raksturo 7. att. dotais grafiks.



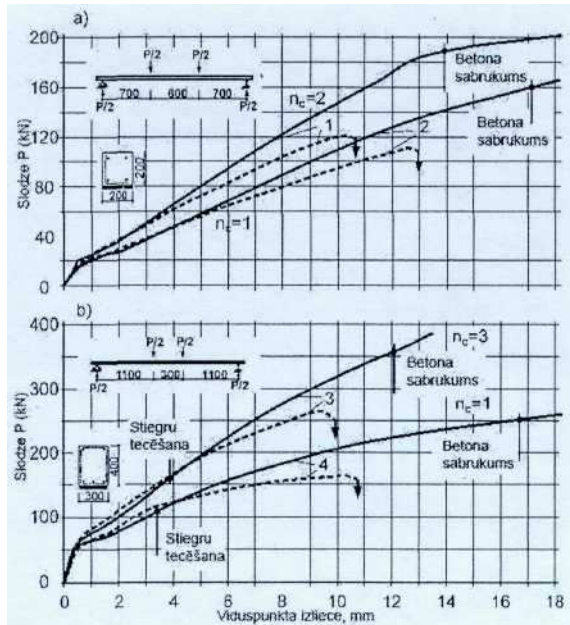
7. att. Otrā veida siju lieces stinguma atkarība no lieces momenta lieluma.

Lieces stinguma izmaiņas otrā veida sijām attēlo līknes 4 — 6, pie kam oglekļa pastiprinājuma platums sakrīt ar sijas platumu, bet viena slāņa biežums ir 0,17 mm. Līkne 5 atbilst sijai, kura pastiprināta ar viena oglekļa slāni, bet līkne 6 sijai ar trīs reizes biežāku oglekļa slāni.

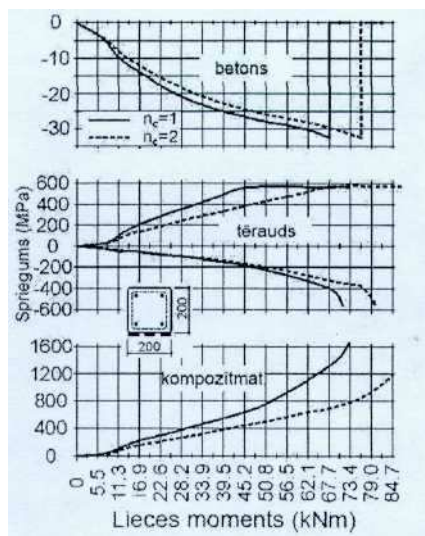
No iegūtajām līknēm varam konstatēt kā oglekļplasta pastiprinājums iespaido sijas lieces stingumu un tātad arī deformativitāti. Līknēm ir izteikti trīs slogojuma posmi. Pirmais attiecas uz lineāras deformēšanās posmu (praktiski nemainīgs lieces stingums). Tas ir slogojuma sākumposms līdz plaisu parādīšanās brīdim stieptajā betona daļā. Šis posms ir relatīvi neliels un reālos slogojumos nebūtisks. Otrais ir betona plaisu attīstības un spriegumu pārdalīšanās starp komponentēm posms. Šai posmā būtiski mainās sijas lieces stingums. Ar šīm izmaiņām jārekinās slogotos liektos elementos, jo lieces momentu izmaiņas diapazons tuvs reālajiem konstrukciju slogojumiem. Trešajam posmam raksturīgs spriegumu pieaugums komponentēs bez būtiskas to pārdalīšanās. Šī posma gala rezultāts ir kādas komponentes nestspējas zudums. Tāds var būt spiestās betona zonas sabrukums, metāla stiegru tecēšanas sākums vai oglekļa slāņu stiepes sabrukums. Gadījumā, ja iestājas metāla stiegru tecēšana, veidojas ceturtais sijas slogojuma posms. Šai posmā notiek palielināta oglekļa slāņu noslogotība un sijas deformēšanās. Iestājoties metāla stiegru tecēšanai novērojama pielīmēto oglekļplasta slāņu atslāņošanās, kas ir par iemeslu sijas nestspējas zudumam.

Lai pārbaudītu iepriekš izklāstītās metodikas precizitāti, tika veikta no literatūras iegūto dzelzsbetona siju eksperimentālo izliecu līkņu salīdzināšana ar prognozējamo. Dzelzsbetona sijas struktūra, izmēri un slogojuma shēma parādīta attēlā. Izmantojot izklāstīto metodiku tika noteikta maksimālo izliecu līknes sijām četrpunktu lieces gadījumā.

Iegūtie rezultāti redzami 8. att. nepārtrauktu līniju veidā. Šie rezultāti salīdzināti ar eksperimentālajiem, kuri attēloti punktu veidā. Līknēm ir izteikti nelineārs raksturs un tajās iezīmējas raksturīgie slogojuma posmi.



8.att. Eksperimentālā un prognozējamā sijas maksimālās izlieces atkarība no slodzes



9.att. Spriegumu izmaiņa liektas sijas komponentēs slogojuma gaitā, ar nepārtrauktu līniju - 1 pastiprinošā kompozītmateriālu uzlika; ar svītrlīniju - 2 pastiprinošās kompozītmateriālu uzlikās.

Statiski slogojot siju līdz sabrukumam, eksperimentāli tika noteiktas maksimālas sijas izlieces laiduma vidū. Līknes raksturs liecina par to, ka sijas izliecu līkne sastāv no vairākiem atšķirīga deformēšanās rakstura posmiem. Līknes raksturs būtiski mainās pie izlieces vērtības 2 mm, kas sastāda 0,1 % no sijas laiduma. Var uzskatīt, ka pie šai deformācijai atbilstošās slodzes ir saplaisājusi visa sijas betona stieptā zona. Slogojuma diapazonā līdz deformācijai 10 mm, kas ir 0,50 % no sijas laiduma, deformēšanās līknei ir praktiski lineāri augošs raksturs. Šai slogojuma posmā sijas stieptā zona praktiski ir saplaisājusi un spriegumus uzņem betona spiestā zona un stieptās stiegras. Pie slodzes 72 kNm novērojams izliecu neierobežots pieaugums, kura cēlonis ir stiegru tecēšana.

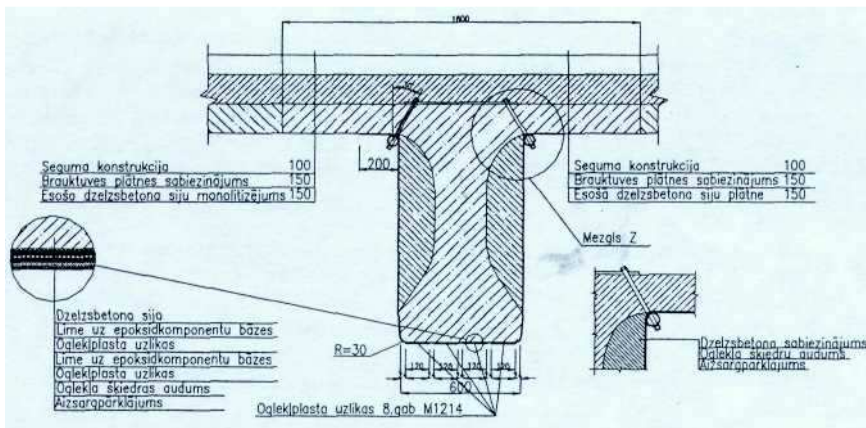
Skaitliski iegūta teorētiskā līkne gan pēc formas, gan arī skaitliskajām vērtībām raksturīgajos punktos ļabi aproksimē eksperimentālos rezultātus. Tas dod pamatu apgalvojumam, ka piedāvātā kompozītu siju izliecu aprēķina metode var tikt sekmīgi lietota dažāda šķērsriezuma un orientētu komponentu gadījumos. Par spriegumstāvokļa maiņu šķērsgriezumā tirās lieces gadījumā ļauj spriest 9.att. parādītās diagrammas.

Piektā nodaļā izklāstīts slāņainas struktūras aprēķinu metodikas pielietojums dzelzsbetona tilta rekonstrukcijas projektā.

Tika konstatēts, ka 20 gadus ekspluatētām dzelzsbetona tilta sijām Rīgas rajonā uz Jūrmalas apvedceļa pār Varkalu kanālu nestspēja atbilst tikai 67%-75% no Eirokodeksa LVS ENV 1991:2000 prasību slodzēm.. Tilta garums ir 68 metri, ko veido laidumu shēma 18 + 24 + 18 metri. Veiktie aprēķini rāda, ka tilta sijas izprojektētas ļoti ekonomiski pamatojoties uz 80-to gadu Latvijā spēkā esošo būvnormatīvu aprēķina slodzēm. Nestspējas rezerve tā laika slodzēm nepārsniedz 5%. Tilta balstu konstrukcijas atšķirībā no laidumu konstrukcijām sevī ietver pietiekamu nestspējas rezervi, lai bez papildu pastiprināšanas uzņemtu gan pastiprinātas

Tika pieņemts lēmums tilta laidumu siju pastiprināšanu veikt izmantojot konstrukcijas stieptajai daļai pielīmētas oglekļplasta uzlikas. Pastiprināšanu uzskatāmi ilustrē 10. attēls.

Sijas L=24m šķērsriezuma konstrukcija pie balsta



10. att. Pastiprinātās Varkalu tilta sijas šķērsgriezums virs balsta

Lai nodrošinātu siju plauktu nestspēju pie jaunajām slodzēm, nepieciešams 150mm biezs uzbetonējums siju spiestajā zonā.

Līdz šim ekspluatācijā esošo dzelzsbetona siju šķērsriezums spēj uzņemt lieces momentu $M_{csos}=4,28$ MNm. Tā kā prasītais lieces moments, kas jāuzņem tilta sijām, ir $M_{bras}=7,00$ MNm, tad sijās veidojas 63% pārslodze. Tātad pastiprinājuma rezultātā jāiegūst pieļaujamā lieces momenta pieaugums $M_{pastipr}=M_{bras}-M_{csos}=7,00-4,28=2,72$ MNm.

Siju pastiprināšanai tiek izmantots SIA „Sika Latvija” piedāvātās oglekļplasta lentas M1214.

Izmantojot slāņainās struktūras aprēķina metodiku, tika konstatēts, ka projektējamā tilta siju nestspēja sasniedzama pastiprinot ekspluatācijā esošās sijas ar astoņām oglekļplasta slāņu kārtām, kas izvietotas divās kārtās, katras kailas biezums $h=1,4$ mm, platums 120mm. Slāņi tiek izvietoti uz siju stieptās zonas četrās paralēlās rindās ar atstarpi 5cm

SECINĀJUMI

Promocijas darbā ir izstrādāta vienota uz slāņainu materiālu mehānikas pamatprincipiem balstīta kombinētas struktūras liektu dzelzsbetona elementu spriegumu - deformāciju stāvokļa aprēķinu metodika un radīts šādu elementu lieces stingrības un stiprības aprēķinu skaitliskas realizācijas modelis. Metodika dod iespēju prognozēt pastiprinātu dzelzsbetona elementu lieces stingumu un potenciālo nestspēju atkarībā no konkrētā būvelementa struktūras un komponentu mehāniskajām īpašībām. Pielietojot darbā izstrādāto mainīgas struktūras modeli ir iespējams konstatēt, kā plaisu veidošanās un attīstības process ietekmē pastiprinātu būvelementu lieces stinguma izmaiņu sloģojuma gaitā.

Promocijas darbā:

- ir izstrādāta jauna pastiprinātu liektu dzelzsbetona konstrukciju elementu aprēķinu metodika, kura, izmantojot slāņainu struktūru mehānikas pamatprincipus patvaļīgi sakārtotu slāņu paketei ar izteikti atšķirīgām atsevišķo slāņu fizikāli mehāniskām īpašībām, dod iespēju noteikt racionālākās pastiprinošās uzlikās, kuras nodrošina nepieciešamo sijas nestspējas pieaugumu,
- izmantojot kombinētā būvelementa slāņainuma principu, ir izveidots sloģojuma procesā mainīgs aprēķinu modelis, kurš dod iespēju ievērtēt kā betona nelineārās deformatīvās īpašības, tā arī plaisu veidošanās un attīstības procesu,
- izstrādātā metodika realizēta skaitliskā formā un pārbaudīta salīdzinot iegūtos rezultātus ar neatkarīgos literatūras avotos publicētiem eksperimentālajiem datiem kā nepastiprinātiem, tā arī ar kompozītmateriālu uzlikām pastiprinātiem dzelzsbetona elementiem;
- veiktie atšķirīgu struktūru pastiprinātu dzelzsbetona elementu lieces stinguma aprēķini un to salīdzinājums ar eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem dod pamatu apgalvot, ka piedāvātais aprēķinu modelis un izstrādātā aprēķinu metodika kā kvalitatīvi, tā arī kvantitatīvi pareizi atspoguļo pastiprinātā dzelzsbetona elementa struktūras un tā komponentu mehānisko īpašību iespaidu uz pastiprināto elementu deformatīvajām un stiprības īpašībām;
- izstrādātā aprēķinu metodika izmantota veicot pastiprinājumu optimizēšanu 20 gadus ekspluatētām dzelzsbetona tilta sijām tiltam Latvijā, Rīgas rajonā uz Jūrmalas apvedceļa pār Varkaļu kanālu.

Metodika ļauj prognozēt spriegumu pārdalīšanās procesu kombinēto stieņu komponentēs plaisu un deformāciju attīstības gaitā.

Metodika dod iespēju noteikt racionālāko konkrētu pastiprinošo slāņu daudzumu dotas struktūras un formas dzelzsbetona sijai, kā arī novērtēt komponentu stiprības rezervi konkrēta slogojuma līmenim un prognozēt kombinētā elementa sabrukumu.

PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. Skudra, Bulavs, Tirāns (2002) „Cracking Criteria of Reinforced Concrete Beams Strengthened for Flexure" Latvian Journal of Physics and Technical Sciences 2002-2, p 61-66
2. Skudra, Bulavs, Tirāns (2002) „Cracking Criteria of Reinforced Concrete Beams Strengthened for Shear", RTU, Arhitektūra un Būvzinātne 2002-3, p 170-177
3. Skudra, Krūkliņš, Tirāns (2002) „Analytic Study of Uncracked Reinforced Concrete Beams Strengthened for Shear" Latvian Journal of Physics and Technical Sciences 2002-6, p 39-46
4. Skudra, Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2003) „Cracking Criteria of Reinforced Concrete Beams Strengthened for Flexure" Latvian Journal of Physics and Technical Sciences 2003-2, p 51-56
5. Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2003) „Method of Prediction of the Deflections of Reinforced Concrete Beams Considering Cracking", RTU, Arhitektūra un Būvzinātne 2-4, p 79-104
6. Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2003) „Model of Nonlinearly Deforming Laminated Material" Proceedings of SDSMS'03 International Conference, Klaipēda University, Lithuania, p 24-34
7. Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2004) „Forecasting of Deflections of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Plastic Sheets" 8. International Conference of Modern Building Materials, Structures and Techniques, May 19 - 21, 2004, Vilnius, Lithuania, p 369-372
8. Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2005) „Improvement of Capacity in Bending by the Use of FRP Layers on RC Beams" Journal of Civil Engineering and Management, 2005, Vol XI, No3, Lithuania, p 169-174
9. Bulavs, Rādiņš, Tirāns (2006) „A Method for Predicting the Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Plates", Mechanics of Composite Materials - 2006 - Vol.42, No.1", p 45-59