

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Būvniecības Fakultāte
Būvniecības un Rekonstrukcijas Institūts

Andrejs PUPURS

**LIEKTU FIBROBETONA ELEMENTU
NESTSPĒJAS PROGNOZĒŠANA**

**LOAD BEARING CAPACITY PREDICTION OF
STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE
ELEMENTS SUBJECTED TO BENDING LOADS**

Promocijas darba kopsavilkums

Summary of Dissertation Thesis

Promocijas padome “RTU P-06”

Būvzinātnes nozare, Būvkonstrukciju apakšnozare

Zinātniskais vadītājs
Dr.sc.ing. profesors
Andrejs KRASŅIKOVŠ

Rīga 2011

UDK 624.012.45.04(043.2)

Pu 505 1

Pupurs A. Liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšana.
Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU, 2011. – 60 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU Būvkonstrukciju katedras paplašinātās sēdes 2011.g.
25.februāra lēmumu, protokols Nr. K01-11



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

ISBN 978-9934-10-230-1

Satura rādītājs / table of contents

Satura rādītājs / table of contents	3
Darba vispārējs raksturojums.....	4
Tēmas aktualitāte	4
Darba mērķis	5
Darba uzdevumi	5
Pētījumu metodika	5
Zinātniskā novitāte	6
Darba praktiskais pielietojums.....	7
Aizstāvēšanai tiek izvirzīts	7
Darba apjoms	8
Būtiskāko konferenču saraksts.....	8
Būtiskāko publikāciju saraksts.....	9
Promocijas darba struktūra	10
Promocijas darba saturs	11
Secinājumi.....	30
Izmantotā literatūra	31
Review of Dissertation Thesis	32
Topicality of the Dissertation Thesis	32
Objective of study	33
Tasks of the study	33
Methodology of the Dissertation Thesis	33
Scientific novelty of the Dissertation Thesis	34
Practical application of the Dissertation Thesis	35
Results presented for defence of Dissertation Thesis	35
Volume of the Dissertation Thesis.....	36
List of relevant conferences	36
List of relevant publications.....	37
Structure of the Dissertation Thesis.....	38
Contents of the Dissertation Thesis	39
Conclusions.....	58
References.....	59

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pašreizējie Eiropas un Pasaules fibrobetona pētnieku un inženieru veiktie zinātniskie un izpētes darbi galvenokārt mērķēti vispārēju un starptautiski atzītu projektēšanas normatīvu izstrādei. Vienotu projektēšanas normatīvu iztrūkums jau vairākus gadus kavē fibrobetona pielietošanu daudzās konstrukcijās un, neraugoties uz tā acīmredzamām priekšrocībām, pretrunas esošajās fibrobetona konstrukciju projektēšanas rekomendācijās ierobežo inženiera izvēli par labu fibrobetonam.

Tādēļ šobrīd ir svarīgi dot pētniecisku ieguldījumu, kas sekmētu fibrobetona normatīvu izstrādi, veicot oriģinālus eksperimentālus pētījumus un izstrādājot modeļus fibrobetona konstruktīvo elementu nestspējas un darbības prognozēšanai.

Kamēr fibrobetona konstrukciju nestspējas noteikšanai lielākā daļa no šobrīd pieejamām projektēšanas rekomendācijām pielieto inverso modelēšanas pieeju (aproximējot eksperimentāli iegūtas līknes), ir jāatzīmē, ka tiešā modelēšana pieeja fibrobetona projektēšanā ļautu iegūt ekonomiskākus konstruktīvos risinājumus un reālistiskākus fibrobetona elementu darbības raksturošanas modeļus, ievērtējot faktisko šķiedru veidu, daudzumu un orientāciju.

Tādēļ šī promocijas darba mērķis ir izstrādāt modeli fibrobetona konstruktīvo elementu nestspējas un pēc plaisāšanas stadijas darbības prognozēšanai, izmantojot tiešo modelēšanas pieeju. Piedāvātais modelis ir izstrādāts vienkāršā formā ar nolūku, lai tas nākotnē būtu piemērojams konstrukciju projektēšanas normatīvajos dokumentos. Šajā promocijas darbā izstrādātais modelis ir piemērots liektu fibrobetona konstruktīvo elementu (siju, plātņu) nestspējas prognozēšanai un tā izstrādāšanas pamatā ir novērojums, ka konstruktīvo fibrobetona elementu nestspēja ir atkarīga no šķiedru izraušanas pretestības bīstamajā šķēlumā. Līdzīga pieeja nākotnē varētu tikt piemērota arī stieptu fibrobetona elementu nestspējas un darbības prognozēšanai.

Šis promocijas darbs sastāv no 3 galvenajām sadaļām: 3.nodaļā veikti eksperimentāli pētījumi dažādu veidu komerciāli pieejamo tērauda šķiedru izraušanas pretestības noteikšanai. Eksperimentāli noteikta arī šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekme un dotas vidējās šķiedras izraušanas pretestības sakarības dažādām konfigurācijām. 4.nodaļā veikta šķiedras izraušanas procesa skaitliskā modelēšana ar galīgo elementu metodi. Pielietojot plīsumu mehānikas principus, parametriski analizēta plaisas starp tērauda šķiedru un betona matricu augšana. 4.nodaļā veikta arī šķiedras pilnīga izraušanas procesa skaitliskā modelēšana. No salīdzinājuma un labākās atbilstības ar eksperimentālajiem rezultātiem tika noteikti un analizēti svarīgi parametri, kuru precīza eksperimentāla noteikšana ir sarežģīta. Visbeidzot, 5.nodaļā izstrādāts modelis liektu fibrobetona elementu nestspējas un darbības prognozēšanai, par modelēšanas ieejas pamatdatiem ņemot iepriekš noteiktās šķiedru izraušanas sakarības. Atšķirībā no vairākuma esošo modeļu, kas pieejami literatūrā un projektēšanas rekomendācijās, šajā promocijas darbā piedāvātais modelis ļauj ievērtēt faktisko šķiedru daudzumu un veidu fibrobetona maisījumā. Modelēšanas rezultātu apstiprināšanai un modeļa lietderības izvērtēšanai tika veikti fibrobetona siju eksperimentāli lieces stiprības pētījumi. Neraugoties uz modeļa vienkāršo pieeju, tika iegūta ļoti laba atbilstība ar eksperimentālajiem rezultātiem, kas apstiprina izstrādātā modeļa pielietojamību.

Tā kā liektu fibrobetona elementu nestspēja un darbība pēc plaisāšanas stadijā tika precīzi prognozēta, šis promocijas darbs pierāda iespējas un priekšrocības, ko dod

tiešās modelēšanas pieejas izmantošana fibrobetona konstruktīvo elementu projektēšanā, salīdzinot ar inverso pieeju, kas tiek lietota lielākajā daļā no šobrīd pieejamiem fibrobetona konstrukciju projektēšanas dokumentiem. Šis promocijas darbs šobrīd arī ir viens no nedaudzajiem literatūrā pieejamiem zinātniskajiem pētījumiem, kurš attiecināms uz fibrobetonu ar lielu šķiedru koncentrāciju ($100 - 300 \text{ kg/m}^3$), kas ir nepieciešama fibrobetona pielietošanai konstruktīvajos elementos.

Darba mērķis

Šī Promocijas darba mērķis ir izstrādāt modeli liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, izmantojot tiešās modelēšanas pieeju.

Darba uzdevumi

Lai sasniegtu augstāk minēto darba mērķi, tika izvirzīti sekojoši darba uzdevumi:

1. Eksperimentāli noteikt šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarību trīs dažādiem komerciāli pieejamo tērauda šķiedru veidiem. Izvērtēt šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekmi uz augstāk minēto sakarību.

2. Veikt šķiedras izraušanas procesa skaitlisko modelēšanu un izvērtēt dažādu ģeometrisku un mehānisku parametru ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību.

3. Izstrādāt modelēšanas algoritmu liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā.

Pētījumu metodika

Promocijas darba 1.nodaļa ir literatūras apskats, kurā aprakstīti pētījumi par fibrobetona tehnoloģiskajām īpašībām kā arī fibrobetona darbības modelēšanas metodēm vairākos mērogos. Literatūras apskatā referēti raksti zinātniskajos žurnālos, disertācijas, grāmatas kā arī tehniskās atskaides. Balstoties uz Promocijas darba ievadā un literatūras apskatā doto informāciju, tiek formulēts darba mērķis. Tiek izvirzīti trīs galvenie darba uzdevumi darba mērķa sasniegšanai.

Darba pirmais uzdevums (aprakstīts Promocijas darba 3.nodaļā) ir eksperimentāla šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības noteikšana. Pirmkārt, tika izgatavoti piemēroti veidņi paraugu izgatavošanai atbilstoši darba uzdevumam – izvērtēt šķiedru enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību. Uzdevuma veikšanai kopumā tika izgatavoti 66 dažādu konfigurāciju paraugi. Otrkārt, atbilstoši paraugu formai tika izgatavoti arī testēšanas žokļi, izraušanas eksperimentu veikšanai ar testēšanas iekārtu. Eksperimentu veikšanai tika izmantota Zwick/Roell testēšanas iekārta kā arī videoekstensometrs šķiedras izraušanas pārvietojuma mērīšanai. Katrai konfigurācijai tika izgatavoti un eksperimentāli testēti vismaz 9 paraugi, kopumā šī darba uzdevuma veikšanai pārbaudot 594 paraugus. Eksperimentu rezultāti tika apstrādāti izmantojot Microsoft Excel programmatūru. No eksperimentāli iegūtajām spēka un pārvietojuma sakarībām tika iegūtas vidējās sakarības katrai šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas konfigurācijai.

Darba otrais uzdevums (aprakstīts 4.nodaļā) ir skaitliska šķiedras izraušanas procesa modelēšana taisnas formas orientētām šķiedrām. Skaitliskajai modelēšanai

tika izmantota galīgo elementu metodes (GEM) programma ANSYS [1]. Skaitliskās modelēšanas mērķis ir izvērtēt dažādu parametru, kas ir grūti nomērāmi eksperimentāli, ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību. Vispirms tika izstrādāts 2-D GEM modelis, lai analizētu plaisas starp šķiedru un matricu izplatīšanos, izmantojot plīsumu mehānikas principus, rēķinot enerģijas atbrīvošanās ātrumu. Lai izvērtētu dažādu individuālo parametru ietekmi uz plaisas starp šķiedru un matricu izplatīšanos, tika veikta parametriska analīze. Tālāk tika izstrādāts 3-D modelis, lai analizētu šķiedras pilnīgas izraušanas procesu, kā arī analizēti parametri, kas ietekmē šķiedras izraušanas pretestību.

Visbeidzot, trešais darba uzdevums (aprakstīts 5.nodaļā) ir modeļa izstrāde konstruktīvā fibrobeta elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, modeļa izstrādāšanai par pamatu ņemot iepriekšējās nodaļās iegūtos rezultātus. Tika analizēta liektu fibrobeta elementu nestspēja. Modelēšanas algoritms tika izveidots MATLAB [2] datorprogrammā. Laboratorijā tika izgatavoti atbilstoši fibrobeta siju paraugi modelēšanas rezultātu eksperimentālai validācijai.

Zinātniskā novitāte

Šajā Promocijas darbā tika izstrādāts modelis konstruktīvā fibrobeta elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, izmantojot tiešo modelēšanas pieeju. Tiešā modelēšana nav tikusi bieži izmantota fibrobeta modelēšanai, jo tā parasti ir sarežģīta lielā nezināmo parametru daudzuma dēļ. Šajā promocijas darbā izmantotā tiešā modelēšanas pieeja, turpretī, salīdzinot ar inversās pieejas modeļiem literatūrā, ietver būtiskas priekšrocības, ievērtējot faktisko šķiedru tilpuma koeficientu un šķiedru veidu fibrobeta. Un pretēji tiešās modelēšanas piemēriem literatūrā, šajā Promocijas darbā izstrādātais modelis ir relatīvi vienkāršs un ērti lietojams.

Modelēšanas vienkāršības nosacījums ir šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarību pieejamība. Šķiedru izraušanas sakarību nozīmi un nepieciešamību pielietot modelēšanā apliecina labā atbilstība starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem. Lai gan literatūrā ir pieejami daudzi zinātniskie darbi, kuros pētīta dažādu veidu tērauda šķiedru izraušanas, plaša, visaptveroša datubāze, ietverot arī šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekmi līdz šim nebija pieejama. Dažādus šķiedras enkurojuma dziļumus un orientācijas leņķus ir svarīgi pētīt, jo šķiedru orientācija fibrobeta parasti ir haotiska. Šajā Promocijas darbā tika pētīti 3 visbiežāk sastopamie komerciāli pieejamo tērauda šķiedru veidi. Tādējādi tika iegūta datubāze ar šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarībām 66 dažādām paraugu konfigurācijām.

Šī Promocijas darba 4.nodaļā tika veikta šķiedras izraušanas procesa skaitliskā modelēšana, izmantojot jaunākās GEM aprēķinu datorprogrammas. Kvazistatiskā slogojumā plaisas atarp tērauda šķiedru un betona matricu augšanas modelēšana un analīze zināmā mērā nav praktiski pielietojama, jo šis process norit ļoti īsā laikā (vājās betona un tērauda virsmu saistes dēļ), tādēļ literatūrā ir samērā maz pētījumu, kas veiktu šādus mikromehāniskus pētījumus. Tomēr, apzinoties, ka pastāvīgi pilnveidojoties fibrobeta sastāva projektēšanai, uzlabojas arī šķiedras un matricas starpvirsmas mehāniskās īpašības un tā rezultātā minētās plaisas augšanas process var kļūt būtisks. Šajā Promocijas darbā izstrādāts 2-D asij simetrisks GEM modelis, kas lietots kopā ar plīsumu mehānikas principiem, lai sarēķinātu enerģijas atbrīvošanās

ātrumu, plaisai izplatoties starp šķidru un matricu. Tālāk 4.nodaļā tika izstrādāts arī 3-D GEM modelis šķiedras pilnīgas izraušanas procesa modelēšanai. 3-D modeļa novitāti var pamatot, atzīmējot tā spēju ievērtēt rukuma izraisītos spriegumus kā arī spēju variēt ar dažādām starpvirsmas īpašībām.

Konstruktīvā fibrobetona nestspējas prognozēšanas modelis tika izstrādāts un tā eksperimentālā validācija tika veikta fibrobetona sastāviem ar šķiedru daudzumu līdz pat 300 kg/m^3 . Šis Promocijas darbs līdz ar to var tikt minēts kā viens no nedaudzajiem literatūrā pieejamiem pētījumiem, kas attiecas uz fibrobetonu ar tik lieliem šķiedru daudzumiem.

Darba praktiskais pielietojums

Šobrīd fibrobetona pielietošana daudzās konstrukcijās ir ievērojami apgrūtināta vienota fibrobetona projektēšanas normatīva iztrūkuma dēļ. Tā kā lielākajā daļā no šobrīd pieejamām fibrobetona projektēšanas rekomendācijām tiek izmantota inversā modelēšanas pieeja, apkosimējot eksperimentāli mēritās līknes, šobrīd fibrobetona konstrukciju projektēšana ir tieši atkarīga no eksperimentāli pārbaudītā materiāla īpašībām. Lai veiktu pretējo, t.i., lai noteiktu nepieciešamo fibrobetona sastāvu lai uzņemtu doto slodzi un atbilstu dotajiem ekspluatācijas apstākļiem, šobrīd pieejamie fibrobetona projektēšanas dokumenti nav pielietojami.

Šajā Promocijas darbā piedāvātais modelis, turpretī, dod iespēju prognozēt fibrobetona konstrukciju nestspēju plaisu izveidošanās un to atvērums palielināšanās stadijā ar pieņemamu aprēķinu sarežģītības pakāpi. Tā kā par modeļa ieejas datiem ņemtas šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības, tad konstrukciju projektētājam ir iespējams aprēķināt nepieciešamo šķiedru daudzumu un šķiedru veidu, lai sasniegtu noteiktus nestspējas rādītājus. Tas nozīmē, ka, izmantojot šajā Promocijas darbā izstrādāto modeli, fibrobetona konstrukciju projektēšanu iespējams veikt optimizēti un lietderīgi, tam var būt ļoti liela ekonomiskā nozīme.

Fibrobetona pielietošanai būvkonstrukcijās ir nepieciešami lieli šķiedru daudzumi, tomēr pie tādiem ir grūti saglabāt maisījuma iestrādājamību un nodrošināt vienmērīgu šķiedru sadalījumu tilpumā. 4 gadu laikā, kurā izstrādāts šis Promocijas darbs, tika iegūtas zināšanas un prasme šāda fibrobetona sastāva projektēšanai, eksperimentāli pārbaudot vairāk kā 100 dažādas šķiedru un citu betona sastāvdaļu kombinācijas. Fibrobetona sastāvs, kas tika lietots šā Promocijas darba ietvaros tika īpaši izvēlēts atbilstoši kritērijam – liela šķiedru daudzuma iemaisīšanas iespēja, saglabājot maisījuma iestrādājamību.

Eksperimentālie šķiedras izraušanas rezultāti, kas ir daļa no šī Promocijas darba, ietver lielu daudzumu informācijas, kas var tikt izmantota līdzīgu modeļu izstrādāšanai, kā arī detalizētākai šķiedru formas ietekmes uz izraušanas procesu analīzei, kas ir būtiska informācija šķiedru ražotājiem.

Arī Promocijas darbā izstrādātie GEM modeļi var būt noderīgi praktiskai pielietošanai. Labā eksperimentālo un GEM modelēšanas rezultātu atbilstība norāda, ka izstrādātos GEM modeļus var pielietoti gan būvinženieri, gan materiālu pētnieki, lai izvērtētu šķiedras izraušanas pretestību un dažādu parametru ietekmi uz to.

Aizstāvēšanai tiek izvirzīts

- Liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšanas modelis plaisu izveidošanās un to atvērums palielināšanās stadijā.

- Eksperimentālie rezultāti ar 3 veidu komerciāli pieejamo tērauda šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarībām pie dažādiem šķiedras enkurojuma garumiem un orientācijas leņķiem attiecībā pret pielikto spēku.
- Izstrādātie skaitliskie (GEM) modeļi plaisas starp tērauda šķiedru un betona matricu augšanas modelēšanai un šķiedras pilnīgas izraušanas procesa modelēšanai.

Darba apjoms

Promocijas darbā ir sekojošas nodaļas: Anotācija, Ievads, 1.Literatūras apskats, 2.Darba mērķis, 3. Šķiedru izraušanas eksperimentāli pētījumi, 4.Šķiedras izraušanas procesa skaitliskā modelēšana, 5.Fibrobeta siju nestspējas prognozēšana, Secinājumi, Literatūras saraksts, Pielikums. Promocijas darba apjoms ir 157 lpp., darbā ir 97 attēli, 7 tabulas, Izmantotās literatūras sarakstā ir 94 avoti.

Būtiskāko konferenču saraksts

Konferenču sarakstā minētas zinātniskās konferences, kurās Promocijas darba autors uzstājies ar mutisku ziņojumu par šī darba būtiskākajiem rezultātiem.

1. MCM-2006 14th International Conference on Mechanics of Composite Materials, Latvija, Jūrmala, 29.maijs-2. jūnijs, 2006.
2. 48.Starptautiskā RTU zinātniskā konference, Latvija, Rīga 12.oktobris, 2007.
3. RTU 49.Starptautiskā zinātniskā konference, Latvija, Rīga 13-15.oktobris, 2008.
4. MCM-2008 15th International Conference on Mechanics of Composite Materials, Latvija, Jūrmala, 26-30.maijs, 2008.
5. 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokija, Japāna, 28-30.oktobris, 2008.
6. 17th International Conference on Composite Materials. ICCM-17. Edinburga, Lielbritānija, 27-31.jūlijs, 2009.
7. 50. Starptautiskā RTU Zinātniskā konference, Apakšsekcija “Transports un Mehānika”, Rīga, Ezermalas 6, 2009.g. 16.oktobris.

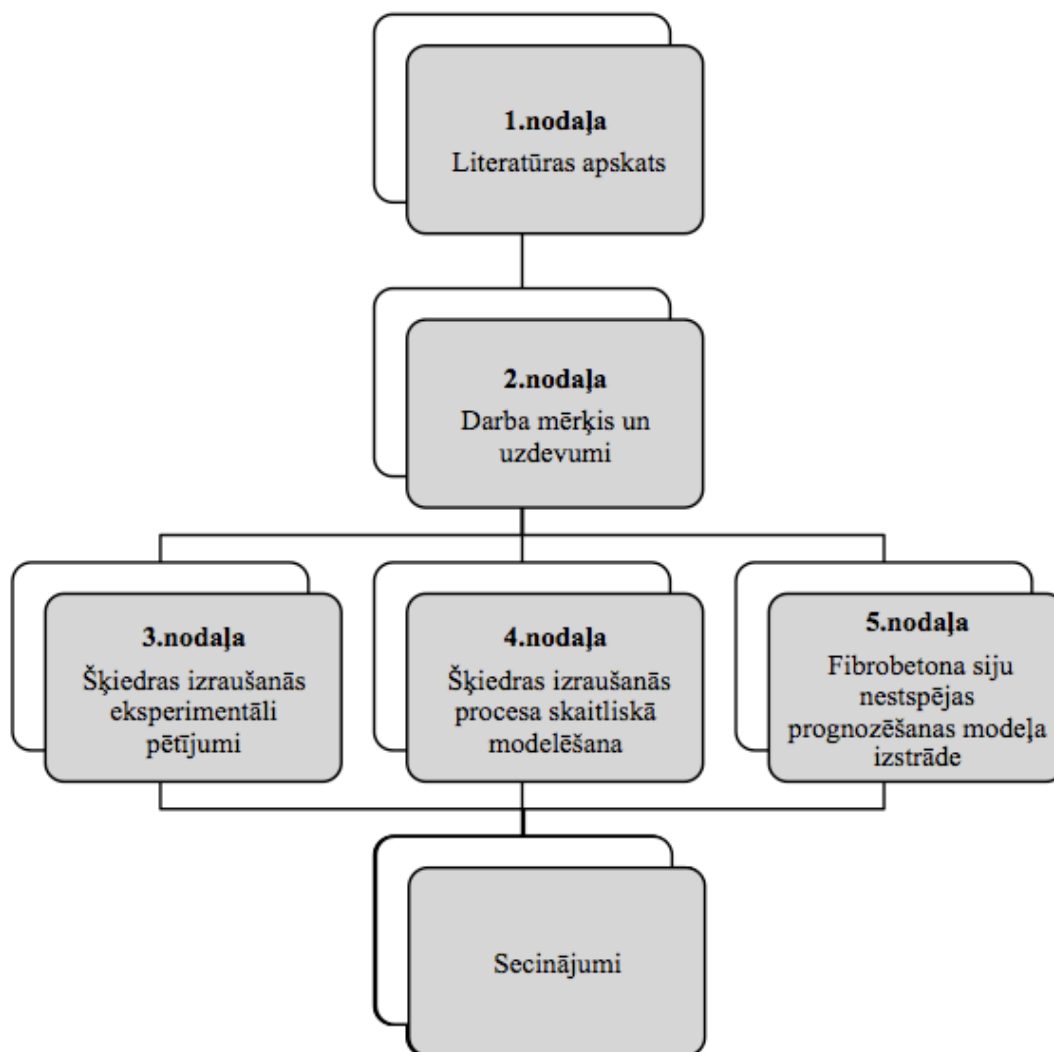
Būtiskāko publikāciju saraksts

Publikāciju sarakstā minētas publikācijas, kurās atspoguļoti būtiskākie Promocijas darba rezultāti.

1. Pupurs A., Krasņikovs A., Pakraštinš L. Micro-mechanical stress-state analysis of fibre reinforced concrete (FRC), Scientific Proceedings of Riga Technical University (Architecture and Construction Science) – 7 (2006), pp.160.-171.
2. Pupurs A., Krasņikovs A. Tērauda šķiedru izraušanas spēka noteikšana fibrobetonos, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Transport and Engineering) – 24 (2007), pp.183.-190.
3. Pupurs A., Krasņikovs A., Kononova O., Šahmenko G. Non-linear post-cracking behaviour prediction method for high concentration steel fibre reinforced concrete (HCSFRC) beams, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Architecture and Construction Science) – 8 (2007), pp.60.-70.
4. Krasņikovs A., Kononova O., Pupurs A. Steel fiber reinforced concrete strength, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Transport and Engineering) – 28 (2008), pp.142.-151.
5. Krasņikovs A., Lapsa V., Pupurs A. Latvijas patents Nr. P-07-11 „Fibrobetona būvelements“, (2007).
6. Eiduks M., Krasņikovs A., Lapsa V., Pupurs A. Latvijas patents P-07-125 „Orientēta fibrobetona izgatavošanas paņēmiens un ierīce“, (2007).
7. Kononova O., Krasņikovs A., Pupurs A. High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Strength. Prediction and Experimental Investigation, Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, (2008), pp. 543-548.
8. Krasņikovs A., Pupurs A. High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Fracture. Fiber Pull-out Experimental Investigation, Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, (2008), pp.703-708.
9. Pupurs A., Varna J., Krasņikovs A. Energy release rate based fiber/matrix debond growth in fatigue. Part II: Debond growth analysis using Paris law, Mechanics of Advanced Materials and Structures, (2011), In Press.
10. Kononova O., Pupurs A., Krasņikovs A. Fiber concrete beam failure observed as rare phenomena, Journal of Vibroengineering – 10 (2008), pp. 497.-499.
11. Krasņikovs A., Kononova O., Pupurs A. Micromechanical Investigation of Steel Fiber Reinforced High-Performance Concrete Post-Cracking Behavior, Proceedings of International scientific conference Fiber Concrete 2009, Prague, Czech Republic, (2009), pp.110-124.

Promocijas darba struktūra

Promocijas darba struktūra attēlota 1.att. Kā norādīts 1.att., pirmās divas galvenās Promocijas darba nodaļas ir literatūras apskats un darba mērķa izvirzīšana. Trīs izvirzīto darba uzdevumu rezultāti aprakstīti galvenajās nodaļās 3 – 5. Promocijas darbs noslēgts ar galvenajiem secinājumiem.



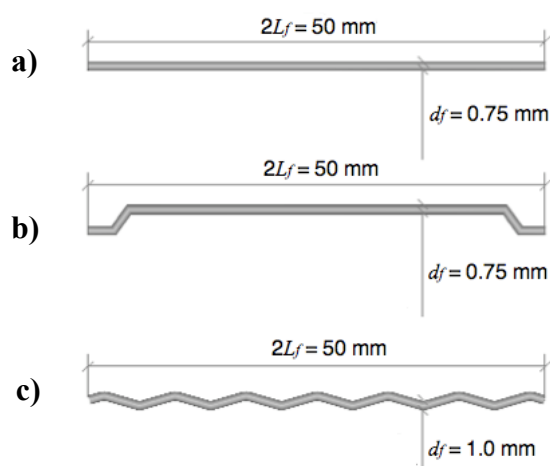
1.att. Promocijas darba struktūra

PROMOCIJAS DARBA SATURS

Kā norādīts Promocijas darba struktūrā (1.att.) darbam ir 5 nodaļas, no kurām **1.nodaļa** ir literatūras apskats, **2.nodaļā** formulēti darba mērķi, savukārt 3., 4. un 5.nodaļa ir darba galvenās nodaļas, kurās risināti darba uzdevumi.

Promocijas darba **3.nodaļā** aprakstīts pirmais no izvirzītajiem darba uzdevumiem – šķiedru izraušanas eksperimentāli pētījumi.

No komerciāli pieejamām tērauda šķiedrām visbiežāk fibrobetonā tiek izmantotas 3 ģeometrisku formu šķiedras: taisnas, šķiedras ar gala enkurojumiem (turpmāk: enkurotas) un viļņotas formas šķiedras, skatīt 2.att.



2.att. Komerciāli pieejamo tērauda šķiedru trīs raksturīgākās ģeometriskās formas: a) taisnas; b) ar gala enkurojumiem; c) viļņotas formas šķiedras

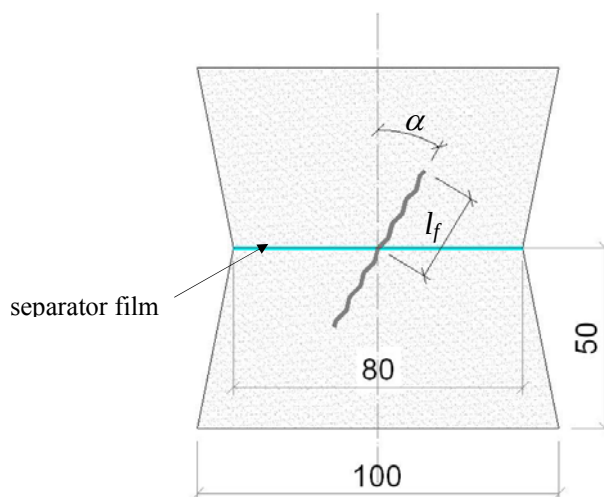
Taisnas formas orientētas šķiedras izraušanas spēkam spēj pretoties vienīgi ar pastāvošām vājām mijiedarbības saitēm (van der Waals) starp šķiedras un betona matricas virsmām kā arī ar rukuma izraisītiem spiedes spriegumiem. Savukārt enkurotu un viļņotu formu šķiedras izraušanas spēkiem spēj pretoties arī pateicoties mehāniskai enkurošanai un to izraušanas mehānismi tādēļ ir daudz sarežģītāki, ietverot arī plastiskas šķiedras deformācijas izraušanas procesa gaitā.

Tā kā pastāv lielas atšķirības starp dažādu veidu šķiedru izraušanas pretestību, fibrobetona konstruktīvo elementu nestspēja ir ievērojami atkarīga no pielietotā šķiedru veida un daudzuma, kāds tiek izmantots tā sastāvā. Šī darba mērķis ir izstrādāt fibrobetona konstrukciju nestspējas un plaisas atvēruma prognozēšanas modeli kā alternatīvu šobrīd pieejamajiem modeļiem, kuros izmantota inversā modelēšanas pieeja. Par modeļa ieejas pamatdatiem šajā darbā tiek ņemtas eksperimentāli noteiktās šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma līknes. Tā kā šķiedru sadalījums un orientācija fibrobetona tilpumā var būt dažāda, ir nepieciešams izvērtēt šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekmi uz tās izraušanas pretestību. Literatūrā jau agrāk veikti eksperimentāli šķiedru izraušanas pētījumi fibrobetonā [3,4], tomēr rezultāti pie dažādām enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa kombinācijām nav pieejami.

Tādēļ, šā Promocijas darba 3.nodaļā tiek veikti eksperimentāli pētījumi, nosakot iepriekš minēto komerciāli pieejamo tērauda šķiedru izraušanas pretestību pie dažādiem enkurojuma dziļumiem un orientācijas leņķiem. Protams, šķiedru

izraušanas pretestība būtu eksperimentāli jāpārbauda arī pie dažādām betona matricas īpašībām, tomēr, šis promocijas darbs veltīts tikai minēto šķiedras novietojuma konfigurāciju pētīšanai. Visi šķiedras izraušanas eksperimenti tādēļ tika veikti izmantojot tikai vienu betona sastāvu.

Paraugu konfigurācija un ģeometriskie izmēri doti 3.att. Minētajā attēlā l_f norāda šķiedras enkurojuma dziļumu un α norāda šķiedras orientācijas leņķi attiecībā pret pielikto izraušanas spēka virzienu.



3.att. Šķiedras izraušanas eksperimentu paraugu konfigurācija: l_f - enkurojuma dziļums, α - orientācijas leņķis

Visi šķiedras izraušanas eksperimenti tika veikti izmantojot testēšanas iekārtu Zwick/Roell Z150, izraušanas spēks tika mērīts ar spēka devēju ar ± 1 kN kapacitāti.

Šķiedras izraušanas pārvietojums u_z tika mērīts izmantojot bezkontakta videoekstensometru “Messphysik”.

Slogošanas ātrums visos šķiedras izraušanas eksperimentos bija 10 mm/min. Katrs eksperiments tika veikts līdz pilnīgai šķiedras izraušanai no betona matricas (atsevišķos gadījumos tika novērota arī šķiedras pārtrūkšana).

Kopumā tika izgatavotas un eksperimentāli pārbaudītas 66 dažādas paraugu konfigurācijas, kā uzskaitīts 1.tabulā. Katras konfigurācijas ietvaros tika izgatavoti 8 – 9 paraugi. Relatīvi lielais paraugu skaits nodrošina iespēju novērtēt rezultātu statistisko izkliedi. Tā kā šī Promocijas darba mērķis ir izstrādāt modeli kurā par ieejas pamatdatiem tiek izmantotas šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības, tad šīs sakarības nepieciešams noteikt precīzi, kā arī ir jāzin rezultātu statistiskā izkliede.

Kā parādīts 3.att. šķiedras enkurojuma dziļums tiek mērīts no starplikas līdz tuvākajam šķiedras galam, paralēli šķiedras garenvirziena asij. Taisnas un enkurotas formas šķiedrām diametrs bija vienāds ar $d_f = 0.75$ mm, viļņotas formas šķiedrām diametrs bija nedaudz lielāks, t.i., $d_f = 1.0$ mm. Saskaņā ar ražotāja doto specifikāciju, viļņotas formas šķiedru stiepes stiprība ir 1100 N/mm^2 , savukārt taisnas un enkurotas formas šķiedrām stiepes stiprība ir 1160 N/mm^2 . Visām šķiedrām elastības modulis ir vienāds ar $E_f = 210 \text{ GPa}$.

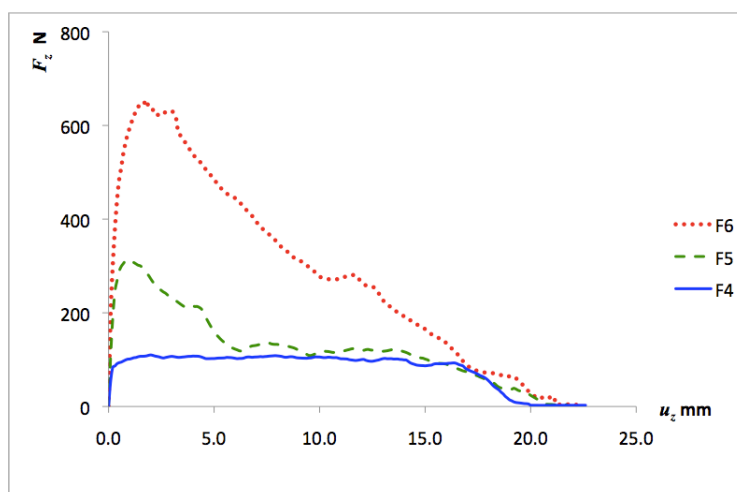
1. Tabula

Šķiedras izraušanas eksperimentu paraugu konfigurācijas un apzīmējumi

Apzīm.	Šķiedra	α [°]	l_f [mm]	Apzīm.	Šķiedra	α [°]	l_f [mm]
F1	taisna	0	25	F34	taisna	30	20
F2	enkurota	0	25	F35	viļņota	30	20
F3	viļņota	0	25	F36	enkurota	30	20
F4	taisna	0	20	F37	taisna	45	20
F5	enkurota	0	20	F38	viļņota	45	20
F6	viļņota	0	20	F39	enkurota	45	20
F7	taisna	0	15	F40	taisna	60	20
F8	enkurota	0	15	F41	viļņota	60	20
F9	viļņota	0	15	F42	enkurota	60	20
F10	taisna	0	10	F43	taisna	20	15
F11	enkurota	0	10	F44	viļņota	20	15
F12	viļņota	0	10	F45	enkurota	20	15
F13	taisna	0	5	F46	taisna	30	15
F14	enkurota	0	5	F47	viļņota	30	15
F15	viļņota	0	5	F48	enkurota	30	15
F16	taisna	10	25	F49	taisna	45	15
F17	enkurota	10	25	F50	viļņota	45	15
F18	viļņota	10	25	F51	enkurota	45	15
F19	taisna	20	25	F52	taisna	60	15
F20	enkurota	20	25	F53	viļņota	60	15
F21	viļņota	20	25	F54	enkurota	60	15
F22	taisna	30	25	F55	taisna	20	10
F23	enkurota	30	25	F56	viļņota	20	10
F24	viļņota	30	25	F57	enkurota	20	10
F25	taisna	45	25	F58	taisna	30	10
F26	enkurota	45	25	F59	viļņota	30	10
F27	viļņota	45	25	F60	enkurota	30	10
F28	taisna	60	25	F61	taisna	45	10
F29	enkurota	60	25	F62	viļņota	45	10
F30	viļņota	60	25	F63	enkurota	45	10
F31	taisna	20	20	F64	taisna	60	10
F32	viļņota	20	20	F65	viļņota	60	10
F33	enkurota	20	20	F66	enkurota	60	10

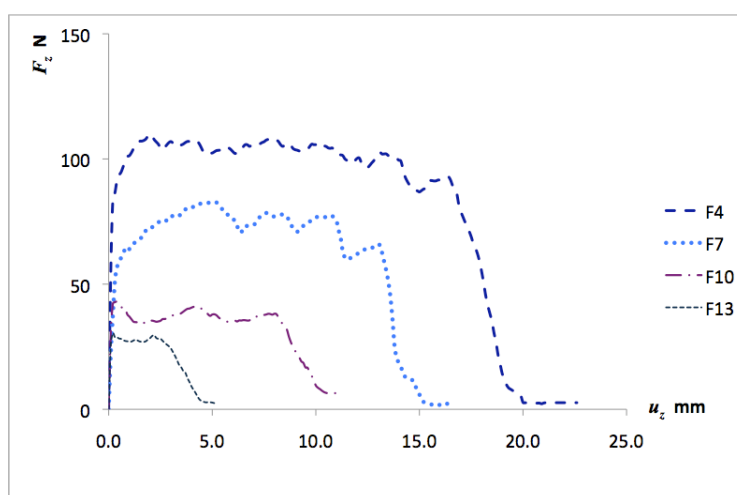
Šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma vidējās līknes taisnas, enkurotas un viļņotas formas šķiedrām pie enkurojuma garuma $l_f = 20$ mm un orientācijas leņķa $\alpha = 0^\circ$ parādītas 4.att. Kā redzams 4.att., viļņotas formas šķiedrām F6 atbilst visaugstākā izraušanas spēka F_z vērtība kā arī tām raksturīga augstāka izraušanas pretestība visā izraušanas procesa gaitā. Maksimālais šķiedras izraušanas spēks

enkurotas formas šķiedrām F5, atbilstoši 4.att. datiem, ir aptuveni 2 reizes mazāks kā viļņotas formas šķiedrām F6. Salīdzinot ar viļņotas formas un enkurotas formas šķiedrām, kurām raksturīga mehāniska enkurošanās, taisnas formas šķiedras F4, kā gaidīts, tika izrautas ar daudz mazāku spēku. Saskaņā ar 4.att. uzrādītajiem datiem maksimālais izraušanas spēks taisnas formas šķiedrām F4 ir vairāk kā 2 reizes zemāks kā enkurotas formas šķiedrām F5. Enkurotas formas šķiedru daudz augstākā pretestība izraušanas spēkiem tiek sasniegta, pateicoties šķiedras iztaisnošanās procesam. Līdz ar šķiedras iztaisnošanos parasti norisinās arī būtiska berzes spēka pieaugšana lokālos punktos.

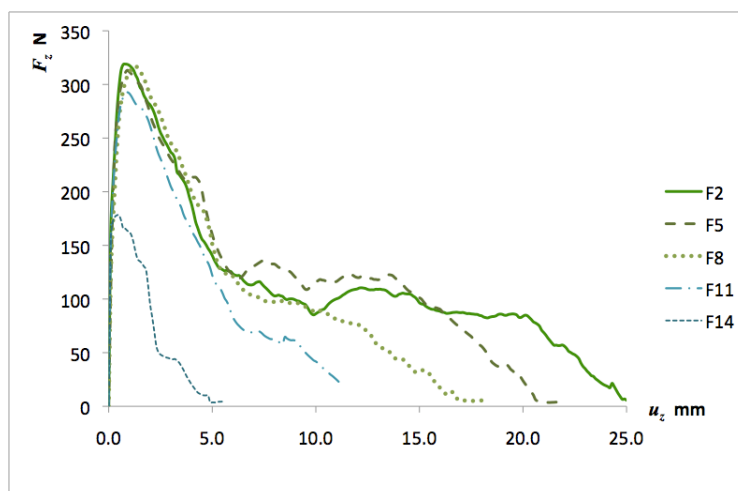


4.att. Šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma vidējās līknes trīs dažādu formu šķiedrām: F4 – taisnas; F5 – enkurotas; F6 – viļņotas. Visos gadījumos $\alpha = 0^\circ$

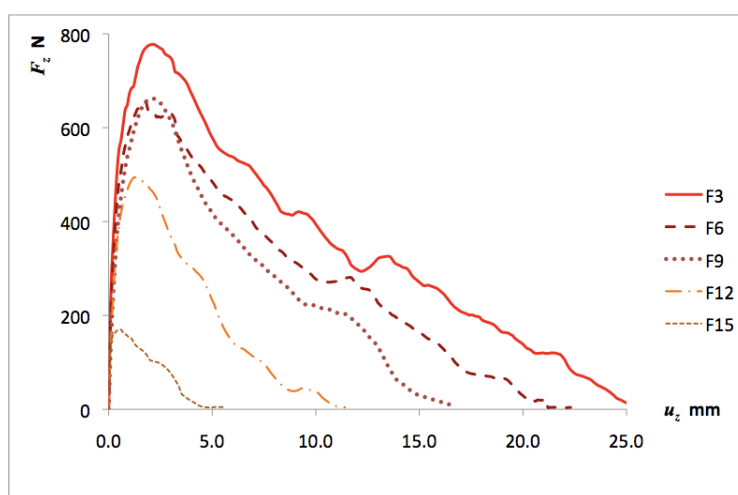
Attēlos 5, 6 un 7 doti eksperimentālie rezultāti attiecīgi taisnas, enkurotas un viļņotas formas šķiedrām pie dažādiem enkurojuma dziļumiem l_f .



5.att. Šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma vidējās līknes taisnas formas šķiedrām: F4 ($l_f = 20$ mm) F7 ($l_f = 15$ mm); F10 ($l_f = 10$ mm); F13 ($l_f = 5$ mm)



6.att. Šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības enkurotām šķiedrām: F2 ($l_f = 25$ mm); F5 ($l_f = 20$ mm); F8 ($l_f = 15$ mm); F11 ($l_f = 10$ mm); F14 ($l_f = 5$ mm)



7.att. Šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības viļņotas formas šķiedrām: F3 ($l_f = 25$ mm); F6 ($l_f = 20$ mm); F9 ($l_f = 15$ mm); F10 ($l_f = 10$ mm); F15 ($l_f = 5$ mm)

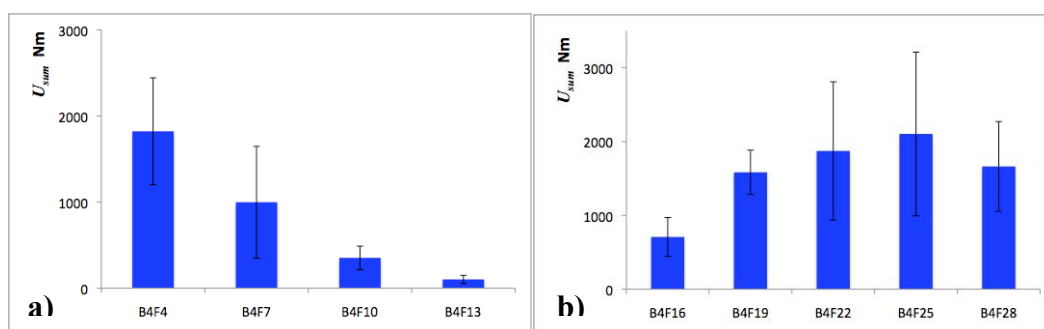
Kā redzams 5.att., taisnas formas šķiedrām enkurojuma dziļuma l_f ietekme ir būtiska. Galvenā sakarība no 5.att. redzamajiem datiem ir maksimālā spēka samazināšanās līdz ar šķiedras enkurojuma dziļuma samazināšanos un otrādi. 5.att. redzami eksperimentālie rezultāti liecina, ka pēc maksimālā šķiedras izraušanas spēka sasniegšanas spēks samazinās tikai nedaudz līdz brīdim, kad betona matricā atlikuši 1-2 mm no sākotnējā šķiedras enkurojuma garuma. Šajā līknes posmā novērojams straujš izraušanas spēka kritums. Šādu novērojumu var izskaidrot ar berzes spēku pieaugšanu. Līdzīgi plato apgabali šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma līknēs konstatēti arī citos pētījumos literatūrā [4,5].

Būtiskākā atšķirība enkurotas formas šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma līknēs, kā redzams 6.att., no iepriekš rādītajiem taisnas formas šķiedru rezultātiem ir izteikta maksimālā spēka virsotne (pie pārvietojuma vērtībām aptuveni $u_z = 0.8$ mm) pēc kuras novērojams būtisks izraušanas spēka kritums. Analizējot šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma līknes 6.att., var secināt, ka maksimālā spēka

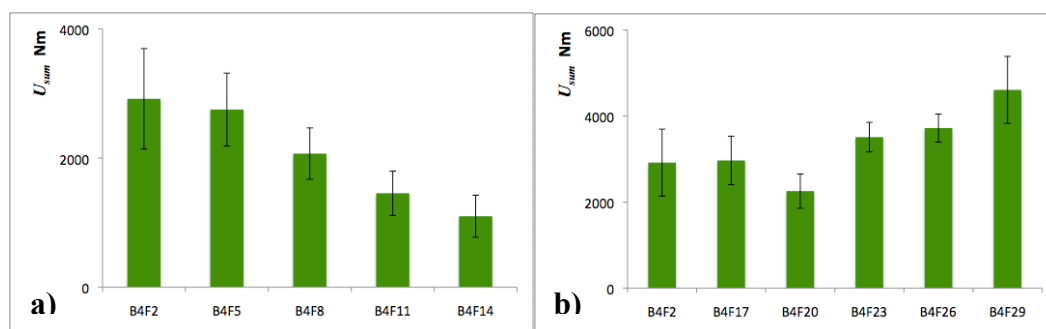
vērtība praktiski nemainās, atkarībā no šķiedras enkurojuma dziļuma, izņemot visīsāko enkurojuma dziļumu $l_f = 5$ mm.

Kā jau tika minēts iepriekš, salīdzinot šķiedru izraušanas pretestību 4.att., viļņotas formas šķiedrām raksturīga visaugstākā izraušanas pretestība no šajā darbā pētītajiem šķiedru formu veidiem. Viļņotas šķiedras izraušanas procesa gaitā vienlaicīgi norisinās gan šķiedras iztaisnošanās, gan saliekšanās atkarībā no “viļņu” skaita enkurotajā šķiedras daļā. 7.att. redzamie rezultāti liecina, ka visaugstākais izraušanas spēks atbilst gadījumam ar vislielāko enkurojuma dziļumu, t.i., $l_f = 25$ mm. Tomēr, ja salīdzina izraušanas spēka un pārvietojuma līknes viļņotas formas šķiedrām ar enkurojuma dziļumu $l_f = 20$ mm un $l_f = 15$ mm, maksimālais izraušanas spēks abos gadījumos ir praktiski vienāds. Tādējādi var secināt, ka viļņotas formas šķiedru izraušanas pretestība ir būtiski atkarīga no enkurojumā esošā “viļņu” skaita.

Šķiedru enkurojuma dziļuma l_f un orientācijas leņķa α ietekme attiecībā uz šķiedru izraušanas enerģiju ir uzskatāmi parādīta 8., 9. un 10.att. Šķiedras izraušanas enerģija U_{sum} norāda nepieciešamā darba apjomu lai pilnībā izrautu šķiedru no matricas, tā ir ērti interpretējama, jo norāda uz izraušanas spēka un pārvietojuma līknes integrāli (laukumu zem līknes). 8., 9. un 10.att dotajos rezultātos redzama arī standartnovirze konfigurāciju individuālo paraugu rezultātos.

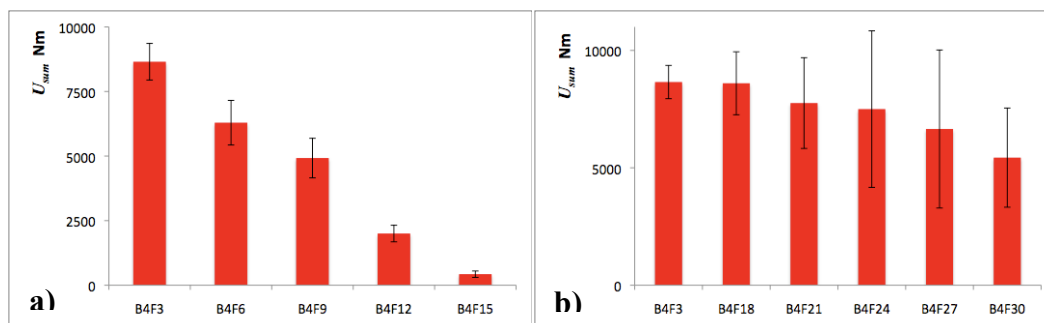


8.att. Šķiedras izraušanas enerģija U_{sum} taisnas formas šķiedrām. Rezultāti attēloti: a) pie dažādiem enkurošanas dziļumiem; b) pie dažādiem orientācijas leņķiem (skat. 1.tabulu)



9.att. Šķiedras izraušanas enerģija U_{sum} enkurotas formas šķiedrām. Rezultāti attēloti: a) pie dažādiem enkurošanas dziļumiem; b) pie dažādiem orientācijas leņķiem (skat. 1.tabulu)

8., 9. Un 10.att dotie rezultāti norāda, ka enkurotas un viļņotas formas šķiedrām raksturīga daudz lielāka izraušanas enerģija nekā taisnas formas šķiedrām. Turklāt, kā uzrāda eksperimentālie rezultāti, arī standartnovirze enkurotas un viļņotas formas šķiedrām ir ievērojami mazāka kā taisnām šķiedrām.



10.att. Šķiedras izraušanas enerģija U_{sum} viļņotas formas šķiedrām. Rezultāti attēloti:
a) pie dažādiem enkurošanas dziļumiem; b) pie dažādiem orientācijas leņķiem (skat. 1.tabulu)

Promocijas darbā uzrādītas šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības, detalizēti izanalizējot mikromehāniskos procesus, kas norisinās šajā procesā. Standartnovirze tika analizēta, salīdzinot šķiedru izraušanas enerģiju U_{sum} , kā arī maksimālo šķiedras izraušanas spēku F_{max} .

Tika secināts, ka viļņotas formas šķiedrām raksturīga visaugstākā pretestība (lielākās U_{sum} un F_{max} vērtības).

Tomēr enkurotas formas šķiedras var uzskatīt par lietderīgākajām no visām trīs darbā pētītajām šķiedrām, pateicoties to augstajai izraušanas pretestībai un viszemākajai standartnovirzei U_{sum} un F_{max} vērtībās.

Taisnas formas šķiedrām raksturīga zema izraušanas pretestība un liela eksperimentālo mērījumu statistiskā izkliede.

Promocijas darba **4.nodaļā** veikta un aprakstīta šķiedras izraušanas procesa skaitliskā modelēšana.

Skaitliskā modelēšana izmantojot GEM tika veikta taisnas formas cilindriskām šķiedrām, kas orientētas pieliktā izraušanas spēka virzienā ($\alpha = 0^\circ$). Skaitliskā modelēšana tika veikta, izmantojot GEM aprēķina datorprogrammu ANSYS [1].

Tā kā mikroskopisku bojājumu rašanās un izplatīšanās sistēmā, kas sastāv no tērauda šķiedras un to aptverošas betona matricas, ir grūti eksperimentāli novērojama un nomērāma, GEM aprēķini ir ērts paņēmiens šo problēmu analizēšanai. Lai gan literatūrā ir pieejami arī analītiskie modeļi [6-8] šķiedras izraušanas procesa analīzei fibrobetonā, to ietvaros virkne parametru tiek noteikta eksperimentāli.

Turklāt, analizējot fibrobetonu kā īso šķiedru kompozītmateriālu, jāņem vērā, ka analītiskie risinājumi ir apgrūtināti, piemēram, sarežģītā spriegumu sadalījuma dēļ, šķiedru mijiedarbības dēļ, u.tml.

Promocijas darba 4.nodaļas mērķis ir veikt detalizētu mikromehānisku šķiedras izraušanas procesa analīzi fibrobetonā, izvērtējot dažādu parametru, kā, piemēram, šķiedras un betona mehāniskās īpašības, šķiedras ģeometriskos parametru, u.c. parametru ietekmi uz šķiedras izraušanas procesu. Tā kā jau iepriekš tika uzsvērts, ka fibrobetona konstruktīvo elementu nestspēja un darbība ir tieši atkarīga no šķiedru

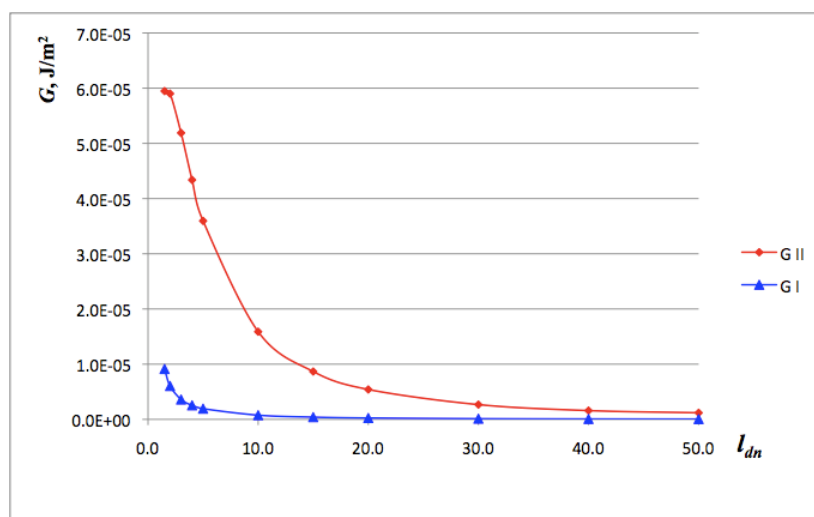
izraušanas pretestības, tad šīs nodaļas rezultāti dod iespēju materiālu zinātniekiem un inženieriem analizējot šos parametrus, optimizēt projektējamās konstrukcijas īpašības.

Promocijas darba literatūras apskatā arī tika minēts, ka pateicoties jaunākajiem sasniegumiem fibrobetona sastāva projektēšanā, mūsdienās tiek lietotas smalkas pildvielas, kas nodrošina daudz labāku adhēziju starp tērauda šķiedru un betona matricu. Saprota, ka šīs pildvielas ne tikai uzlabo šķiedras un matricas starpvirsmas īpašības, bet arī ietekmē matricas elastīgās īpašības. Līdz šim literatūrā nav bijuši detalizēti pētījumi par šo parametru ietekmi uz šķiedras izraušanas procesu.

Tādēļ šī darba 4.nodaļā veikta detalizēta minēto parametru analīze, kā arī no salīdzinājuma ar eksperimentālajiem datiem (no 3.nodaļas), noteiktas dažādu mikromehānisko parametru vērtības. Tas nozīmē, ka eksperimentāli noteiktās šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības var tikt izmantotas kā ieejas dati skaitliskajos modeļos, lai aprēķinātu dažādus mikromehāniskus parametrus, piemēram, lai aprēķinātu šķiedras un matricas starpvirsmas īpašības (šajā nodaļā aprēķināta plīšanas stigrība G_c). No šajā darbā izstrādātajiem relatīvi vienkāršajiem modeļiem aprēķinātie parametri var tikt pielietoti citos, daudz sarežģītākos aprēķinos.

Vispirms tika modelēts plaisas starp šķiedru un matricu izplatīšanās process, izmantojot 2-D asij simetrisku GEM modeli. Tika izanalizētas iespējamās plaisas izplatīšanās modas (I un II moda). Tika izvērtēts kā dažādi parametri, kā piemēram šķiedras un betona matricas mehāniskās īpašības, šķiedras ģeometriskie parametri, betona rukums, u.c., ietekmē plaisas starp šķiedru un matricu izplatīšanos. Plaisas izplatīšanās tika analizēta ar lineāri elastīgās plīsumu mehānikas paņēmieniem, aprēķinot enerģijas atbrīvošanās ātrumu G pie dažādiem plaisas garumiem l_d . Enerģijas atbrīvošanās ātruma G izmaiņa atkarībā no plaisas garuma tika aproksimēta ar vienkāršām matemātiskām izteiksmēm, kuras tiek izmantotas, lai modeļa ietvaros veiktu plaisas izplatīšanās simulācijas, kā arī lai modelētu šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarību.

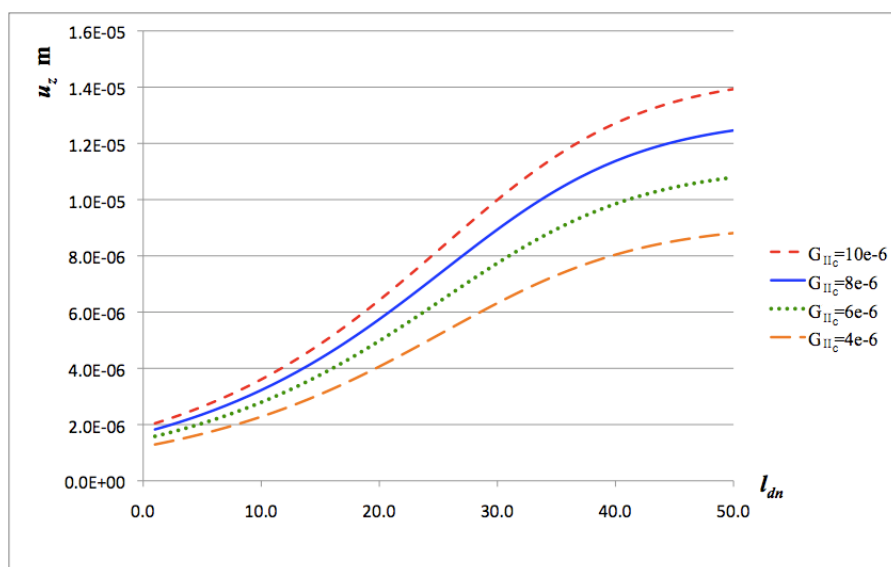
11.att. demonstrēti GEM modelēšanas rezultāti – enerģijas atbrīvošanās ātrums G kā funkcija no normalizētā starpvirsmas plaisas garuma $l_{dn} = l_d / r_f$.



11.att. I un II plīsumu modas enerģijas atbrīvošanās ātrumi (attiecīgi G_I un G_{II}) atskaites gadījumam attēloti kā funkcijas no normalizētā plaisas garuma. $l_{dn} = l_d / r_f$.

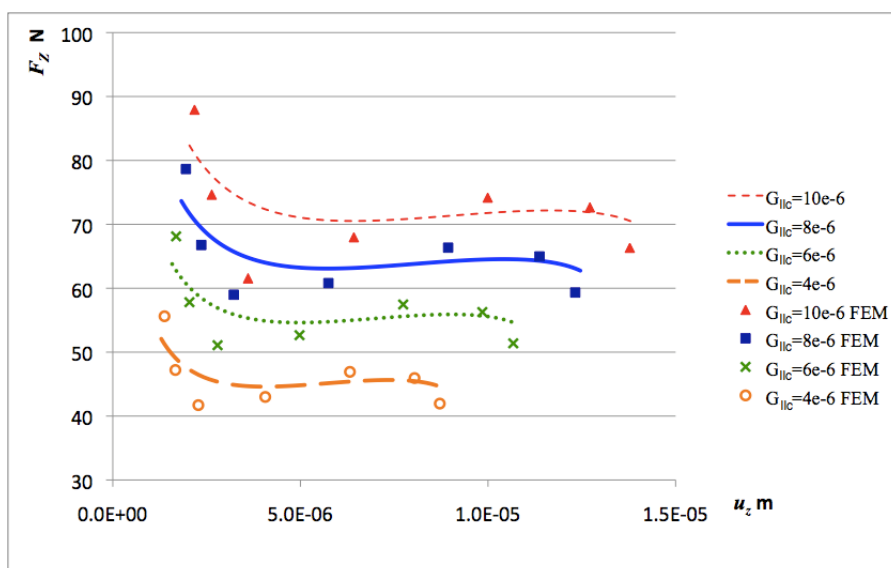
$$u_z = 0.005 \text{ mm}$$

No 11.att. redzamajiem rezultātiem var secināt, ka moda II ir dominējoša, tomēr modas I ietekme ir būtiska pie nelieliem plaisas garumiem. Darbā tika parādīts, ka sakarība starp enerģijas atbrīvošanās ātrumu un plaisas garumu var tikt aproksimēta ar vienkāršu eksponentes funkciju. Tādējādi modeļa ietvaros iespējams veikt starpvirsmas plaisas izplatīšanās simulācijas. 12.att. attēloti simulāciju rezultāti, pieņemot dažādas starpvirsmas plīšanas stigrības G_{IIc} vērtības.



12.att. Šķiedraas un matricas starpvirsmas plaisas izplatīšanās simulācijas vairākiem gadījumiem. G_{IIc} skaitliskās vērtības norādītas J/m^2

Promocijas darbā tika arī norādīts, ka šķiedras izraušanas spēks šajā stadijā ir atkarīgs gan no pieliktā pārvietojuma u_z , gan arī no starpvirsmas plaisas garuma l_{dn} . Tādējādi, tika iegūta šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma izteiksme, aprakstot sakarību starp spēku F_z , pārvietojumu u_z un plaisas garumu l_{dn} .

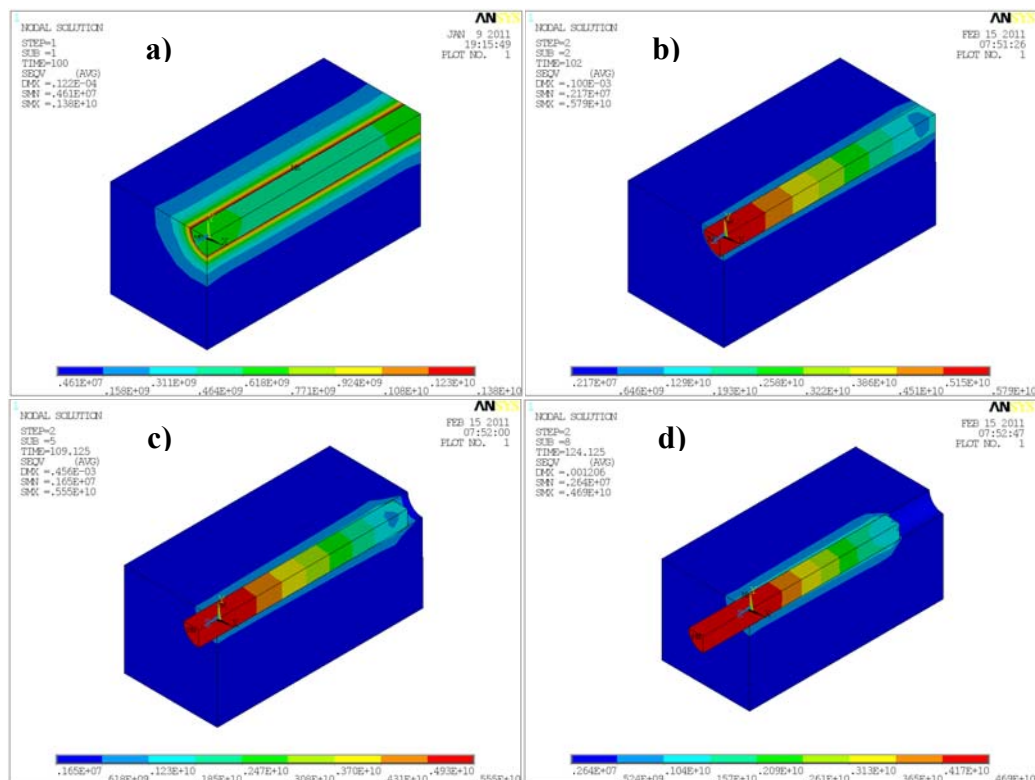


13.att. Šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības modelēšanas rezultāti un validācija ar GEM. G_{IIc} skaitliskās vērtības norādītas J/m^2

Modelēšanas rezultāti un neatkarīga validācija ar GEM pie dažādām starpvirsmas plīšanas stigrības G_{IIc} vērtībām attēloti 13.att.

Tālāk 4.nodaļā veikta šķiedras pilnīgas izraušanas procesa modelēšana, izmantojot 3-D GEM modeli. Tika izšķirti divi gadījumi: sākotnēji atdalījušās starpvirsmas gadījums, kurā tiek pieņemts, ka starp šķiedru un betona matricu nepastāv saiste; kā arī sākotnēji saistītas starpvirsmas gadījums.

Ņemot vērā vājo saisti starp tērauda šķiedru un betona matricu, bieži ir pieļaujams starpvirsmu uzskatīt par nesaistītu. 14.att. parāda ekvivalento (von Mises) spriegumu sadalījumu dažādās šķiedras izraušanas procesa stadijās gadījumā, kad starpvirsmas saisti neievēro.



14.att. Ekvivalento (von Mises) spriegumu sadalījums dažādās šķiedras izraušanas procesa stadijās gadījumā, kad starpvirsmas ir sākotnēji atdalījušies: a) sākotnējais spriegumu sadalījums pirms izraušanas spēka pielikšanas; b), c), d) šķiedras izraušanas ar berzes spēku pretestību.

2.tabulā sarindoti parametriskās analīzes varianti – dažādas ģeometriskos un mehāniskos parametru variācijas gadījumā, kad šķiedras un matricas starpvirsmas ir sākotnēji atdalījušies.

Modelēšanas rezultāti sākotnēji atdalījušās starpvirsmas gadījumam pie 4 dažādiem šķiedras enkurojuma dziļumiem l_f apkopoti 15.att. No 15.att. redzamajām līknēm var secināt, ka starp šķiedras maksimālo izraušanas pretestību (maksimālo spēku F_z) un šķiedras enkurojuma dziļumu l_f ir lineāra sakarība pie tam lielākam enkurojuma dziļumam atbilst lielāka izraušanas pretestība. Kā redzams 15.att., šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības sākotnējā daļa sakrīt visiem salīdzinātajiem šķiedras enkurojuma dziļumiem l_f . Tādējādi, šķiedrām ar lielākiem enkurojuma dziļumiem l_f maksimālā izraušanas spēka vērtība tiek sasniegta pie lielākām pārvietojuma u_z vērtībām.

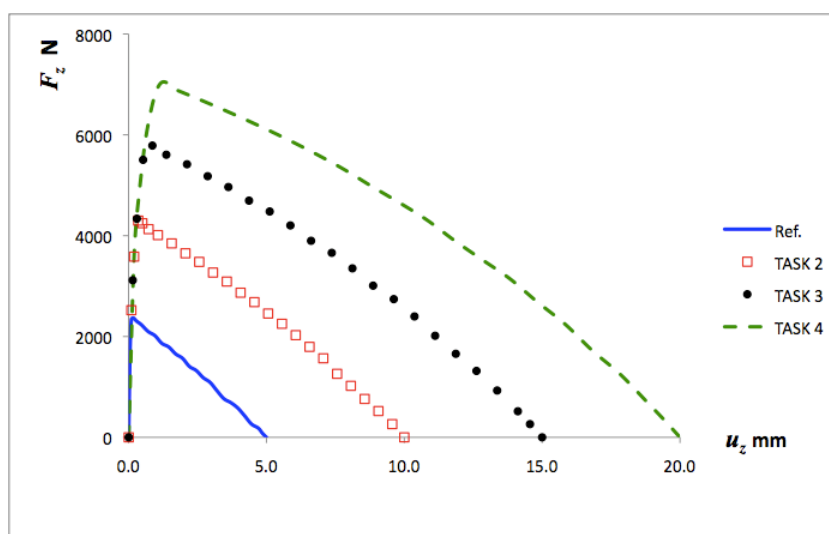
Kā redzams 15.att. pēc maksimālās vērtības sasniegšanas šķiedras izraušanas spēks samazinās gandrīz lineāri līdz šķiedras pilnīgai izraušanai. Jāatzīmē, ka

modelēšanas rezultātu skaitliskās vērtības attiecībā uz izraušanas spēku F_z pārsniedz praktiskos eksperimentos reāli iespējamus lielumus, tomēr, šajā Promocijas darba nodaļā uzdevums ir veikt parametrisko analīzi, tādēļ šādi salīdzinājumi ir pieļaujami.

2.tabula

Parametriskās analīzes varianti gadījumam, kad šķiedras un matricas starpvirsma ir sākotnēji atdalījusies.

Variantā apzīmējums:	E_f [GPa]	E_m [GPa]	r_f [mm]	r_m [-]	p_c [MPa]	l_f [mm]	μ [-]
Ref.	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.3
Task 2	210	30	0.375	0.360	776.0	10	0.3
Task 3	210	30	0.375	0.360	777.5	15	0.3
Task 4	210	30	0.375	0.360	778.3	20	0.3
Task 5	210	30	0.375	0.365	515.8	5	0.3
Task 6	210	30	0.375	0.370	255.4	5	0.3
Task 7	210	30	0.380	0.3648	772.7	5	0.3
Task 8	210	30	0.400	0.384	767.9	5	0.3
Task 9	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.2
Task 10	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.1
Task 11	220	30	0.375	0.360	774.6	5	0.3
Task 12	200	30	0.375	0.360	770.7	5	0.3



15.att. GEM modelēšanas rezultāti pie dažādiem enkurojuma dziļumiem l_f .

Apzīmējumi atbilstoši 2.tabulai.

Ņemot vērā, ka saites starp tērauda šķiedru un betonu ir vājas, pieņēmumu par sākotnēji atdalījušos starpvirsmu vairākumā gadījumu var uzskatīt par pamatotu. No otras puses, šobrīd fibrobetona sastāvā arvien lielākos apjomos tiek izmantotas smalkas pildvielas (mikrosilīcijs, nanosilīcijs, u.tml.) tādējādi iegūstot starpvirsmas ar daudz labākām stiprības īpašībām kā lietojot līdz šim zināmos betona sastāvus. Tādējādi abi no minētajiem gadījumiem ir aktuāli fibrobetona praktiskai pielietošanai.

Tādēļ Promocijas darba 4.nodaļā modelēšana tika veikta arī gadījumam, kad šķiedras un matricas starpvirsma ir sākotnēji saistīta. Atbilstoši 3.tabuā sarindotajiem

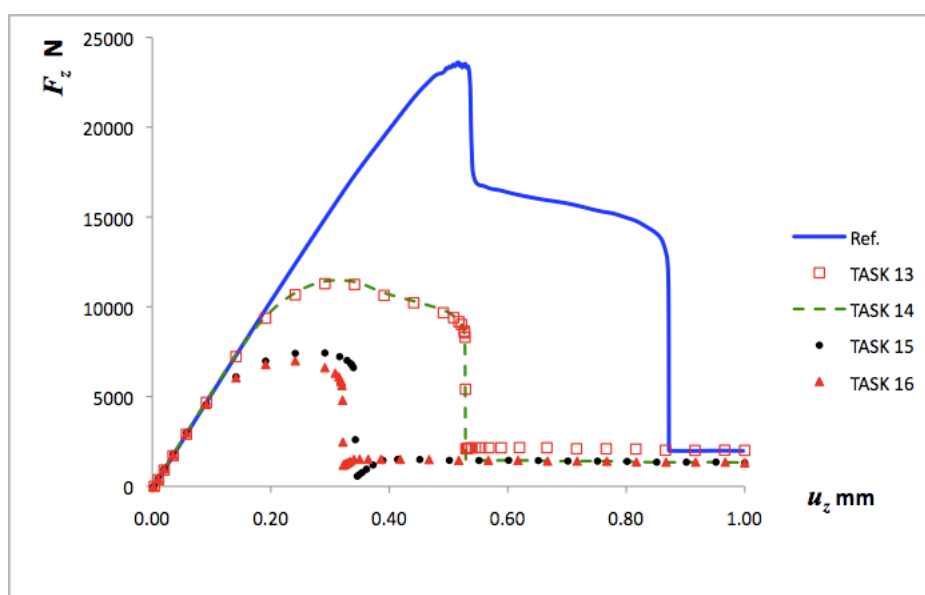
gadījumiem tika veikta parametriska analīze, izvērtējot dažādu ģeometrisku un mikromehānisko parametru nozīmi. GEM modelēšana tika ērti veikta aprēķina programmā ANSYS [1], modificējot sākotnēji atdalījušās starpvirsmas gadījumam lietoto modeli, papildus uz starpvirsmas izveidojot kohezīvās zonas materiālu, kas nodrošina virsmu saistīšanos līdz zināmai robežai.

3.tabula

Parametriskās analīzes varianti gadījumam, kad šķiedras un matricas starpvirsmā ir sākotnēji saistīta.

Variantā apzīmējums:	E_f	E_m	r_f	r_m	p_c	l_f	$\tau_{\max}$	u_t^c	μ
	[GPa]	[GPa]	[mm]	[-]	[MPa]	[mm]	[Pa]	[mm]	[-]
Ref.	210	30	0.375	0.360	772.7	5	5e9	0.3	0.3
Task 13	210	30	0.375	0.360	772.7	5	2e9	0.3	0.3
Task 14	210	30	0.375	0.365	515.8	5	2e9	0.3	0.3
Task 15	210	30	0.375	0.365	515.8	5	1e9	0.3	0.3
Task 16	210	30	0.375	0.365	515.8	5	1e9	0.25	0.3

16.att. apkopoti skaitliskās modelēšanas rezultāti sākotnēji saistītas starpvirsmas gadījumā.

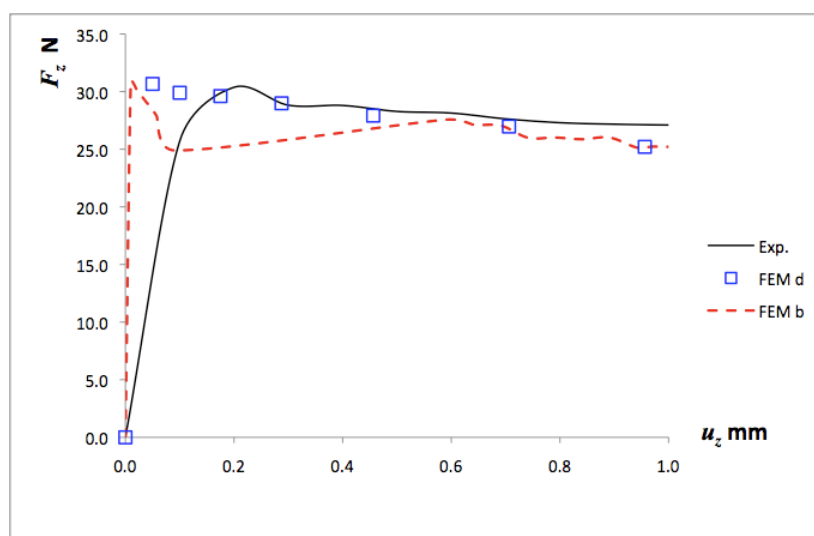


16.att. GEM modelēšanas rezultāti pie dažādiem parametriem. Variantu apzīmējums saskaņā ar 3.tabulu

Tā kā, analizējot iegūtos rezultātus tika secināts, ka pēc starpvirsmas atdalīšanās šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarība ir tieši tāda pati kā iepriekš (sākotnēji atdalījušās starpvirsmas gadījumā), modelēšanas rezultāti 16.att. doti pārvietojumu u_z diapazonā no 0 līdz 1 mm. Kā redzams 16.att., sākotnējā spēka un pārvietojuma sakarība ir lineāra, jo starpvirsmā ir saistīta. Kad uz starpvirsmas tiek sasniegts spriegumstāvoklis, pie kura tiek sasniegta plīšanas stigrības G_{IIC} vērtība, sākas starpvirsmas atdalīšanās kā rezultātā izraušanas spēks F_z samazinās.

Noslēdzot Promocijas darba 4.nodaļu, no salīdzinājuma ar eksperimentālajiem rezultātiem tika noteikti mikromehāniskie parametri konkrētajam gadījumam.

Labākā atbilstība starp eksperimentālajiem rezultātiem un abiem skaitlisko modeļu rezultātiem redzama 17.att.



17.att. GEM modelēšanas rezultāti, izmantojot sākotnēji atdalījušās starpvirsmas modeli (FEM d) un sākotnēji saistītās starpvirsmas modeli (FEM b), salīdzinājumā ar eksperimentālajiem datiem (Exp.) pie $l_f = 5$ mm (konfigurācija B4F13 1.tabulā)

Lai gan pēc 17.att. redzamā ir iegūta laba atbilstība starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem, iespējams, labāka atbilstība tiktu sasniegta ievērojot berzes spēka izmaiņas šķiedras izraušanas procesa gaitā. Analizējot sakritību starp eksperimentālajiem rezultātiem un sākotnēji saistītās starpvirsmas modeļa rezultātiem var secināt, ka atbilstība šķiedras izraušanas procesa sākotnē nav laba, jo eksperimentālajos rezultātos līknēs netika konstatēta izteikta maksimālā spēka virsotne. Tādējādi var secināt, ka konkrētajā gadījumā šķiedras izraušanas modelis, kurā pieņemta sākotnēji atdalījušās starpvirsmas, precīzāk raksturo situāciju eksperimentālajos paraugos.

Kopumā vērtējot Promocijas darba 4.nodaļā izstrādātos skaitliskos modeļus, tos var uzskatīt par ērtu metodi kā analizēt dažādu šķiedras ģeometrisku parametru ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību. Bez tam no salīdzinājuma ar eksperimentālajiem rezultātiem darbā izstrādātie GEM modeļi dod iespēju noteikt dažādus mikromehāniskos parametrus, kuru eksperimentāla noteikšana ir sarežģīta.

Šajā promocijas darbā skaitliskā modelēšana tika veikta, izmantojot tikai taisnas formas šķiedru, vadoties pēc aprēķinu ērtības apsvērumiem. Slodzes virzienā orientātas šķiedras izraušanas procesu, piemēram, var ērti veikt, izmantojot 2-D asij simetrisku modeli. Ja šķiedras orientācijas leņķis nesakrīt ar pieliktā izraušanas spēka virzienu, tad jālieto daudz sarežģītākie 3-D modeļi. Ja šķiedrai ir enkurota vai viļņota forma, tad tās izraušanas procesa modelēšanai nepieciešams ievērot arī tērauda šķiedras plastiskās deformācijas, šķiedrām iztaisnojoties. Tas, savukārt, rada nepieciešamību pēc lielākiem skaitļošanas resursiem. Literatūrā [9] ir pieejami modelēšanas rezultāti, kuros ar 3-D skaitlisku GEM modeli analizēta enkurotas tērauda šķiedras izraušanas, izmantojot īpašus, GEM aprēķinu programmā pieejamus starpvirsmas elementus. Jāatzīmē, ka autori avotā [9] starpvirsmas īpašību noteikšanai

izmanto taisnas šķiedras GEM modeli līdzīgu kā šajā Promocijas darbā. Līdz ar to var secināt, ka parametriskās analīzes rezultāti, kas doti šajā darbā, var tikt lietoti kā ieejas dati daudz sarežģītāku formu šķiedru modeļos. Lai gan avotā [9] pieejamie rezultāti ir interesanti, tie pieejami tikai nedaudzām konfigurācijām. Turklāt autori avotā [9] rekomendē veikt vienkāršāku 2-D modelēšanu, tādējādi ietaupot aprēķinos patērēto laiku.

Tomēr, pastāvīgi attīstoties un uzlabojoties pieejamiem skaitļošanas resursiem, dažādu formu šķiedru izraušanas procesa modelēšana nākotnē paredzams būs veicama daudz vienkāršāk un arī tādi parametri kā šķiedras orientācijas leņķis un betona matricas lokāla izdrupšana būs viegli iekļaujama modelēšanā.

Promocijas darba **5.nodaļā** izstrādāts modelis fibrobetona konstruktīvo elementu nestspējas prognozēšanai, par ieejas datiem ņemot iepriekš iegūtās šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības.

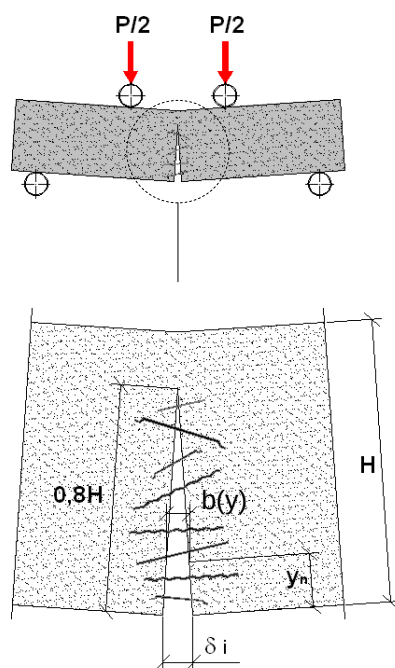
Promocijas darba 5.nodaļas uzdevums ir izstrādāt modeli konstruktīvā fibrobetona siju nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā. Promocijas darba 1.nodaļā literatūras apskata ietvaros tika pārskatīti un analizēti esošie fibrobetona konstrukciju nestspējas aprēķināšanas modeļi. No literatūras apskatā veiktās analīzes tika secināts, ka lielākā daļa no šobrīd pieejamiem modeļiem ir balstīti uz inverso pieeju, kas nozīmē, ka nestspējas pamatsakarības spriegumu un defromāciju ($\sigma - \varepsilon$) vai spriegumu un plaisas atvēruma ($\sigma - w$) veidā tiek iegūtas aproksimējot standartizētu eksperimentu rezultātus ar lineārām vai pa posmiem lineārām sakarībām. Tieši tāda pati pieeja fibrobetona konstruktīvo elementu nestspējas noteikšanai tiek izmantota arī nesen izstrādātajās projektēšanas rekomendācijās [10-16], tās parasti tiek papildinātas ar norādījumiem par standartizētu eksperimentu veikšanu, rekomendētiem paraugu izmēriem un to izgatavošanu. Minētajās projektēšanas rekomendācijās nestspējas līknes dotas kā lineāras, bilineāras vai pa posmiem lineāras sakarības, kuras ir attiecīgi spēkā kādā noteiktā deformāciju ε vai plaisas atvērumu w diapazonā. Šo lineāro sakarību krustpunktos tiek noteiktas atbilstošās spriegumu σ vērtības. Ņemot vērā, ka eksperimentālajiem rezultātiem raksturīga noteikta izkliede, atbilstoši minētajām rekomendācijām spriegumu vērtības tiek reizinātas ar vairākiem drošības koeficientiem k_i , kur $k_i < 1$. Tādā veidā tiek noteikta konstruktīvo elementu aprēķina pretestība. Atbilstoši rekomendāciju prasībām, eksperimentāli nomērītās sakarības $\sigma - \varepsilon$ vai $\sigma - w$ tiek interpretētas lineāro vai pa posmiem lineāro modeļu ietvaros un tiek veikta aproksimācija. Tomēr, ja eksperimentālās līknes pēc rakstura nelīdzinās rekomendācijās norādītajiem lineārajiem un pa posmiem lineārajiem modeļiem, tad aproksimācijas veikšana nav vienkārša un viennozīmīga. Tādējādi, no šķietami līdzīgām līknēm ir iespējams iegūt lielas atšķirības aprēķina pretestības vērtībās.

Rekomendācijās lietoto drošības koeficientu k_i kopējā ietekme nozīmē, ka eksperimentāli noteiktā fibrobetona elementa nestspēja ir ievērojami jāsamazina, turklāt bieži tiek lietotas tās pašas drošības koeficientu vērtības neatkarīgi no šķiedru tilpuma koeficienta fibrobetonā. Pieejamās rekomendācijas, protams, tiek lietotas aizvien plašāk, tomēr vairāki apsvērumi elementa nestspējas noteikšanā ir apšaubāmi. Tādēļ tiešās modelēšanas pieeja var būt lietderīga alternatīva plaši lietotajām inversajām modelēšanas metodēm.

Diemžēl izmantojot tiešās modelēšanas pieejas modeļus, kas publicēti literatūrā (piem. [17]) ir nepieciešams izmantot daudzus parametrus, kuru vērtības ikreiz ir jānosaka eksperimentāli.

Lai izvairītos no nepieciešamības veikt virkni eksperimentālu pārbažu nezināmo parametru noteikšanai, ir nepieciešams izveidot plašu datubāzi ar sistemātiski sakārtotām šo parametru vērtībām. Šajā Promocijas darbā fibrobetona siju nestspēja un darbība plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā tika modelēta izmantojot datubāzi, kas iegūta apkopojot Promocijas darba 3.nodaļā veikto šķiedras izraušanas eksperimentu rezultātus. Galvenais modelēšanā izmantotais piegājiens ir apsvērums, ka zinot šķiedru daudzumu, enkurojuma dziļumu un orientācijas leņķi bīstamajā šķēlumā, ir iespējams aprēķināt spēku, kādu šķiedras uzņem savienojot plaisas malas. Šķiedru daudzumu šķēlumā iespējams aprēķināt pēc dotā šķiedru tilpuma vai svara koeficienta fibrobetonā un pieņemot varbūtīgu šķiedru sadalījumu tilpumā. Zinot šķiedras novietojumu attiecībā pret bīstamā šķēluma plakni, no iepriekš apkopotās šķiedras izraušanas eksperimentu rezultātu datubāzes iespējams atrast atbilstošo spēku, ko šķiedra pie dotā plaisas atvēruma uzņem.

Daudzos iepriekš veiktos zinātniskos pētījumos, kā aprakstīts šī Promocijas darba literatūras apskata nodaļā, tika pierādīts ka līdzko fibrobetona elementā rodas plaisa, šķiedras tiek nospieltas savienojot plaisas malas un tās aizkavē plaisas tālāku izplatīšanos un atvēršanos. Tādēļ jebkura fibrobetona konstruktīvā elementa nestspēja ir tieši atkarīga no tajā esošo šķiedru izraušanas pretestības. Ja liektā konstruktīvā elementa materiāls ir homogēns un izotrops, plaisas ir sagaidāmas šķēlumā, kurā lieces moments ir maksimālais. Savukārt liektiem fibrobetona konstruktīvajiem elementiem, piemēram, sijām vai plātnēm, plaisas lokalizācija ir atkarīga gan no lieces momenta, gan arī no šķiedru daudzuma šķēlumā. Tādēļ fibrobetona konstrukciju eksperimentālās pārbaudes bieži tiek veiktas, izmantojot paraugus ar iegriezumu, lai plaisas lokalizāciju ierosinātu vēlamajā šķēlumā, tādējādi iegūstot konsekventus rezultātus un vienkāršojot rezultātu interpretāciju. 18.att shematiski attēlots fibrobetona sijas paraugs ar iegriezumu, sija slogota 4 punktu liecē.

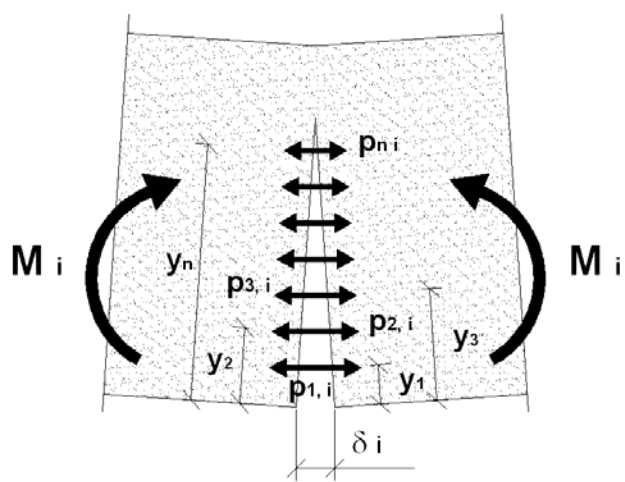


18.att. 4 punktu liecē slogotas fibrobetona sijas shematisks attēls. Attēla zemākajā daļā attēlots maksimālais plaisas atvērums δ un lokālais plaisas atvērums $b(y)$

Promocijas darbā izstrādātajā nestspējas prognozēšanas modelī tiek pieņemts, ka liektā elementa plaisas augstums ir nemainīgs visā sijas slogošanas procesā un tas ir vienāds ar $0.8H$, kur H ir elementa augstums.

Pēc tam, kad fibrobeta sijas stieptajā zonā parādījušās mikroplaisas, tālāka slogošana izraisa vienas lielāka izmēra plaisas lokalizāciju bīstamajā šķēlumā. Fibrobeta elementa nestspēja būs tieši atkarīga no šķiedru veida, konfigurācijas (enkurojuma dziļums, orientācijas leņķis) un daudzuma šajā šķēlumā. Kā redzams 18.att., plaisas lokālo atvērumu $b(y)$ var aprēķināt no vienkāršām ģeometriskām sakarībām, ja ir zināma maksimālā plaisas atvērums δ_i vērtība.

Promocijas darba 3.nodaļā veiktajā eksperimentālajā programmā, tika izpētīta šķiedru enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekme uz šķiedras izraušanas pretestību, lai to varētu iekļaut arī sijas nestspējas prognozēšanas modelī. Tādējādi, zinot šķiedru daudzumu un to sadalījumu bīstamajā šķēlumā, jebkurai plaisas lokālā atvērums vērtībai $b(y)$ var aprēķināt spēku, kāds tiek pārnests pāri plaisai. Savukārt, kad ir aprēķināta spēka vērtība, kāds tiek pārnests pāri plaisai, tad pēc 18. un 19.att. dotās shēmas var aprēķināt atbilstošo ārējā spēka P vērtību un maksimālo plaisas atvērums δ_i .



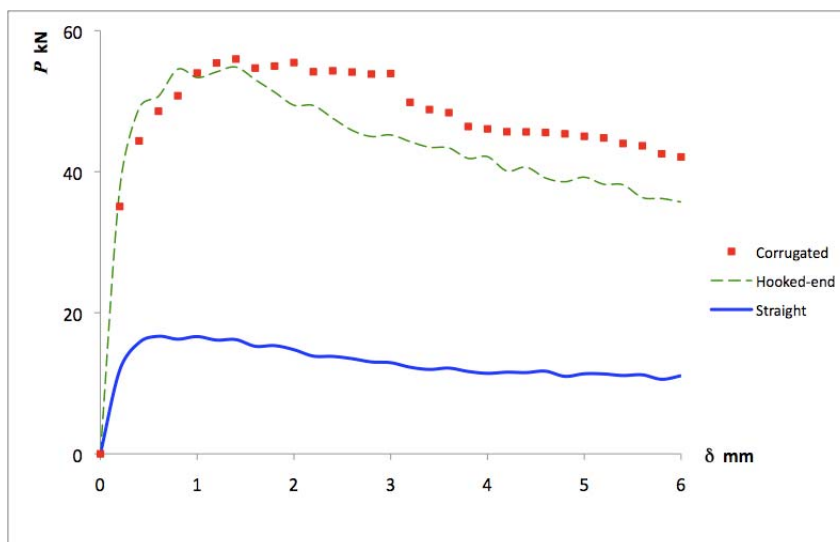
19.att. Sakarība starp maksimālo plaisas atvērums δ_i , lokālo spēku $p_{n,i}$ un ārēji pielikto lieces momentu M_i

Ņemot vērā grūtības, ar kādām jāsastopas, lai iegūtu pieņemamus analītiskos un skaitliskos modeļus, tieša šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības izmantošana par ieejas datiem, iespējams, ir visērtākā metode, ja šie dati ir pieejami. Iepriekš jau diskutēts un uzsvērts, ka eksperimentālo šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarību izmantošana modelēšanai dod vairākas priekšrocības un arī nodrošina modelēšanas precizitāti.

20.att. doti modelēšanas rezultāti, attēlojot ārējā spēka P un maksimālā plaisas atvērums δ_i sakarību 3 dažādām fibrobeta sijām, kuru sastāvā ir attiecīgi taisnas, enkurotas vai viļņotas formas šķiedras.

Pirmkārt, no 20.att. dotajiem rezultātiem var secināt, ka šajā Promocijas darbā izstrādātais nestspējas prognozēšanas modelis dod reālistiskus rezultātus, ja salīdzina ar eksperimentālajiem rezultātiem. Rezultātos var redzēt, ka maksimālā spēka P vērtība tiek sasniegta pie nelielām plaisas atvērums δ vērtībām. Pieaugot plaisas atvērums, spēka P vērtība samazinās. Lai gan Promocijas darba 3.nodaļā tika

pierādīts, ka viļņotas formas šķiedru izraušanas pretestība ir visaugstākā, ir svarīgi atcerēties, ka to šķērsriezuma diametrs bija lielāks kā enkurotas un taisnas formas šķiedrām. Tādēļ pie viena un tā paša šķiedru daudzuma uz tilpuma vienību (kā, piemēram, 20.att. $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$), enkurotās formas šķiedru daudzums ir lielāks. Šis ir ļoti svarīgs apstāklis, kam jāpievērš uzmanība fibrobetona sastāva un nestspējas projektēšanā. Lai atrastu optimālo šķiedru daudzumu un sasniegtu vēlamo fibrobetona nestspēju, var tikt izmantots šajā Promocijas darbā izstrādātais modelis.



20.att. Fibrobetona siju nestspējas modelēšanas rezultāti gadījumos, kad fibrobetonā izmantotas taisnas, galos enkurotas un viļņotas šķiedras. Visos attēlotajos gadījumos šķiedru daudzums $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$

Modelēšanas rezultātu validācijai tika veikta vienāda fibrobetona siju paraugu eksperimentāla pārbaude. Tika izgatavotas un 4 punktu liecē eksperimentāli pārbaudītas (skat. 21.att.) fibrobetona sijas ar izmēriem $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$.



21.att. Fibrobetona siju eksperimentāla pārbaude 4 punktu liecē

Visu izgatavoto fibrobetona siju laiduma vidū tika izveidots 2 mm plats un 20 mm dziļš iegriezums. Iegriezumī tika veikti, lai ierosinātu plaisas lokalizāciju visām

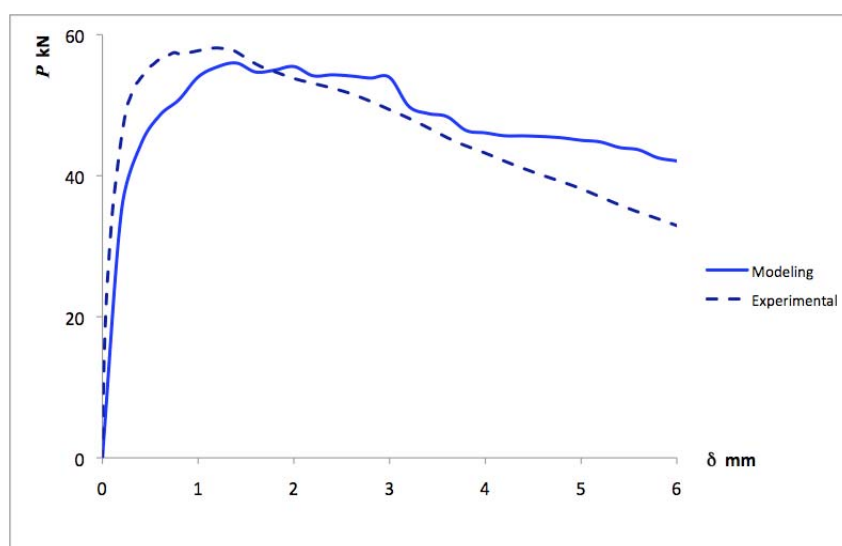
pārbaudītajām sijām vienā šķēlumā sijas laiduma vidū, lai eksperimentālā pārbaude atbilstu apstākļiem, kādi pieņemti modelēšanā.

Eksperimentu veikšanai tika izvēlēts betona maisījums, kurā iespējams iemaisīt šķiedru daudzumu no $100 - 300 \text{ kg/m}^3$. Tāds pats betona maisījums tika izmantots arī šķiedru izraušanas eksperimentos šī Promocijas darba 3.nodaļā.

22.att. kā piemērs parādīts salīdzinājums starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem fibrobeta sijām ar viļņotas formas šķiedrām.

Kā var secināt, modelēšanas rezultāti labi sakrīt ar eksperimentālajiem datiem, neraugoties uz relatīvo modelēšanas algoritma vienkāršību. Modelēto un eksperimentālo līkņu rakstura ziņā iegūta laba atbilstība, pierādot, ka pieņēmums par šķiedru izraušanas pretestību kā galveno parametru, kas nosaka liektu fibrobeta konstruktīvo elementu nestspēju, ir pamatots.

Analizējot modelēšanas rezultātus, var secināt, ka atbilstība starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem samazinās, pieaugot šķiedru daudzumam fibrobeta. Šo pasliktinājumu ir iespējams izskaidrot ar dažādiem faktoriem, kas tieši raksturīgi fibrobeta ar lielāku šķiedru daudzumu kā, piemēram, nevienmērīgs šķiedru sadalījums, šķiedru saķeršanās, šķiedru mijiedarbība, kas izraisa spriegumu koncentrāciju un betona matricas izdrupšanu, u.tml. apstākļi, kas Promocijas darba 5.nodaļā izstrādātajā modelī netika ievērtēti.



22.att. Eksperimentālo un modelēšanas rezultātu salīdzinājums fibrobeta sijām ar viļņotas formas šķiedrām. Šķiedru daudzums $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$

Noslēdzot kopsavilkumu par Promocijas darba 5.nodaļu var minēt, ka rakstura ziņā modelēšanas rezultātiem ir ļoti laba atbilstība ar eksperimentālajiem datiem, apstiprinot, ka tiešās modelēšanas pieeja, izmantojot šķiedras izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības ir lietderīga un var būt praktiski ērti pielietojama. Spriežot pēc validācijas ar eksperimentālajiem datiem, var secināt, ka labāka atbilstība atbilst fibrobeta sastāviem ar mērenu šķiedru daudzumu. Lai izskaidrotu atbilstības pasliktināšanos, par iemeslu var minēt gan nevienmērīgu šķiedru sadalījumu pie lielākiem šķiedru daudzumiem (šķiedras ir grūtāk iemaisīt betonā) kā arī šķiedru orientāciju – pie lieliem šķiedru daudzumiem šķiedru orientācijas gadījuma raksturs, kas pieņemts modelēšanas algoritmā, ir ierobežots.

Modelēšanas algoritmā ieviesto vienkāršojumu (taisnas plaisas plaknes un nemainīgs plaisas augstums $0.8H$) dēļ pieaug atšķirība starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem. Faktiskā plaisas augstuma un plaisas koordinātes ievērtēšana modelī būtu iespējama, būtiski nesarežģījot modelēšanas algoritmu, kas, savukārt, nav vēlams no konstrukciju projektēšanas ērtības viedokļa.

Šķiedru mijiedarbībai arī ir būtiska ietekme, jo liels šķiedru daudzums parasti noved pie spriegumu koncentrācijas, kā rezultātā ievērojami izdrūp betona matrica un samazinās fibrobeta konstrukcijas nestspēja.

Lai noteiktu faktisko šķiedru sadalījumu tilpumā dažādos fibrobeta sastāvos, nepieciešams veikt eksperimentālos mērījumus, mērot šķiedru enkurojuma dziļumu un orientāciju.

Jāatzīmē arī, ka šī Promocijas darba ietvaros tika pētīta būtībā tikai viena mēroga fibrobeta paraugi. No literatūrā pieejamās informācijas var secināt, ka fibrobeta konstruktīvajiem elementiem ļoti būtiska ir mēroga ietekme uz nestspēju.

Noslēdzot Promocijas darba 5.nodaļā izstrādātā modeļa pārskatu, ir nepieciešams pieminēt, ka izstrādātais modelis atšķiras no vairākuma literatūrā un projektēšanas dokumentos pieejamo modeļu ar spēju ievērot faktisko šķiedru daudzumu, kāds pielietots maisījuma sastāvā. Tiešās modelēšanas pieeja izstrādātajā modelī ļauj iegūt ne tikai reālistiskas fibrobeta elementa nestspējas prognozes, bet arī ļauj analizēt elementa darbību plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā. To nav iespējams iegūt ar šobrīd pieejamiem projektēšanas dokumentiem. Tādējādi izstrādāto modeli var uzskatīt par novitāti fibrobeta pētniecības nozarē.

SECINĀJUMI

Apkopojot Promocijas darba rezultātus, tika iegūti sekojoši secinājumi:

1. Promocijas darbā tika izstrādāts modelis liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, izmantojot tiešo modelēšanas pieeju. Izstrādātais modelis ir lietderīgs un viegli lietojams, ja ir pieejami eksperimentālie dati ar individuālo šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarībām. Izstrādātais modelis atšķiras no lielākās daļas šobrīd pieejamo fibrobetona elementu nestspējas aprēķina modeļu ar tā spēju ievērtēt pielietoto šķiedru veidu, daudzumu un to izraušanas īpatnības. Tādējādi šajā darbā izstrādātais modelis dod iespēju optimizēt fibrobetona konstrukciju projektēšanu un izstrādāt ekonomiskākas konstrukcijas.

2. Darba ietvaros tika veikti eksperimentāli pētījumi 3 dažādu formu komerciāli pieejamo tērauda šķiedru izraušanas pretestības noteikšanai. Iegūtie eksperimentālie rezultāti liecina par būtisku šķiedras enkurojuma dziļuma un orientācijas leņķa ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību it īpaši attiecībā uz taisnas formas šķiedrām.

3. Tika izstrādāts skaitliskais modelis plaisas starp tērauda šķidru un betona matricu izplatīšanās raksturošanai, izmantojot galīgo elementu metodi (GEM) un plīsumu mehāniku. Iegūtie aprēķinu rezultāti pierāda būtisku starpvirsmas mehānisko īpašību ietekmi uz šķiedras izraušanas pretestību. Darbā tika veikta arī šķiedras pilnīgas izraušanas procesa GEM modelēšana un, veicot modelēšanas rezultātu salīdzinājumu ar eksperimentālajiem rezultātiem, tika noteiktas dažādu mehānisko parametru – rukuma spriegumu, berzes koeficienta, starpvirsmas plīšanas stigrības – skaitliskās vērtības.

4. Tika izstrādāts modelēšanas algoritms liektu fibrobetona elementu nestspējas prognozēšanai plaisu izveidošanās un to atvēruma palielināšanās stadijā, par galvenajiem ieejas datiem ņemot iepriekš eksperimentāli noteiktās šķiedru izraušanas spēka un pārvietojuma sakarības. Labākā atbilstība starp modelēšanas un eksperimentālajiem rezultātiem tika iegūta sijām ar šķiedru daudzumu 150 kg/m^3 .

IZMANTOTĀ LITERATŪRA

1. ANSYS Release 11.0, ANSYS Academic Research, (2007) ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania.
2. MATLAB Release 7.9, (2009).
3. Groth P. Fibre reinforced concrete, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, (2001), Luleå, Sweden.
4. Robins P., Austin S., Jones P. Pull-out behaviour of hooked steel fibers, *Materials and Structures* – 35 (2002), pp.434-442.
5. Banthia N., Yan C. Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices, *Cement and Concrete Research* – 26 (1996), pp.657-662.
6. Cailleux E., Cutard T., Bernhart G. Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modelling, *Mechanics of Materials* – 37 (2005), pp.427-445.
7. Banholzer B., Brameshuber W., Jung W. Analytical simulation of pull-out tests – the direct problem, *Cement & Concrete Composites* – 27 (2005), pp.93-101.
8. Banholzer B., Brameshuber W., Jung W. Analytical simulation of pull-out tests – the inverse problem, *Cement & Concrete Composites* – 28 (2006), pp.564-571.
9. Georgiadi-Stefanidi K., Mistakidis E., Pantousa D., Zygomalas M. Numerical modelling of the pull-out of hooked steel fibres from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results, *Construction and Building Materials* – 24 (2010), pp.2489–2506.
10. Vandewalle L., et al. Recommendation of RILEM TC162-TDF: test and design methods for steel fibre reinforced concrete: design of steel fibre reinforced concrete using the σ - ω method: principles and applications, *Materials and Structures* – 35 (2002), pp.262-278.
11. AFGC-SETRA Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. Interim recommendations, AFGC Publication, France, (2002).
12. Stalfiberbetong, rekommendationer for konstruktion, utforande och provning. Betongrapport n.4., Svenska Betongforeningen, (1995).
13. Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton (DAfStb) Guidelines for steel fiber reinforced concrete—23th Draft, richtlinie Stahlfaserbeton, DIN 1045. Annex parts 1-4., (2007).
14. Faserbeton, Osterreichische Vereinigung fur Beton und Bautechnik. OBBV, Wien international symposium dedicated to Prof. S. P. Shah, (2002).
15. CNR-DT 204. Guidelines for design, construction and production control of fiber reinforced concrete structures. National Research Council of Italy, Italy, (2006).
16. Vandewalle L., et al. Recommendation of RILEM TC162-TDF: test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ε design method (final recommendation), *Materials and Structures* – 36 (2003), pp.560-567.
17. Li V.C, Stang H., Krenchel H. Micromechanics of crack bridging in fiber reinforced concrete, *Materials and Structures* – 26 (1993), pp.486-494.

REVIEW OF DISSERTATION THESIS

Topicality of the Dissertation Thesis

At present concrete researchers and engineers on European and world-wide level are focusing their efforts towards developing generally accepted international design regulations for steel fiber reinforced concrete (FRC) structural elements. It has been realised that the lack of generally accepted design regulations has been long and despite the clear advantages of FRC in many applications the use of it has often been limited due to inconsistency of the existing design recommendations.

It is therefore important to contribute to FRC research community with original results and concepts of models for predicting the behaviour of FRC structural elements. While in order to determine the properties of FRC most of the currently available design recommendations use inverse approach (approximation of experimentally obtained relations), the direct approach, on the other hand, can provide more economical and realistic structural design of FRC by evaluating the actual type, amount and orientation of fibers in the structural element.

In the present Thesis a constitutive model for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements is elaborated using the direct modeling approach. The model is elaborated in a simple form so that it could be applicable for integration within a structural design document in the future. The modelling procedure described in this Thesis is applicable for FRC structural elements subjected to bending loads, and the main principle of the model is based on the observation that behaviour of a FRC element strictly depends on the pull-out resistance of fibers. The same principle could be also used in the future for prediction of behaviour of FRC structural elements subjected to tensile loads.

The present Thesis consists of three main parts: in Chapter 3 extensive experimental study of fiber pull-out resistance of three types of commercially available steel fibers is performed. The effect of fiber embedded length and inclination angle is experimentally determined and the average pull-out laws for different configurations are presented. In Chapter 4 numerical modelling of the fiber pull-out process is performed using finite element method. Using fracture mechanics principles, steel fiber/concrete matrix interface debond crack growth is parametrically analyzed. Numerical modelling of the complete pull-out process of straight fibers is also performed in Chapter 4. From comparison and best fit with experimental results different parameters, which are difficult to measure experimentally, are determined. Finally, in Chapter 5 an algorithm for the model for predicting the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC beams is elaborated. Unlike most of the existing models available in the literature and design recommendations, the model proposed in this Thesis takes into account the actual amount and type of fibers in the FRC mix. FRC beams subjected to 4 point bending were tested experimentally to validate the modelling results and the obtained agreement was good despite the simplicity of the model.

Since the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC beams were accurately predicted this Thesis demonstrates the potential and advantage of applying direct approach of modelling to FRC alternatively to inverse methods suggested in most of the available design recommendations. The present work is also one of the few studies published in the literature so far that has been focused on FRC with high fiber amounts ($100 - 300 \text{ kg/m}^3$), which is essential for structural applications.

Objective of study

The objective of this Dissertation Thesis is to elaborate a model for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of steel fiber reinforced concrete elements subjected to bending loads using direct modelling approach.

Tasks of the study

In order to achieve the formulated objective of the Thesis the following tasks of the study are outlined:

1. To determine experimentally the pull-out resistance of 3 different types of commercially available steel fibers. Also to evaluate in the experimental study is the dependance of fiber pull-out resistance on fiber embedded length and inclination angle.
2. To perform numerical modelling of fiber pull-out process and to evaluate the significance of geometrical and mechanical parameters that affect the pull-out resistance of the fiber.
3. To elaborate the algorithm of the model for predicting the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC elements subjected to bending loads.

Methodology of the Dissertation Thesis

The Dissertation Thesis begins with a broad literature study ranging from technological properties of fresh FRC mix to multi-scale modelling of FRC mechanical properties. Scientific papers, textbooks, doctoral thesis and technical reports have been cited in the literature study. As a conclusion to Introduction and Literature review chapters of this Thesis the objective of the study is formulated. Three main tasks of the study were advanced.

The first task (described in Chapter 3) – experimental measurements of fiber pull-out resistance is performed using a specifically elaborated pull-out test procedure. Moulds for pull-out specimens were designed and manufactured in order to fulfill the requirements of the study, i.e., to investigate different fiber embedded lengths as well as different inclination angles. For this reason 66 different configurations of samples were manufactured. Testing grips accurately corresponding with the shape of the moulded specimens were also manufactured in order to perform the pull-out tests in the tensile machine. Zwick/Roell testing machine was used in combination with videoextensometer for measuring the pull-out displacement. At least 9 specimens were manufactured for each configuration resulting in total number of tested specimens equal to 594 pieces. The pull-out test results were processed using Microsoft Excel software. The experimentally measured pull-out load – displacement relations were averaged between specimens to obtain the average pull-out law for each configuration of fiber embedded length and inclination.

The second task (described in Chapter 4) – numerical modelling of fiber pull-out process was performed for straight shape and aligned fibers. Finite element method (FEM) software ANSYS [1] was used for modelling. The objective of numerical modelling was to evaluate significance on fiber pull-out resistance of different parameters, which are often difficult to measure experimentally. First a 2-D FEM model was elaborated to analyze the propagation of fiber/matrix interface debond

crack using fracture mechanics principles and calculating the energy release rate. Parametric analysis was performed in order to evaluate influence of individual parameters on growth of the interface debond crack. Further, a 3-D FEM model was elaborated in order to study the complete pull-out process and the significance of different parameters was analyzed.

Finally, the third task (described in Chapter 5) was performed using results from previous chapters in order to develop a model for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements. FRC structural elements subjected to bending loads were studied. MATLAB [2] software was used and a code for calculating the applied load – crack opening displacement relation was written. Laboratory samples were manufactured to validate the modelling results with experimental test results.

Scientific novelty of the Dissertation Thesis

In this Dissertation Thesis modelling of load bearing capacity and post-cracking behaviour of fiber reinforced concrete structural elements was performed using the direct modelling approach. Direct modelling has not been favoured in many previous studies due to its complexity. The direct modelling approach used in this Thesis, however, has the advantage over inverse models available in literature with its ability to take into account the actual volume fraction and type of fibers in FRC. And on contrary to direct models published in the literature, relative simplicity and ease of use is maintained in the model proposed in this Dissertation Thesis.

The requirement for modelling simplicity is the availability of fiber pull-out laws. Importance of fiber pull-out laws can be explained judging from the good agreement obtained between modelling and experimental validation test results. Thus the concept of assuming that the load bearing capacity of FRC structural element depends on fiber pull-out resistance is justified. Although there have been many studies in literature focusing on pull-out load-displacement relations of several types of fibers, a broad database of fiber pull-out laws for different fiber embedded lengths and inclination angles has not been available. It is significant to study the effect of fiber embedded length and inclination angle considering that the fibers are usually randomly oriented in FRC. In this study 3 most common types of commercially available steel fibers have been studied obtaining a database for 66 different configurations.

In Chapter 4 of this Dissertation Thesis numerical modelling was performed using latest versions of FEM software programs. For quasi-static loading the debonding of steel fiber/concrete matrix interface could be of too small time scale to be of practical interest (due to weak strength of the interface) therefore not many studies have been done on this subject. However, regarding to constant improvement of mix design of FRC, and increase of interface strength, the analysis of debond crack growth is significant. A 2-D axisymmetrical model was elaborated, which in combination with fracture mechanics concepts was used to calculate the rate of debond crack growth. Further in Chapter 4 a 3-D model was elaborated to model the complete pull-out of fiber. The novelty of 3-D model could be best described by its ability to take into account the shrinkage stresses and to include or neglect the interface strength.

Experimental validation of the proposed model for load bearing capacity of FRC structural elements was performed for FRC beams with reinforcement weight

fractions up to 300 kg/m^3 . This study thus can be highlighted as one of the few studies in literature focusing on such large fiber fractions in FRC.

Practical application of the Dissertation Thesis

At this point the use of FRC in many structural applications is significantly hindered due to lack of consistent structural design regulations. Since most of the currently available design recommendations use the inverse modelling approach performing approximations of standard experimental test results, the structural design of FRC can be considered as the adaption to available properties of experimentally tested material. The ability to perform the opposite, i.e., to determine the necessary mix design of FRC in order to suit for the given load and service conditions, is not attainable using the currently available structural design documents.

The model proposed in this Dissertation Thesis, on the other hand, provides the opportunity to predict the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements with reasonable degree of complexity. Since the pull-out laws of individual fibers are used as an input data in the proposed model, the structural designer is provided with the ability to calculate the necessary volume fraction and type of steel fibers to fulfill specific requirements of loading and service. This means that more optimized and economical design of FRC is possible using this model, which could be of high economical significance.

Large fiber fractions are essential for structural applications of FRC, however, in such case it is difficult to maintain workability of concrete mix and achieve uniform fiber distribution. In the four years of the doctoral studies a know-how was obtained for the mix design of FRC by testing over 100 different fiber and other concrete ingredient combinations. The mix design presented in this Dissertation Thesis has been selected as one of the best for application in civil engineering for its ability to maintain workability even at high fiber fractions.

The experimental pull-out tests performed as a part of this Dissertation Thesis provides large amount of useful information for development of similar models and for more detailed analysis of fiber shape for the manufacturers of fibers.

The use of numerical FEM models demonstrated in this Dissertation Thesis can also be considered as useful for practical application. The good agreement between numerical modelling and experimental pull-out results actually shows that these models can be used by structural designer, materials selector or materials scientist to evaluate the pull-out behaviour of the fiber and how the pull-out resistance depends on different parameters and properties of concrete matrix.

Results presented for defence of Dissertation Thesis

- Model for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements.
- Database of experimentally determined pull-out relations of three types of commercially available steel fibers with different embedded lengths and inclination angles.
- Numerical (FEM) models for modelling of fiber/matrix interface debond growth and complete fiber pull-out process.

Volume of the Dissertation Thesis

In this Dissertation Thesis following chapters are included: Abstract, Introduction, 1.Literature review, 2.Objective of study 3.Experimental fiber pull-out tests, 4.Numerical modelling of the fiber pull-out process, 5.Modelling of load bearing capacity of FRC beams, Conclusions, References, Appendix. Dissertation Thesis contains 157 pages, 97 figures, 7 tables, Reference list contains 94 sources.

List of relevant conferences

In the following, scientific conferences, where the author of this Dissertation Thesis has orally presented the results of this work, are listed.

1. MCM-2006 14th International Conference on Mechanics of Composite Materials, Jūrmala, Latvia, May 29 – June 2, 2006.
2. 48th RTU International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 12, 2007.
3. 49th RTU International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 13-15, 2008.
4. MCM-2008 15th International Conference on Mechanics of Composite Materials, Jūrmala, Latvia, May 26-30, 2008.
5. 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, October 28-30, 2008.
6. 17th International Conference on Composite Materials. ICCM-17. Edinburgh, United Kingdom, July 27-31, 2009.
7. 50th RTU International Scientific Conference, Riga, Latvia, October 16, 2009.

List of relevant publications

In the following, publications where main results of this Dissertation Thesis have been published, are listed.

1. Pupurs A., Krasņikovs A., Pakrašiņš L. Micro-mechanical stress-state analysis of fibre reinforced concrete (FRC), Scientific Proceedings of Riga Technical University (Architecture and Construction Science) – 7 (2006), pp.160.-171.
2. Pupurs A., Krasņikovs A. Tērauda šķiedru izraušanas spēka noteikšana fibrobetonos, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Transport and Engineering) – 24 (2007), pp.183.-190.
3. Pupurs A., Krasņikovs A., Kononova O., Šahmenko G. Non-linear post-cracking behaviour prediction method for high concentration steel fibre reinforced concrete (HCSFRC) beams, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Architecture and Construction Science) – 8 (2007), pp.60.-70.
4. Krasņikovs A., Kononova O., Pupurs A. Steel fiber reinforced concrete strength, Scientific Proceedings of Riga Technical University (Transport and Engineering) – 28 (2008), pp.142.-151.
5. Krasņikovs A., Lapsa V., Pupurs A. Latvian patent Nr. P-07-11 „Fibrobetona būvelementi“, (2007).
6. Eiduks M., Krasņikovs A., Lapsa V., Pupurs A. Latvian patent P-07-125 „Orientēta fibrobetona izgatavošanas paņēmiens un ierīce“, (2007).
7. Kononova O., Krasņikovs A., Pupurs A. High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Strength. Prediction and Experimental Investigation, Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, (2008), pp. 543-548.
8. Krasņikovs A., Pupurs A. High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Fracture. Fiber Pull-out Experimental Investigation, Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, (2008), pp.703-708.
9. Pupurs A., Varna J., Krasņikovs A. Energy release rate based fiber/matrix debond growth in fatigue. Part II: Debond growth analysis using Paris law, Mechanics of Advanced Materials and Structures, (2011), In Press.
10. Kononova O., Pupurs A., Krasņikovs A. Fiber concrete beam failure observed as rare phenomena, Journal of Vibroengineering – 10 (2008), pp. 497.-499.
11. Krasņikovs A., Kononova O., Pupurs A. Micromechanical Investigation of Steel Fiber Reinforced High-Performance Concrete Post-Cracking Behavior, Proceedings of International scientific conference Fiber Concrete 2009, Prague, Czech Republic, (2009), pp.110-124.

Structure of the Dissertation Thesis

Structure of the Dissertation Thesis is demonstrated in Fig.1. As it is illustrated in Fig.1. the first two main chapters of the Thesis are literature review and formulation of the objective of the study. The three main chapters describing the finding from the advanced tasks of the study are Chapters 3,4 and 5. The Thesis is summarized with the main conclusions of the study.

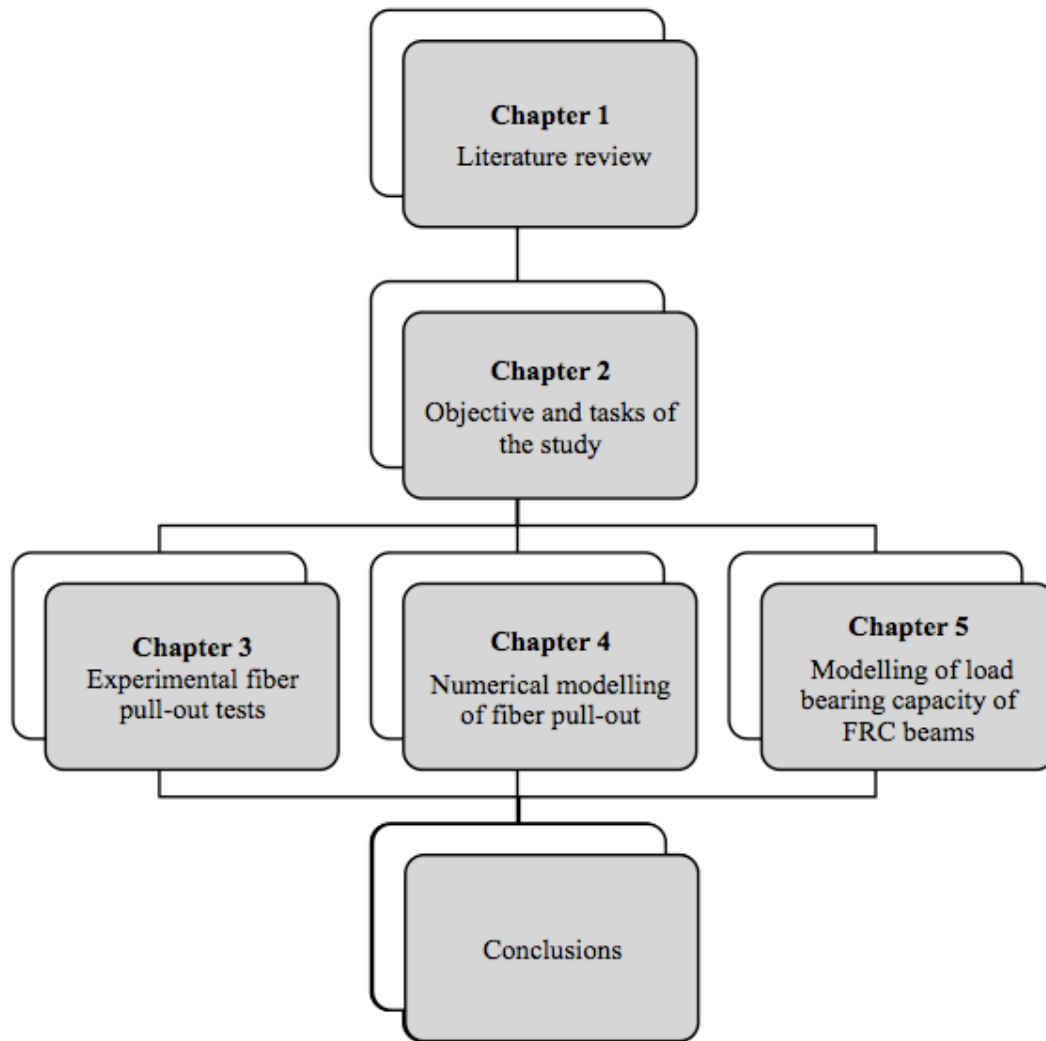


Fig.1. Structure of the Dissertation Thesis

CONTENTS OF THE DISSERTATION THESIS

As demonstrated in Fig.1 there are 5 Chapters in this Dissertation Thesis – **Chapter 1** is the literature review, in **Chapter 2** the objective and tasks of the study are formulated. The three main chapters of this Dissertation Thesis, where the tasks of the study have been performed, are Chapters 3, 4 and 5.

In **Chapter 3** of the Dissertation Thesis the first task of the study - the experimental single fiber pull-out tests - is described.

There are 3 geometry types of commercially available steel fibers that are mostly used in FRC: straight, hooked-end and undulated form fibers as shown in Fig.2.

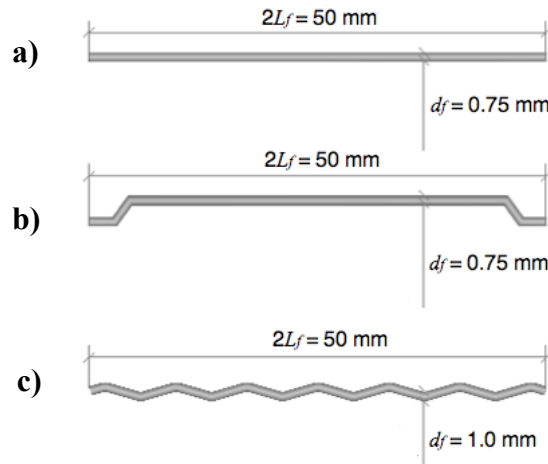


Fig. 2. Three common types of commercially available steel fibers: a) straight; b) hooked-end; c) undulated shape fibers

While aligned straight fibers in FRC resist the applied pull-out load only by means of the weak interface bonds and residual shrinkage stresses, the hooked-end and undulated shape fibers are expected to provide much higher resistance to pull-out load by means of mechanical anchorage. Mechanisms of pull-out for hooked-end and undulated form fibers are thus much more complicated than for straight fibers and those mechanisms typically involve plastic deformation of the fiber during the process.

Because of these differences between different fibers the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements such as beams plates, etc, will be highly dependent on the type and volume fraction of the fibers added to the concrete mix. This study aims to develop a model alternative to those using the inverse approach to predict the load bearing capacity and crack opening displacement in a FRC structural element by using the pull-out relations (laws) of individual fibers as the input data. To achieve this a detailed database of experimental pull-out laws is necessary to obtain. Regarding the chaotic orientation and distribution of fibers in FRC the effects of different embedded lengths as well as different orientation angles have to be evaluated. Several studies [3,4] have been published presenting experimental and modelling results for inclined fibers, however, the combined effect of embedded length and inclination angle has not yet been studied.

Therefore, in Chapter 3 of this Dissertation Thesis experimental pull-out tests have been performed for the three mentioned types of commercially available fibers for various configurations of fiber embedded lengths and inclination angles with

respect to applied pull-out load. It would have certainly been of great interest to analyze the fiber pull-out behaviour in various different types of concrete matrix, however, this study focuses only on investigation of the mentioned parameters. All experimental samples were thus made using the same mix design of concrete.

The configuration of the moulded specimen and its dimensions are given in Fig.3. In Fig.3 l_f shows the embedded length of the fiber (that will be subjected to pull-out) and α shows the inclination angle of the fiber with respect to the applied pull-out load direction.

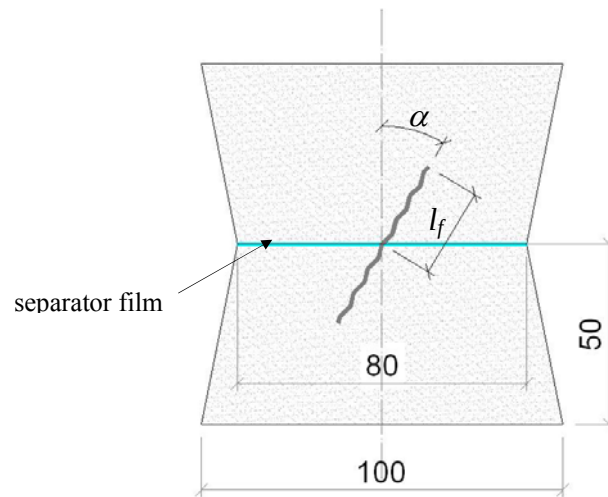


Fig.3. Configuration of a pull-out test specimen: l_f - embedded length, α - inclination angle

All single fiber pull-out experiments were carried out using tensile testing machine Zwick/Roell Z150, the pull-out load was measured by a ± 1 kN capacity load cell.

The pull-out displacement u_z was measured using a non-contact videoextensometer “Messphysik”.

The test speed for all specimens was set to 10 mm per minute. Each test was conducted until complete pull-out of the fiber had occurred (seldom the fiber fracture was also observed).

Altogether 66 different fiber configurations listed in Table 1 were manufactured and tested in this experimental part of the study. For each fiber configuration a number of 8 - 9 specimens were manufactured. The number of manufactured specimens for each case was so high because it was expected to encounter a high scatter in the test results. Since the objective of this study is to employ the experimentally measured pull-out laws in a larger scale model for predicting the load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC elements, fully representative pull-out relations (laws) are necessary as well as the statistical distribution for these laws.

As it is shown in Fig.3 the embedded length of fibers is defined as a distance from separator film to the nearest end of the fiber parallel with the fiber longitudinal axis. Straight fiber and hooked-end fiber diameters were equal to $d_f = 0.75$ mm, while undulated shape fibers were a little larger in diameter, i.e., $d_f = 1.0$ mm.

According to manufacturer's data sheet, the tensile strength for undulated shape fibers was 1100 N/mm^2 while for straight and hooked-end fibers the tensile strength was equal to 1160 N/mm^2 . Elastic modulus of all fiber types corresponds to $E_f = 210 \text{ GPa}$.

Table 1.

Pull-out test sample configurations and notation of samples

Name	Fiber type	α [°]	l_f [mm]	Name	Fiber type	α [°]	l_f [mm]
F1	straight	0	25	F34	straight	30	20
F2	hooked-end	0	25	F35	undulated	30	20
F3	undulated	0	25	F36	hooked-end	30	20
F4	straight	0	20	F37	straight	45	20
F5	hooked-end	0	20	F38	undulated	45	20
F6	undulated	0	20	F39	hooked-end	45	20
F7	straight	0	15	F40	straight	60	20
F8	hooked-end	0	15	F41	undulated	60	20
F9	undulated	0	15	F42	hooked-end	60	20
F10	straight	0	10	F43	straight	20	15
F11	hooked-end	0	10	F44	undulated	20	15
F12	undulated	0	10	F45	hooked-end	20	15
F13	straight	0	5	F46	straight	30	15
F14	hooked-end	0	5	F47	undulated	30	15
F15	undulated	0	5	F48	hooked-end	30	15
F16	straight	10	25	F49	straight	45	15
F17	hooked-end	10	25	F50	undulated	45	15
F18	undulated	10	25	F51	hooked-end	45	15
F19	straight	20	25	F52	straight	60	15
F20	hooked-end	20	25	F53	undulated	60	15
F21	undulated	20	25	F54	hooked-end	60	15
F22	straight	30	25	F55	straight	20	10
F23	hooked-end	30	25	F56	undulated	20	10
F24	undulated	30	25	F57	hooked-end	20	10
F25	straight	45	25	F58	straight	30	10
F26	hooked-end	45	25	F59	undulated	30	10
F27	undulated	45	25	F60	hooked-end	30	10
F28	straight	60	25	F61	straight	45	10
F29	hooked-end	60	25	F62	undulated	45	10
F30	undulated	60	25	F63	hooked-end	45	10
F31	straight	20	20	F64	straight	60	10
F32	undulated	20	20	F65	undulated	60	10
F33	hooked-end	20	20	F66	hooked-end	60	10

Average pull-out curves for the three studied fiber types with fiber embedded length $l_f = 20 \text{ mm}$ and inclination angle $\alpha = 0^\circ$ are presented in Fig.4. As it can be seen in Fig.4, undulated shape steel fibers F6 exhibit the highest pull-out force F_z and

the highest pull-out resistance throughout the whole pull-out process. The maximal pull-out load for hooked-end fibers F5 is, according to the obtained results, approximately 2 times lower than for undulated shape fibers F6. Compared to undulated and hooked-end fibers, that provide additional mechanical anchorage with concrete, the straight aligned fibers F4 showed the smallest maximal pull-out load values and the smallest resistance throughout the whole process. According to Fig.4 the peak load for straight fibers F4 is more than two times smaller than for hooked-end fibers F5. The much higher resistance for undulated and hooked-end fibers is achieved through straightening of the fiber through the channel during the pull-out process. Straightening of fibers is typically accompanied by significant increase of local fiber and concrete surface friction.

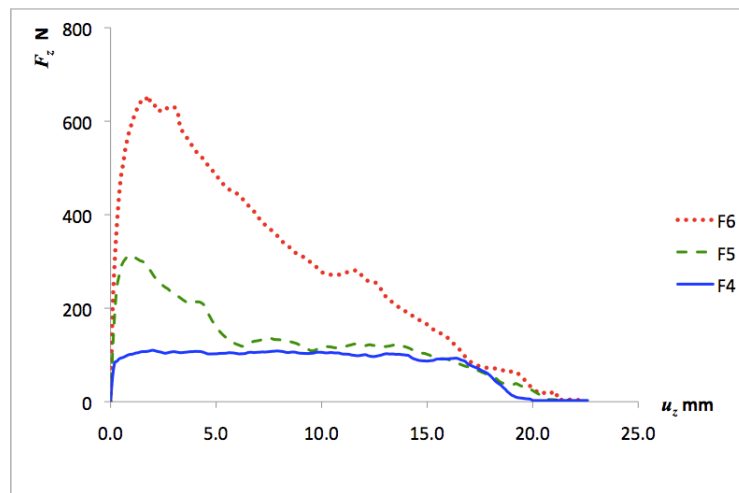


Fig.4. Average pull-out curves for three fiber types: F4 – straight; F5 – hooked-end; F6 – undulated. For all fibers $\alpha = 0^\circ$

Figures 5, 6 and 7 show the experimental results for straight shape, hooked-end and undulated shape fibers respectively with different embedded lengths l_f .

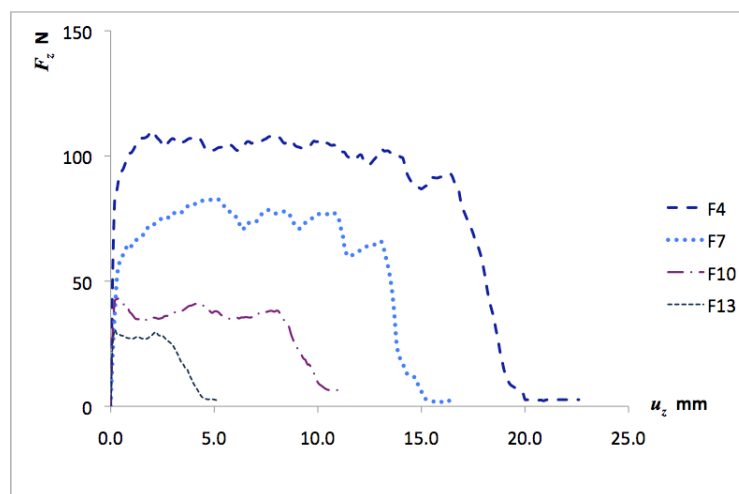


Fig.5. Average pull-out curves for straight fibers: F4 ($l_f = 20$ mm) F7 ($l_f = 15$ mm); F10 ($l_f = 10$ mm); F13 ($l_f = 5$ mm)

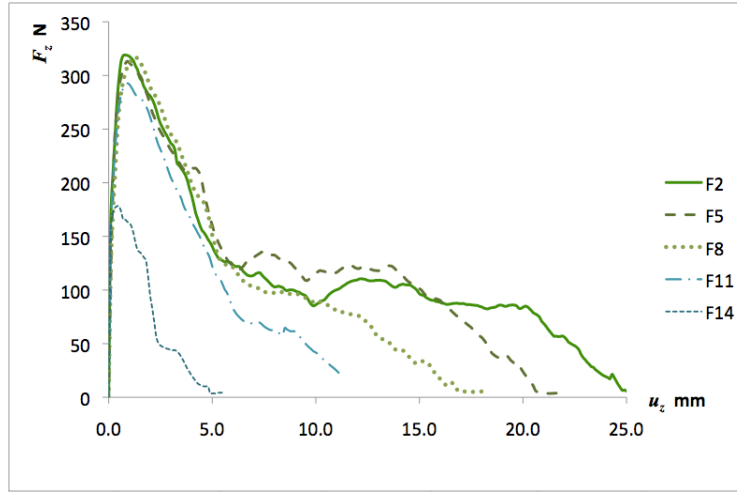


Fig.6. Average pull-out curves for hooked-end fibers: F2 ($l_f = 25$ mm); F5 ($l_f = 20$ mm); F8 ($l_f = 15$ mm); F11 ($l_f = 10$ mm); F14 ($l_f = 5$ mm)

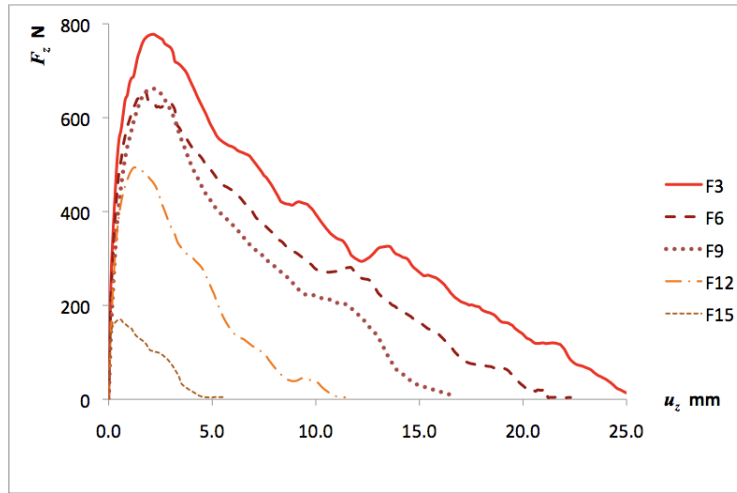


Fig.7. Average pull-out curves for undulated fibers: F3 ($l_f = 25$ mm); F6 ($l_f = 20$ mm); F9 ($l_f = 15$ mm); F10 ($l_f = 10$ mm); F15 ($l_f = 5$ mm)

As it can be seen from Fig.5 for straight fibers the influence of fiber embedded length l_f is significant. The general observation is that the maximal pull-out load is higher for longer embedded lengths and there is a gradual decrease of the maximal pull-out load for the respective shorter embedded lengths. The results obtained and demonstrated in Fig.5 show a rather small decrease of the pull-out load up until the last few millimetres of the length remaining in the concrete matrix when a steep decrease of load occurs concluding the complete pull-out of the fiber. This phenomenon could be explained by an increase in local friction resistance. Similar plateau regions can be found from pull-out test results of aligned fibers in literature [4,5].

The most notable difference of hooked-end fiber pull-out curves presented in Fig.6 from pull-out curves of straight fibers is the distinct first peak load (at displacements approximately $u_z = 0.8$ mm on average) after which a sudden decrease of the pull-out load occurs. Generally analyzing the pull-out curves presented in Fig.6, an important notification is that the value of this peak load does not depend on the

embedded length with the only exception being the smallest embedded length $l_f = 5$ mm.

As it was presented earlier from the comparison performed in Fig.4, the undulated shape fibers provide the highest pull-out resistance from all three fiber types that were studied. During the pull-out of undulated fiber straightening and bending of fiber occurs simultaneously several times, depending on the shape and number of the “waves”. From the results presented in Fig.7 it is evident that the highest pull-out load corresponds to highest fiber embedded length, i.e., $l_f = 25$ mm. However, if we consider and compare the pull-out curves for fibers with embedded lengths $l_f = 20$ mm and $l_f = 15$ mm, the peak pull-out load in both cases is the same. This leads to conclude, that number of embedded hooks is crucial for pull-out resistance.

The significance of both fiber embedded length l_f and the inclination angle α can be well distinguished from results presented in Fig. 8, 9 and 10. The pull-out energy U_{sum} shows the amount of work necessary to pull-out the fiber and basically it can be interpreted as the area under the pull-out curve for the complete pull-out process. The results summarized in Figs. 8, 9 and 10 also show the standard deviation for the tested samples.

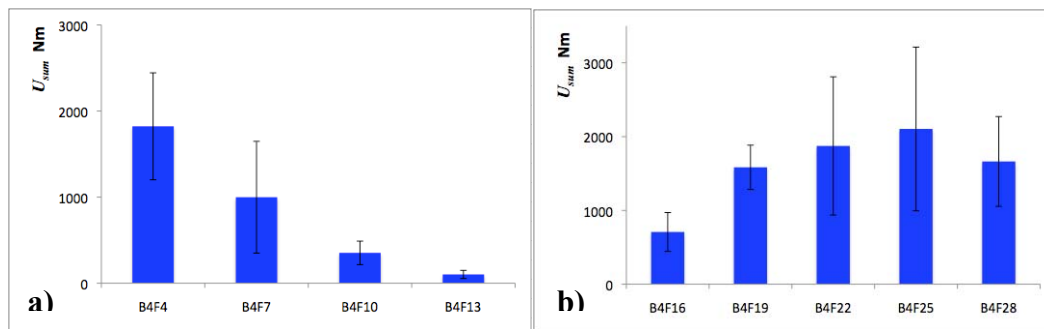


Fig.8. Pull-out energy U_{sum} for straight fibers. Results shown for: a) different embedded lengths; b) different inclination angles (see Table 1)

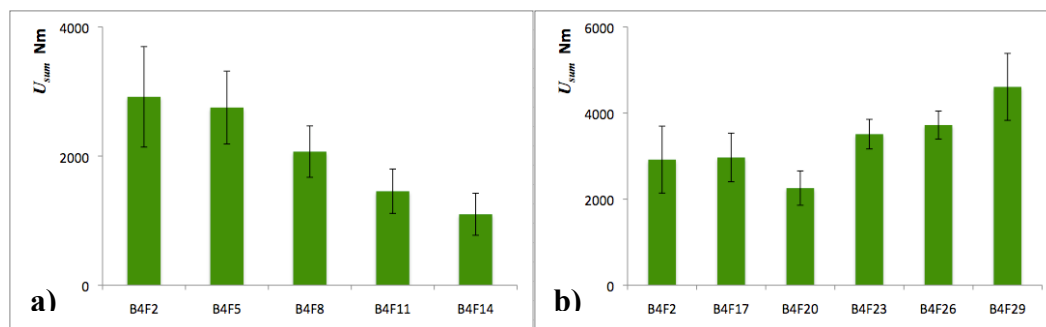


Fig.9. Pull-out energy U_{sum} for hooked-end fibers. Results shown for: a) different embedded lengths; b) different inclination angles (see Table 1)

The results summarized in Figs. 8, 9 and 10 generally show that hooked-end and undulated shape fibers provide much higher pull-out energy than straight shape fibers.

Furthermore, as demonstrated by the results, the scatter between tested samples was much lower for hooked-end and undulated shape fibers compared to straight fibers.

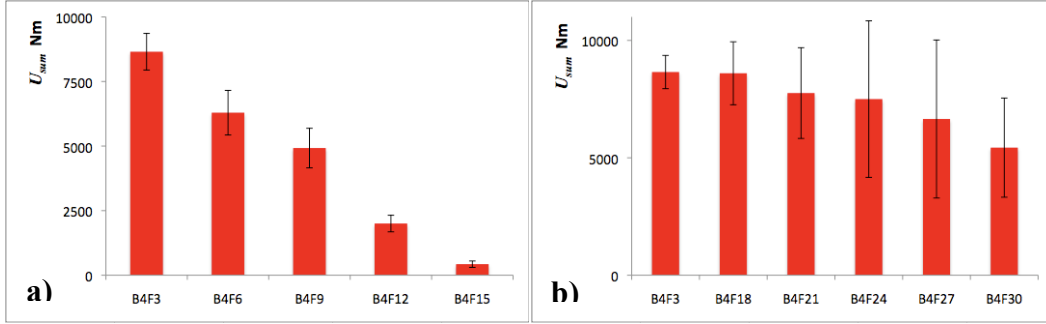


Fig.10. Pull-out energy U_{sum} for undulated shape fibers. Results shown for: a) different embedded lengths; b) different inclination angles (see Table 1)

The pull-out curves for all relevant configurations have been presented and all the micromechanical events during the pull-out have been analyzed. The statistical deviation for all configurations were analyzed by comparing the total pull-out energy U_{sum} and the maximal pull-out load F_{max} .

Undulated shape fibers were concluded to have the highest resistance to pull-out since the values of U_{sum} and F_{max} were much higher than for hooked-end fibers and, understandably, higher than for the straight fibers.

However, hooked-end fibers were best in terms of combining high pull-out resistance with uniformity of test results as the standard deviation of U_{sum} and F_{max} values was the smallest.

Straight fibers were proved to have low pull-out resistance and high scatter between the measured entities.

In **Chapter 4** of this Dissertation Thesis numerical modelling of fiber pull-out is described.

Numerical FEM modelling of fiber pull-out process was performed for single straight cylindrical steel fiber that is aligned with the direction of the applied pull-out displacement ($\alpha = 0^\circ$). Numerical modelling was performed using FEM software ANSYS [1].

While micro damage initiation and propagation within a system consisting of a steel fiber embedded in a concrete matrix block is difficult to be measured experimentally, FEM is an attractive and adequate tool to analyze it. Although there have been numerous analytical approaches demonstrated [6-8], the most of the analytical methods published in the literature still have struggled to provide a parameter-independent model for this problem.

Furthermore, since a short fiber reinforced composite is under consideration, a feasible analytical solution might not even be achievable because of complex stress distributions, overlapping of stress states, etc.

The objective of Chapter 4 is to provide a detailed micromechanical analysis of the pull-out process of straight fiber and to analyze the significance of various parameters such as constituent material elastic properties, fiber geometry and others on the pull-out resistance of the fiber. Since it was already described before that the mechanical behaviour and load bearing capacity of a FRC structural element directly depends on the pull-out characteristics of the individual fiber, the parametric analysis

presented in Chapter 4 is aimed to provide a tool for materials scientist, engineer or materials selector to improve or achieve desirable mechanical properties of the designed structure.

It was also described in the literature review section of this Dissertation Thesis that new additives are nowadays widely used in FRC mix designs that especially suit for better adhesion with the reinforcement fibers. The additives certainly affect both the fiber/matrix interface properties as well as the elastic properties of the concrete itself. So far the most of the studies have not discussed the general significance of these mentioned parameters.

Thus a detailed parametric analysis is performed in Chapter 4 and the modelling parameters for particular cases are found and presented from the best fit with experimental results determined in Chapter 3. Generally, it means that experimentally measured fiber pull-out law (load vs. displacement) can be also used as the input data in a numerical model in order to calculate several micromechanical parameters and thus characterize the interface properties (for example, critical strain energy release rate G_c). Certainly, the calculated interface properties can then be employed to analyze other, more complex problems with different boundary conditions.

First, the interface debonding stage of fiber pull-out was modelled using a 2-D axisymmetric model. The potential crack propagation modes (Mode I and II) were analyzed. It was evaluated how different parameters, such as fiber and matrix elastic properties, fiber geometry and the shrinkage of concrete affect the propagation of debond crack. The propagation of crack is analyzed by linear elastic fracture mechanics approach by calculating the energy release rate G for different interface debond lengths. The changes of energy release rate G with the debond length were comprised in simple mathematical expressions that allows to perform debond crack growth simulations and, more importantly, to derive the fiber pull-out law in the debonding stage.

Fig.11 demonstrates numerical modelling results in form of energy release rate as a function of normalized debond length $l_{dn} = l_d / r_f$.

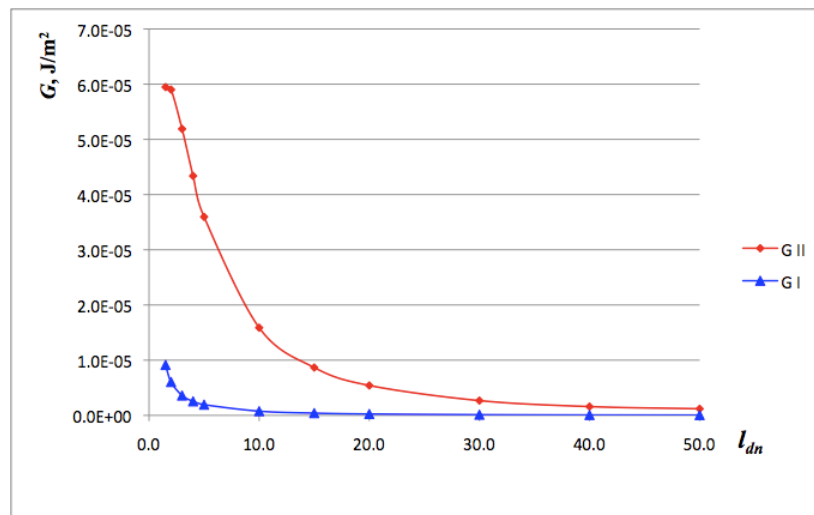


Fig.11. Mode I and Mode II energy release rate (G_I and G_{II} respectively) for the reference case presented as a function of normalized debond length $l_{dn} = l_d / r_f$.

$$u_z = 0.005 \text{ mm}$$

It can be seen in Fig.11 that Mode II crack propagation dominates although the contribution of Mode I is significant for short debond lengths. It was shown that the relation between energy release rate can be approximated by simple exponential function. Thus debond crack growth simulations can be performed. In Fig.12 debond growth simulations are shown for different interfaces with different values of critical strain energy release rate G_{IIc} .

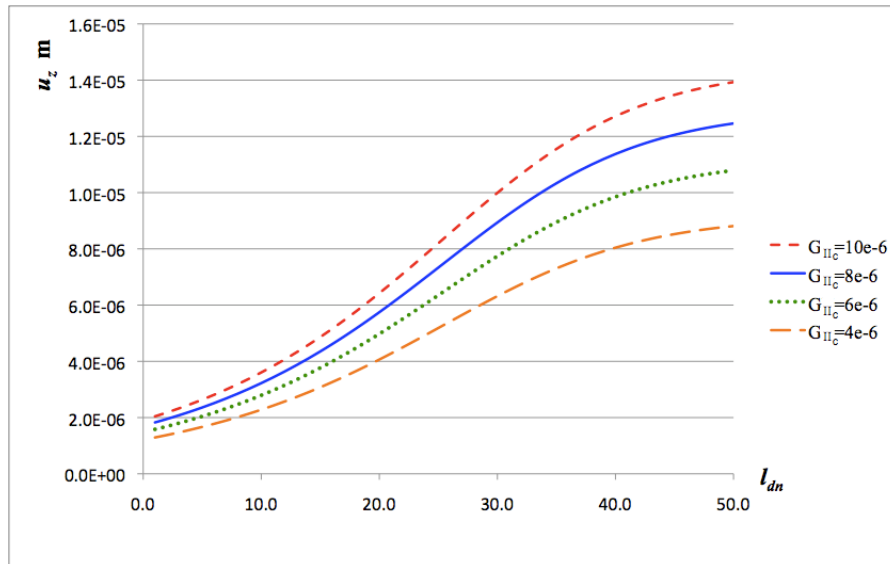


Fig.12. Debond growth simulations for various cases. G_{IIc} values in calculation examples given in J/m^2

It was also shown that the pull-out load depends both on the applied pull-out displacement u_z and on the length of debond l_{dn} . Thus fiber pull-out law was derived using simple approximation of relations between the load F_z , displacement u_z and the debond length l_{dn} .

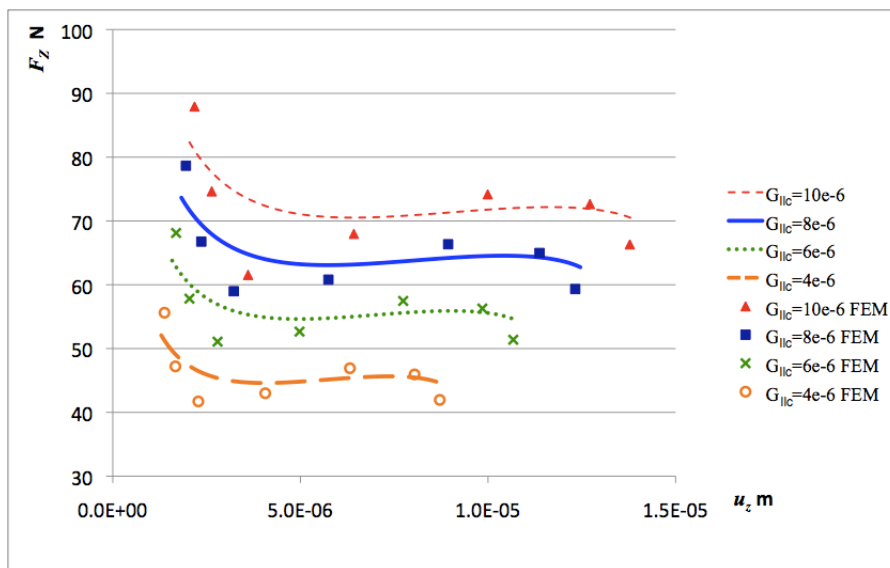


Fig.13. Modelled fiber pull-out law curves for different cases with FEM validation. G_{IIc} values in calculation examples given in J/m^2

The modelled pull-out laws for different cases of interface properties (different values of G_{Ic}) are presented and validated by independent FEM results in Fig.13.

Further in Chapter 4, modelling of the complete fiber pull-out was performed using a 3-D FEM model. Two cases were subdivided: initially debonded interface, where it is assumed that there is no bonding between fiber and matrix, and initially bonded interface.

Regarding the weak interface bond strength between the steel fiber and concrete, it might be applicable to neglect it in many cases. Fig.14 shows the stress distribution in various stages of the pull-out process for the case of initially debonded interface.

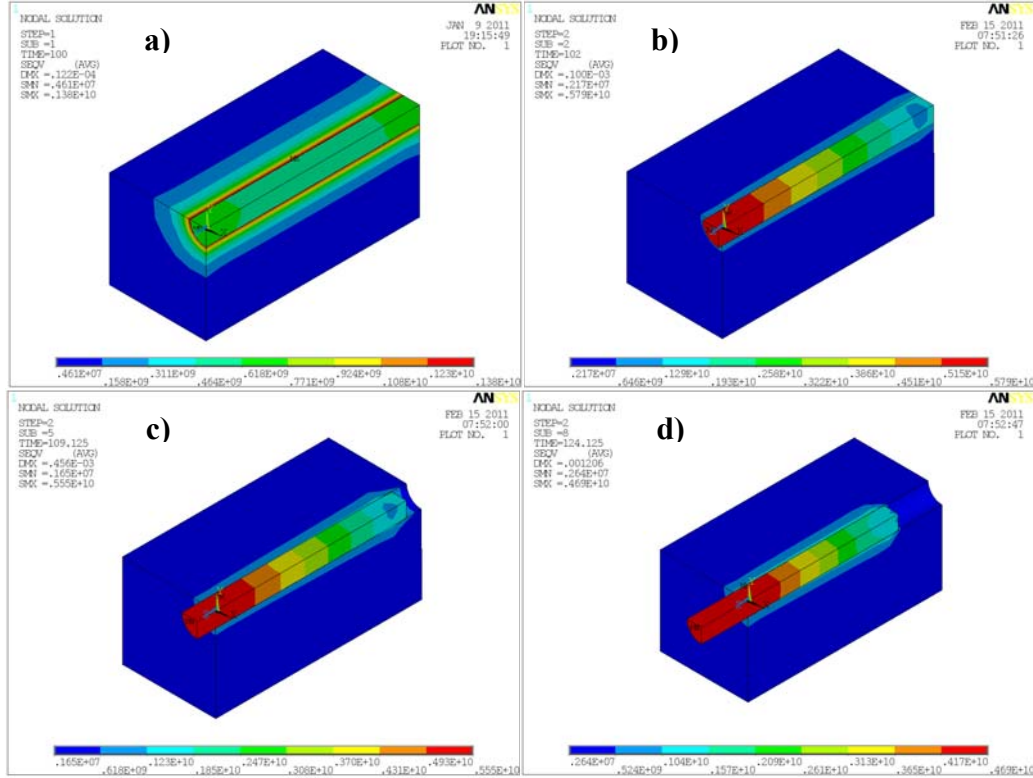


Fig.14. Equivalent (von Mises) stress distribution during various stages of the fiber pull-out for the initially debonded interface case: a) residual stresses before beginning of pull-out; b), c), d) fiber pull-out sliding with friction resistance

Parametric analysis of different geometrical and mechanical parameters listed in Table 2 was performed for the case of initially debonded interface.

Modelling results for initially debonded interface case for different fiber embedded lengths l_f are shown in Fig.15. It can be concluded that the pull-out resistance (F_z) is linearly dependent on the fiber embedded length l_f and the load is higher for longer embedded lengths. According to Fig.15 the initial response before the peak load is reached follows the same curve for all cases. The peak load for longer embedded lengths is thus reached at larger displacements u_z than for shorter embedded lengths.

After reaching the peak load, the values of pull-out load decrease almost linearly in all cases shown in Fig.15 until complete pull-out of fiber.

Numerical values of modelling results for F_z in this example are too high to be realistic. However, the objective of this section is to perform parametric analysis and discuss the trends and significance of parameters.

Table 2.

Parametric analysis tasks for the case of initially debonded interface

Case name:	E_f	E_m	r_f	r_m	p_c	l_f	μ
	[GPa]	[GPa]	[mm]	[-]	[MPa]	[mm]	[-]
Ref.	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.3
Task 2	210	30	0.375	0.360	776.0	10	0.3
Task 3	210	30	0.375	0.360	777.5	15	0.3
Task 4	210	30	0.375	0.360	778.3	20	0.3
Task 5	210	30	0.375	0.365	515.8	5	0.3
Task 6	210	30	0.375	0.370	255.4	5	0.3
Task 7	210	30	0.380	0.3648	772.7	5	0.3
Task 8	210	30	0.400	0.384	767.9	5	0.3
Task 9	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.2
Task 10	210	30	0.375	0.360	772.7	5	0.1
Task 11	220	30	0.375	0.360	774.6	5	0.3
Task 12	200	30	0.375	0.360	770.7	5	0.3

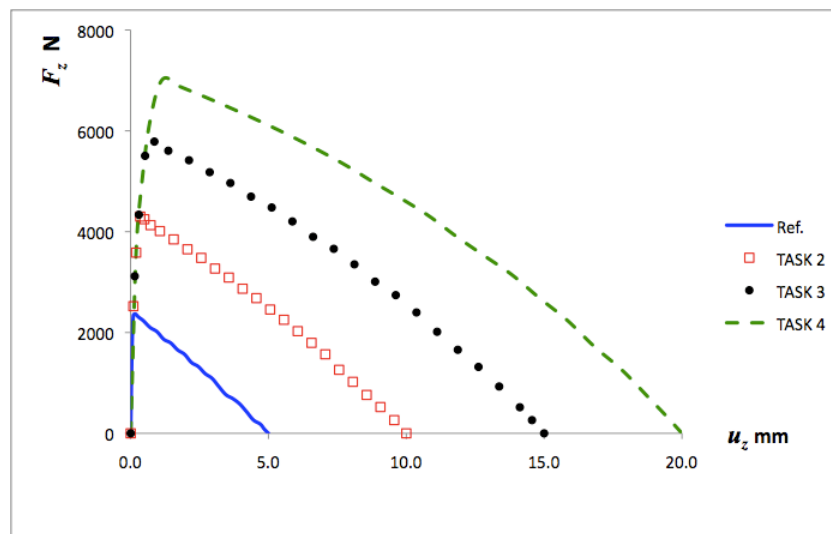


Fig.15. FEM modelling results showing significance of fiber embedded length l_f .
Tasks according to Table 2.

Realizing that the bonding between steel fiber and concrete matrix is weak, the assumption of initially debonded interface may be applicable for most cases. On the other hand, an ongoing development and improvement of concrete mix designs such as, for example, inclusion of micro and nano-scale additives allows obtaining interfaces with much better properties than for conventional concrete. Both of these cases therefore could be interesting from point of view of practical application.

Thus, modelling of fiber pull-out for initially bonded case was also performed. Parametric analysis revealing the significance of different geometrical and mechanical

parameters was performed as listed in Table 3. FEM modelling was conveniently performed in ANSYS [1] by modifying the previously used model for the initially debonded case by including cohesive zone material and defining its properties.

Table 3.

Parametric analysis tasks for the initially bonded interface									
Case name:	E_f	E_m	r_f	r_m	p_c	l_f	$\tau_{\max}$	u_t^c	μ
	[GPa]	[GPa]	[mm]	[-]	[MPa]	[mm]	[Pa]	[mm]	[-]
Ref.	210	30	0.375	0.360	772.7	5	5e9	0.3	0.3
Task 13	210	30	0.375	0.360	772.7	5	2e9	0.3	0.3
Task 14	210	30	0.375	0.365	515.8	5	2e9	0.3	0.3
Task 15	210	30	0.375	0.365	515.8	5	1e9	0.3	0.3
Task 16	210	30	0.375	0.365	515.8	5	1e9	0.25	0.3

Fig.16 demonstrates the results from the parametric analysis showing different pull-out curves for different cases.

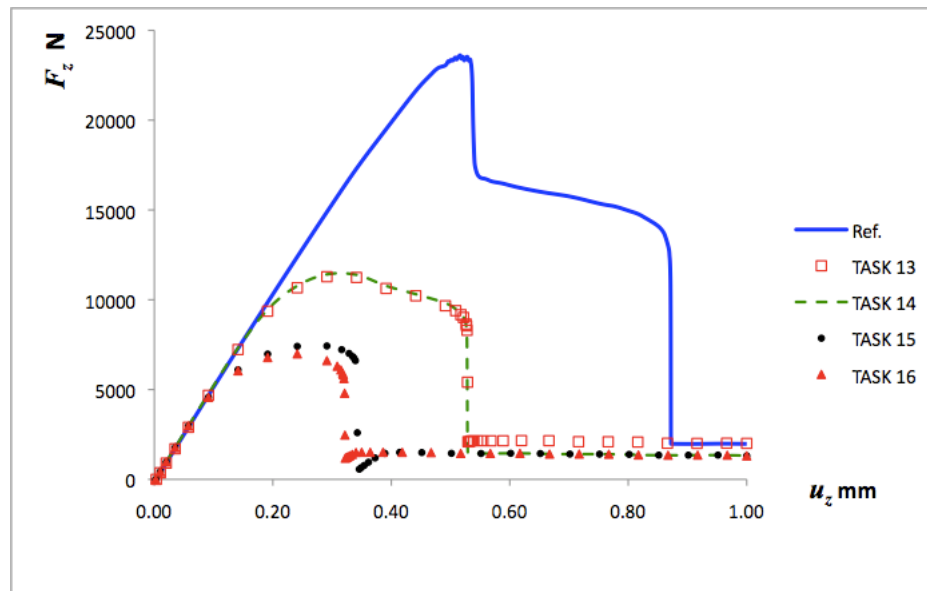


Fig.16. FEM modelling results showing significance of different parameters according to Table 3

Since it was found out that after completion of debonding the pull-out resistance is exactly the same as for the case of initially debonded interface, the modelling results are presented for displacement u_z range between 0 and 1 mm.

As it is shown in Fig.16 initial response to the applied pull-out load in all tasks is linear since the interface is bonded. The non-linear behaviour continues until critical tangential fracture energy G_{IIC} is reached. Then the interface debonding starts and the reaction force F_z will decrease due to initiation and further propagation of debond crack.

Finally, from the best fit with the experimental pull-out results the mechanical parameters were found for the particular cases.

Best fit between experimental data and the two numerical models (initially debonded and initially bonded interface) is demonstrated in Fig.17.

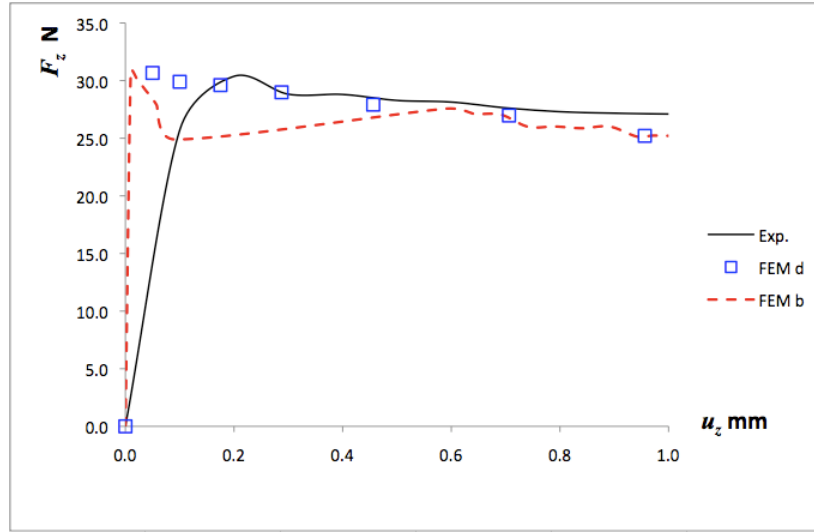


Fig.17. FEM modelling results using both initially debonded (FEM d) and bonded (FEM b) interface models, in comparison with the experimental data (Exp.) for $l_f = 5$ mm (configuration B4F13 in Table 1)

Although a good agreement has been obtained in Fig.17, a better agreement between modelling and experimental results could be obtained by accounting for the changes in the friction coefficient μ and using it as a function of pull-out length. Concerning the agreement between experimental and initially bonded case modelling results one can note that no sharp peak is present in averaged experimental curves thus giving rise to bad agreement in the initial part of pull-out law. Since no distinct peak is evident in the initial part of experimental curve it can be concluded that the interface can be considered as initially debonded.

In general, the numerical models proposed in Chapter 4 were presented as a convenient modelling and analysis tool for the engineer. The models can be useful either to select materials to achieve desirable fiber resistance and thus desirable FRC post-cracking behavior or to characterize interface properties for a given system, for which experimental measurements of load-displacement are available.

In the present work, the numerical modelling of pull-out was performed only for straight and aligned fibers mainly due to practical reasons. Aligned fiber pull-out can be conveniently studied as a 2-D axisymmetric problem and the parametric study results can be analysed in a straightforward way. Pull-out of an inclined fiber, on the other hand, has to be a 3-D analysis because the axisymmetry is no longer valid and, therefore, more computer power must be involved in order to obtain FEM solution. Including bending and straightening of the inclined, hooked-end and undulated shape fibers is related to plastic deformations and significantly more computer power is required for solution. In [9] a 3-D numerical (FEM) modelling of pull-out was performed for aligned hooked-end fiber by using interface elements to account for debonding and material plasticity to account for fiber straightening and concrete matrix compression. Symmetry conditions were used in order to reduce the size of the model. Notably, experimental results of straight fiber pull-out were used to define the

properties of the interface. Thus it can be confirmed that the results of extended parametric analysis performed in this study can contribute as an input for more complicated models. Although results in [9] seem very interesting, they were specifically obtained only for a few configurations, therefore the authors in [9] still suggest a simpler 2-D modelling as an operating tool for parametric evaluation in order to save calculation time.

Nevertheless, because the personal computer power still keeps increasing, modelling of pull-out of complex shape fibers can soon be expected to become feasible. Then including effects of inclination of fiber and matrix spalling should not also be troublesome.

In **Chapter 5** of this Dissertation Thesis the results from experimental pull-out tests obtained in Chapter 3 were incorporated in modelling of load bearing capacity of FRC structural elements.

The objective Chapter 5 is to elaborate modelling tool for calculating and predicting the load bearing capacity of FRC structural beams subjected to bending loads. In the literature review section (Chapter 1) the existing models were reviewed and analyzed. As it was concluded there, the most of the existing models are based on the inverse approach, meaning that constitutive laws in form of a stress-strain ($\sigma - \varepsilon$) or stress-crack width ($\sigma - w$) relations are determined from experimental tests of FRC elements using linear or multi-linear approximation. Exactly the same approach of determination of load bearing capacity of FRC elements is used in previously available as well as in recently proposed design regulations and recommendations [10-16] which are issued together with instructions for experimental specimen dimensions, suggested sample preparation and testing methodology. The principle of the constitutive laws used in regulations is based on linear, bilinear or multi-linear relations that are used for specific ranges of strains ε or crack widths w . Certain values of corresponding stresses σ are then defined in the intersections of these linear regions. Due to statistical distribution of experimentally tested samples, the stresses are multiplied by several safety factors k_i , where $k_i < 1$. Thus the flexural strength values for structural design are determined. When a $\sigma - \varepsilon$ or $\sigma - w$ relation is available from the tests, it has to be readjusted according to the requirements of the linear and multi-linear models, depending on the requirements of recommendations being used. Fitting the values of experimental curve with a multi-linear relations is not always feasible and often the fitting procedure is not straightforward and comprehensible. Therefore, large differences of flexural strengths can be obtained from seemingly similar curves.

The safety factors k_i used in recommendations are often rather low and specified in form of a numerical constant rather than being a dependant function on amount and type of fibers used in FRC. The overall use of design recommendations and regulations is, of course, gaining more widespread use, however, many aspects concerning determination of design strength are questionable. Thus, direct modelling approaches may be attractive as alternative to often not applicable inverse methods.

Unfortunately, the direct approaches that have been presented in literature [17] have always been associated with many parameters that are also unknown unless determined experimentally.

In order to prevent the necessity to perform experimental measurements along with the structural design, a large database of systematically structured parameter values and relations is necessary. In the present work load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC beams are modelled using the database of experimental

pull-out test results that were performed and summarized in Chapter 3. The general principle of the model proposed in Chapter 5 of this Dissertation Thesis is that the pull-out laws of individual fibers are applied in order to calculate the transferred load through the crack. The number of fibers in cross section is calculated through the given amount of fibers in the concrete mix. A random orientation angle is determined for each fiber and then the appropriate pull-out law for that specific inclination angle are used for calculations of the load that is transferred through the crack.

It has been shown by this study and numerous previous research papers discussed in the literature review section that, as soon as micro cracks appear in the structural FRC element, the fiber bridging mechanism activates instantly thus resisting the further crack growth. Therefore, the load bearing capacity of any structural FRC element directly depends on fiber capability to resist the pull-out loads. For structural beams and plates made from homogeneous isotropic materials subjected to bending loads the crack localization will most often occur at the cross-section where the highest bending moment is acting. For FRC beams or plates, however, the localization of a crack depends both on the bending moment and also on the number of fibers in each cross-section. Notched beam specimens are therefore often used in order to initiate the crack at a desired cross-section so that representative, consistent values of flexural strength and other parameters can be obtained. Fig.18 schematically shows the notched beam specimen subjected to 4 point bending.

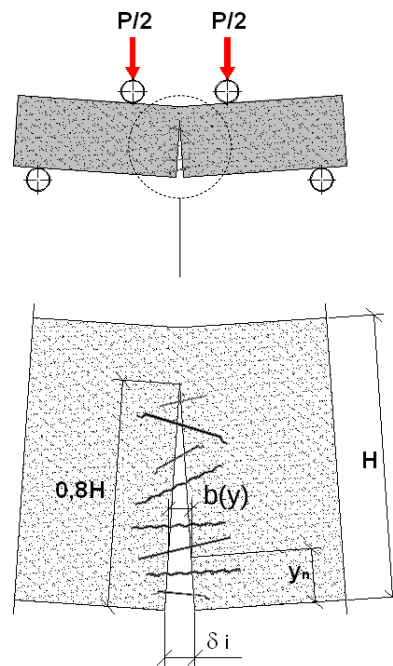


Fig.18. Schematic representation of FRC beam subjected to 4 point bending. Lower part of figure shows the maximal crack opening δ and local opening of crack $b(y)$

In the model proposed in this Dissertation Thesis it is assumed that the crack height is always equal to $0.8H$, where H is the height of the beam specimen.

After the micro-cracks have formed in the tensile zone of FRC element, the further increase of applied load eventually leads to crack localization at the critical cross-section. The load bearing capacity of a FRC element will directly depend on the type, configuration (shortest embedded length, inclination angle) and number of fibers bridging this crack. According to the scheme shown in Fig.18 the local crack opening

displacement $b(y)$ can be found from simple geometrical relations, if the maximal crack opening displacement δ_i is known.

The objective of Chapter 3 was to determine the pull-out laws for these different possible configurations of fibers so that these effects could be included in the model described in Chapter 5. Thus, the load bridged across any value of the local crack opening displacement $b(y)$ can be found, if number, embedded length and the inclination angle of the fibers at this location is known. If the load that is bridged across the crack is calculated, then the relation between the applied external load P and the maximal crack opening displacement δ_i can be found from the schemes shown in Figs.18 and 19.

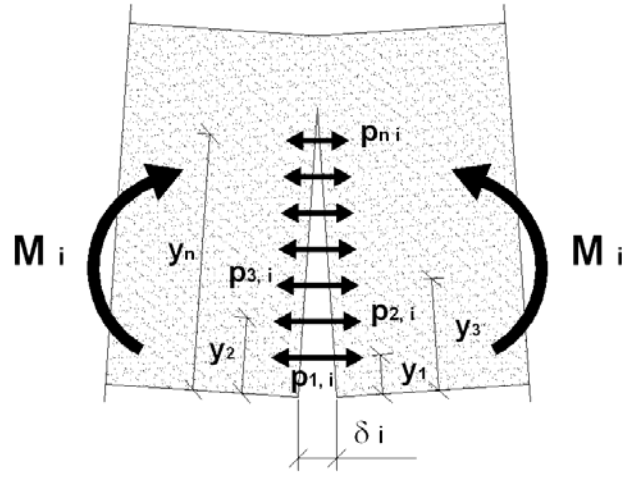


Fig.19. Representation of relation between maximal crack opening displacement δ_i , local pull-out force $p_{n,i}$ and external bending moment M_i

Regarding the difficulties involved in obtaining reasonable analytical and numerical relations, a direct application of experimentally obtained pull-out relations, if available, is probably the best alternative for modelling. The discussion given above has emphasized the motivation and significant advantages of using the experimental pull-out test results as a model input in order to obtain good modelling accuracy.

Modelling results showing the relation between the applied load P and the maximal crack opening displacement δ_i for three different FRC beams with straight, hooked-end or undulated shape fiber reinforcement respectively, are shown in Fig.20.

First of all, it can be seen that the model gives realistic prediction as compared with experimentally obtained curves. It can be seen that maximal load bearing capacity (P) is achieved at small crack opening displacement δ values. As the crack opening displacement increases, the load bearing capacity of FRC beam slowly decreases. The modelling results are in accordance with the expectations, since individual fiber pull-out laws were used as the input data. Although in Chapter 3 it was clearly proved that undulated shape fibers have the highest pull-out resistance, it is important to remember that diameter is larger for these fibers. Therefore, for the same weight fraction of fibers (as in Fig.20 $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$), the number of hooked-end fibers will be larger. This is an important factor to consider, when structural design of FRC structures is performed. For obtaining an optimal reinforcement solution for a FRC structure, the model presented here is highly significant.

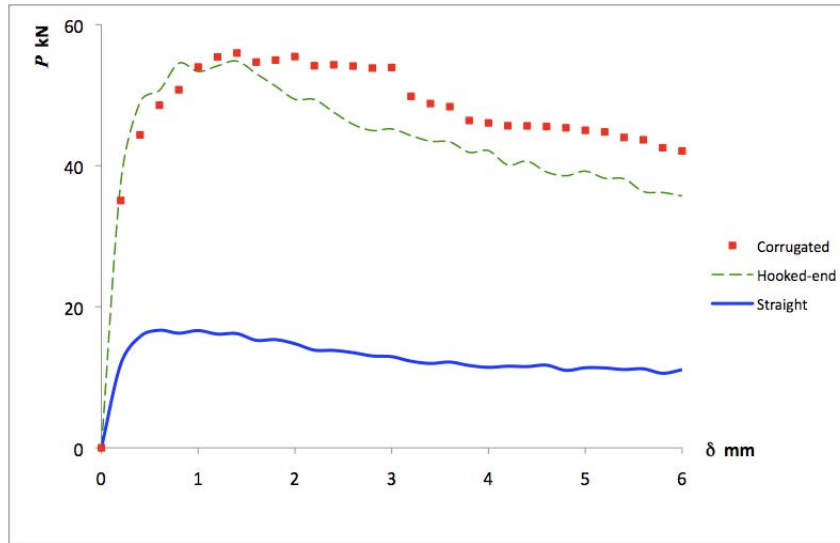


Fig.20. Modelling results of load bearing capacity of FRC beams with straight, hooked-end or undulated shape fibers. In all cases fiber weight fraction $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$

The model proposed and described in this section was validated with experimental tests. FRC beams with dimensions $150 \times 150 \times 600$ mm were manufactured and tested in 4 point bending scheme (see Fig.21). A 2 mm wide notch of 20 mm depth was cut in the middle of the span of the beam. The purpose of the notch was to initiate one major crack in the zone of the maximal bending moment in order to provide circumstances for reasonable comparison with the previously described model. Especially selected mix design (combination of ingredients) was used for manufacturing the samples. The main objective was to use the same concrete matrix but with different fiber fractions in the range between $100 - 300 \text{ kg/m}^3$. The same mix was used also in experimental pull-out tests in Chapter 3 of this Dissertation Thesis.



Fig.21. Experimental FRC beam test in 4 point bending load scheme

Comparison between modelling results and experimental tests is shown in Fig.22. Results for FRC beams with undulated shape fiber reinforcement are given as an example.

As it was concluded from comparison, the presented model for prediction of load bearing capacity of FRC beams gives good results despite the general simplicity of the modelling procedure. The character of modelling and experimental curves is in excellent agreement meaning that the principle of using fiber pull-out laws for a larger scale model has proved to be very efficient. This proves once again the importance of pull-out resistance of individual fibers on load bearing capacity and post-cracking behaviour of FRC structural elements.

The common negative observation from the compared results is that the agreement between modelling and experimental results decreases with increase of the fiber weight fraction in the concrete. There are several factors responsible for this disagreement, which are characteristic for higher fiber fractions. For instance, non-uniform distribution of fibers, fiber segregation, multiple fiber interaction that causes stress concentration and, thus, an intensive spalling of the matrix and similar factors that have not been accounted for in the proposed model.

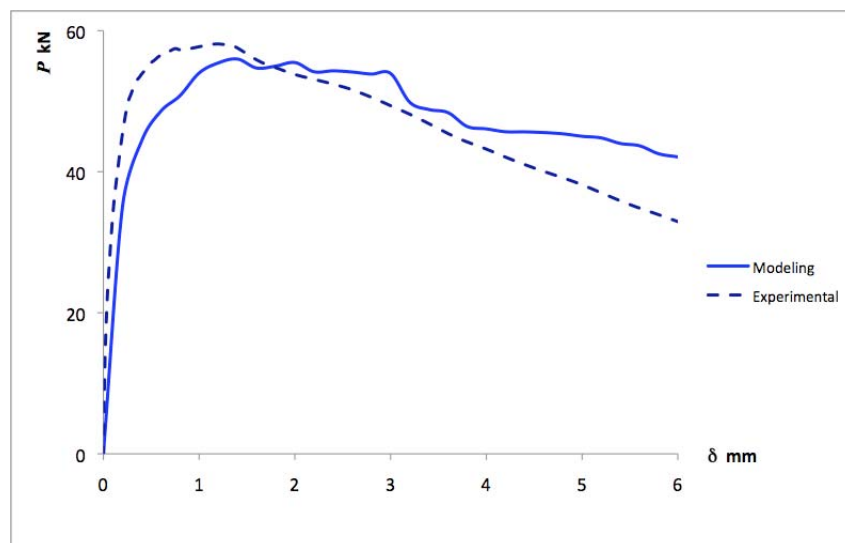


Fig.22. Experimental and modelling results for FRC beams reinforced with undulated shape fibers. Fiber weight fraction $w_f = 150 \text{ kg/m}^3$

The general conclusion from macro-scale modelling results given in Chapter 5 of this Dissertation Thesis is that character-wise the agreement with experimental results is very good. The agreement in character of the modelling and experimental curves confirms that the direct modelling approach by using micro-scale experimentally obtained pull-out relations is reasonable. The moderate disagreement in numerical values can have various reasons. Judging from modelling results the agreement with experimental data depends on fiber fraction in the mix. According to the results a better agreement corresponds to smaller fiber concentrations. The possible reason for

deviation from experimental results could also be fiber orientation. A FRC mix with large fiber concentrations does not necessarily follow random distribution across the volume and random distribution of orientation angles, as it was assumed in the modelling procedure.

The modelling assumptions such as straight crack planes and constant crack height equal to $0.8H$ should also be revised in order to correspond better with the real conditions. It could be done without introducing complex procedures that would not be applicable for use in structural design.

Apart from the modelling assumptions the fiber overlapping effects have to be considered. The large amount of fibers often leads to stress concentration and overload of the concrete matrix which leads to spalling of the concrete.

To verify the actual distribution of fibers for various FRC mixes with various fiber fractions, counting of the fibers and in-situ measurements of embedded length and angle distributions are necessary.

It also has to be noted that only one length scale of beam specimens has been observed in this study. It is well known for FRC structural and laboratory tested elements that the size of the sample has a large influence on the strength and load bearing capacity.

To conclude the findings of Chapter 5 it can be mentioned that the model presented in this study differs from the most of structural design guidelines and models available in literature by its ability to evaluate the actual fiber content in the concrete mix. The direct method approach in the proposed model allows obtaining not only the maximal load bearing capacity but also the general post-cracking behaviour of the structural element. None of the currently available design regulations and guidelines are capable of similar. The model presented in this study can thus be concluded as novelty in the research of fiber reinforced concrete.

CONCLUSIONS

As the final summary of the present work the following conclusions were drawn:

1. A model for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of steel fiber reinforced concrete structural elements was elaborated using the direct modelling approach. The proposed simple model is useful and easy to use, if the fiber pull-out laws are available. The model also differs from the most of the other methods described in structural design documents and models published in the literature by its ability to evaluate the actual type and amount of fibers used in the mix. Thus more economical and motivated use of steel fibers can be possible using the model proposed in this work.

2. Experimental pull-out test program was performed to determine the pull-out resistance of three types of commercially available steel fibers. The obtained experimental results show significant dependence of fiber pull-out resistance on the embedded length and inclination angle for straight shape fibers in particular.

3. Finite element method (FEM) and fracture mechanics were employed in order to analyze the steel fiber/concrete matrix interface debond growth. The obtained calculation results indicate a high significance of interface properties for achieving high pull-out resistance. FEM modelling of complete pull-out process was also performed and from comparison with experimental test results, it was concluded that the elaborated FEM models are sufficient for determination of different mechanical parameters such as residual shrinkage stresses, coefficient of friction and interface fracture toughness.

4. A modelling algorithm was elaborated for prediction of load bearing capacity and post-cracking behaviour of fiber reinforced concrete elements subjected to bending loads. Previously obtained fiber pull-out laws were used as the input data in the model. The best agreement between the modelling and experimental validation results was obtained for beams with fiber content of 150 kg/m^3 .

REFERENCES

1. ANSYS Release 11.0, ANSYS Academic Research, (2007) ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania.
2. MATLAB Release 7.9, (2009).
3. Groth P. Fibre reinforced concrete, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology, (2001), Luleå, Sweden.
4. Robins P., Austin S., Jones P. Pull-out behaviour of hooked steel fibers, *Materials and Structures* – 35 (2002), pp.434-442.
5. Banthia N., Yan C. Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices, *Cement and Concrete Research* – 26 (1996), pp.657-662.
6. Cailleux E., Cutard T., Bernhart G. Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modelling, *Mechanics of Materials* – 37 (2005), pp.427-445.
7. Banholzer B., Brameshuber W., Jung W. Analytical simulation of pull-out tests – the direct problem, *Cement & Concrete Composites* – 27 (2005), pp.93-101.
8. Banholzer B., Brameshuber W., Jung W. Analytical simulation of pull-out tests – the inverse problem, *Cement & Concrete Composites* – 28 (2006), pp.564-571.
9. Georgiadi-Stefanidi K., Mistakidis E., Pantousa D., Zygomalas M. Numerical modelling of the pull-out of hooked steel fibres from high-strength cementitious matrix, supplemented by experimental results, *Construction and Building Materials* – 24 (2010), pp.2489–2506.
10. Vandewalle L., et al. Recommendation of RILEM TC162-TDF: test and design methods for steel fibre reinforced concrete: design of steel fibre reinforced concrete using the σ - ω method: principles and applications, *Materials and Structures* – 35 (2002), pp.262-278.
11. AFGC-SETRA Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. Interim recommendations, AFGC Publication, France, (2002).
12. Stalfiberbetong, rekommendationer for konstruktion, utforande och provning. Betongrapport n.4., Svenska Betongforeningen (1995).
13. Deutscher Ausschuss fur Stahlbeton (DAfStb) Guidelines for steel fiber reinforced concrete—23th Draft, richtlinie Stahlfaserbeton, DIN 1045. Annex parts 1-4., (2007).
14. Faserbeton, Osterreichische Vereinigung fur Beton und Bautechnik. OBBV, Wien international symposium dedicated to Prof. S. P. Shah, (2002).
15. CNR-DT 204. Guidelines for design, construction and production control of fiber reinforced concrete structures. National Research Council of Italy, Italy, (2006).
16. Vandewalle L., et al. Recommendation of RILEM TC162-TDF: test and design methods for steel fibre reinforced concrete: σ - ε design method (final recommendation), *Materials and Structures* – 36 (2003), pp.560-567.
17. Li V.C, Stang H., Krenchel H. Micromechanics of crack bridging in fiber reinforced concrete, *Materials and Structures* – 26 (1993), pp.486-494.

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTES
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2011.g. 9.decembrī, plkst. 14:30, Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes sēžu zālē, Āzenes ielā 16, promocijas padomes "RTU-P06" atklātā sēdē.

OFICIĀLIE OPONENTI

Profesors, Dr.sc.ing. Jānis Brauns
Latvijas Lauksaimniecības Universitāte

Vecākais zinātniskais līdzstrādnieks, Dr.sc.ing. Jānis Andersons
Latvijas Universitāte, Polimēru Mehānikas institūts

Emeritētais profesors, Dr.sc.ing. Ralejs Tepfers
Chalmers University of Technology, Zviedrija

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskās universitātes inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Andrejs Pupurs (Paraksts)



Datums: 02.09.2011.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur Anotāciju, Ievadu, 5 nodaļas, Secinājumus, Literatūras sarakstu, Pielikumu, 97 attēlus, kopā 157 lappuses. Literatūras sarakstā ir 94 nosaukumi.