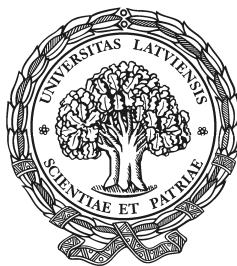


Edmunds Zīle

Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu betona kolonnu
mehāniskā uzvedība spiedē

Promocijas darba kopsavilkums



Latvijas Universitāte

Rīga – 2009

Promocijas darba veids: zinātnisku publikāciju kopa.

Zinātniskais vadītājs: Prof. Dr. Habil. Sc. Ing. **Vitauts Tamužs**, LU

Darba recenzenti:

1. _____

2. _____

3. _____

Darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas un astronomijas zinātnes nozares promocijas padomes atklātā sēdē

2010. gada _____

Pulksten _____

_____ auditorijā.

Ar darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes bibliotēkā (Rīgā Kalpaka bulv. 4) un Latvijas Akadēmiskajā bibliotēkā (Rīgā, Rūpniecības ielā 10).

LU Fizikas un astronomijas zinātnes nozares speciālās promocijas padomes priekšsēdētājs: _____

Anotācija

Betona konstrukciju mehāniskā uzvedība ir izteikti nelineāra un sarežģīta. Šajā promocijas darbā ir pētīta ar kompozītmateriāliem pastiprinātu apaļu betona kolonnu mehāniskā uzvedība

Analizētas pastiprināta betona deformatīvās īpašības. Deformatīvajām īpašībām ir būtiska ietekme uz pastiprināta betona nestspēju. Deformāciju lielums nosaka pastiprinošo spiedienu un līdz ar to arī betona stiprību.

Ir analizēta pastiprinājuma priekšspriegojuma ietekme uz pastiprināta betona mehānisko uzvedību. Priekšspriegojums aizkavē betona plaisāšanu.

Ir pētīta pastiprināta betona kolonnu noturība spiedē. Noteikts, kādam ir jābūt kolonnas slaidumam (divkārša kolonnas garuma attiecība pret rādiusu), lai pastiprinājums būtu efektīvs.

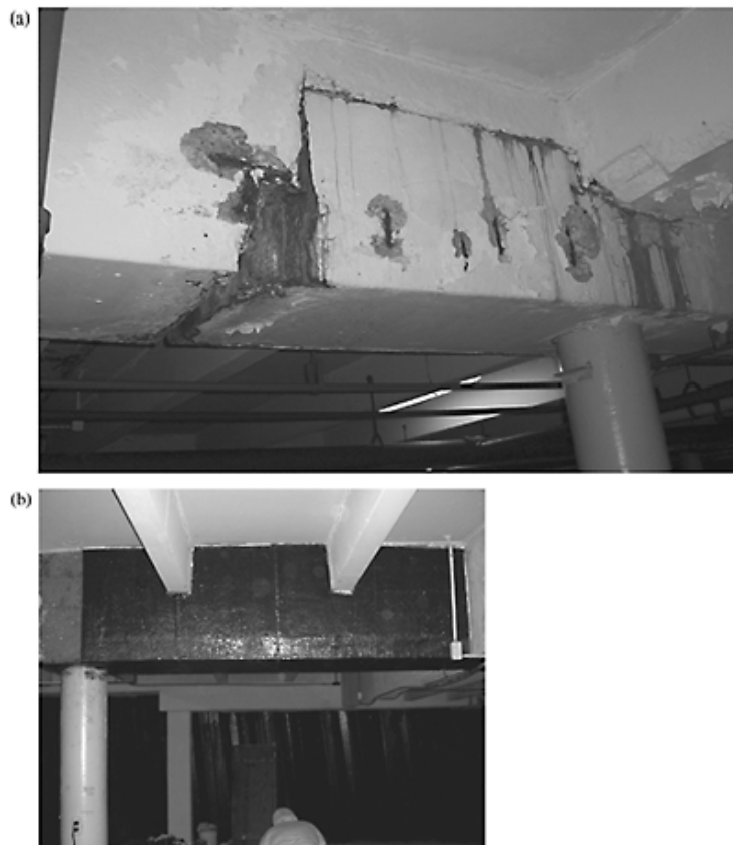
Saturs

1 Ievads	5
1.1 Darba uzdevumi	6
1.2 Publikācijas	7
2 Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu apaļu betona kolonnu deformatīvās īpašības.....	8
2.1 Eksperimentu programma	9
2.1.1 Betona īpašības	9
2.1.2 Kompozīta pastiprinājums	9
2.1.3 Pastiprinātie betona paraugi	10
2.2 Sakarības starp spriegumiem un deformācijām pastiprinātā betonā.....	10
2.3 Diferenciālais Puasona koeficients un Puasona koeficients	13
2.4 Pieskares moduļa un maksimālās garendeformācijas novērtējums	16
3 Apaļu pastiprinātu betona kolonnu neelastīgā deformēšanās	18
3.1 Plastiskuma teorijas postulāti.....	19
3.2 Sabrukuma virsma un slogošanas trajektorijas	21
3.3 Plastisko deformāciju attīstība	21
4 Sākotnējā sānu spiediena ietekme uz apaļu pastiprinātu betona kolonnu uzvedību	28
4.1 Eksperimentu programma	28
4.1.1 Betona īpašības	28
4.1.2 Kompozīta pastiprinājums	29
4.2 Grīstes uztīšanas process un pastiprinātie paraugi	29
4.3 Priekšspriegojuma ietekmes novērtējums	31
4.4 Rezultāti	33
5 Apaļu pastiprinātu betona kolonnu stabilitāte	38
5.1 Eksperimentu programma	38
5.1.1 Betona īpašības un pastiprinātie paraugi.....	38
5.1.2 Kompozīta pastiprinājums	39
5.1.3 Pastiprinātie betona paraugi	39
5.2 Teorētiskā pastiprinātu betona kolonnu stabilitāte	39
5.3 Pastiprinātu betona kolonnu noturības zuduma prognozēšana	42
6 Rezultāti un secinājumi	44
Atsauces	44

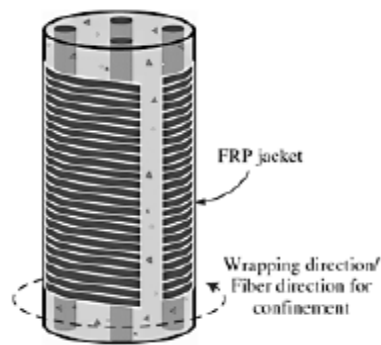
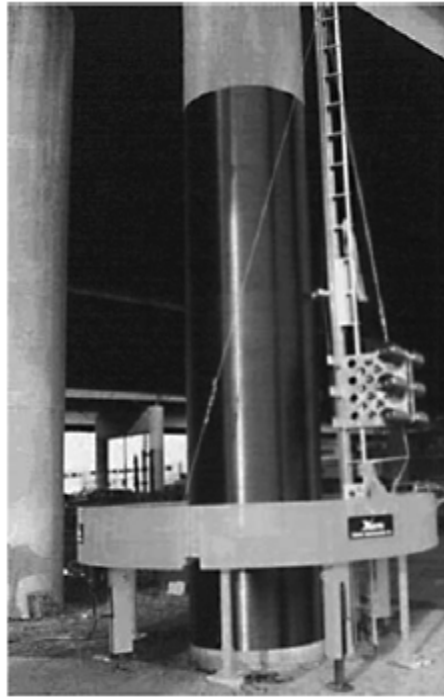
1 Ievads

Pēdējo gadu laikā ir strauji pieaudzis pieprasījums pēc betona konstrukciju atjaunināšanas. Betona konstrukciju nolietojšanās rada nepieciešamību pēc lētām un efektīvām atjaunināšanas metodēm. Eksploatācijas slodžu pieaugums (piemēram, satiksmes plūsmas intensitātes pieaugums) var radīt noslogojumu, kas pārsniedz projektēto konstrukcijas noslogojumu. Tas rada nepieciešamību pēc steidzīgas betona konstrukcijas pastiprināšanas.

Šķiedru kompozītu izmantošana ļauj atrisināt daudzus praktiskus uzdevumus, kur tradicionālu materiālu pielietojums nenodrošina pietiekamu betona konstrukciju nestspējas uzlabojumu. Šķiedru kompozītiem ir augsta īpatnējā stiprība, tie nav pakļauti korozijai un ir nemagnētiski. Šķiedru kompozīti pastiprina betona konstrukcijas, minimāli izmainot to svaru un izmērus. Tomēr augstās kompozītmateriālu izmaksas ierobežo to praktisko pielietojumu. Viena no galvenajām šķiedru kompozītu pastiprinājuma priekšrocībām ir iespēja to pielietot tā, lai panāktu specifiskus pastiprinājuma efektus. Piemēram, pastiprinājums var būt lokšņu veidā, kuru pielīmē betona virsmai, lai palielinātu lieces stingumu (attēls 1.1.), vai kā aptinums kolonnai, lai palielinātu tās stiprību (attēls 1.2.).



Attēls 1.1. Bojātas betona sijas atjaunināšana. (a) bojātā sija; (b) pēc pastiprinājuma pielīmēšanas [1].



Attēls 1.2. Pastiprināta betona kolonna.

Parasti pastiprinājumam tiek izmantots oglekļa, stikla vai aramīda šķiedru kompozīts. Noteikta šķiedru tipa izvēli nosaka izmaksas, nepieciešamais stiprības pieaugums un ilgzturība.

Diemžēl šķiedru kompozītu pielietojumu betona konstrukciju pastiprināšanai ierobežo nepietiekami plašā eksperimentu datubāze un starptautiska normatīva neesamība. Pastiprināta betona mehāniskās uzvedības pētījumu rezultāti ļaus palielināt pastiprinājuma efektivitāti un samazināt pastiprinājuma izmaksas, optimāla pastiprinošā materiāla izmantojuma dēļ.

1.1 Darba uzdevumi

Promocijas darbā ir pētīta ar šķiedru kompozītmateriāliem pastiprināta betona kolonnas mehāniskā uzvedība. Darbs sastāv no eksperimentālās daļas un teorētiskās analīzes daļas. Tika izvirzīti sekojoši uzdevumi:

- 1) Pētīt pastiprināta betona deformēšanos spiedē.

- 2) Atrast formulas, kuras ļautu novērtēt pastiprināta betona kolonnu maksimālo garendeformāciju un pieskares moduli pie spiedes spriegumiem, kuri pārsniedz nepastiprināta betona spiedes stiprību.
- 3) Noteikt sakarību starp neelastīgo deformāciju komponentēm un to atkarību no sprieguma stāvokļa. Šai sakarībai ir izšķiroša nozīme betona uzvedības modelēšanā, pielietojot plastiskuma teoriju.
- 4) Novērtēt pastiprinājuma priekšspriegojuma ietekmi uz pastiprināta betona mehānisko uzvedību.
- 5) Novērtēt, kā pastiprinājums ietekmē betona kolonnu stabilitāti spiedē.

Lai varētu izpildīt augstāk minētos uzdevumus, LU Polimēru Mehānikas Institutā pētnieku grupa prof. V. Tamuža vadībā veica pastiprinātu betona kolonnu mehāniskās pārbaudes. Tika paveikts sekojošais:

- 1) Izgatavotas apaļas kolonnas no dažādas stiprības betona un pastiprinātas, aptinot ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām tā, lai iegūtu dažāda biezuma pastiprinājumu. Aptītās betona kolonnas pārbaudītas spiedē.
- 2) Izgatavotas dažāda garuma pastiprinātas apaļas betona kolonnas. Veiktas stabilitātes pārbaudes.
- 3) Izgatavotas apaļas kolonnas no dažādas stiprības betona un pastiprinātas, uztinot priekšspriegotu oglekļa šķiedru grīsti uz rotējoša betona parauga, kura virsma tika iepriekš pārklāta ar epoksīdsveķu slāni.

1.2 Publikācijas

Šī darba galvenie rezultāti ir publicēti 4 žurnālu rakstos:

1. E. Zīle, V. Tamužs „Inelastic deformation of round concrete columns in triaxial compression”. *Mechanics of composite materials*, 2010, pieņemts publicēšanai;
2. E. Zīle, M. Daugevičius, V. Tamužs ” The effect of pretensioned FRP windings on the behavior of concrete columns in axial compression”. *Mechanics of composite materials*, 2009, Vol. 45, No. 5, pp. 455 – 464;
3. V. Tamužs, R. Tepfers, E. Zīle, V. Valdmanis ”Stability of round concrete columns confined by composite materials”. *Mechanics of composite materials*, 2007, Vol. 43, No. 5, pp. 445 – 452;
4. V. Tamužs, R. Tepfers, E. Zīle, O. Ladnova ”Behavior of concrete cylinders confined by a carbon composite 3. Deformability and the ultimate axial strain”. *Mechanics of composite materials*, 2006, Vol. 42, No. 4, pp. 303 – 314.

Rezultāti tika ziņoti un apspriesti 5 starptautiskās konferencēs:

1. V. Tamužs, R. Tepfers, E. Zīle, V. Valdmanis "Mechanical behavior of FRP-confined concrete columns under axial compressive loading". *5th International Engineering and Construction Conference (IECC'5)*, California, USA, August 27-29, 2008;
2. E. Zīle, V. Tamužs, R. Tepfers „Compressive behavior of CFRP-confined square concrete columns”. *13th European Conference on Composite Materials*, Stockholm, Sweden, June 2-5, 2008;
3. V. Tamužs, R. Tepfers, E. Zīle, V. Valdmanis „Properties of FRP-confined concrete columns under axial compressive loading”. *Challenges for Civil Construction CCC2008*, Porto, Portugal, April 16-18, 2008;
4. V. Tamužs, R. Tepfers, E. Zīle V. Valdmanis, E. Zīle, E. Spārniņš, O. Ladnova „Tests and prediction of the mechanical behavior of cylindrical concrete specimens confined by composite wrapping”. *8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, Patras, Greece, July 16-18, 2007;
5. O. Ladnova, E. Zīle „Non-linear deformation and failure of CFRP-confined concretes”. *XIV International Conference „Mechanics of Composite Materials”*, Riga, Latvia, May 29-June 2, 2006.

2 Ar kompozītmateriāliem pastiprinātu apaļu betona kolonnu deformatīvās īpašības

Apaļā pastiprinātā betona kolonnā kompozīta aptinums tiek slogots aploces virzienā, bet betons atrodas trīsasīgās spiedes spiegunstāvoklī. Tādējādi tiek pilnībā izmantota kompozīta pastiprinājuma augstā stiepes stiprība, ievērojami paaugstinot betona stiprību un maksimālās deformācijas. Lai gan atsevišķi betons un kompozīts ir trausli materiāli, pastiprināts betons uzvedas kā plastisks materiāls, jo pastiprinājums aizkavē bojājumu pieaugumu, ierobežojot betona deformācijas.

Modeļi, kuri pietiekami precīzi aprakstītu pastiprināta betona mehānisko uzvedību, joprojām atrodas attīstības fāzē. Šādu modeļu izstrādei ir nepieciešami eksperimentālo pētījumu rezultāti, kādi, piemēram, ir atrodami darbā [2], kur ir eksperimentāli pētīta ar oglekļa šķiedru-epoksīda kompozītu pastiprināta betona uzvedība.

Šī darba mērķis ir izpētīt pastiprināta betona deformēšanās īpatnības, iegūt formulas, kas ļautu prognozēt maksimālo garendeformāciju un pieskares moduli E_2 pie spiedes sprieguma, kas pārsniedz nepastiprināta betona stiprību, jo E_2 nosaka pastiprināto garo kolonnu stabilitāti.

2.1 Eksperimentu programma

2.1.1 Betona īpašības

Pētījumā tika izmantots dažādu stiprību betons (sagaidāmā stiprība (MPa) jeb betona klase 20, 40 un 60). Spiedē tika pārbaudītas 12 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Visu kolonnu diametrs bija 150mm. Rezultāti ir apkopoti tabulā 2.1.

Tabula 2.1. Betona īpašības.

Betona klase	Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendeformācija, ϵ_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ϵ_{lo} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
20	26.6	0.264	0.097	24.7	0.195
40	37.0	0.194	0.066	27.5	0.164
60	47.6	0.227	0.137	34.4	0.194

2.1.2 Kompozīta pastiprinājums

Betona kolonnas tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām (oglekļa šķiedru audums SikaWrap®-230C). Ražotāja dotās oglekļa auduma īpašības ir šādas: stiprība stiepē 4300 MPa, Junga modulis 238GPa, maksimālā deformācija 1.8%, biezums 0.131mm un blīvums 1.76g/cm³.

Šķiedras stiprība, kura realizējas kompozītā, ir atkarīga no armējuma koeficienta, šķiedras vidējās stiprības, kura ir noteikta pie fiksēta šķiedras garuma, un šķiedras stiprības izkliedes. Diemžēl ražotājs nesniedz informāciju par vidējo šķiedras stiprību pie fiksēta šķiedras garuma un stiprības izkliedi. Tāpēc kompozīta stiprība un maksimālā deformācija ir jānosaka, izmantojot speciālas pārbaudes.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar *ASTM D 2290* standartu. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību (aprēķinātas no kompozīta, izmantojot maisījuma likumu, neievērojot matricas stiprību un moduli) salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām ir atrodams tabulā 2.2.

Tabula 2.2. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām.

Attiecība starp eksperimentālo stiprību un ražotāja doto stiprību	Attiecība starp eksperimentālo moduli un ražotāja doto moduli	Attiecība starp eksperimentālo maksimālo stiepes deformāciju un ražotāja doto maksimālo stiepes deformāciju
0.65	0.95	0.67

Redzams, ka eksperimentālais modulis ir par 5% zemāks nekā ražotāja dotais modulis, savukārt, tikai aptuveni 2/3 no ražotāja dotās stiprības ir realizējusies

kompozītā. Iegūtā maksimālā stiepes deformācija ir par 33% zemāka nekā ražotāja dotā vērtība.

2.1.3 Pastiprinātie betona paraugi

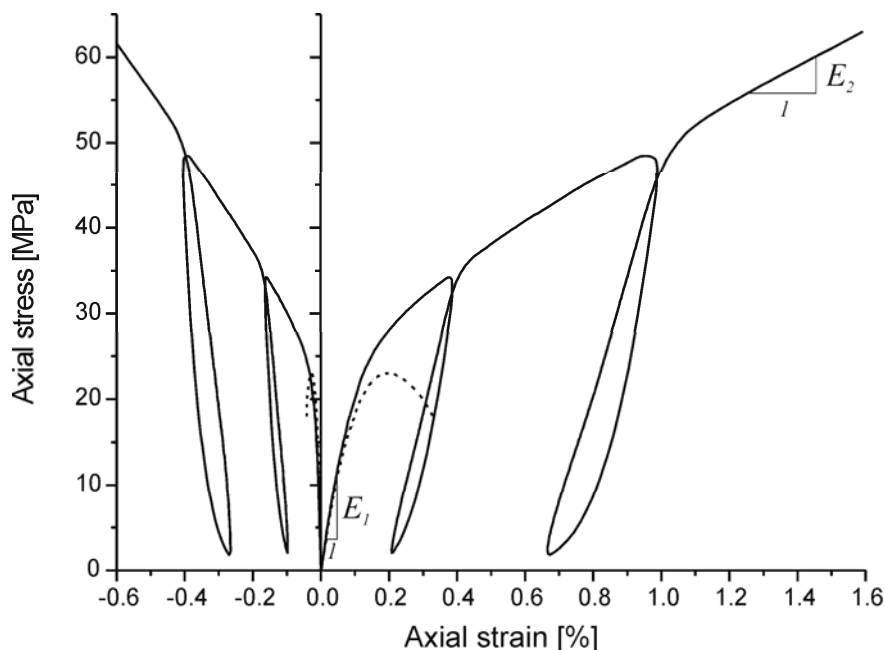
Pastiprināto paraugu diametrs bija 150 un 250mm, augstums, attiecīgi, 450 un 750mm (attiecība starp augstumu un diametru: $H/D = 3$). Paraugu, kuru izmēri bija 150mm x 450mm, aptinums sastāvēja no 3, 5, un 7 oglekļa auduma slāņiem. Paraugu, kuru izmēri bija 250mm x 750mm, aptinums sastāvēja no 5 oglekļa auduma slāņiem.

Pastiprinātie paraugi tika pakļauti monotoni pieaugošai vienasīgai spiedes slodzei līdz paraugi sabruka. Slogošanas laikā tika mērīta slodze, garendeformācija un šķērsideformācija. Slogošanas ātrums bija 10 MPa/min saskaņā ar *ASTM C 39/C39M – 99* standartu.

2.2 Sakarības starp spriegumiem un deformācijām pastiprinātā betonā

Betons ir trausls kompozīts, kurš sastāv no pildvielas, ūdens un saistvielas, kura, savukārt, arī satur daudz maza izmēra daļiņu. Betons ir porains. Pildvielas daļiņu izmērs un forma ietekmē betona stiprību. Tipiskas nepastiprināta betona spriegumu-deformāciju līknes vienasīgā spiedē ir parādītas attēlā 2.1. Neslogots betons satur daudz mikroplaisu. Īpaši daudz to ir pildvielas un saistvielas savienojumu vietās. Šīs mikroplaisas rodas noslāņošanās, rukuma, kā arī saistvielas termiskā izplešanās dēļ. Sākotnējā slogošanas posmā esošās plaisas izplatās maz un betona uzvedību var raksturot kā elastīgu. Palielinot slodzi, pildvielas un saistvielas stingumu atšķirība rada spriegumu koncentrācijas, kuru dēļ betonā rodas un izplatās jaunas plaisas, kas noved pie betona sabrukuma.

Attēlā 2.1. ir parādītas tipiskas pastiprināta betona spriegumu-deformāciju līknes spiedē. Atšķirībā no nepastiprināta betona, pastiprināts betons uzvedas kā plastisks materiāls. Pastiprināta betona sprieguma-deformācijas līkni nosacīti var sadalīt trīs posmos. Pirmajā posmā pastiprināts betons uzvedas kā elastīgs materiāls ($E_I = E_o$). Pieaugot mikroplaisu blīvumam, iestājas pārejas posms, kurā pastiprinājums iedarbojas uz betonu ar pieaugošu sānu spiedienu, lai samazinātu betona kolonnas stinguma zudumu. Trešajā posmā pastiprinājums ir pilnībā aktivēts un kolonnas stingums vairs praktiski nemainās. Šajā posmā betona uzvedību nosaka pastiprinājuma īpašības.



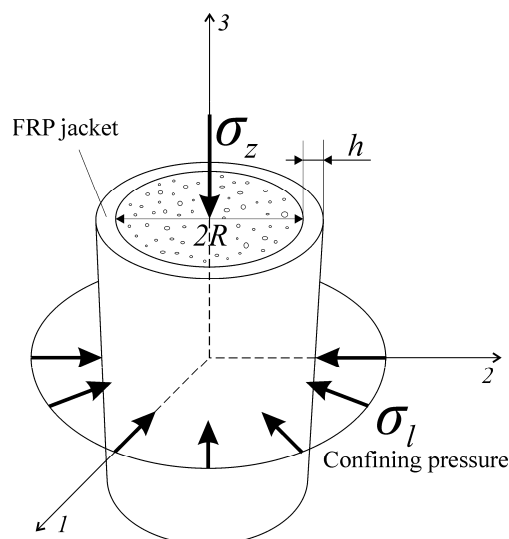
Attēls 2.1. Tipiska nepastiprināta un pastiprināta betona uzvedība spiedē (dati ņemti no [2]). Pārtrauktā līnija – nepastiprināts betons; nepārtrauktā līnija – pastiprināts betons.

Pāreja starp pirmo un trešo posmu notiek tad, kad spiedes spriegums sasniedz nepastiprināta betona stiprību f_{co} . Spriegumu pārejas posmā mēdz saukt par linearitātes robežu vai spriegumu noliekuma punktā.

Pastiprinājums, ierobežojot šķērsdeformācijas, rada betonā trīsasīgu sprieguma stāvokli. Sānu sprieguma lielums ir atkarīgs no šķērsdeformāciju lieluma. Aksiālo spriegumu σ_z tieši nomēra eksperimenta laikā, bet sānu spriegumu σ_l var aprēķināt, ja ir nomērīta aploces deformācija ε_j . Vienvirziena oglekļa šķiedru kompozīts deformējas lineāri līdz pat sabrukšanai. Tādā gadījumā kompozīta pastiprinājumā darbojas gredzenspriegums $\sigma_j = E_j \varepsilon_j$, kurš rada spiedienu uz betona kolonnas sānu virsmas (skat. attēlu 2.3).

$$\sigma_l = -\frac{E_j h}{R} \varepsilon_j = -E_{lat} \varepsilon_j, \quad (2.1)$$

kur E_j – kompozīta pastiprinājuma modulis, h – pastiprinājuma biezums, R – kolonnas rādiuss un $E_{lat} = E_j h / R$ ir tā saucamais “sānu modulis”.



Attēls 2.3. Pastiprināta betona kolonna.

Rakstā [3] tika parādīts, ka pastiprināta betona kolonnas spiedes stiprību f_{cc} var novērtēt, izmantojot formulu:

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1 + K_{\sigma} \cdot \frac{f_{lu}}{f_{co}}, \quad (2.2)$$

K_{σ} nosaka šādi:

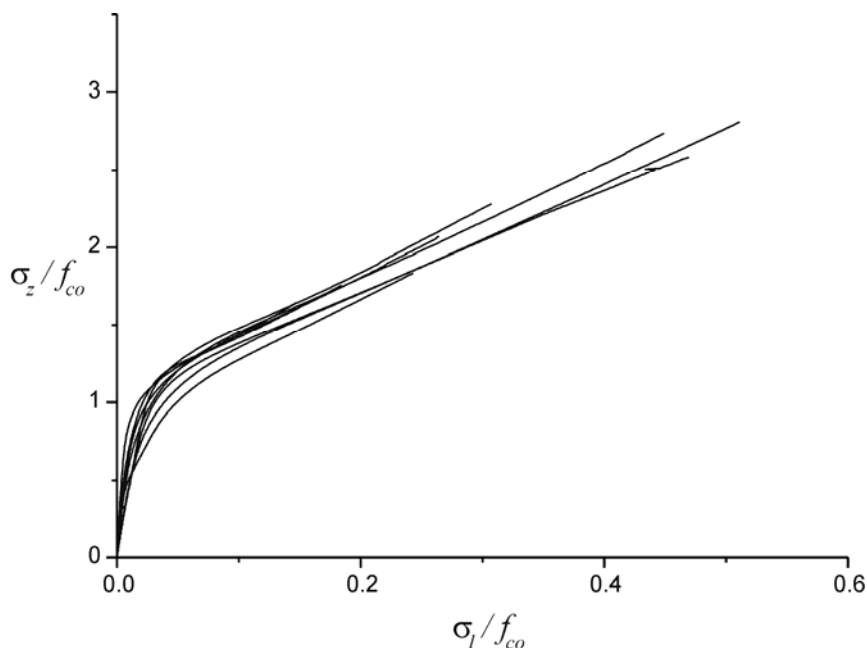
$$K_{\sigma} = \frac{1 - \nu_o}{\nu_o}, \quad (2.3)$$

kur ν_o nepastiprināta betona Puasona koeficients. Tipiska nepastiprināta betona Puasona koeficienta vērtība ir 0.2. Tādā gadījumā $K_{\sigma}=4$. f_{lu} ir maksimālais sānu spiediens:

$$f_{lu} = E_{lat} \varepsilon_{ju}, \quad (2.4)$$

kur ε_{ju} – pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija. Tā kā betona un pastiprinājuma pārvietojumi to savienojuma vietā ir vienādi, tad pastiprināta betona maksimālā deformācija ε_{lu} ir vienāda ar pastiprinājuma maksimālo aploces deformāciju: $\varepsilon_{lu} = \varepsilon_{ju}$.

Attēlā 2.4. ir parādītas slogošanas trajektorijas bezdimensionālā spriegumu telpā (normētā aksiālā sprieguma σ_z / f_{co} un normētā sānu sprieguma σ_l / f_{co} telpā) paraugiem, kuriem ir atšķirīgs pastiprinājuma biezums un atšķirīga nepastiprināta betona stiprība.



Attēls 2.4. Pastiprinātu betonu slogošanas trajektorijas.

Slogošanas trajektorijas sākuma posms atbilst elastīgai uzvedībai. Otrajā slogošanas trajektorijas posmā betons intensīvi plaisā. Ja betons ir pietiekami pastiprināts ($E_{lat}/f_{co} > 11$), tad visi otrie slogošanas trajektoriju posmi neatkarīgi no betona klases un pastiprinājuma biezuma tiecas uz vienoto līkni, kuru apraksta:

$$\frac{|\sigma_z|}{f_{co}} = 1 + K_\sigma \cdot \frac{|\sigma_l|}{f_{co}}, \quad |\sigma_z| > f_{co}, \quad (2.5)$$

vai

$$\frac{|\sigma_z|}{f_{co}} = 1 + 4 \cdot \frac{|\sigma_l|}{f_{co}}, \quad |\sigma_z| > f_{co}. \quad (2.6)$$

Slogošanas trajektorija pārtrūkst, kad gredzenspriegums pastiprinājumā sasniedz maksimumu.

2.3 Diferenciālais Puasona koeficients un Puasona koeficients

Ja spiedes spriegums σ_z pārsniedz linearitātes robežu, tad, lai betons nesabruktu, sānu spiedienam σ_l ir jāpieaug tā, lai izpildītos (2.6). Tas nozīmē, ka bojājumu uzkrāšanās betonā norisinās tā, ka sānu spiediena pieaugums $\Delta\sigma_l$ ir proporcionāls aksiālā spiediena pieaugumam $\Delta\sigma_z$:

$$\Delta\sigma_l = \frac{1}{4} \cdot \Delta\sigma_z. \quad (2.7)$$

Puasona koeficienta (šķērsdeformācijas attiecība pret garendeformāciju: $\varepsilon_l/\varepsilon_z$) maiņas rezultātā virs linearitātes robežas būtiski pieaug sānu spiediens un visu pastiprināto paraugu slogošanas trajektorijas tiecas uz vienoto līkni. Deformāciju aprakstam izmantosim diferenciālo Puasona koeficientu (DPK) jeb šķērsdeformācijas pieauguma attiecību pret garendeformācijas pieaugumu:

$$\tilde{\nu} = -\frac{\Delta\varepsilon_l}{\Delta\varepsilon_z}. \quad (2.8)$$

Diferenciālais Puasona koeficients $\tilde{\nu}$ raksturo, cik strauji pieaug šķērsdeformācijas. Pastiprināta betona pieskares moduli E_2 definē sekojoši:

$$E_2 = \frac{\Delta\sigma_z}{\Delta\varepsilon_z}. \quad (2.9)$$

No (2.7) un (2.9) seko, ka:

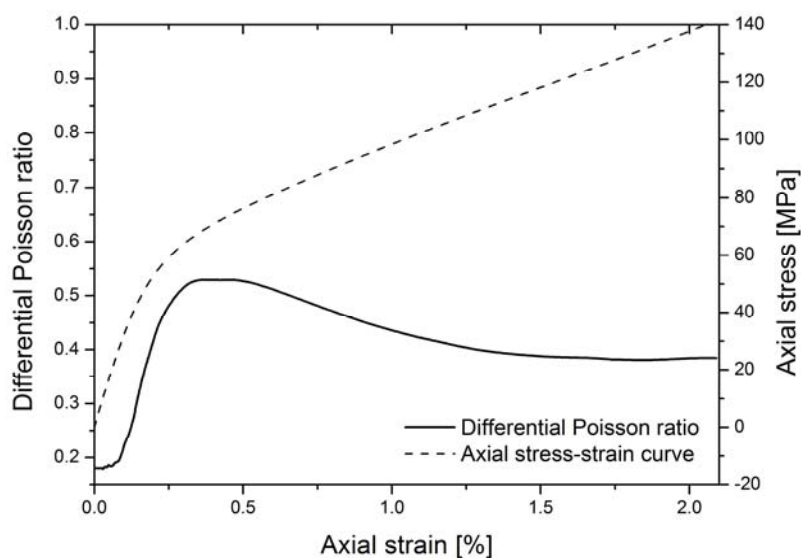
$$E_2 = 4 \frac{\Delta\sigma_l}{\Delta\varepsilon_z}. \quad (2.10)$$

Tā kā $\Delta\sigma_l = -E_l\Delta\varepsilon_l$, tad:

$$E_2 = 4E_{lat}\tilde{\nu}. \quad (2.11)$$

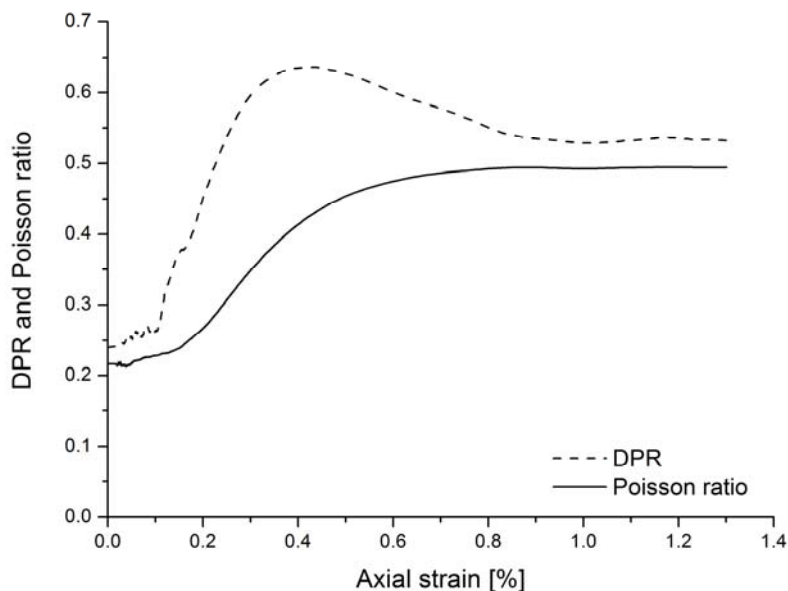
No (2.11) seko, ka slogošanas posmā, kuru apraksta (2.6) $E_2 = const$, ja $\tilde{\nu} = const$.

Tipiska eksperimentālā DPR atkarība no garendeformācijas ir parādīta attēlā 2.5. Sākotnējā DPK vērtība sakrīt ar nepastiprināta betona Puasona koeficientu ν_0 . Līknes maksimums atbilst pārejas zonai. Redzams, ka $\tilde{\nu}$ tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.



Attēls 2.5. Tipiska pastiprināta betona diferenciālā Puasona izmaiņa (60 betona klase, parauga garums 450mm, 7 pastiprinošā materiāla slāņi).

Tipiska eksperimentālā Puasona koeficienta atkarība no garendeformācijas ir parādīta attēlā 2.6. Virs linearitātes robežas betons intensīvi plaisā. Tas izraisa strauju šķērsdefomāciju augšanu un, attiecīgi, Puasona koeficienta pieaugumu. Puasona koeficients arī tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.



Attēls 2.6. Pastiprināta betona Puasona koeficients un DPK (20 betona klase, parauga garums 450mm, 3 pastipriņošā materiāla slāņi).

Vispārīgi $\tilde{\nu} \neq \nu$, taču var parādīt, ka Puasona koeficienta un DPK asimptotiskās vērtības sakrīt. Puasona koeficients ir atkarīgs no aksiālā σ_z :

$$\nu(\sigma_z) = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_z}. \quad (2.12)$$

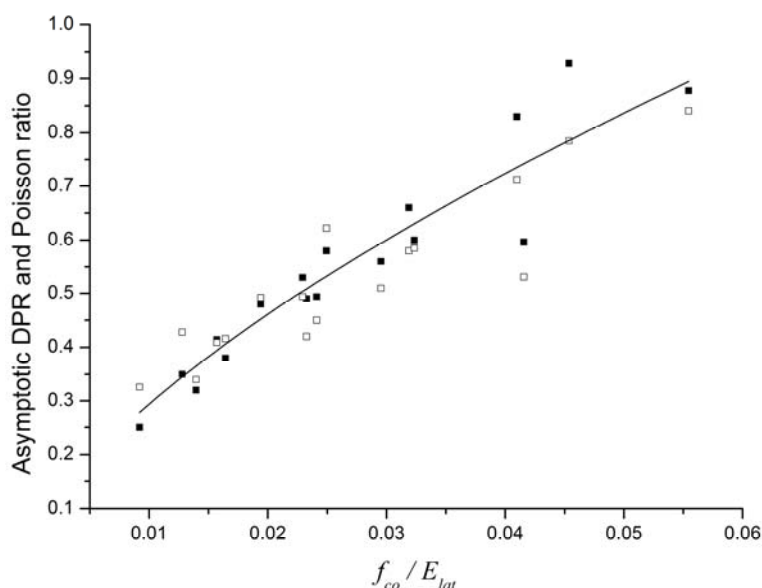
Atvasinot (2.12) iegūst:

$$\frac{d\nu}{d\sigma_z} = \frac{d\varepsilon_l \cdot \varepsilon_z - \varepsilon_l \cdot d\varepsilon_z}{\varepsilon_z^2 d\sigma_z} = \frac{(\tilde{\nu} - \nu)d\varepsilon_z}{\varepsilon_z d\sigma_z} \text{ or } \tilde{\nu} = \nu + \frac{d\nu}{d\sigma_z} E_t \varepsilon_z, \quad (2.13)$$

kur $E_t = d\sigma_z / d\varepsilon_z$ ir pastiprināta betona pieskares modulis. Kad Puasona koeficients ir sasniedzis asimptotisko vērtību, tad $d\nu/d\sigma_z = 0$, un no (2.13) seko, ka Puasona koeficienta un DPK asimptotiskās vērtības ir vienādas. Praktiski par asimptotiskajām vērtībām tiek pieņemtas eksperimentāli noteiktās galējās vērtības, kuras parasti nesakrīt. Gadījumos, kad nav skaidrs, vai asimptotiskā vērtība ir sasniegta, galējais DPK norāda augšējo robežu, bet galējais Puasona koeficients – apakšējo asimptotiskās vērtības robežu.

Eksperimenti rāda, ka asimptotiskais DPK $\tilde{\nu}_{as}$ un asimptotiskais Puasona koeficients ν_{as} pieaug, ja pieaug nepastiprināta betona spiedes stiprība f_{co} , un samazinās, ja

pieaug sānu modulis E_{lat} . Asimptotiskā DPR un Puasona koeficienta atkarība no bezdimensionālā parametra f_{co} / E_{lat} ir parādīta attēlā 2.7.



Attēls 2.7. Asimptotiskais DPK un Puasona koeficients. Iekrāsotie simboli – DPR, neiekrāsotie simboli – Puasona koeficients. Nepārtrauktā līnija – aproksimācija.

Aproksimējot eksperimentālos datus (attēlā 2.7.), tika iegūta formula asimptotiskā DPK $\tilde{\nu}_{as}$ novērtējumam:

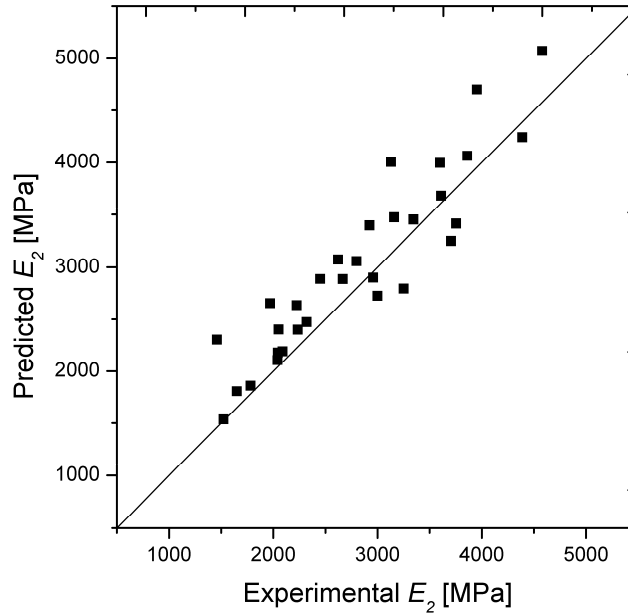
$$\tilde{\nu}_{as} = 5.9 \cdot \left(\frac{f_{co}}{E_{lat}} \right)^{0.65} . \quad (2.14)$$

2.4 Pieskares moduļa un maksimālās garendeformācijas novērtējums

Ievietojot (2.14) formulā (2.11), iegūstam formulu pastiprinātā betona pieskares moduļa novērtējumam E_2 :

$$E_2 = 23.6 \cdot E_{lat} \cdot \left(\frac{f_{co}}{E_{lat}} \right)^{0.65} . \quad (2.15)$$

Salīdzinājums ar eksperimentu rezultātiem ir parādīts attēlā 2.8. Datu izkliedi attēlā 2.8. var izskaidrot ar dažādu pastiprinājuma izgatavošanas kvalitāti.



Attēls 2.8. Prognozēto un eksperimentālo E_2 vērtību salīdzinājums. Nepārtrauktā līnija – ideālā sakritība. Papildus izmantoti eksperimentālie rezultāti no [2] un [4].

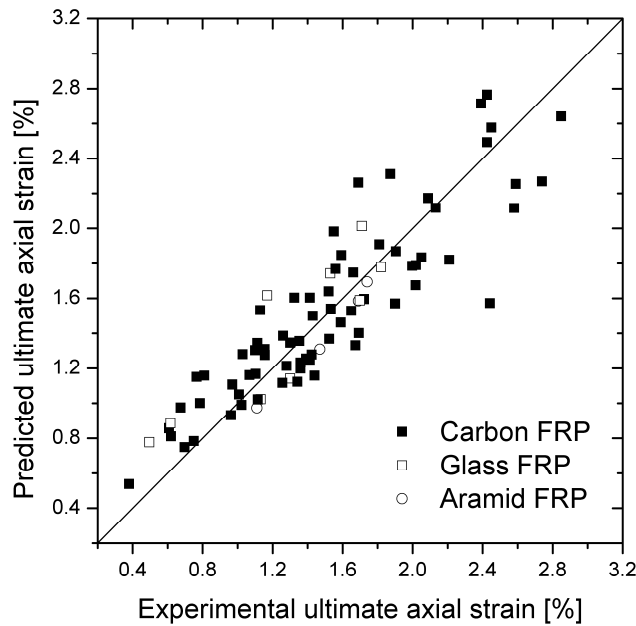
Formulu maksimālās garendeformācijas novērtējumam var iegūt, izmantojot asimptotisko DPR $\tilde{\nu}_{as}$, kuru pieraksta šādā formā:

$$\tilde{\nu}_{as} = \frac{\varepsilon_{lu} - \varepsilon_{lo}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{co}}. \quad (2.16)$$

kur $\varepsilon_{co}, \varepsilon_{lo}$ - nepastiprināta betona maksimālā garendeformācija un maksimālā šķērsdeformācija un $\varepsilon_{cc}, \varepsilon_{lu}$ - pastiprināta betona maksimālā garendeformācija un maksimālā šķērsdeformācija. No (2.16) un (2.14) iegūst formulu pastiprināta betona maksimālās garendeformācijas novērtējumam ε_{cc} :

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0.17 \cdot (\varepsilon_{ju} - \varepsilon_{lo}) \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{0.65}. \quad (2.17)$$

Salīdzinājums ar eksperimentu rezultātiem ir parādīts attēlā 2.9. Iegūtā formula ir vienkārša un piemērota praktiskai izmantošanai.



Attēls 2.9. Prognozēto un eksperimentālo pastiprināta betona galējo garendeformāciju salīdzinājums. Nepārtrauktā līnija – ideālā sakritība. Papildus izmantoti eksperimentālie rezultāti no [2] un [4-15].

Formulā (2.17) tiek izmantota pastiprinātu betonu pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija. Lai, nesagraujot paraugu, noteiktu pastiprināta betona maksimālo garendeformāciju, jāizmanto ražotāja dotā pastiprinājuma materiāla graužoša deformācija, vai jāveic pastiprinājuma materiāla pārbaudes, lai to noteiktu. Pastiprinātu betonu pārbaudēs noteiktā pastiprinājuma maksimālā aploces deformācija ε_{ju} ir ievērojami mazāka par kompozīta gredzenu pārbaudēs noteikto maksimālo aploces deformāciju ε_{ju}^d . Tam par iemeslu ir deformāciju lokalizācija plaisājošajā betonā, kas rada nevienmērīgu spriegumu sadalījumu pastiprinājumā un, rezultātā, noved pie pastiprinājuma priekšlaicīga sabrukuma. Lai varētu izmantot kompozīta gredzenu pārbažu rezultātus, jāievieš redukcijas koeficients $c_s : \varepsilon_{ju} = c_s \varepsilon_{ju}^d$. Salīdzinot kompozīta gredzenu pārbaudēs noteikto maksimālo aploces deformāciju ar pastiprinātu betonu pārbaudēs (papildus izmantojot rezultātus no [2]) noteiktajām vērtībām, iegūts, ka redukcijas koeficients ir 0.60. Redukcijas koeficients c_m , ja tiek izmantota ražotāja dotā vērtība ε_{ju}^m , ir 0.36 ($\varepsilon_{ju} = c_m \varepsilon_{ju}^m$). Redukcijas koeficientu vērtības ir derīgas tikai oglekļa šķiedru kompozīta pastiprinājumam. Redukcijas koeficienti stikla un aramīda šķiedru kompozītu pastiprinājumam ir jānosaka atsevišķi.

3 Apaļu pastiprinātu betona kolonnu neelastīgā deformēšanās

Pastiprinātu betonu slogojot spiedē, tajā rodas neatgriezeniskās jeb neelastīgās deformācijas, kuras ievērojami pārsniedz elastīgās deformācijas, tādēļ reālistisks

neelastīgo deformāciju apraksts ir nepieciešams precīzai betona mehāniskās uzvedības modelēšanai.

Lai aprakstītu materiālu uzvedību spiedē, bieži tiek izmantota plastiskuma teorija. Prognozēto plastisko deformāciju sakritība ar eksperimentu ir atkarīga no plastiskā potenciāla izvēles. Eksistējošie betona plastiskuma modeļi ir balstīti uz nepastiprināta betona trīsasu spiedes ar nemainīgu sānu spiedienu eksperimentu rezultātiem [16-18]. Šo modeļu spēja pietiekami precīzi aprakstīt ar kompozītmateriāliem pastiprināta betona deformēšanos ir apšaubāma, jo pastiprināta betona uzvedība būtiski atšķiras no nepastiprināta betona uzvedības trīsasu spiedē ar konstantu sānu spiedienu. Šajā darbā ir analizēti pastiprinātu betona kolonnu spiedes eksperimentu rezultāti ar mērķi noteikt, kā pastiprinātā betonā attīstās plastiskās deformācijas.

3.1 Plastiskuma teorijas postulāti

Pirmais plastiskuma teorijas postulāts nosaka, ka eksistē slogošanas virsma f , kura ir atkarīga no sprieguma stāvokļa un slogošanas vēstures. Spriegumu telpā slogošanas virsma atdala apgabalu, kurā materiāls deformējas elastīgi, no apgabala, kurā materiālā rodas neatgriezeniskās deformācijas. Slogošanas virsma nav fiksēta, bet maina savu formu atkarībā no nostiprināšanās funkcijas χ :

$$f(\sigma_{ij}, \chi) = 0. \quad (3.1)$$

Ja $f < 0$, tad materiāls deformējas elastīgi. Slogošanas virsmai nav jāmainās, ja tiek veikta koordinātu transformācija. Tas nozīmē, ka slogošanas virsma ir spriegumu tenzora un spriegumu deviatora invariantu funkcija:

$$f(I_1, J_2, J_3, \chi) = 0, \quad (3.2)$$

kur I_1 spriegumu tenzora pirmais invariants, J_2 un J_3 ir otrais un trešais spriegumu deviatora invariants. Galveno spriegumu telpā $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ slogošanas virsma veido konusveidīga figūru, kuras ass ir vērsta pa taisni $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Tas nozīmē, ka slogošanas virsmu ir ērti apskatīt cilindriskā koordinātu sistēmā (*Haigh – Westergaard stress space*):

$$f(\xi, \rho, \theta, \chi) = 0, \quad (3.3)$$

kur ξ ir hidrostatiskā koordināta, ρ ir deviatora koordināta un θ ir Lodes leņķis. Cilindriskās koordinātas tiek pierakstītas sekojoši:

$$\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, \quad I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad (3.4)$$

$$\rho = \sqrt{2J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (3.5)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right), \quad J_3 = (\sigma_1 - I_1/3) \cdot (\sigma_2 - I_1/3) \cdot (\sigma_3 - I_1/3). \quad (3.6)$$

Pastiprinātām apaļām betona kolonnām $\sigma_z = \sigma_3$ un sānu spiediens ir $\sigma_l = \sigma_1 = \sigma_2$ (attēls 2.3.). Tādā gadījumā no (3.4), (3.5) un (3.6) seko, ka $\theta = \pi/3$ un:

$$\xi = \frac{\sigma_z + 2\sigma_l}{\sqrt{3}}, \quad (3.7)$$

$$\rho = \sqrt{\frac{2}{3}} |\sigma_l - \sigma_z|. \quad (3.8)$$

Materiālā rodas plastiskās deformācijas, kad slogošanas trajektorija sasniedz sākotnējo slogošanas virsmu f_y :

$$f_y(\xi, \rho, \theta) = f(\xi, \rho, \theta, \chi_o) = 0, \quad (3.9)$$

kur χ_o ir nostiprināšanās funkcijas sākotnējā vērtība. Nostiprināšanās funkcija nosaka, kā slogošanas virsma pārvietosies slogošanas gaitā. Ja $\chi=1$, tad ir sasniegta sabrukuma virsma F :

$$F(\xi, \rho, \theta) = f(\xi, \rho, \theta, 1) = 0, \quad (3.10)$$

Otrais plastiskuma teorijas postulāts nosaka, ka pilnās deformācijas pieaugumu $d\varepsilon_{ij}$ var sadalīt divās komponentēs – elastīgajā $d\varepsilon_{ij}^{el}$ un plastiskajā $d\varepsilon_{ij}^{pl}$:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{el} + d\varepsilon_{ij}^{pl}, \quad (3.11)$$

Trešais plastiskuma teorijas postulāts jeb plastiskās tecēšanas likums nosaka, kā attīstās plastiskās deformācijas. Plastiskās tecēšanas likumu pieraksta šādā formā:

$$d\varepsilon_{ij}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g(\sigma_{ij}, \chi)}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3.12)$$

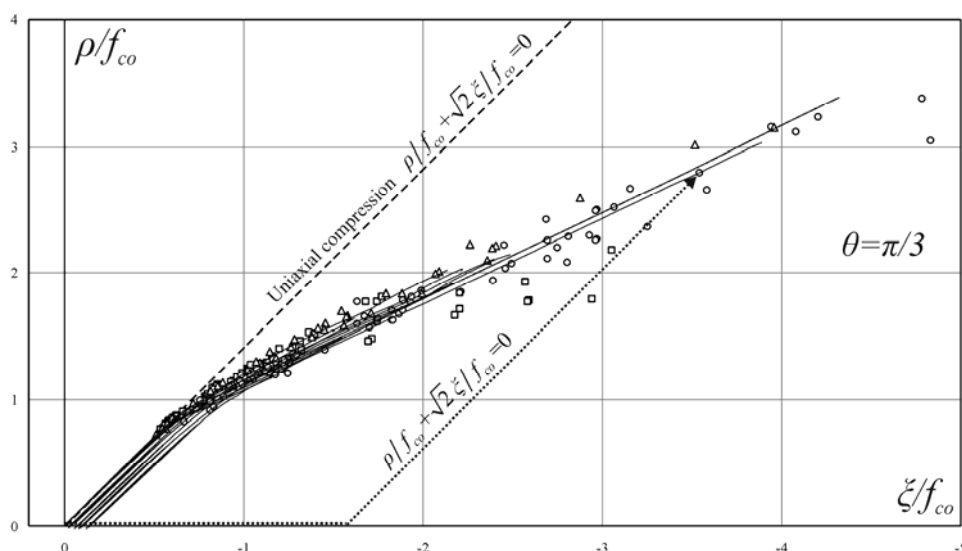
kur $d\lambda \geq 0$ ir plastiskais reizinātājs un $g(\sigma_{ij}, \chi)$ plastiskais potenciāls. Arī plastiskajam potenciālam nav jāmainās, ja tiek veikta koordinātu transformācija: $g(\xi, \rho, \theta, \chi) = 0$. No (3.10) seko, ka plastisko deformāciju pieauguma vektors ir vērsts pa plastiskā potenciāla virsmas normāli.

Plastiskās tecēšanas likumu sauc pa asociētu, ja plastiskais potenciāls g sakrīt ar slogošanas virsmu f : $g = f$. Eksperimenti rāda, ka betonu raksturo neasociētais plastiskās tecēšanas likums: $g \neq f$ [19]. Ja $\chi=1$, tad iegūst plastisko potenciālu G , kas atbilst sabrukuma virsmai:

$$G(\xi, \rho, \theta) = g(\xi, \rho, \theta, 1) = 0. \quad (3.13)$$

3.2 Sabrukuma virsma un slogošanas trajektorijas

Attēlā 3.1. ir parādīta apaļu betona kolonnu stiprība (neiekrāsoti simboli) trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$) [17] un pastiprinātu apaļu betona kolonnu slogošanas trajektorijas (nepārtrauktas līnijas). Salīdzinājumam attēlā 3.1. ir parādīts slogošanas trajektorijas piemērs (pārtrauktā līnija) trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Simboli attēlā 3.1. veido betona sabrukuma virsmu, kura ir atkarīga no hidrostatiskā spiediena. Betona kolonnu, kuru pastiprinājums ir sākotnēji nospriegots, slogošanas trajektorijas ir nobīdītas pa hidrostatisko asi.



Attēls 3.1. Neiekrāsoti simboli – apaļu betona kolonnu stiprība trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Nepārtrauktās līnijas – pastiprinātu apaļu betona kolonnu slogošanas trajektorijas. Pārtrauktā līnija – slogošanas trajektorijas piemērs trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu.

3.3 Plastisko deformāciju attīstība

Plastiskās deformācijas pieaugumu var sadalīt divās komponentēs – plastisko tilpuma deformāciju pieaugumā $d\varepsilon_{\xi}^{pl}$ un plastisko deformāciju deviatora pieaugumā $d\varepsilon_{\rho}^{pl}$:

$$d\varepsilon_{\xi}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \xi} = \frac{dI_1^{\varepsilon}}{\sqrt{3}}, \quad dI_1^{\varepsilon} = d\varepsilon_1^{pl} + d\varepsilon_2^{pl} + d\varepsilon_3^{pl}, \quad (3.14)$$

$$d\varepsilon_{\rho}^{pl} = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \rho} = \sqrt{2dJ_2^{\varepsilon}}, \quad dJ_2^{\varepsilon} = \frac{(d\varepsilon_1^{pl} - d\varepsilon_2^{pl})^2 + (d\varepsilon_2^{pl} - d\varepsilon_3^{pl})^2 + (d\varepsilon_3^{pl} - d\varepsilon_1^{pl})^2}{6} \quad (3.15)$$

kur $d\varepsilon_1^{pl}$, $d\varepsilon_2^{pl}$ un $d\varepsilon_3^{pl}$ ir plastisko deformāciju tenzora galveno vērtību pieaugumi. No Huka likuma seko, ka elastīgās garendeformācijas ε_z^{el} un šķērsdeformācijas ε_l^{el} apaļā pastiprinātā betona kolonnā ir:

$$\varepsilon_z^{el} = \frac{1}{E_o} [\sigma_z - 2\nu_o \cdot \sigma_l], \quad (3.16)$$

$$\varepsilon_l^{el} = \frac{1}{E_o} [(1-\nu_o) \cdot \sigma_l - \nu_o \cdot \sigma_z], \quad (3.17)$$

No (2.1), (3.16) un (3.17) seko, ka:

$$\varepsilon_z^{el} = \frac{1}{E_o} \left[1 - \frac{2k\nu_o^2}{1+k(1-\nu_o)} \right] \cdot \sigma_z, \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_l^{el} = \frac{\nu_o}{E_o [k(\nu_o - 1) - 1]} \cdot \sigma_z, \quad (3.19)$$

kur parametrs k tiek definēts sekojoši:

$$k = \frac{E_{lat}}{E_o} = \frac{E_j h}{E_o R}. \quad (3.20)$$

Plastiskās deformācijas aprēķina, atņemot no pilnajām deformācijām, kuras tiek noteiktas eksperimentāli, elastīgās deformācijas:

$$\varepsilon_z^{pl} = \varepsilon_z^{total} - \varepsilon_z^{el}, \quad (3.21)$$

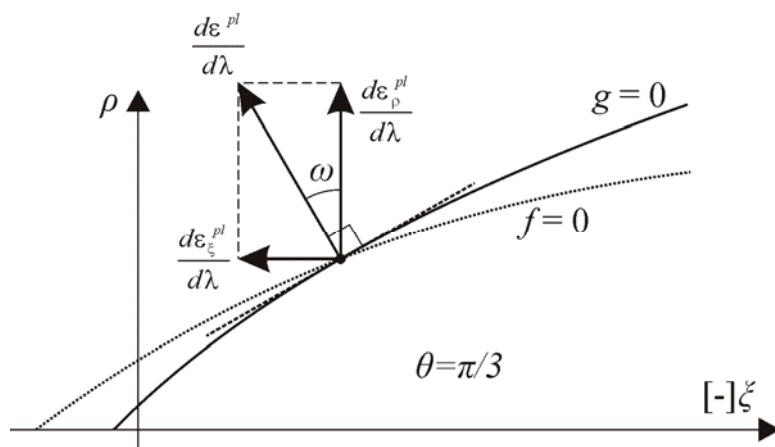
$$\varepsilon_l^{pl} = \varepsilon_l^{total} - \varepsilon_l^{el}. \quad (3.22)$$

Apalām pastiprinātām betona kolonnām $\varepsilon_3^{pl} = \varepsilon_z^{pl}$ un $\varepsilon_1^{pl} = \varepsilon_2^{pl} = \varepsilon_l^{pl}$. Tad no (3.14) un (3.15) seko, ka pilnā plastiskā tilpuma deformācija un pilnais plastisko deformāciju deviators ir:

$$\varepsilon_{\xi}^{pl} = \frac{\varepsilon_z^{pl} + 2\varepsilon_l^{pl}}{\sqrt{3}}, \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{\rho}^{pl} = \sqrt{\frac{2}{3}} |\varepsilon_l^{pl} - \varepsilon_z^{pl}|. \quad (3.24)$$

Plastisko deformāciju pieauguma vektora sadalīšana komponentēs ir parādīta attēlā 3.2.

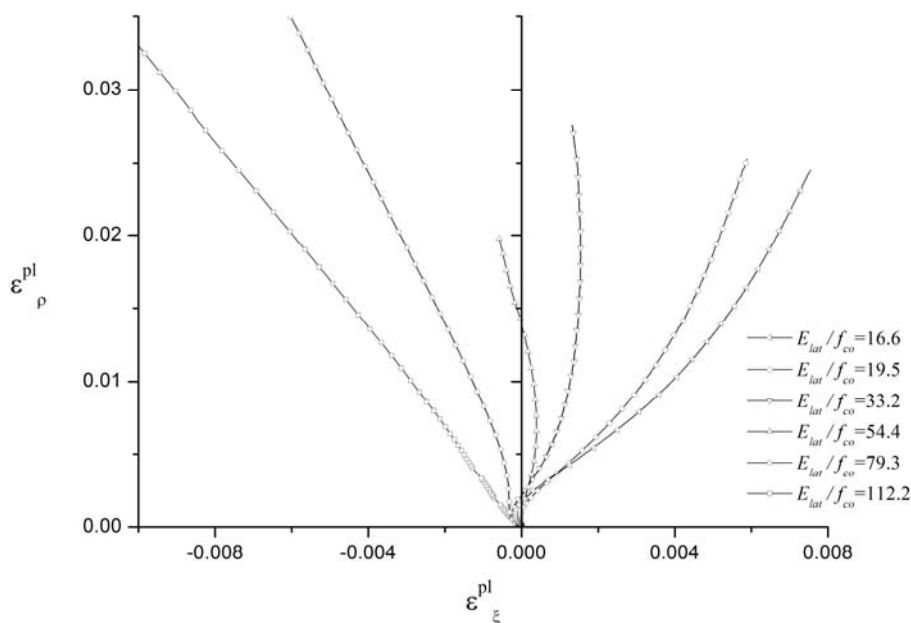


Attēls 3.2. Neasociētā plastiskā tecēšanas likuma shematisks attēlojums.

Attiecību starp plastiskās deformācijas komponentu pieaugumiem nosaka plastisko deformāciju pieauguma vektora virziens ψ :

$$\psi = \operatorname{tg} \omega = \frac{d \varepsilon_{\xi}^{pl}}{d \varepsilon_{\rho}^{pl}}. \quad (3.25)$$

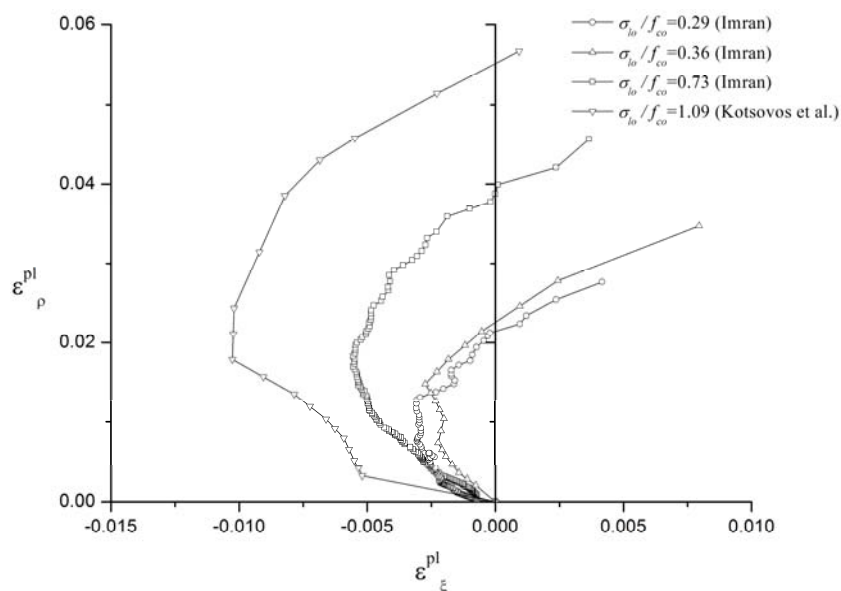
Tipiskas eksperimentālās pastiprinātu apaļu betona kolonnu plastisko deformāciju trajektorijas ir parādītas attēlā 3.3.



Attēls 3.3. Apaļu pastiprinātu betona kolonnu plastisko deformāciju trajektorijas.

Sakarību starp plastisko tilpuma deformāciju un plastisko deformāciju deviatoru ietekmē parametrs E_{lat}/f_{co} . Sākumā notiek plastiska tilpuma samazināšanās. Ja parametra E_{lat}/f_{co} vērtība ir maza, tad otrajā slogošanas trajektorijas posmā notiek plastisks tilpuma pieaugums. Pie vidējām parametra E_{lat}/f_{co} vērtībām otrajā slogošanas trajektorijas posmā plastisku tilpuma pieaugumu nomaina plastiska

tilpuma samazināšanās. Pie lielām parametra E_{lat}/f_{co} vērtībām otrajā slogošanas trajektorijas posmā norisinās tikai plastiska tilpuma samazināšanās. Pretēji iepriekš minētajam, nepastiprināta betona trīsasīgās spiedes pārbaudēs ar nemainīgu sānu spiedienu plastisko tilpuma samazināšanos vienmēr nomaina plastisks tilpuma pieaugums (attēls 3.4., līknes iegūtas, apstrādājot datus, kuri ir publicēti [16] un [20]).

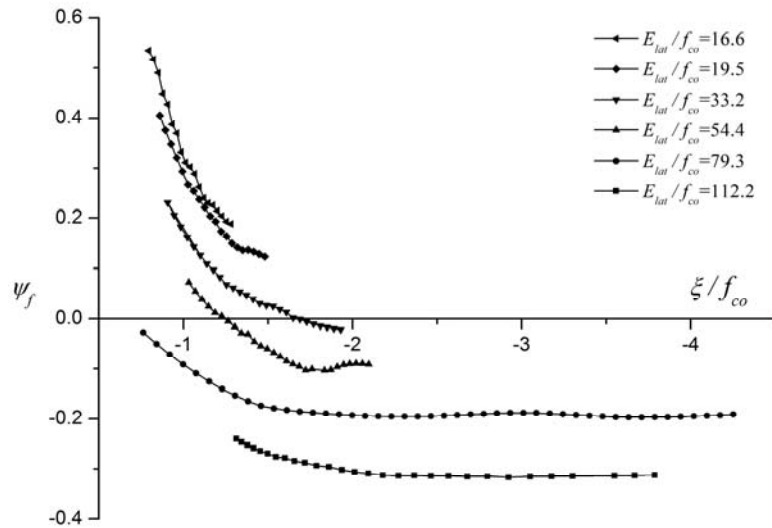


Attēls 3.4. Plastisko deformāciju trajektorijas trīsasīgās spiedes pārbaudēs ar nemainīgu sānu spiedienu σ_{lo} .

Ja ir zināmas eksperimentālās plastisko deformāciju trajektorijas, tad var noteikt plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienu ψ .

Lai gan eksperimentu rezultātiem attēlā 3.1. ir ievērojama izkliede, var redzēt, ka pastiprināta betona slogošanas trajektoriju otrie posmi praktiski sakrīt ar sabrukšanas virsmu. Tāpēc tālāk uzskatīsim, ka plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni slogošanas trajektoriju otrajos posmos, ψ_f , atbilst plastiskajam potenciālam pie sabrukuma (formula (3.13)).

Virziens ψ_f ir atkarīgs no parametra E_{lat}/f_{co} un hidrostatiskā spiediena ζ . ψ_f atkarība no normalizētā hidrostatiskā spiediena ir parādīta attēlā 3.5.



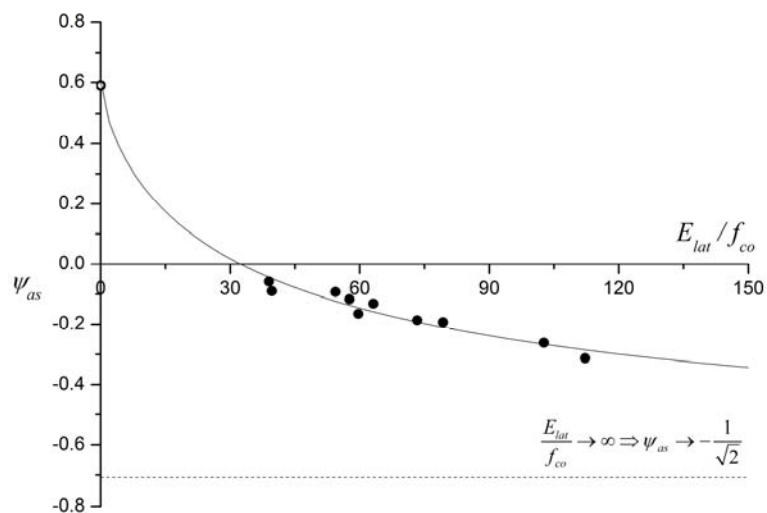
Attēls 3.5. Eksperimentālie plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni ψ_f pie sabrukuma.

Var redzēt, ka pieaugot hidrostatiskajam spiedienam, ψ_f tiecas uz kādu asimptotisku vērtību.

Asimptotiskā plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtība pie sabrukuma trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu atbilst gadījumam, kad $E_{lat}/f_{co} = 0$, jo šķērsdeformācijas nav atkarīgas no sānu spiediena.

Ja $E_{lat}/f_{co} \rightarrow \infty$, tad šķērsdeformācijas nav un no (3.23), (3.24) un (3.25) seko, ka $\psi_f \rightarrow -1/\sqrt{2}$.

Asimptotisko plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtību pie sabrukuma ψ_{as} atkarība no parametra E_{lat}/f_{co} ir parādīta attēlā 3.6.



Attēls 3.6. Asimptotiskās plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtības pie sabrukuma ψ_{as} . Iekrāsoti simboli – pastiprināts betons. Neiekrāsotais simbols – vidējā vērtība betona trīsasīgā spiedē ar nemainīgu sānu spiedienu. Nepārtrauktā līnija – aproksimācija.

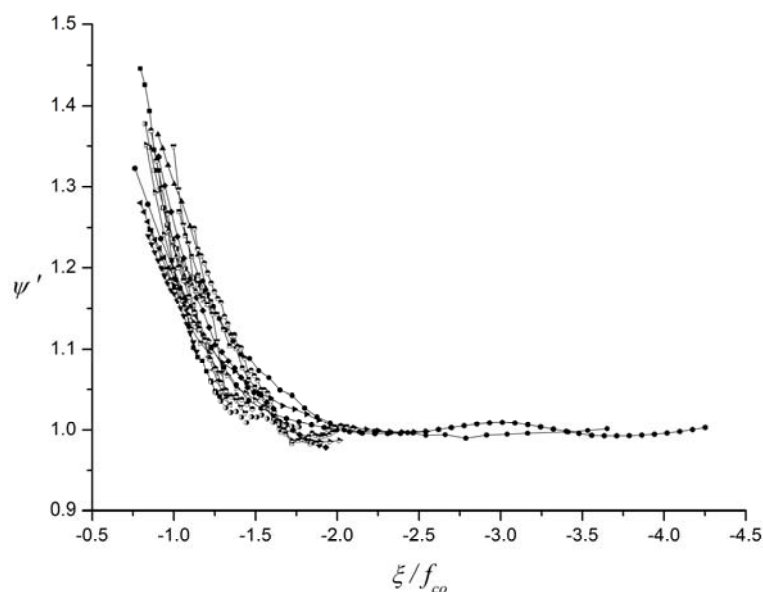
Formula asimptotisko plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena vērtību noteikšanai:

$$\psi_{as} = \frac{1}{A_{\psi} + B_{\psi} \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_{\psi}}} - \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (3.26)$$

kur $A_{\psi}=0.76$, $B_{\psi}=0.05$ un $n_{\psi}=0.73$. Normētos plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienus ψ' definējam sekojoši:

$$\psi' = \frac{\psi_f + \frac{1}{\sqrt{2}}}{\psi_{as} + \frac{1}{\sqrt{2}}}. \quad (3.27)$$

Normēto plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienu atkarība no normētā hidrostatiskā spiediena ir parādīta attēlā 3.7.



Attēls 3.7: Normētie plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni. Dažādi simboli apzīmē dažādas parametra E_{lat}/f_{co} vērtības.

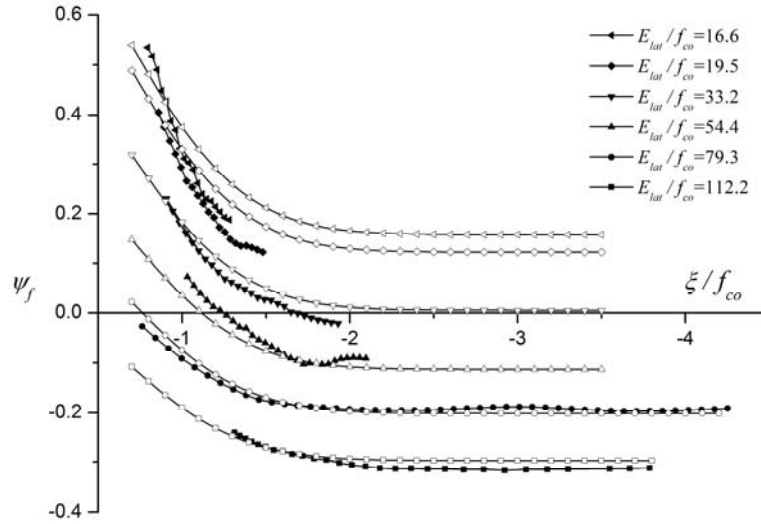
Var novērot, ka normētie virzieni ψ' tiecas veidot vienoto līkni, kuru var aprakstīt ar formulu:

$$\psi' = 1 + A_m \exp \left[- \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)^2 \right], \quad (3.28)$$

kur $A_m=0.76$ un $B_m=1.11$. Izmantojot (3.26), (3.27) un (3.28), iegūstam formulu plastisko deformāciju pieauguma vektora virziena pie sabrukuma novērtēšanai:

$$\psi_f(E_{lat}, f_{co}, \xi) = \left(\frac{1}{A_\psi + B_\psi \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_\psi}} \right) \left(1 + A_m \exp \left[- \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)^2 \right] \right) - \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (3.29)$$

Novērtējuma salīdzinājums ar eksperimentu ir parādīti attēlā 3.8.



Attēls 3.8. Plastisko deformāciju pieauguma vektora virzieni ψ_f pie sabrukuma. Iekrāsotie simboli – eksperiments, neiekrāsotie simboli – novērtējums.

Plastiskā potenciāla virsmu pie sabrukuma G var uzrakstīt šādā formā:

$$G(\xi, \rho, E_{lat}, f_{co}) = \rho + \Psi(\xi, E_{lat}, f_{co}) = 0. \quad (3.30)$$

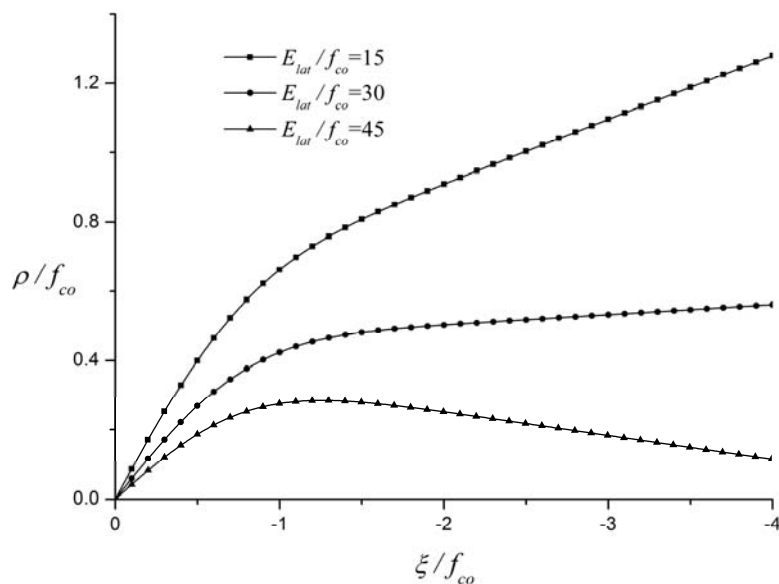
Tiek pieņemts, ka plastiskais potenciāls nav atkarīgs no Lodes leņķa. No (3.14), (3.15) un (3.25) seko, ka:

$$\psi_f = \frac{\frac{\partial G}{\partial \xi}}{\frac{\partial G}{\partial \rho}} = \frac{\partial \Psi}{\partial \xi}. \quad (3.31)$$

Izmantojot (3.29) un (3.31), iegūstam, ka plastiskais potenciāls ir:

$$G = \rho - \frac{\xi}{f_{co} \sqrt{2}} + \left(\frac{1}{A_\psi + B_\psi \left(\frac{E_{lat}}{f_{co}} \right)^{n_\psi}} \right) \left(\frac{\xi}{f_{co}} + \frac{A_m \sqrt{\pi} \operatorname{Erf} \left(B_m \frac{\xi}{f_{co}} \right)}{2B_m} \right) = 0, \quad (3.32)$$

kur $\text{Erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$. Plastiskais potenciāls ir parādīts attēlā 3.9.



Attēls 3.9. Plastiskā potenciāla atkarība no parametra E_{lat}/f_{co} .

4 Sākotnējā sānu spiediena ietekme uz apaļu pastiprinātu betona kolonnu uzvedību

Betonu sākotnēji nosprīgojot, tiek aizkavēta betona plaisāšana. Sākotnējais sānu spiediens izraisa sprieguma pieaugumu noliekuma punktā, tādējādi palēninot plaisu augšanu betonā. Šajā darbā ir demonstrēta iekārta priekšsprīgotu pastiprinātu betona kolonnu izgatavošanai un pētīta priekšsprīgojuma ietekme uz betona uzvedību.

4.1 Eksperimentu programma

4.1.1 Betona īpašības

Pētījumā tika izmantots dažādu stiprību betons (sagaidāmā stiprība (MPa) jeb betona klase 20, 35 un 50). Spiedē tika pārbaudītas 6 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Visu kolonnu (nepastiprinātu un pastiprinātu) diametrs bija 152mm, garums – 300mm. Rezultāti ir apkopoti tabulā 4.1.

Tabula 4.1. Betona īpašības.

Betona klase	Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendefromācija, ε_{co} [%]	Maksimālā šķērsdeformācija, ε_{lo} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
20	18.7	0.30	0.16	24.1	0.21
35	38.1	0.26	0.15	29.7	0.20
50	44.6	0.24	0.10	32.6	0.20

4.1.2 Kompozīta pastiprinājums

Betona kolonnas tika pastiprinātas, aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātu oglekļa šķiedru grīsti. Ražotāja dotās oglekļa šķiedru grīstes *Tenax – J UTS 7731* īpašības ir šādas: stiprība stiepē 5193MPa, Junga modulis 244GPa, maksimālā deformācija 2.13%, šķiedras diametrs $7\mu\text{m}$, šķiedru skaits 24000 un blīvums 1.79g/cm^3 .

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar *ASTM D 2290* standartu. Eksperimentāli noteikto oglekļa šķiedru grīstes īpašību (aprēķinātas no kompozīta, izmantojot maisījuma likumu, neievērojot matricas stiprību un moduli) salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām ir atrodams tabulā 4.2.

Tabula 4.2. Eksperimentāli noteikto oglekļa šķiedru grīstes īpašību salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām.

Attiecība starp eksperimentālo stiprību un ražotāja doto stiprību	Attiecība starp eksperimentālo moduli un ražotāja doto moduli	Attiecība starp eksperimentālo maksimālo stiepes deformāciju un ražotāja doto maksimālo stiepes deformāciju
0.68	0.97	0.57

Redzams, ka eksperimentālais modulis ir par 3% zemāks nekā ražotāja dotais modulis, savukārt, tikai nedaudz vairāk kā puse ražotāja dotās stiprības ir realizējusies kompozītā. Iegūtā galējā stiepes deformācija ir par 43% zemāka nekā ražotāja dotā vērtība.

4.2 Grīstes uztīšanas process un pastiprinātie paraugi

Betons tika pastiprināts, uztinot ar epoksīdsveķiem piesūcinātu oglekļa šķiedru grīsti uz rotējošas betona kolonnas. Iekārta grīstes uztīšanai ir parādīta attēlā 4.1. Uztīšanas process ir shematiski parādīts attēlā 4.2. Grīste no spoles nonāk priekšspriegošanas ierīcē, kura sastāv no četriem ar gumiju pārklātiem riteniem. Katrs ritenis ir atsevišķi regulējams, lai iegūtu vajadzīgo priekšsprieguma spēku. Grīstes novietojumu kontrolēja, pārvietojot priekšspriegojuma ierīci gar parauga asi. Paraugam veicot pilnu apgriezieni, priekšspriegojuma ierīce pārvietojas par 8mm. Pirms grīstes uztīšanas betona virsmai uzklāja epoksīdsveķu slāni. Uztīšanas procesā tika sekots

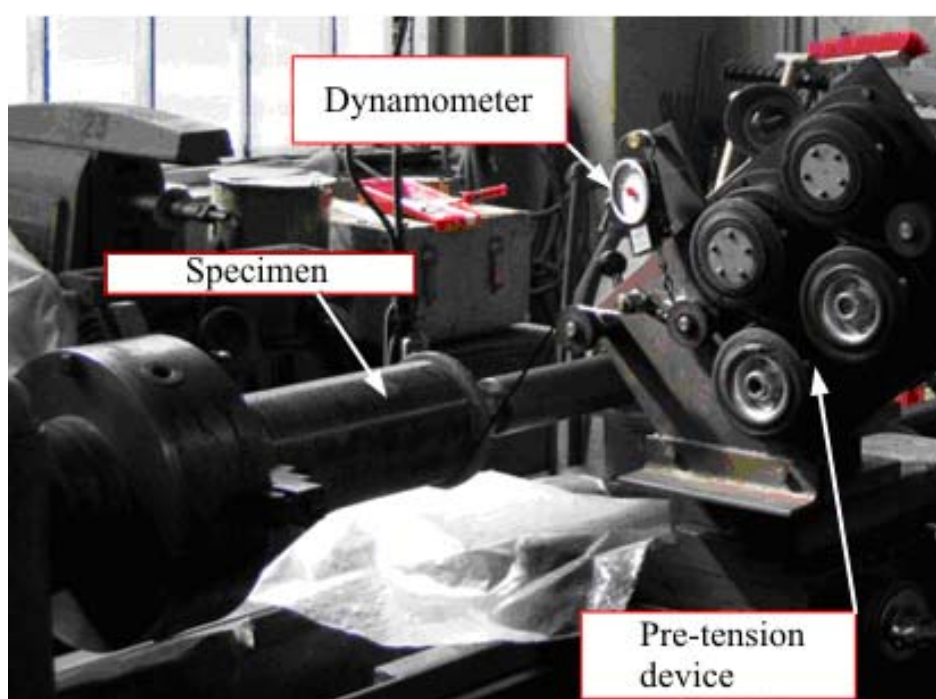
tam, lai grīste netiktu bojāta. Pastiprinātie paraugi tika atstāti nožūt 10 dienas pie temperatūras 22°C.

Pavisam tika izgatavoti un pārbaudīti 26 pastiprināti paraugi. Pastiprinājums sastāvēja no 2 un 4 grīstes slāņiem. Pastiprinājuma biezumu var aprēķināt sekojoši:

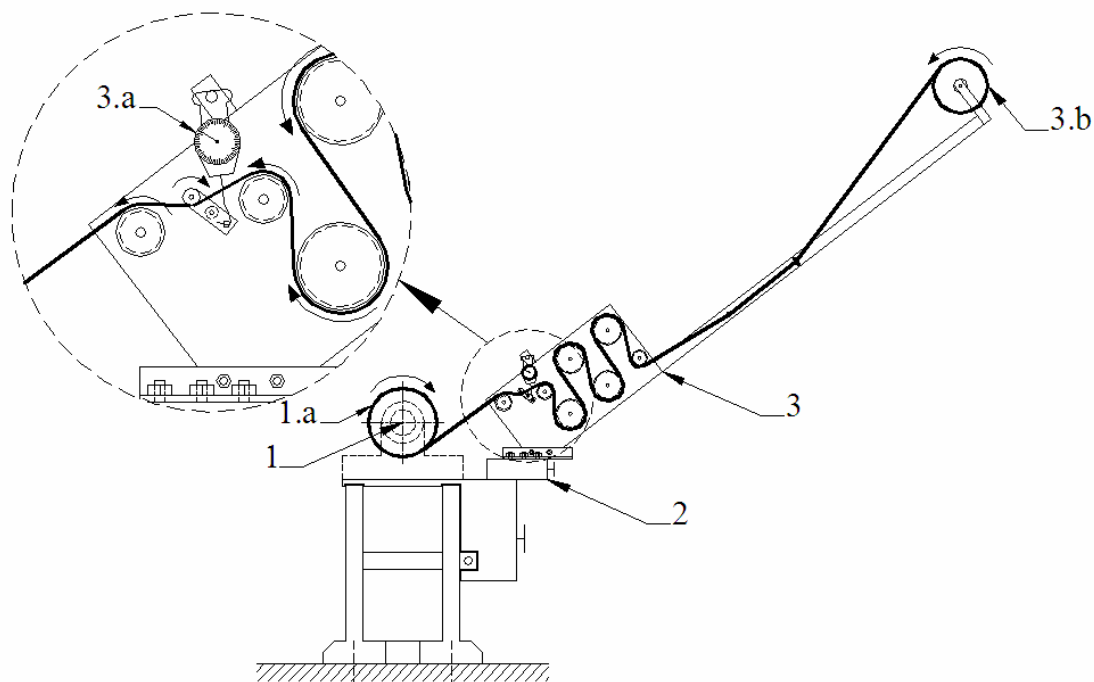
$$h = \frac{nS_o}{t}, \quad (4.1)$$

kur S_o – vidējais grīstes šķērsriezuma laukums, t – grīstes uztīšanas solis (8mm) un n – pastiprinājuma slāņu skaits.

Priekšspriegojuma spēks P bija 0N, 245N un 490N. Pārbaūžu laikā reģistrēja garendeformācijas un šķērsdeformācijas. Saskaņā ar *ASTM C 39/C39M – 99* standartu slogošanas ātrums bija 10 MPa/min.



Attēls 4.1. Uztīšanas iekārta.



Attēls 4.2. Uztišanas iekārtas shematisks attēlojums. 1- rotējošs parauga stiprinājums; 1.a – paraugs; 2 – horizontāla platforma, kura var pārvietoties gar parauga asi; 3 – platformai 2 piestiprināta priekšspriegojuma ierīce; 3.a – dinamometrs; 3.b – spole.

4.3 Priekšspriegojuma ietekmes novērtējums

No Huka likuma izriet, ka pirmā slogošanas trajektorijas posma slīpums ir:

$$\frac{d\sigma_z}{d\sigma_l} = \frac{1+k(1-\nu_o)}{k\nu_o}, \quad (4.2)$$

No (4.2) seko, ka sānu spriegums ir:

$$\sigma_l = \frac{k\nu_o}{1+k(1-\nu_o)} \sigma_z. \quad (4.3)$$

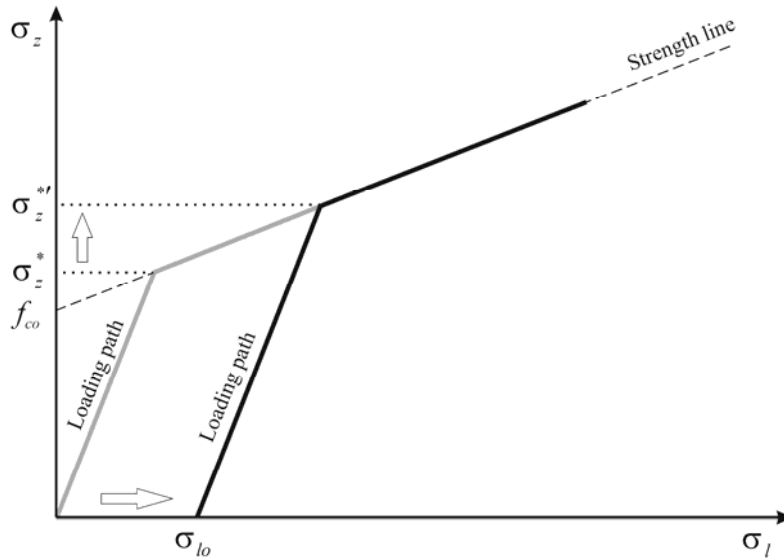
Sākotnējā slogošanas trajektorija krusto stiprības līniju noliekuma punktā. Ievietojot (4.3) formulā (2.5), iegūst spriegumu noliekuma punktā:

$$|\sigma_z^*| = [1+k(1-\nu_o)] \cdot f_{co}. \quad (4.4)$$

Spriegumu noliekuma punktā var palielināt, priekšspriegojot kompozīta pastiprinājumu. Pastiprinājuma priekšspriegojums rada sākotnējo sānu spiedienu σ_{l0} , tādēļ sākotnējā slogošanas trajektorija krustos stiprības līniju pie augstāka spiedes sprieguma (attēls 4.3). Sākotnējais sānu spiediens ir:

$$\sigma_{lo} = -\frac{nP}{Rt}, \quad (4.5)$$

kur P – grīstes priekšspriegojuma spēks.



Attēls 4.3. Sākotnējā sānu spiediena ietekme uz noliekuma punktu.

Tādā gadījumā sānu spiediens ir:

$$\sigma_l = \frac{kv_o}{1+k(1-\nu_o)} \sigma_z + \sigma_{lo}. \quad (4.6)$$

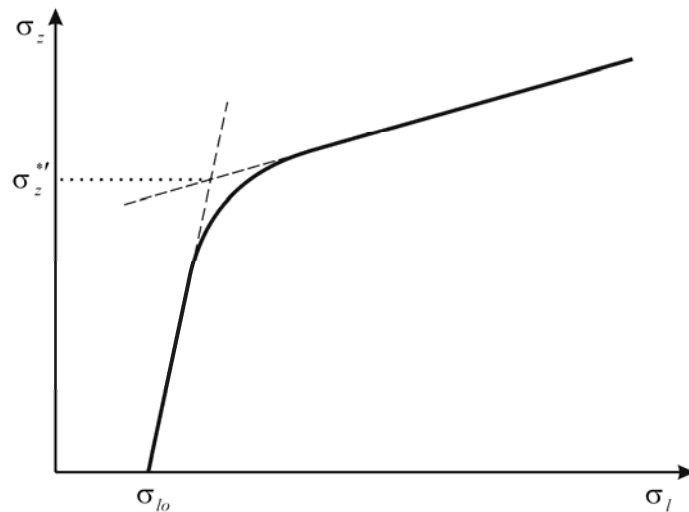
Ievietojot (4.6) formulā (2.5) iegūst priekšspriegota betona spriegumu noliekuma punktā:

$$|\sigma_z^*|' = [1+k(1-\nu_o)] \cdot [f_{co} + K_\sigma |\sigma_{lo}|] \quad (4.7)$$

vai

$$|\sigma_z^*|' = [1+k(1-\nu_o)] \cdot \left[f_{co} + \frac{1-\nu_o}{\nu_o} \cdot \frac{nP}{Rt} \right] \quad (4.8)$$

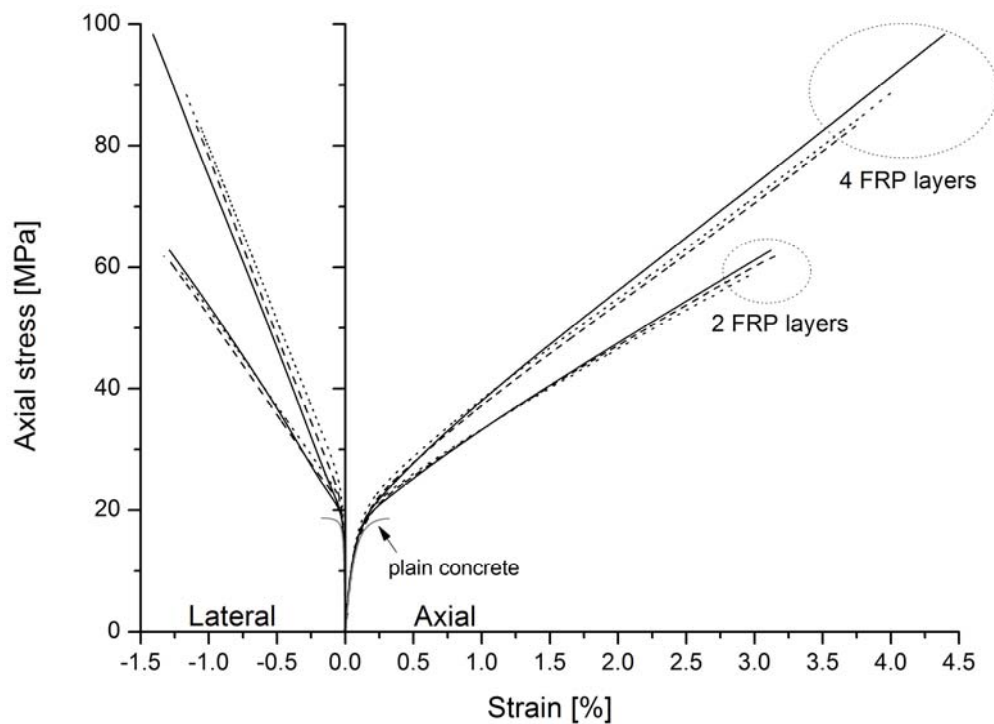
Kā rāda pārbažu rezultāti, pāreja no pirmā slogošanas trajektorijas posma uz otro slogošanas trajektorijas posmu norisinās pakāpeniski, tāpēc spriegumu noliekuma punktā definējam kā spiedes spriegumu pirmo un otro slogošanas trajektorijas posmu turpinājumu krustpunktā (attēls 4.4).



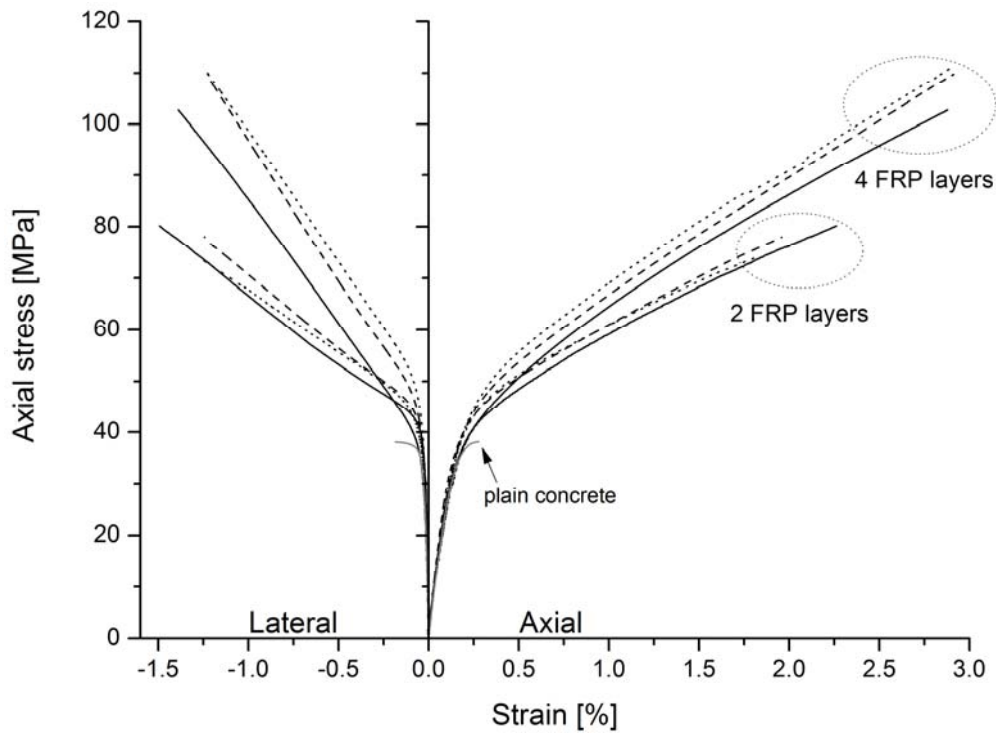
Attēls 4.4. Noliekuma punkta noteikšana no eksperimentu rezultātiem.

4.4 Rezultāti

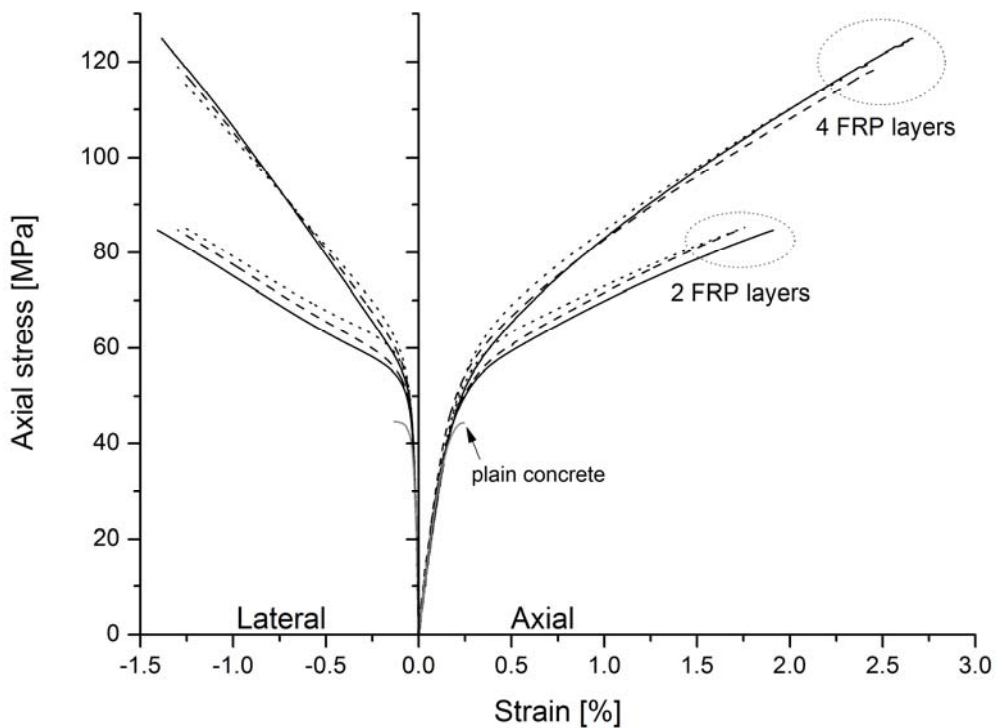
Vidējotas pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas līknes ir parādītas attēlos 4.5-4.7. Sloģošanas trajektorijas ir parādītas attēlā 4.9.



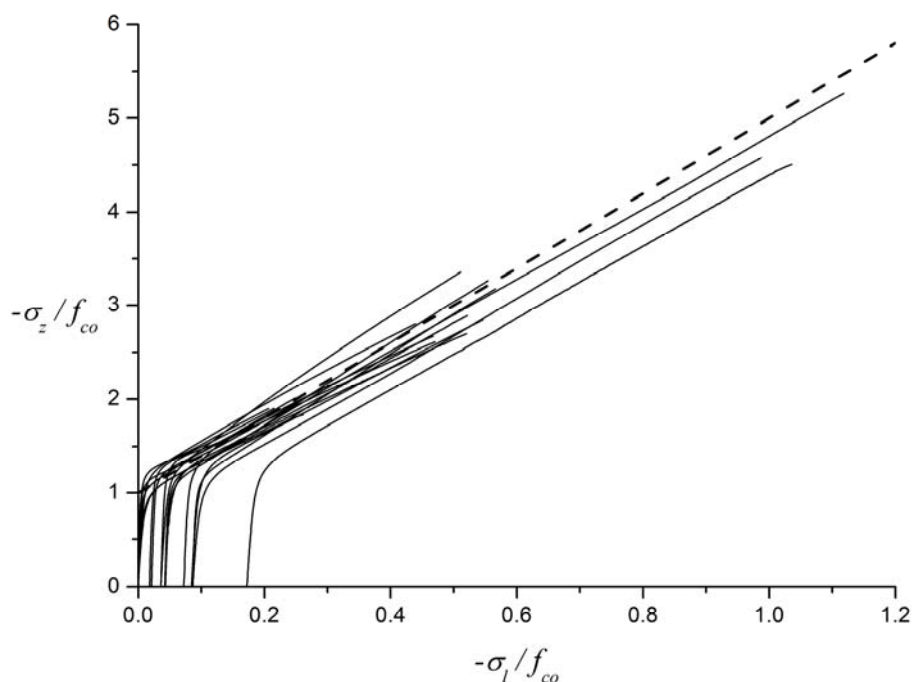
Attēls 4.5. Pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas līknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co}=18.7\text{MPa}$. Nepārtrauktā līnija – $P=0\text{N}$, pārtrauktā līnija – $P=245\text{N}$, punktētā līnija – $P=490\text{N}$.



Attēls 4.6. Pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas līknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co}=38.1\text{MPa}$. Nepārtrauktā līnija – $P=0\text{N}$, pārtrauktā līnija – $P=245\text{N}$, punktētā līnija – $P=490\text{N}$.



Attēls 4.8. Pastiprinātu betona kolonnu sprieguma-deformācijas līknes. Nepastiprināta betona spiedes stiprība $f_{co}=44.6\text{MPa}$. Nepārtrauktā līnija – $P=0\text{N}$, pārtrauktā līnija – $P=245\text{N}$, punktētā līnija – $P=490\text{N}$.



Attēls 4.8. Složošanas trajektorijas (pārtrauktā līnija – stiprības līnija).

Tabulā 4.3. ir uzrādīta pastiprināta betona maksimālā garendeformācija ε_{cc} , maksimālā šķērsdeformācija ε_{lu} , normētā spiedes stiprība f_{cc}/f_{co} , normētais spiedes spriegums noliekuma punktā $|\sigma_z|^{exp}/f_{co}$ un prognozētais normētais spiedes spriegums noliekuma punktā $|\sigma_z|^{est}/f_{co}$. Relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ, Δ^* , ir:

$$\Delta^* = \frac{|\sigma_z|' - |\sigma_z|^*}{|\sigma_z|^*} \cdot 100\%. \quad (4.9)$$

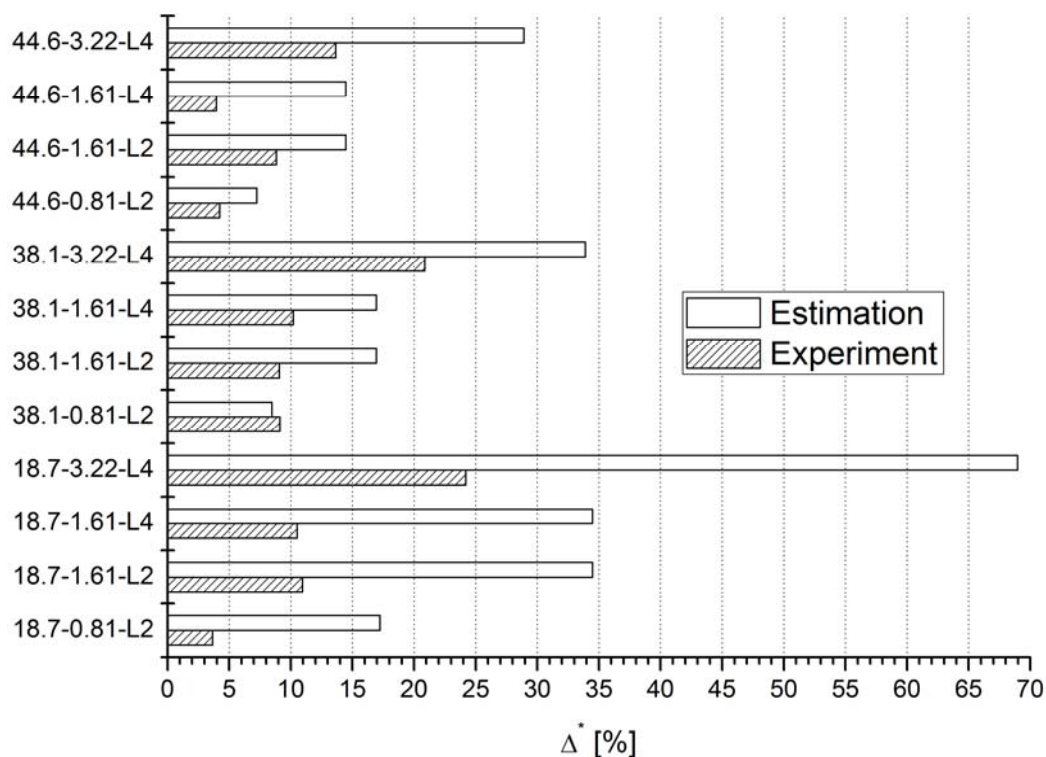
Prognozēto relatīvo pieaugumu Δ^{*est} iegūst, ievietojot (4.4) un (4.8) formulā (4.9):

$$\Delta^{*est} = \frac{1 - \nu_o}{\nu_o} \cdot \frac{nP}{Rt}. \quad (4.10)$$

Visu paraugu eksperimentālais un prognozētais relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ ir parādīts attēlā 4.9.

Tabula 4.3. Eksperimentu rezultāti.

f_{co} [MPa]	n	P [N]	$ \sigma_{lo} $ [MPa]	ε_{cc} [%]	ε_{lu} [%]	f_{cc}/f_{co}	$ \sigma_z^{*exp} /f_{co}$	$ \sigma_z^{*est} /f_{co}$
18.7	2	0	0	3.15	1.29	3.36	1.04	1.02
		245	0.81	3.15	1.33	3.31	1.08	1.20
		490	1.61	2.99	1.23	3.21	1.16	1.38
18.7	4	0	0	4.39	1.41	5.26	1.00	1.05
		245	1.61	3.74	1.09	4.45	1.11	1.41
		490	3.22	4.08	1.17	4.74	1.24	1.77
38.1	2	0	0	2.28	1.50	2.10	1.06	1.02
		245	0.81	1.96	1.26	2.05	1.16	1.10
		490	1.61	1.82	1.28	1.94	1.16	1.19
38.1	4	0	0	2.88	1.39	2.70	1.05	1.04
		245	1.61	2.91	1.23	2.89	1.16	1.21
		490	3.22	2.90	1.23	2.88	1.27	1.39
44.6	2	0	0	1.91	1.41	1.90	1.19	1.02
		245	0.81	1.73	1.30	1.90	1.24	1.09
		490	1.61	1.76	1.26	1.91	1.29	1.17
44.6	4	0	0	2.66	1.38	2.80	1.24	1.04
		245	1.61	2.49	1.30	2.67	1.29	1.19
		490	3.22	2.28	1.28	2.61	1.40	1.34



Attēls 4.9. Eksperimentālais un prognozētais relatīvais spiedes sprieguma pieaugums noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ. Pastiprināto paraugu apzīmējuma atšifrējums: (nepastiprināta betona stiprība [MPa]) – (sākotnējais sānu spiediens [MPa]) – L(pastiprinājuma slāņu skaits).

No attēla 4.9 redzams, ka pastiprinājuma priekšspriegojums palielina spiedes spriegumu noliekuma punktā pat par 24%. Spiedes spriegums nepastiprinātā konstruktīvā elementā nedrīkst pārsniegt noteiktu robežu [21]:

$$\sigma_z < 0.6 \frac{f_{co}}{\gamma}, \quad (4.11)$$

kur γ drošības koeficients ($\gamma > 1$). Pastiprinātā betona konstruktīvā elementā f_{co} ir jāaizvieto ar spiedes spriegumu noliekuma punktā $|\sigma_z^*|$. Parasti nepriekšspriegotiem pastiprinātiem elementiem $|\sigma_z^*| \approx f_{co}$. Tā kā priekšspriegotiem konstruktīviem elementiem $|\sigma_z^*| > f_{co}$, tad šādiem elementiem ir augstāks robežspriegums un tos var pakļaut lielākām ekspluatācijas slodzēm.

Dažiem paraugiem starp prognozētajiem un eksperimentālajiem spiedes sprieguma pieaugumiem noliekuma punktā priekšsprieguma dēļ ir ievērojamas atšķirības (skatīt attēlu 4.9). Tas nozīmē, ka sasniegtais priekšspriegojums paraugos bija mazāks nekā iecerēts. To var izskaidrot ar šļūdi un spriegumu relaksāciju betonā pastiprinājuma nožūšanas laikā, kas izraisa priekšspriegojuma līmeņa samazināšanos. Šis efekts ir īpaši izteikts mazas stiprības betonam ($f_{co} = 18.7 \text{ MPa}$).

Tā kā priekšspriegotā pastiprinājumā oglekļa šķiedras ir jau pagarinātas, tad priekšspriegotu paraugu maksimālās šķērsdeformācijas ir mazākas par nepriekšspriegotu paraugu maksimālajām šķērsdeformācijām (skatīt tabulu 4.3). Šķērsdeformāciju samazinājums izraisa spiedes stiprības un maksimālās garendeformācijas samazinājumu. Praktiskos pielietojumos tam ir maza nozīme, jo betona konstruktīvā elementa ekspluatācijas slodzei ir jābūt zemākai par spiedes spriegumu noliekuma punktā.

Pastiprināta betona kolonnas spiedes stiprība ir atkarīga no pastiprinājuma maksimālās aploces deformācijas (skat. formulu (2.2)). Maksimālā aploces deformācija pastiprinātu betona kolonnu pārbaudēs, ja kolonnas ir pastiprinātas, manuāli aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām, ir par 40% zemāka nekā maksimālā aploces deformācija kompozīta gredzenu pārbaudēs. Savukārt, maksimālā aploces deformācija pastiprinātu betona kolonnu pārbaudēs, ja kolonnas ir pastiprinātas, uztinot uz tām oglekļa šķiedru grīsti, ir tāda pati vai pat nedaudz augstāka nekā maksimālā aploces deformācija kompozīta gredzenu pārbaudēs. Tas nozīmē, ka ar grīstes uztīšanas metodi iegūtajam pastiprinājumam ir augstāka kvalitāte, jo tiek nodrošināts vienmērīgāks šķiedru sadalījums un mazināts šķiedru viļņainums.

Ja diviem paraugiem ir viena un tā pati nepastiprināta betona stiprība un sānu modulis, tad paraugam, kurš pastiprināts ar uztītu oglekļa šķiedru grīsti, būs lielāka spiedes stiprība nekā paraugam, kurš pastiprināts, manuāli aptinot to ar oglekļa šķiedru lentu. Ja f_{cc}^* un ε_{ju}^* ir ar oglekļa šķiedru lentu pastiprināta betona spiedes stiprība un maksimālā aploces deformācija ($\varepsilon_{ju}^* = 0.6 \varepsilon_{ju}^d$, kur ε_{ju}^d ir maksimālā aploces deformācija kompozītu gredzenu pārbaudēs), un f_{cc} ir ar oglekļa šķiedru grīsti pastiprināta betona spiedes stiprība, tad no formulas (2.2) izriet, ka relatīvais spiedes stiprības pieaugums, ja tiek izmantota grīstes uztīšana, ir:

$$\frac{f_{cc} - f_{cc}^*}{f_{cc}^*} = \frac{0.67 \cdot K_{\sigma} E_{lat} \varepsilon_{ju}^*}{f_{co} + K_{\sigma} E_{lat} \varepsilon_{ju}^*}, \quad (4.12)$$

Relatīvais spiedes stiprības pieaugums ir lielāks betonam, kuram ir mazāka nepastiprināta betona stiprība. Prognozētais relatīvais spiedes stiprības pieaugums, ja tiek izmantota grīstes uztīšana, ir uzrādīts tabulā 4.4.

Tabula 4.4. Prognozētais relatīvais spiedes stiprības pieaugums, ja tiek izmantota grīstes uztīšana ($\varepsilon_{ju}^d = 1.2\%$ un $E_j = 225000 \text{ MPa}$).

f_{co} [MPa]	E_{lat} [MPa]	$(f_{cc} - f_{cc}^*) / f_{cc}^*$ [%]
27	1170	37
	2730	50
48	1170	28
	2730	42

5 Apaļu pastiprinātu betona kolonnu stabilitāte

Iepriekš tika parādīts, ka betona kolonnas spiedes stiprību un maksimālo deformāciju var ievērojami palielināt, ja betona kolonna tiek pastiprināta. Taču, ja kolonnai ir liels slaidums, tad tā var zaudēt noturību pirms stiprības sasniegšanas. Darbā tika eksperimentāli pētīta ar oglekļa šķiedru kompozītu pastiprinātu slaidu betona kolonnu noturība spiedē un veikts eksperimentālā kritiskā noturības zuduma sprieguma salīdzinājums ar prognozēto kritisko noturības zuduma spriegumu.

5.1 Eksperimentu programma

5.1.1 Betona īpašības un pastiprinātie paraugi

Pētījumā tika izmantots divu dažādu stiprību betons (sagaidāmā stiprība (MPa) jeb betona klase 25 un 50). Spiedē tika pārbaudītas 3 nepastiprinātas betona kolonnas, lai noteiktu nepastiprināta betona stiprību. Nepastiprināto kolonnu diametrs bija 150mm. Rezultāti ir apkopoti tabulā 5.1.

Tabula 5.1: Betona īpašības.

Betona klase	Stiprība spiedē, f_{co} [MPa]	Maksimālā garendeformācijas mērcija, ε_{co} [%]	Maksimālā šķeērsdeformācijas mērcija, ε_{lo} [%]	Junga modulis, E_o [GPa]	Puasona koeficients, ν_o
25	31.1	0.212	0.096	22.9	0.13
50	48.5	-	0.087	27.3	0.17

5.1.2 Kompozīta pastiprinājums

Betona kolonnas tika pastiprinātas aptinot tās ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām (oglekļa šķiedru audums 340-700 (ražotājs Grafil Inc.)). Ražotāja dotās oglekļa auduma īpašības ir šādas: stiprība stiepē 4500MPa, Junga modulis 234GPa, maksimālā deformācija 1.9%, biezums 0.17mm un blīvums 1.8g/cm³.

Lai noteiktu kompozīta pastiprinājuma stiprību un maksimālo deformāciju, tika izmantotas kompozīta gredzenu pārbaudes saskaņā ar *ASTM D 2290* standartu. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību (aprēķinātas no kompozīta, izmantojot maisījuma likumu, neievērojot matricas stiprību un moduli) salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām ir atrodams tabulā 5.2.

Tabula 5.2. Eksperimentāli noteikto oglekļa auduma īpašību salīdzinājums ar ražotāja dotajām īpašībām.

Attiecība starp eksperimentālo stiprību un ražotāja doto stiprību	Attiecība starp eksperimentālo moduli un ražotāja doto moduli	Attiecība starp eksperimentālo maksimālo stiepes deformāciju un ražotāja doto maksimālo stiepes deformāciju
0.52	0.95	0.55

Redzams, ka eksperimentālais modulis ir par 5% zemāks nekā ražotāja dotais modulis, savukārt, tikai nedaudz vairāk kā puse no ražotāja dotās stiprības ir realizējusies kompozītā. Iegūtā maksimālā stiepes deformācija ir par 45% zemāka nekā ražotāja dotā vērtība.

5.1.3 Pastiprinātie betona paraugi

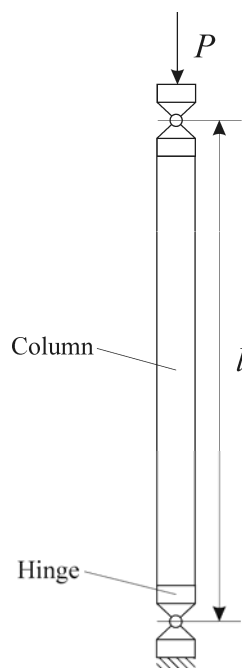
Tika izgatavoti un pārbaudīti 12 pastiprināta betona paraugi. Visu pastiprināto betona paraugu diametrs bija 150mm un to pastiprinājums sastāvēja no 2 oglekļa šķiedru auduma slāņiem. Noturības pārbaudēs izmantoto paraugu garums bija 600mm, 1200mm, 1500mm un 2500mm. Abiem kolonnu galiem tika piestiprināti cilindriski šarnīri, kuri noteica noturības zuduma plakni. Attālums starp šarnīra rotācijas asi un kolonnas galu bija 50mm. Paraugi tika pakļauti monotoni pieaugošai vienasīgai spiedes slodzei līdz paraugu sabrukšanai. Slogošanas laikā tika mērīta slodze, garendeformācija un šķērsdeformācija. Slogošanas ātrums bija 10 MPa/min saskaņā ar *ASTM C 39/C39M – 99* standartu.

5.2 Teorētiskā pastiprinātu betona kolonnu stabilitāte

Kritisko spiedes slodzi P_{cr} , pie kuras elastīga, šarnīros iestiprināta, apaļa kolonna zaudē noturību, nosaka Eilera formula (skatīt attēlu 5.1.):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}, \quad (5.1)$$

kur l – attālums starp šarnīriem, E – Junga modulis, I – kolonnas šķēluma inerces moments (apaļai kolonnai $I=\pi R^4/4$).



Attēls 5.1. Šarnīros iestiprināta kolonna.

Nelineāra materiāla (elastīga vai elastīgi plastiska) gadījumā, Junga modulis E formulā (5.1) ir jāaizvieto ar pieskares moduli E_t [22]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{l^2}. \quad (5.2)$$

Izdalot (5.2) ar kolonnas šķērsriezuma laukumu A , iegūstam kritisko noturības zuduma spriegumu:

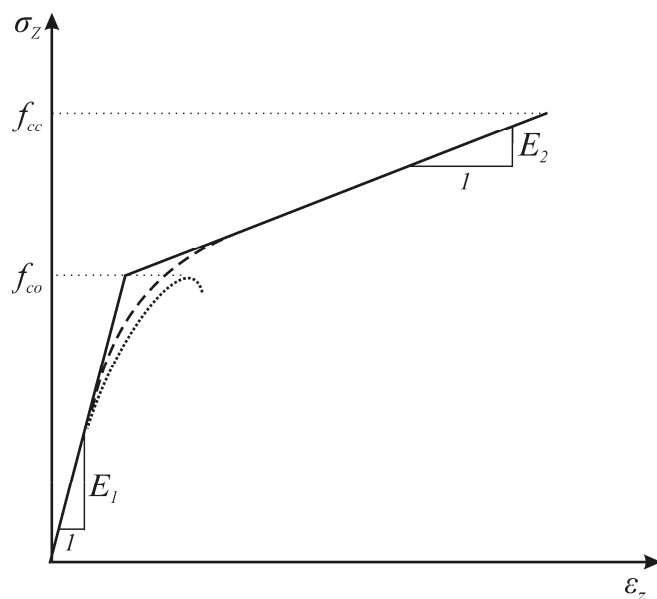
$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{\lambda^2}, \quad (5.3)$$

kur λ ir slaidums:

$$\lambda = \frac{l}{\sqrt{I/A}} = \frac{2l}{R}. \quad (5.4)$$

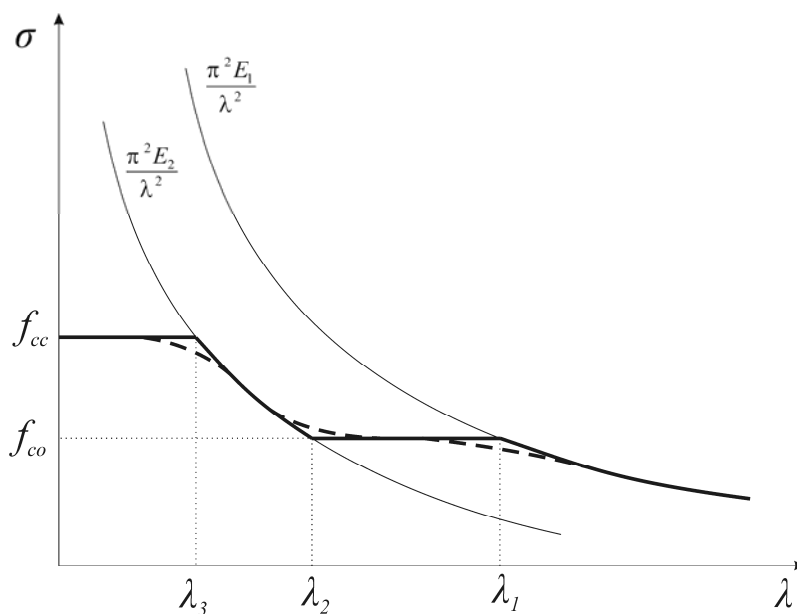
Pastiprinājumam, kurā šķiedras ir orientētas aploces virzienā, ir niecīga ietekme uz sākotnējo lieces stingumu EI un šķērsriezuma laukumu A , tāpēc varam uzskatīt, ka pastiprinājums neietekmē slaidumu λ .

Ideāli bilineāras sprieguma-deformācijas sakarības (nepārtrauktā līnija attēlā 5.2.) gadījumā kritisko noturības zuduma spriegumu nosaka divas Eilera hiperbolas (vienādojums (5.3)), kuras atbilst sākotnējam moduli E_1 un otrajam pieskares moduli E_2 (attēls 5.3.)



Attēls 5.2. Pastiprināta betona sprieguma-deformācijas līkne. punktētā līnija – nepastiprināta betona sprieguma-deformācijas līkne.

Ja $\lambda > \lambda_1$, tad kolonna zaudē noturību pie spiedes sprieguma, kas ir zemāks par nepastiprināta betona stiprību. Ja $\lambda_2 < \lambda < \lambda_1$, tad kolonna zaudē noturību pie spiedes sprieguma, kas ir vienāds ar nepastiprināta betona stiprību. Abos gadījumos pastiprinājums neizraisa kritiskā noturības zuduma sprieguma pieaugumu.



Attēls 5.3. Kritiskais noturības zuduma spriegums kā kolonnas slaiduma funkcija.

Ja $\lambda < \lambda_2$, tad kolonna zaudē noturību pie spiedes sprieguma, kas ir augstāks par nepastiprināta betona stiprību. Tikai gadījumā, ja $\lambda < \lambda_3$, kolonna sabrūk, jo tiek sasniegta spiedes stiprība.

Tā kā eksperimentālā sprieguma-deformācijas līkne ir gluda (pārtrauktā līnija attēlā 5.2.), tad pieskares modulis $E_t(\sigma)$ pakāpeniski mainās no E_1 līdz E_2 . No tā seko, ka arī

kritiskā noturības zuduma sprieguma līkne ir gluda (pārtrauktā līnija attēlā 5.3.). Kritisko noturības zuduma spriegumu σ_{cr} nosaka, atrisinot vienādojumu:

$$\lambda^2 \sigma_{cr} = \pi^2 E_t(\sigma_{cr}). \quad (5.5)$$

5.3 Pastiprinātu betona kolonnu noturības zuduma prognozēšana

Īso pastiprināto betona kolonnu (garums 300mm) pārbaužu rezultāti ir uzrādīti tabulā 5.3. Noturības zuduma pārbaužu rezultāti ir uzrādīti tabulā 5.4. Visi paraugi, izņemot 600mm garos paraugus, zaudēja noturību.

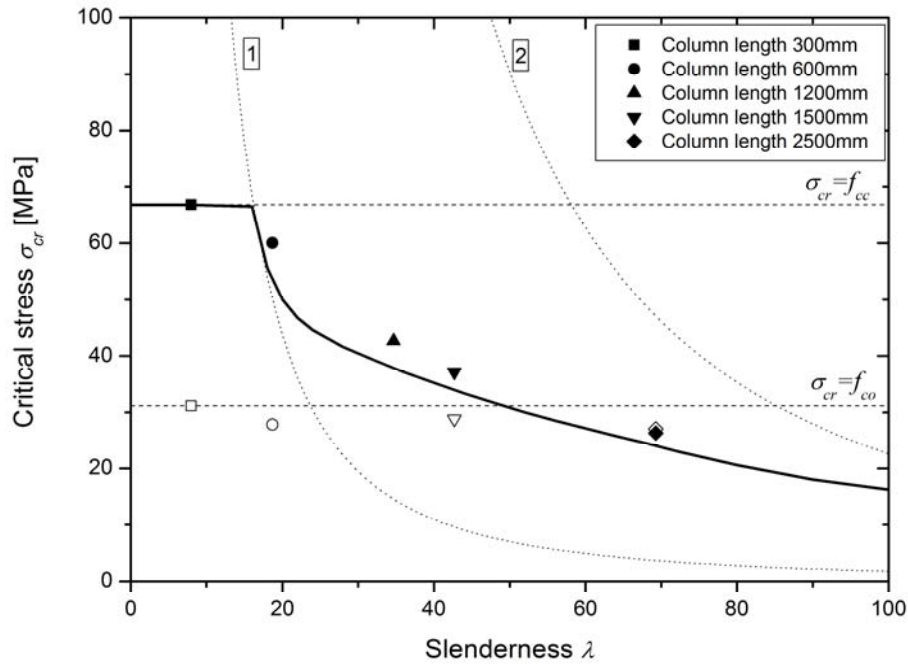
Tabula 5.3. 300mm garo pastiprināto betona kolonnu pārbaužu rezultāti.

Betona klase	f_{cc} [MPa]	ε_{cc} [%]	ε_{lu} [%]	E_t [GPa]	E_2 [MPa]
25	66.8	1.90	0.90	20.8	1773
50	79.2	1.16	0.78	27.4	2485

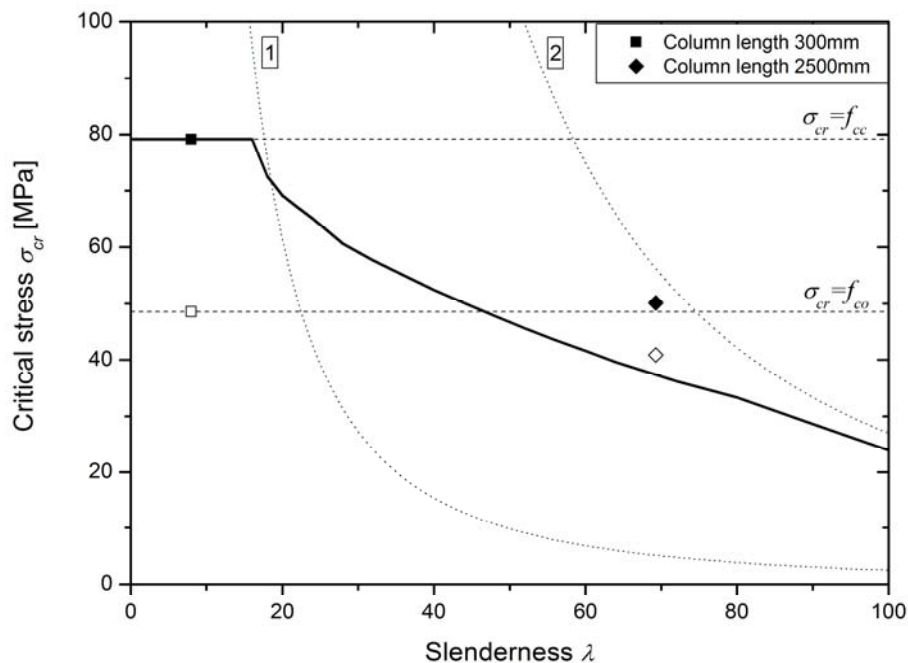
Tabula 5.4. Noturības zuduma pārbaužu rezultāti.

l [mm] (λ)	Betona klase	Pastiprinājums	f_{cc} [MPa]	ε_{cc} [%]	ε_{lu} [%]	E_t [GPa]	E_2 [MPa]
600 (18.7)	25	Nav	27.8	0.25	0.04	22.0	-
600 (18.7)	25	Ir	60.0	1.79	0.81	21.6	1640
1200 (34.2)	25	Ir	42.6	0.53	0.18	24.9	-
1500 (42.7)	25	Nav	28.8	0.16	0.06	23.7	-
1500 (42.7)	25	Ir	37.1	0.31	0.05	23.6	-
2500 (69.3)	25	Nav	27.0	0.16	0.03	24.0	-
2500 (69.3)	25	Ir	26.3	0.20	0.02	23.8	-
2500 (69.3)	50	Nav	40.9	0.18	0.03	29.1	-
2500 (69.3)	50	Ir	50.1	0.24	0.07	28.6	-

Kritisko noturības zuduma spriegumu nosaka atrisinot vienādojumu (5.5), kur līkne $E_t(\sigma)$ tika iegūta no īso kolonnu (garums 300mm) pārbaužu rezultātiem. Attēlos 5.4. un 5.5 ir parādīts prognozētais (nepārtrauktā līnija) un eksperimentālais (simboli) kritiskais noturības zuduma spriegums. Redzams, ka 25 klases betonam ir laba sakritība starp eksperimentālajām un prognozētajām kritiskā noturības zuduma sprieguma vērtībām. 50 klases betonam sakritību starp eksperimentālajām un prognozētajām vērtībām nevar novērtēt, jo tika pārbaudīta tikai viena nepastiprināta un viena pastiprināta betona kolonna.



Attēls 5.4. Prognozētais un eksperimentālais kritiskais noturības zuduma spriegums kā kolonnas slaiduma funkcija (25 betona klase). Iekrāsotie simboli – pastiprinātas betona kolonnas, neiekrāsotie simboli – nepastiprinātas kolonnas, nepārtrauktā līnija – prognoze. 1 līnija – Eilera hiperbola (formula (5.3)), ja $E_t = E_2$. 2 līnija - Eilera hiperbola (formula (5.3)), ja $E_t = E_1$.



Attēls 5.5. Prognozētais un eksperimentālais kritiskais noturības zuduma spriegums kā kolonnas slaiduma funkcija (50 betona klase). Iekrāsotie simboli – pastiprinātas betona kolonnas, neiekrāsotie simboli – nepastiprinātas kolonnas, nepārtrauktā līnija – prognoze. 1 līnija – Eilera hiperbola (formula (5.3)), ja $E_t = E_2$. 2 līnija - Eilera hiperbola (formula (5.3)), ja $E_t = E_1$.

Redzams, ka pastiprinājums ir efektīvs tikai tad, ja kolonnas slaidums $\lambda < 40$.

6 Rezultāti un secinājumi

Šī darba galvenie rezultāti un secinājumi ir šādi:

- 1) Diferenciālais Puasona koeficients (DPK) raksturo, cik strauji pieaug šķērsdeformācijas. Atrasts, ka pēc pārejas posma DPK tiecas uz kādu asimptotisku vērtību, kura ir atkarīga no betona klases un pastiprinājuma īpašībām.
- 2) Iegūta formula asimptotiskā DPK novērtēšanai.
- 3) Iegūtas formulas maksimālās garendformācijas un otrā pieskares moduļa novērtējumam.
- 4) Atrasts, ka, atkarībā no betona klases un aptinuma īpašībām, pastiprinātā betonā var norisināties plastisks tilpuma pieaugums vai plastisks tilpuma samazinājums.
- 5) Iegūta formula, kas ļauj noteikt plastisko deformāciju pieauguma vektora virzienus pie sabrukuma. Konstruēts plastiskais potenciāls, kas atbilst sabrukuma stāvoklim.
- 6) Parādīts, ka pastiprinājuma priekšspriegojums palielina spiedes spriegumu noliekuma punktā līdz pat 24%, salīdzinājumā ar pastiprinājumu bez priekšspriegojuma.
- 7) Atrasts, ka ar oglekļa šķiedru grīstes uztīšanas metodi izgatavotajam pastiprinājumam ir augstāka kvalitāte, nekā pastiprinājumam, kas izgatavots, manuāli aptinot betona kolonnas ar epoksīdsveķiem piesūcinātām oglekļa šķiedru lentām, jo tiek nodrošināts vienmērīgāks šķiedru sadalījums un mazināts šķiedru viļņainums.
- 8) Pētīta garu (garums 600mm – 2500mm) pastiprinātu betona kolonnu stabilitāte spiedē un konstatēts, ka pastiprinājums ir efektīvs tikai tad, ja kolonnas slaidums $\lambda < 40$.

Atsauces

- [1] P. Balaguru, A. Nanni and J. Giancaspro, “FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures”, *Taylor & Francis* (2009).
- [2] V. Tamužs, R. Tepfers, Chi-Sang You, T. Rousakis, I. Repelis, V. Skruls and U. Vilks, “Behavior of concrete cylinders confined by carbon-composite tapes

- [3] V. Tamužs, R. Tefers and E. Spārniņš, “Behavior of concrete cylinders confined by a carbon composite. 2. Prediction of strength”, *Mechanics of Composite Materials*, 42(2), 109-118 (2006).
- [4] Rousakis T., (2001). “Experimental Investigation of Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, under Monotonic and Cyclic Axial Compressive Load.” Research report. Laboratory of Reinforced Concrete, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Demokritus University of Thrace, Greece and Division for Building Technology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (2001).
- [5] L. Lam, J.G. Teng, C.H. Cheung and Y. Xiao, “FRP-confined concrete under axial cyclic compression”, *Cement & Concrete Composites*, 28, 949-958 (2006).
- [6] J.F. Berthet, E. Ferrier and P. Hamelin, “Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study”, *Construction and Building Materials*, 19, 223-232 (2005).
- [7] S. Pessiki, K.A. Harries, J.T. Kestner, R. Sause and J.M. Ricles, ”Axial behavior of reinforced concrete columns confined with FRP jackets”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 5 (4), 237-245 (2001).
- [8] V. Dias da Silva and J.M.C. Santos, ”Strengthening of axially loaded concrete cylinders by surface composites”, In: J. Figueiras, L. Juvandes, R. Faria, A.T. Marques, A. Ferreira, J. Barros, J. Appleton, Eds. *Composites in Constructions, Proceedings of the International Conference*, Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 257-262 (2001).
- [9] M. Shahawy, A. Mirmiran and T. Beitelman, “Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns”, *Composites: Part B*, 31, 471-480 (2000).
- [10] Y. Xiao and H. Wu, “Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets”, *Journal of Materials for Civil Engineering, ASCE*, 12(2), 139-146 (2000).
- [11] P. Rochette and P. Labossiere, “Axial testing of rectangular column models confined with composites”, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 4(3), 129-136 (2000).
- [12] S. Kshirsagar, R.A. Lopez-Anido and R.K. Gupta, “Environmental aging of fiber-reinforced polymer-wrapped concrete cylinders”, *ACI Materials Journal*, 97(6), 703-712 (2000).
- [13] S. Matthys, L. Taerwe and K. Audenaert, “Tests on axially loaded concrete columns confined by fiber reinforced polymer sheet wrapping”, In: C.W. Dolan, S.H. Rizkalla and S.H. Nanni, Eds. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for*

- [14] H. Toutanji, “Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets”, *ACI Materials Journal*, 96(3), 397-404 (1999).
- [15] S. Kono, M. Inazumi and T. Kaku, “Evaluation of confining effects of CFRP sheets on reinforced concrete members”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure ICCI'98*, Tucson, Arizona, 343-355 (1998).
- [16] I. Imran, “Applications of nonassociated plasticity in modeling the mechanical response of concrete”, *PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto*, (1994).
- [17] V.K. Papanikolaou and A.J. Kappos, “Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression”, *Int. J. of Solids and Structures*, 44, 7021-7048 (2007).
- [18] P. Grassl, K. Lungren and K. Gylltoft, “Concrete in compression: a plasticity theory with a novel hardening law”, *Int. J. of Solids and Structures*, 39, 5205-5223 (2002).
- [19] D. Sfer, I. Carol, R. Gettu and G. Etse, “Study of the behavior of concrete under triaxial compression”, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 128(2), 156-163 (2002).
- [20] M.D. Kotsovos and J.B. Newman, “Mathematical description of deformational behavior of concrete under generalized stress beyond ultimate strength.” *Journal of the American Concrete Institute—ACI*, 77(5), 340–346 (1980).
- [21] Comite Euro-International du Beton. CEB-FIP Model Code 1990. Bulletin d'Information CEB, 213/214, Lausanne (1993).
- [22] F.R. Shanley, “Inelastic column theory.” *Journal of Aero Science*, 14(5), 261 – 268 (Sec. 8.1) (1947).

Pateicības

Vēlos izteikt lielu pateicību manam zinātniskā darba vadītājam, profesoram Vitautam Tamužam, par neaizstājamo atbalstu un iedvesmu, konstruktīvām, interesantām diskusijām un kritiku rezultātu apspriešanā.

Vēlos izteikt pateicību Uldim Vilkam, Vilim Skrulam un M. Daugevičius par palīdzību eksperimentu sagatavošanā un veikšanā. Izsaku pateicību visiem Polimēru Mehānikas Institūta kolēģiem par atbalstu zinātniskajā darbā.