

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**GEM bāzēts metamodelis betona plaisas
virsmu vienojošo šķiedru slogojuma likuma
identifikācijai**

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Sabīne Upnere**

Studenta apliecības nr.: su19004

Zinātniskais vadītājs: PhD Normunds Jēkabsons

RĪGA 2022

Anotācija

Betons ir viens no plašāk izmantotajiem materiāliem gan būvniecībā, gan arī specifiskākos pielietojumos, piemēram, no betona veido konteinerus bīstamo atkritumu uzglabāšanai. Betona sastāvam pievienojot šķiedras ir iespējams uzlabot tā īpašības. Ir būtiski zināt vai un kā šādā materiālā veidosies un attīstīsies plaisas.

Šis pētījums ir veltīts skaitlisko modeļu izveidei, kas spēj prognozēt plaisas attīstību šķiedru betonā. Plaisas virsmu vienojošo šķiedru slogojuma likums tiek analizēts lietojot gan galīgo elementu modeļi, gan metamodeļi.

Maģistra darbā veiktā analīze parāda, ka ar bilineāru funkciju var modelēt plaisas attīstību šķiedru betonā.

Atslēgas vārdi: GEM, betons, metamodelis, plaisa, plaisas virsmu slogojuma likums, šķiedra

Abstract

Concrete is one of the most widely used materials in both construction and more specific applications, for example, concrete forms containers for the storage of hazardous waste. By adding fibers to the concrete composition, it is possible to improve its properties. It is important to know if and how cracks will form and develop in such material.

This study is devoted to the development of numerical models that can predict the development of cracks in fiber concrete. The bridging-law of concrete cracking is analyzed using both the finite element model and the surrogate model.

The analysis performed in the master's thesis shows that the opening of cracks in fiber concrete can be modeled with a bilinear function.

Keywords: FEM, concrete, surrogate modeling, crack, bridging-law, fibre

Saturs

Kopsavilkums	i
Abstract	ii
Attēlu saraksts	v
Tabulu saraksts	vii
Saīsinājumi	viii
Ievads	1
1. Plaisu veidošanās un analīze šķiedru betonā	2
1.1. Ievads	2
1.2. Lineāri elastīgās plīšanas mehānikas pamatprincipi	3
1.2.1. Plaisu sprieguma analīze	3
1.2.2. Sprieguma intensitātes koeficients	3
1.2.3. Enerģijas princips	5
1.2.4. Enerģijas izdalīšanās attiecība G_E	7
1.3. Kohēzijas zonas modeļi	9
1.4. Četru punktu lieces tests	15
1.5. Šķiedras betona stiprināšanai	19
1.6. Secinājumi	21
2. Laboratorijas eksperiments	22
2.1. Ievads	22
2.2. Betona paraugu izgatavošana	22
2.3. Lieces tests	25
2.4. Šķiedru izraušanas testi	27
2.5. Secinājumi	29

3. Šķiedrbetona plaisas attīstības skaitliskā modelēšana	30
3.1. Ievads	30
3.2. Galīgo elementu modeļa (GEM) apraksts	31
3.2.1. Robežnosacījumi	33
3.2.2. Režģa ietekmes novērtējums	34
3.3. PVS funkcijas atrašana lietojot GEM	35
3.3.1. Paraugi bez šķiedrām	36
3.3.2. Paraugi ar tērauda šķiedrām	37
3.4. Metamodelēšana PVS funkcijas noteikšanai	40
3.4.1. Eksperimentu plāni	41
3.4.2. Aproksimācijas modeļa atrašana	42
3.4.3. Maksimālā slogojuma un stiepes stiprības prognozēšanas modeļi	44
3.5. Secinājumi	46
Secinājumi un turpmākais darbs	48
Autora ieguldījums	49
Pateicības	49
Izmantotā literatūra	49

Attēlu saraksts

1.1.	Koordinātu ass definīcija plaisas galā. z virziens ir perpendikulāri lapai. [8]	4
1.2.	Trīs neatkarīgi deformācijas režīmi plaisas galā. [9]	4
1.3.	Bezgalīga plāksne ar centrālu plaisu, kas pakļauta stiepei. [9]	6
1.4.	Plaisu izplatīšanās dažāda veida materiālos ar atbilstošu plīšanas enerģiju: (a) ideāli trausls materiāls, (b) gandrīz trausls elastīgs plastmasas materiāls un (c) trausls materiāls ar plaisu līkumu un atzarojumu. w_f ir plīšanas enerģija, kas atkarībā no materiāla var ietvert plastiskus, viskoelastīgus vai viskoplastiskus efektus. [8]	7
1.5.	Plāksne ar plaisu pie noteiktas slodzes P [9].	8
1.6.	Trauslu matricu kompozītmateriālu un kvazitrauslu materiālu savienojumu un procesu zonu shēmas. (a) kohēzijas plaisas shēma (piemēram, betons). (b) vienmērīgi pastiprinātas plaisas shēma (piemēram, ar šķiedru pastiprināts augstas stiprības betons). (c) plaisas shēma ar pārtrauktiem stiegrojumiem (piemēram, dzelzsbetons). [3]	10
1.7.	PVS līknes un plīšanas procesa zonas korelācija. [12]	11
1.8.	Bilineārās funkcijas grafiks un parametri. [13]	12
1.9.	PVS likumu piemēri. [3]	14
1.10.	Nosacījumi plaisas galam: (a) plaisas savienošanas modelis; (b) kohēzijas plaisas modelis. [3]	14
1.11.	Četru punktu lieces testa paraugs. [18]	15
1.12.	Sakarība starp četru punktu lieces testu un tīru lieci sijā. [20]	16
1.13.	Četru punktu lieces testa analītiskā modeļa rezultātu piemērs. Pārvietojums un spriegums, slogojums pielikts virzienā no apakšas uz augšu.	17
1.14.	Bazalta šķiedras [29].	20
2.1.	Dramix RC-80/30-BP šķiedra [31].	23
2.2.	Šķiedru sadalījums parauga tilpumā. (a) Šķiedras vienmērīgi izkliedētas pa visu tilpumu; (b) šķiedras izvietotas tikai noteiktā prizmas slānī.	24
2.3.	Betona prizmu izgatavošana. (a) Betona masa pēc ieliešanas veidnē; (b) paraugu "nogatavināšana" ūdens vannās.	25
2.4.	Betona bez šķiedrām prizmas šķērsriezuma piemērs pēc četru punktu lieces testa.	25

2.5.	Četru punktu lieces testa mašīna ar betona prizmas paraugu.	26
2.6.	Betona ar šķiedrām prizmas paraugi pēc četrpunktu lieces testa. (a) Paraugi ar garām tērauda šķiedrām; (b) paraugi ar īsām polipropilēna šķiedrām.	27
2.7.	Betona paraugs šķiedru izraušanas testam.	28
2.8.	Betona paraugs pēc šķiedru izraušanas testa.	28
3.1.	Skaitliskā modeļa shēma un dimensijas.	31
3.2.	Spēku līdzsvara modelis vienkāršotai, lineārai sistēmai. P ir testa mašīnas pieliktais spēks, F_b ir šķiedru radītais spēks, l ir atbilstošais spēka plecs un θ ir puse no leņķa starp plaisas virsmām.	32
3.3.	Skaitļošanas domēna režģa piemērs.	35
3.4.	Eksperimentālā slogojuma-pārvietojuma līkne betona paraugam bez šķiedrām.	36
3.5.	Slogojuma-pārvietojuma līknes betona paraugam bez šķiedrām. (a) PVS funkcija; (b) GEM modeļa un eksperimentu salīdzinājums.	37
3.6.	Sprieguma sadalījums galīgajos elementos modelētajā parauga daļā. (a) Plaisa sāk atvērties; (b) paraugs ir daļēji salauzts (deformācijas ir 50 reizes palielinātas).	38
3.7.	GEM modeļa un vidējoto eksperimentālo datu (ar norādītu 95% ticamības intervālu) salīdzinājums slogojuma-pārvietojuma līknei betona paraugiem ar tērauda šķiedrām. (a) Paraugā vienmērīgi izkliedēti 60 kg/m ³ šķiedru (grupa G1); (b) paraugā vienmērīgi izkliedēti 90 kg/m ³ šķiedru (grupa G2); (c) paraugā vienmērīgi izkliedēti 120 kg/m ³ šķiedru (grupa G3).	39
3.8.	Desmit punktu eksperimentu plāni: (a) Latīņu hiperkuba plāns tiešajam modelim, (b) inversā metamodeļa plāns.	42
3.9.	Atbildes virsmas un skaitlisko eksperimentu punkti: (a) tiešais metamodelim, (b) inversais metamodelis.	45
3.10.	Inversā metamodeļa verifikācija pie konstantas enerģijas $G_f = 4$ N/m. Salīdzinājums ar galīgo elementu modeļa rezultātiem.	46

Tabulu saraksts

1.1. Betonā lietoto šķiedru mehāniskās īpašības [24]	19
2.1. Betona maisījuma un izmantoto komponentu sastāvs paraugiem ar šķiedrām	23
3.1. Rullīša kontaktsvērma garuma ietekme uz maksimālo spēku	34
3.2. Šūnu izmēra ietekme uz maksimālo spēku	34
3.3. $P - \delta$ līknes integrāļa vērtības.	40
3.4. Metamodeļu kvalitātes kritēriji.	44
3.5. Metamodeļa un GEM modeļa rezultātu salīdzinājums.	45

Saīsinājumi

2D	Div-dimensionāls
AVM	Atbildes Virsmas Metode
GEM	Galīgo Elementu Metode
LH	Latīņu Hiperkubs
PVS	Plaisas Virsmu Slogojums

Ievads

Betons ir viens no visplašāk izmantotajiem materiāliem būvniecībā. Tam ir arī specifiskāki pielietojumi, piemēram, no betona veido konteinerus bīstamo atkritumu uzglabāšanai. Tajā pat laikā zināms, ka betona konstrukcijas ir pilnas ar plaisām. Tādēļ ir būtiski novērtēt plaisu veidošanos un attīstību. Betonam ir sarežģīti bojājumu mehānismi materiāla daudzfāžu dēļ. Plaisu rašanās vietu un plaisu izplatīšanās virzienu ietekmē sprieguma sadalījums [1].

Zināms arī, ka šķiedru pievienošana betonam ir lietderīga, lai kontrolētu plaisu veidošanos, kas ne tikai palielina betona bīdes un stiepes izturību, bet arī samazina būvniecības izmaksas. Zinātniski pētījumi parāda, ka šķiedras palīdz veidot savienojosu efektu betonā, un šķiedras veic darbu pat plaisas rašanās gadījumā. [2]

Maģistra darba mērķis ir lietojot skaitliskos modeļus noteikt šķiedru betona plaisas virsmu vienojošu sloojuma likumu un tā parametrus.

Maģistra darbā atrisināti vairāki galvenie **uzdevumi**.

- 1) Veikt literatūras izpēti par plaisu veidošanos un modelēšanu šķiedru betonā.
- 2) Izstrādāt skaitlisku modeļu kopu, kas ļauj paredzēt plaisas attīstību. Salīdzināt iegūtos skaitliskos rezultātus ar laboratorijas eksperimentu rezultātiem.
- 3) Veikt aprēķinus ar skaitliskajiem modeļiem, simulējot četru punktu lieces testu.
- 4) Analizēt iegūtos rezultātus un izdarīt secinājumus.

Maģistra darbā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts. Pirmajā nodaļā ir īss pamata teorētisko jautājumu un literatūras apskats. Otrajā nodaļā ir aprakstīts betona paraugu izveides process un laboratorijas testi. Trešā nodaļa ir veltīta skaitlisko metožu, modeļu aprakstam un iegūtajiem rezultātiem un to analīzei.

Darba apjoms ir 53 lappuses, 32 attēli, 7 tabulas un literatūras saraksts, kurā ir 39 nosaukumi.

1. nodaļa

Plaisu veidošanās un analīze šķiedru betonā

1.1. Ievads

Šīs nodaļas sākumā ir dots īss ieskats lineāri elastīgās plīšanas mehānikas pamatjēdzienos, kas tiek izmantoti arī nelineāru problēmu atrisinājumu formulēšanā.

Zinātniskajā literatūrā ir aprakstīti dažādi plaisu modeļi, piemēram, fiktīvās plaisas modelis, plaisas joslas un izsmērētās plaisas modelis. Detalizētākus dažādu modeļu aprakstus var atrast, piemēram, A. Karpinteri [3] vai Z.P. Bažanta un J. Planas [4] grāmatā. Mūsdienās arvien populārāks kļūst fāzu lauka modelis, kas pielāgots betona materiālu analīzei. Ar metodes pielietojuma piemēriem var iepazīties [5], [6] un [1]. Saistītās zonas plaisas modelis ir vispārīgi atzīts reālistisks vienkāršojums plīšanas aprakstam trauslos un kvazitrauslos materiālos [7]. Šajā maģistra darbā izmantotajā galīgo elementu programmā plaisas veidošanās matemātiskais formulējums ir pamatots saistītās zonas teorijā.

Skaitlisko modeļu izveidei nepieciešamos eksperimentālos datus par plaisas atvēršanos slodzes ietekmē ieguva no četrpunktu lieces testa, kura apraksts ir pieejams ceturtajā apakšnodaļā.

Visbeidzot nodaļas noslēgumā ir dots īss ieskats materiālu stiprināšanai izmantojamās šķiedrās.

1.2. Lineāri elastīgās plīšanas mehānikas pamatprincipi

Kopš 1960. gada ir izstrādātas plīšanas mehānikas teorijas, kas ņem vērā dažāda veida nelineārās materiālu īpašības (piemēram, plastiskumu, viskoplastiskumu), kā arī dinamiskos efektus. Tomēr arī šīs teorijas var uzskatīt par lineāras elastīgās plīšanas mehānikas apakšvirzieniem [8].

1.2.1. Plaisu sprieguma analīze

Pieņemot izotropisku, lineāri elastīga materiāla uzvedību ir iespējams iegūt slēgtas formas izteiksmes ķermeņa spriegumiem, apskatot noteiktas plaisu konfigurācijas, kas pakļautas ārējiem spēkiem. Definējot polāro koordinātu sistēmas sākumpunktu plaisas galā kā redzams 1.1. attēlā, var parādīt, ka sprieguma lauku jebkurā lineāri elastīgā saplaisājušā ķermenī var uzdot sekojoši [8]:

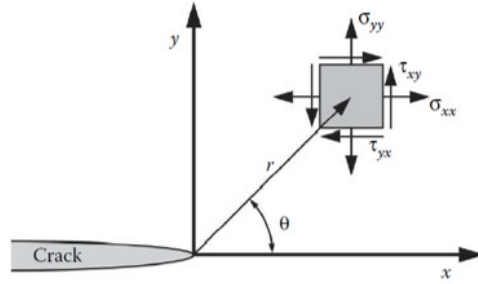
$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{m/2} g_{ij}^{(m)}(\theta), \quad (1.1)$$

kur σ_{ij} ir sprieguma tenzors, r un θ ir atbilstošās koordinātes (skat. 1.1. att.), k ir proporcionalitātes konstante, f_{ij} ir bezdimensionāla funkcija no θ . A_m ir amplitūda un $g_{ij}^{(m)}$ ir m -tā locekļa bezdimensionāla funkcija no θ .

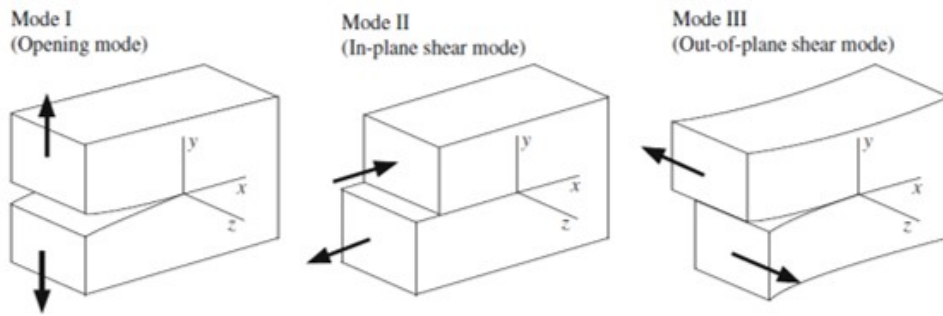
Augstākās kārtas locekļi ir atkarīgi no ģeometrijas, bet jebkuras konfigurācijas risinājums satur galvenais locekli, kas ir proporcionāls $1/\sqrt{r}$. Ja $r \rightarrow 0$, galvenais loceklis tuvojas bezgalībai, bet pārējie locekļi paliek ierobežoti vai tuvojas nullei. Tādējādi spriegums plaisas gala tuvumā mainās ar $1/\sqrt{r}$ neatkarīgi no saplaisājušā korpusa konfigurācijas. Var arī parādīt, ka pārvietojums plaisas gala tuvumā mainās atkarībā no \sqrt{r} . Vienādojums (1.1.) apraksta sprieguma singularitāti, jo spriegums ir asimptotisks pret $r = 0$. [8]

1.2.2. Sprieguma intensitātes koeficients

Plaisu var pakļaut trīs dažādu veidu slodzēm, kas izraisa plaisu virsmu pārvietošanos, skat. 1.2. attēlu. Atvēršanās (I) režīmā slodze tiek pielikta normāli plaisas plaknei. Šādā gadījumā plaisa tiek atvērta. Bīdes (II) režīma slodze attiecas uz plaknes bīdi. Tā izraisa divu plaisu virsmu slīdēšanu vienai pret otru. Ārpusplaknes bīdes (III) režīma slodze, kurā notiek ārpusplaknes bīde, mēdz saplēst abas plaisas virsmas.



1.1. att. Koordinātu ass definīcija plaisas galā. z virziens ir perpendikulāri lapai. [8]



1.2. att. Trīs neatkarīgi deformācijas režīmi plaisas galā. [9]

Katrs slodzes režīms rada $1/\sqrt{r}$ singularitāti plaisas galā, bet proporcionalitātes konstante, k un f_{ij} ir atkarīgas no režīma. Šajā brīdī ir ērti aizstāt k ar sprieguma intensitātes koeficientu K , kur $K = k\sqrt{2\pi}$. Sprieguma intensitātes koeficientus trim slodzes veidiem attiecīgi apzīmē ar K_I , K_{II} un K_{III} . Ņemot vērā, ka šajā darbā analizē I režīmu, tad turpmāk tiks apskatīts tikai plaisas atvēršanas mehānisms. Plaisas gala spriegumu pirmajam slodzes režīmam var uzrakstīt atbilstoši sprieguma intensitātes koeficientam sekojoši [9], [8]:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^I(\theta), \quad (1.2)$$

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (1.3)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (1.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \quad (1.5)$$

kur $\tau_{xZ} = \tau_{yz} = 0$ plaknes spriegumam un plaknes deformācijai un $\sigma_z = 0$ plaknes spriegumam un $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ plaknes deformācijai, ν ir Puasona koeficients.

Plaisas gala pārvietojuma lauki tiek iegūti kā [8]:

$$u_x = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right), \quad (1.6)$$

$$u_y = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right), \quad (1.7)$$

kur G ir bīdes modulis, $\kappa = 3 - 4\nu$ plaknes deformācijai, $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ plaknes spriegumam un $E = 2(1 + \nu)G$.

Sprieguma intensitātes koeficients ir pieliktās slodzes un plaisas lieluma funkcija. Ja apskata galīgu ķermeni, tad koeficients ir arī funkcija no problēmas ģeometriskās konfigurācijas. Tādējādi sprieguma intensitātes koeficients atspoguļo gan plaisas gala singularitātes stiprumu, gan deformācijas veidu. Tas ir parametrs, kas nodrošina saikni starp plaisu saturošo lokālo materiāla uzvedību un globālo struktūras reakciju.

1.2.3. Enerģijas princips

Plīšanas mehānismu no enerģijas principa skatupunkta var definēt izmantojot Grifita plīšanas teoriju. Tā parāda, ka plīšanas enerģijai, kas nepieciešama atvērtas plaisas vienības virsmas izveidošanai, ir cieša saistība ar sprieguma intensitātes koeficientu.

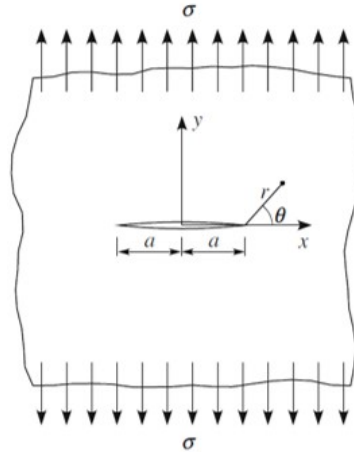
Saskaņā ar pirmo termodinamikas likumu, kad sistēma pāriet no nelīdzsvara stāvokļa uz līdzsvara stāvokli, notiks kopējās enerģijas samazināšanās. Plaisa var veidoties (vai esošā plaisa var augt) tikai tad, ja šāda procesa rezultātā kopējā enerģija samazinās vai paliek nemainīga. [8]

Grifits atvasināja plīšanas kritēriju, ņemot vērā 1.3. attēlā parādīto problēmu, kur bezgalīga plāksne ar vienības biezumu, kas satur plaisu ar garumu $2a$, tiek pakļauta vienmērīgam stiepes spriegumam σ .

Grifits vispirms ieguva deformācijas enerģijas samazināšanos plāksnē, pateicoties plaisas ieviešanai, pamatojoties uz sprieguma analīzi, kā:

$$U_a = -\frac{\pi a^2 \sigma^2}{E} \text{ (plaknes spriegumam)} \quad (1.8)$$

$$U_a = -\frac{1 - \nu^2}{E} \pi a^2 \sigma^2 \text{ (plaknes deformācijai)}, \quad (1.9)$$



1.3. att. Bezgalīga plāksne ar centrālu plaisu, kas pakļauta stiepei. [9]

kur E ir elastības modulis.

Pēc tam Grifits ieviesa virsmas enerģiju – plīšanas enerģija, kas nepieciešama, lai izveidotu atvērtu plaisu.

$$U_s = 4a\gamma_s, \quad (1.10)$$

kur γ_s ir virsmas enerģija uz laukuma vienību. Jāņem vērā, ka vienādojumā (1.10.) plaisas kopējā virsma ir $4a$, jo plaisai ir divas virsmas. Saskaņā ar Grifita enerģijas kritēriju plaisu augšana ir dabiska enerģijas pārnese gaita starp elastīga ķermeņa deformācijas enerģiju un plīšanas enerģiju, kas nepieciešama jaunas plaisas virsmas izveidošanai [9]. Jāizpildās šādam nosacījumam:

$$\frac{d}{dA}(U_a + U_s) = \frac{1}{2} \frac{d}{da}(U_a + U_s) = 0 \quad (1.11)$$

Kritiskā slodze plaisu izplatībai plaknes spriegumu gadījumā tiek iegūta kā

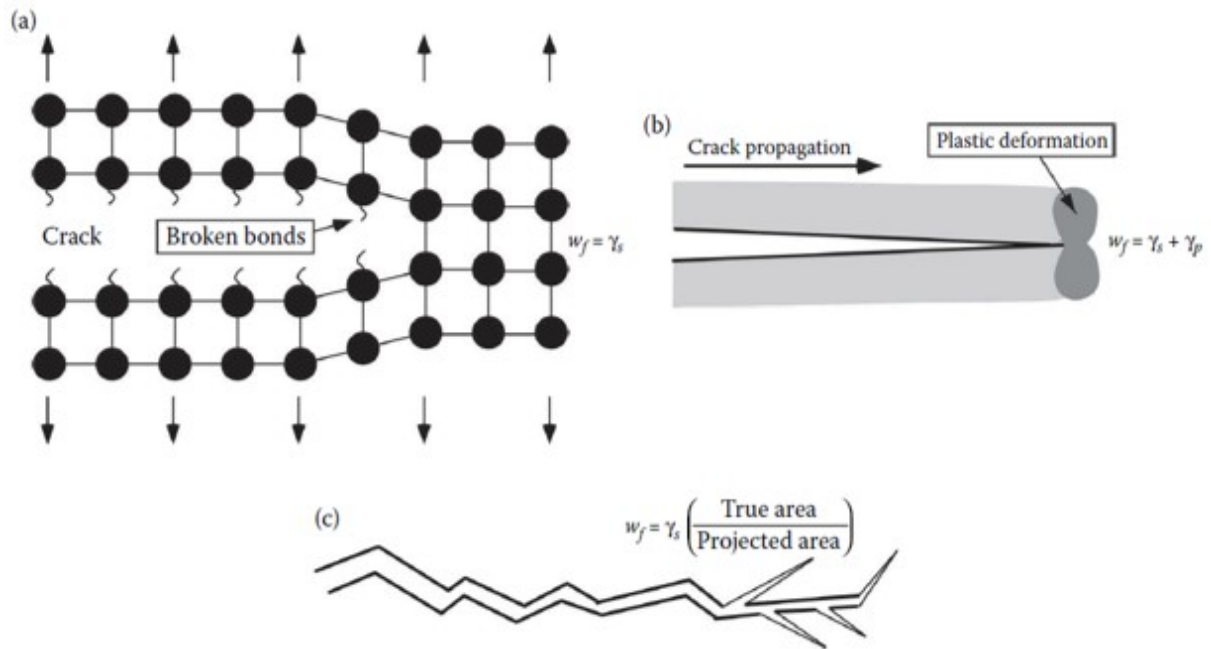
$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1.12)$$

un plaknes deformācijas gadījumā kā

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{(1-\nu^2)\pi a}}. \quad (1.13)$$

Vienādojumi (1.12.) un (1.13.) tiek saukti par Grifita lūzuma kritēriju, kas ir spēkā ideāli trausliem materiāliem.

Plīšanas enerģiju var ietekmēt arī plaisu izplatīšanās un sazarošanās, kas palielina virsmas laukumu. 1.4. attēlā parādīti dažādi materiāla uzvedības veidi un atbilstošā plīšanas enerģija.



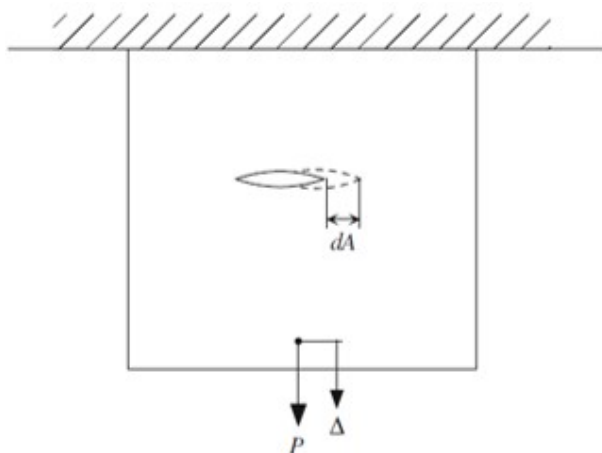
1.4. att. Plaisu izplatīšanās dažāda veida materiālos ar atbilstošu plīšanas enerģiju: (a) ideāli trausls materiāls, (b) gandrīz trausls elastīgs plastmasas materiāls un (c) trausls materiāls ar plaisu līkumu un atzarojumu. w_f ir plīšanas enerģija, kas atkarībā no materiāla var ietvert plastiskus, viskoelastīgus vai viskoplastiskus efektus. [8]

1.2.4. Enerģijas izdalīšanās attiecība G_E

Grifita enerģijas koncepcijai ir globāls raksturs: lai plaisa izplatītos, sistēmā uzkrātajai enerģijai ir jābūt pietiekamai, lai pārvarētu materiāla plīšanas enerģiju. G.R. Irvins definēja enerģijas izdalīšanās attiecību G_E . Tas ir enerģijas mērs, kas atbilst plaisas vienības pagarinājumam un atspoguļo spēku, kam ir tendence izraisīt plaisas paplašināšanos.

1.5. attēlā ir parādīta plaisa plāksnē pie noteiktas slodzes P , kas izraisa plaisas izplešanos par dA . Plaisas izkliedētā enerģija rodas no ārējā spēka PdD veiktā darba un sistēmā atbrīvotās elastīgās deformācijas enerģijas $-dU$, tas ir,

$$G_E = P \frac{d\Delta}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (1.14)$$



1.5. att. Plāksne ar plaisu pie noteiktas slodzes P [9].

Ieviešot sistēmas atbilstību C , kas ir apgriezta plāksnes stingumam:

$$C = \frac{\Delta}{P}, \quad (1.15)$$

enerģijas izdalīšanās attiecību var iegūt kā

$$G_E = \frac{P^2}{2} \frac{\partial C}{\partial A} \quad (1.16)$$

Pastāv saistība starp sprieguma intensitātes koeficientu K , kas definē spriegumu un pārvietošanās laukus tuvu plaisas galam un enerģijas izdalīšanās attiecību G_E , kas ņem vērā spēku plaisas atvēršanai:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E}, \quad (1.17)$$

un

$$G_I = (1 - \nu^2) \frac{K_I^2}{E}, \quad (1.18)$$

kur vienādojums (1.17.) atbilst plaknes spriegumam un vienādojums (1.18.) – plaknes deformācijām. Šajā maģistra darbā veiktajā analizē ir spēkā plaknes sprieguma vienādojums.

1.3. Kohēzijas zonas modeļi

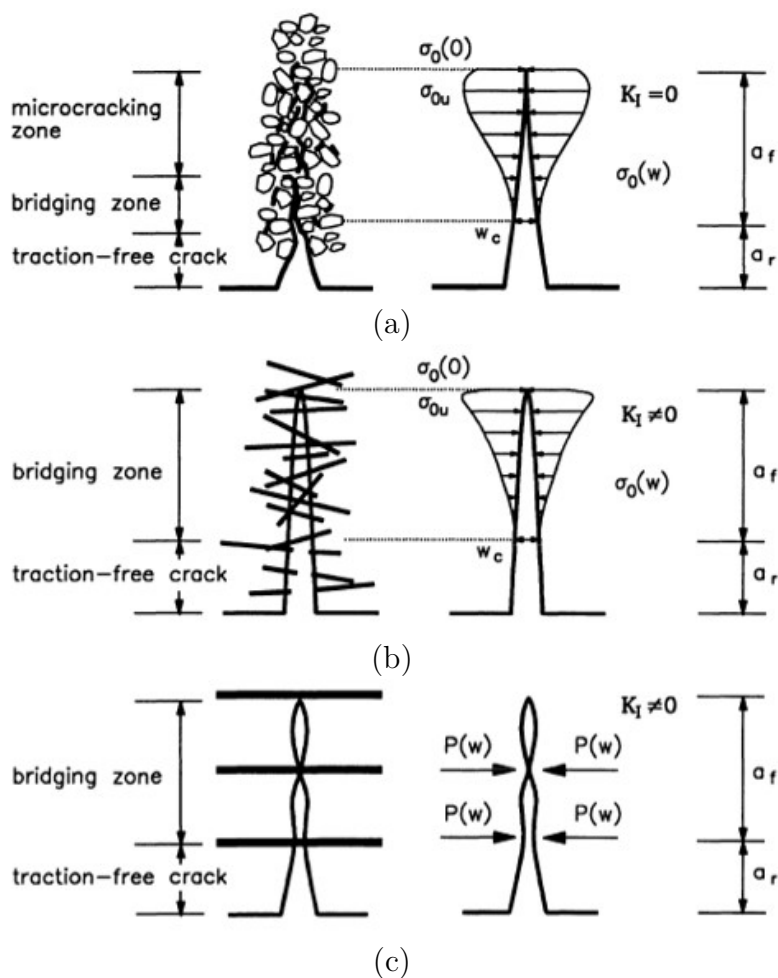
Plīšanas process trauslos matricas kompozītmateriālos un kvazitrauslos materiālos, piemēram, betonā, akmeņos un keramikā, vienmēr ir saistīta ar ļoti šauru joslu, kurā notiek nelineāra deformācija. Šī lokalizētā josla vai procesa zona rodas un attīstās slogošanas procesa laikā, izraisot reālu plaisu. Tā parasti sastāv no mikroplaisāšanas apgabala, kas atrodas netālu no makroplaisu galiem, un savienojošā reģiona līdzās makroplaisām, kur sekundārās fāzes, piemēram, pildvielas, šķiedras, daļiņas, kontrolē plīšanas procesu. [3]

1.6. attēlā ir parādītas procesa zonu shēmas dažādos materiālos. Savienojuma un mikroplaisāšanas reģioni bieži pastāv līdzās. Piemēram, parastajā betonā un dažādos cementa kompozītmateriālos mikroplaisāšanas un savienojumu veidošanās procesi parādās vienā mērogā. Mikroplaisas rodas un izplatās pie blakus esošajiem defektiem un sekundārās fāzes daļiņām. Sekundārās fāzes daļiņas ierobežo makroplaisu no atvēršanās ar savu savienošanas darbību (skat. 1.6.a att.) [10]. No otras puses, daudzos kompozītmateriālos plīšanas process būtībā ir saistīts ar atsevišķas plaisas, kas savienota ar pastipriņošiem elementiem, augšanu.

Lai analizētu trauslu matricu kompozītmateriālu bojājuma procesu, klasiski tiek izmantoti divi alternatīvi nelineāro plaisu modeļi: plaisu savienošanas modelis un kohēzijas zonas plaisu modelis. Modeļi ir bāzēti uz lineāri elastīgās plīšanas mehānikas koncepcijām. Sākotnējie formulējumi pārbauda I režīma plaisu (skat. 1.2. attēlu). Modeļi aizvieto procesa zonu ar fiktīvu plaisu jau pirms esošās plaisas izveidošanās un attēlo visus nelineāros mehānismus, kas kontrolē plīšanas procesu kā sprieguma σ_0 sadalījumu, kas darbojas gar fiktīvo plaisu (skat. 1.6. attēlu). [3]

Kohēzijas zonas modeļi ir sekojoši pieņēmumi [7]:

- Plaisa sākas vietā, kur maksimālais galvenais spriegums σ_1 vispirms sasniedz kritisko vērtību, ko sauc par kohēzijas stiprību σ_t . Šī plaisa veidojas perpendikulāri galvenā sprieguma virzienam. Ja spriegumu izraisa sākotnējs iecirtums materiālā, tad plaisa veidojas uz priekšu no iecirtuma.
- Pēc plaisas izveidošanās tā atveras, pārnesot spriegumu no vienas virsmas uz otru. Kad plaisa ir ierosināta, pārnestais spriegums (kohēzijas spriegums) ir plaisas atvēršanas pārvietojuma vēstures funkcija. Monotonai I režīma plaisas atvēršanai pārnestais spriegums σ ir perpendikulārs pret plaisu virsmām un ir unikāla plaisas atvēruma w funkcija: $\sigma = f(w)$.



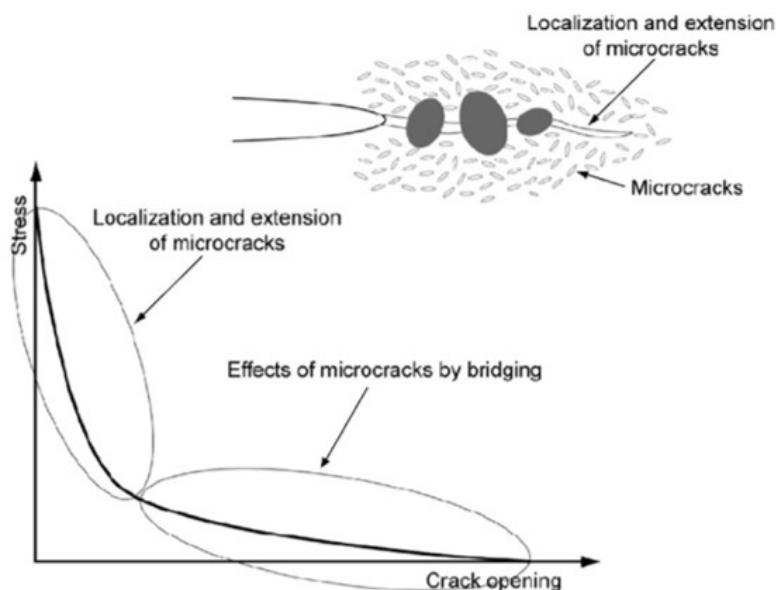
1.6. att. Trauslu matricu kompozītmateriālu un kvazitrauslu materiālu savienojumu un procesu zonu shēmas. (a) kohēzijas plaisas shēma (piemēram, betons). (b) vienmērīgi pastiprinātas plaisas shēma (piemēram, ar šķiedru pastiprināts augstas stiprības betons). (c) plaisas shēma ar pārtrauktiem stiebrojumiem (piemēram, dzelzsbetons). [3]

Visu kohēzijas zonu modeļu centrālais punkts ir funkcija, kas apraksta mijiedarbības spēku starp abām saskarnēm – plaisas virsmām. Šis likums atspoguļo lokālās materiālu īpašības, kas nav atkarīgas no ārējā slogojuma. Plaisas virsmu slogojuma (PVS) likums $f(w)$ savā ziņā aizstāj sprieguma – deformācijas likni tādās metodēs kā plastiskuma teorija. [11]

Būtībā katram betona sajaukumam ir sava PVS likne, ko nosaka pēc eksperimentiem ar šo konkrēto materiālu. PVS likne, kas derīga visiem betoniem, neeksistē, tomēr ieviešot bezdimensionālus lielumus spriegumam un plaisas atvērumsam, dažādu likņu formas ir ļoti tuvu viena otrai.

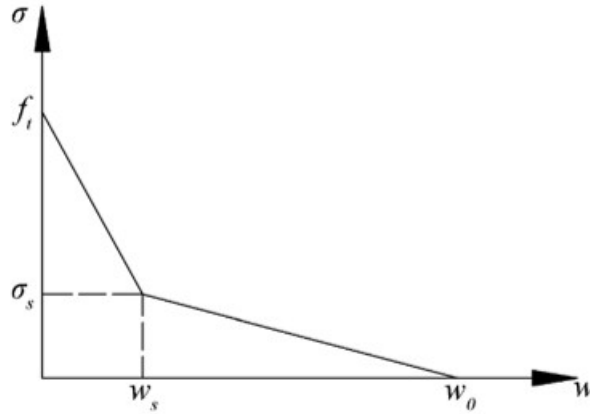
Lai veiktu analīzi un secinātu vispārējās tendences konkrētām struktūrām, ir ērti ieviest vienkāršotas analītiskās funkcijas. Lai arī šādas funkcijas ir tuvinājums, tomēr pat visvienkāršākās no tām sniedz ievērojami labākas analizētās struktūras izturēšanās prognozes nekā plastiskuma vai lineāri elastīgās mehānikas metodes. [4]

PVS līknes korelācija ar plīšanas procesa zonas mehānismu shematiski ir parādīta 1.7. attēlā. Mikroplaisas sāk veidoties tieši pirms spriegums sasniedz stiepes izturību. Pēc stiepes izturības sasniegšanas mikroplaisas tiek lokalizētas un paplašinātas. PVS līknes pirmais stāvais atzars atbilst mikroplaisu lokalizācijai un paplašināšanai. Parauga izmērs vai ģeometrija būtiski neietekmē procesu līdz šai lūzuma stadijai. Spriegums, kas tiek pārnest uz apgabalu, kurā ir mikroplaisas ar savienojošo efektu, saglabājas arī pēc plaisas virsmas atdalīšanas. Šis reģions atbilst atdalīšanas līknes astei. Astes daļa kļūst garāka, palielinoties parauga izmēram. Plīšanas enerģija, kas izkliedēta reģionā, uz kuru spriegums tiek pārnest ar savienojošo efektu, ir lielāka paraugam ar lielāku izmēru. Enerģija tiek izkliedēta mikroplaisāšanas vietā. [12]



1.7. att. PVS līknes un plīšanas procesa zonas korelācija. [12]

Betonam un citiem cementējošiem materiāliem bilineāra funkcija ir pierādīta kā atbilstoša PVS raksturošanai. Šo funkciju var pilnībā aprakstīt ar četriem sekojošiem parametriem (skat. 1.8. att.): stiepes izturība f_t ; plaisas atvērums w_s bilineārās funkcijas pagriešanās punktā; kohezijas spriegums σ punktā w_s ; kritiskās plaisas atvērums w_c .



1.8. att. Bilineārās funkcijas grafiks un parametri. [13]

PVS likums saista spriegumu $\sigma_0(w)$ ar plaisas virsmu atvēršanu w . Likums ir iegūts vai nu no mikromehānikas modeļiem, vai no mehāniskiem testiem [3]. Zinātniskajā literatūrā ir pieejami arī empīriski modeļi kā noteikt bilineāras PVS funkcijas parametrus. P-E. Pētersons [14] pamatojoties uz eksperimentāliem datiem ir definējis modeli, kas ļauj iegūt nepieciešamos parametrus zinot stiepes stiprību f_t un plīšanas enerģiju G_f sekojoši:

$$\sigma_s = f_t/3 \quad (1.19)$$

$$w_s = 0.8G_f/f_t \quad (1.20)$$

$$w_0 = 3.6G_f/f_t \quad (1.21)$$

Idealizētā gadījumā var pieņemt, ka

$$f_t = \sigma_{NP}. \quad (1.22)$$

Guinea u.c. [15] bilineāras PVS funkcijas četrparametru noteikšanai lieto sekojošas izteiksmes:

$$\sigma = f_t \left(1 - \frac{w}{w_1}\right), \text{ ja } 0 \leq w \leq w_s, \quad (1.23)$$

$$\sigma = \sigma_s \left(\frac{w - w_0}{w_s - w_0}\right), \text{ ja } w_s \leq w \leq w_0, \quad (1.24)$$

$$\sigma = 0, \text{ ja } w \geq w_1, \quad (1.25)$$

kur w_1 ir stāvākā segmenta horizontālais krustpunkts ar x asi. No GEM modeļa rezultātu analīzes iegūst, ka

$$w_1 = 1.75(G_f/f_t). \quad (1.26)$$

Pagriešanās punkta koordinātes (σ_s, w_s) var aprēķināt šādi:

$$w_s = w_1 \frac{w_0 - 2(G_f/f_t)}{w_0 - w_1}, \quad (1.27)$$

$$\sigma_s = f_t \frac{2(G_f/f_t) - w_1}{w_0 - w_1}. \quad (1.28)$$

Kritisko plaisas atvērumu w_0 var noteikt no kvadrātvienādojuma

$$w_0^2 - w_0 \frac{6\bar{w}(G_f/f_t) - 2w_1(G_f/f_t)}{2(G_f/f_t) - w_1} + \frac{6\bar{w}w_1(G_f/f_t) - 4w_1(G_f/f_t)^2}{2(G_f/f_t) - w_1} = 0, \quad (1.29)$$

kur \bar{w} ir PVS laukuma centroīda abscisa. To aprēķina sekojoši:

$$\bar{w} = c(G_f/f_t), \quad (1.30)$$

kur c ir konstante, bilineārai funkcijai $c = 0,987$.

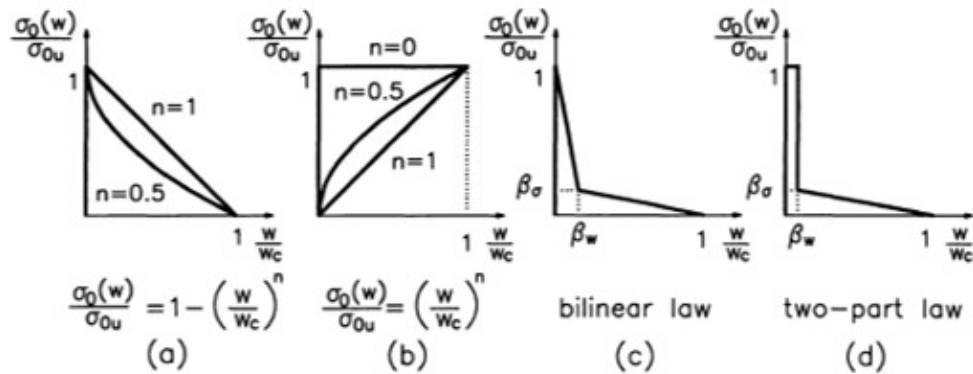
Plīšanas enerģiju var aprēķināt pēc RILEM standarta [16], lietojot eksperimentāli nomērīto sloģojuma - pārvietojuma līkni:

$$G_f = \frac{2W_0 + mg\delta_c}{A}, \quad (1.31)$$

kur W_0 ir laukums zem sloģojuma - pārvietojuma līknes, m ir prizmas masa starp apakšējiem balsta rullīšiem, δ_c ir maksimālais pārvietojums un A ir plaisas laukums. Laukums, ko ierobežo PVS likums $\mathcal{G}_0 = \int \sigma_0(w)dw$, ir materiāla īpašība. PVS likuma piemēru shēmas var aplūkot 1.9. attēlā.

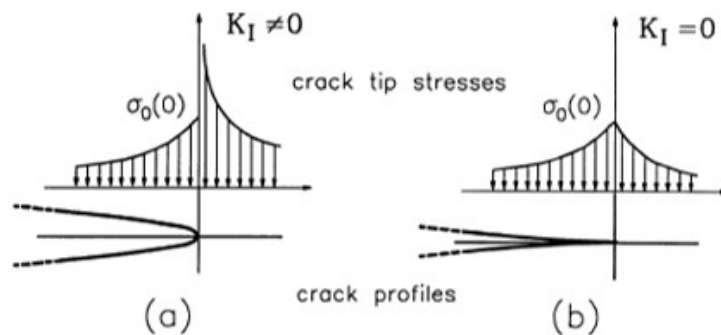
No matemātiskā viedokļa vienīgā atšķirība starp iepriekš minētajiem modeļiem ir plaisas gala sprieguma lauks, kas tiek pieņemts kā singulārs vai galīgs attiecīgi savienošanas vai kohēzijas plīšanai (skat. 1.10. attēlu). Pamatojoties uz šo pieņēmumu, tiek formulēti divi dažādi plīšanu augšanas kritēriji. Plīšanu savienošanas modeļi plīšana sāk izplatīties, kad globālais plīšanas gala sprieguma intensitātes koeficients K_I , kas mēra singulāro sprieguma lauku, ir vienāds ar kritisko vērtību K_{IC} , kas atspoguļo nepastiprinātā materiāla plīšanas izturību:

$$K_I(a) = K_{load}(a) - K_{I\sigma}(a) = K_{IC}, \quad (1.32)$$



1.9. att. PVS likumu piemēri. [3]

kur K_{load} un $K_{I\sigma}$ ir sprieguma intensitātes faktori, kas rodas attiecīgi no pieliktā slodģuma un plaisas atvērģanas sprieguma σ_0 un $a = a_r + a_f$ ir kopējais plaisas garums (skat. 1.6. attēlu).



1.10. att. Nosacģjumi plaisas galam: (a) plaisas savienoģanas modelis; (b) kohģzģijas plaisas modelis. [3]

Kohģzģijas zonas modelģ plaisas gala sprieguma intensitģtes koeficients ir nulle:

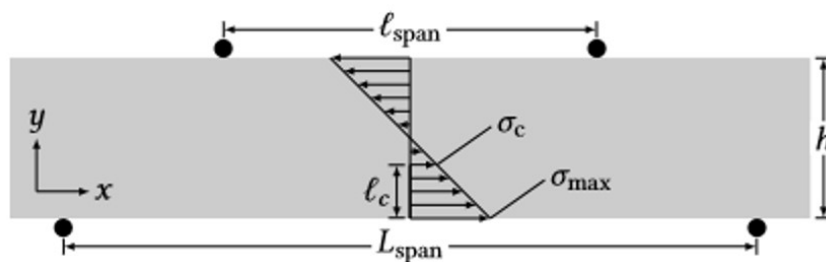
$$K_I(a) = K_{load}(a) - K_{I\sigma}(a) = 0, \quad (1.33)$$

un tģpģc plaisa izplatģģ, kad spriegums tģģ galģ sasniedz homogenizģtģ kompozģtmaterģģla lokģlo stiepes izturģģbu, kas ir kohģzģijas likuma vģrtģba nulles plaisas atvērģanas nobģdei $\sigma_0(0)$. Jģgpilni kohģzģijas zonas modeģģ var tģkt definģti tikai ja $\sigma_0(0) > 0$. Pie nosacģjuma $K_I=0$ plaisas virģsmas gludi aizģveras, veidoģot smailes atģģķģrģbģ no nosacģjuma $K_I \neq 0$, kad veidoģas parabola (skat. 1.10. attģģlu).

Problēmas, ko apraksta (1.32.) un (1.33.) vienādojumi, risinājums un kritiskās slodzes definīcija plaisu izplatībai parasti tiek noteikta, izmantojot divas dažādas pieejas – integrālā vienādojuma pieeju un galīgo elementu pieeju.

1.4. Četru punktu lieces tests

Stiepes izturības noteikšana, izmantojot tiešo stiepes testu ar šķiedrām armētā paraugā, ir sarežģīta, jo rezultāti ir ļoti izkliedēti un var rasties problēmas ar to interpretāciju [17]. Tradicionāli betona paraugu mehāniskās un lūzumu īpašības plaisu izplatīšanās režīmā eksperimentāli tiek pētītas lietojot trīs vai četru punktu lieces testus. Šajā darbā tiek lietots četru punktu lieces tests, kura shematisku attēlojumu var aplūkot 1.11. attēlā.



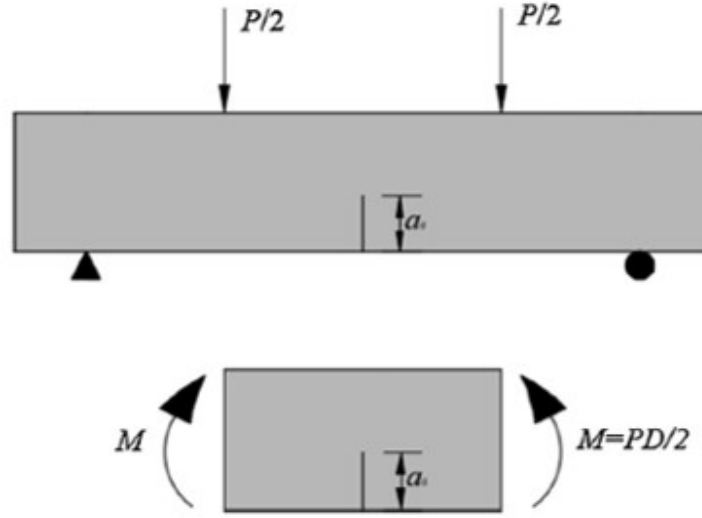
1.11. att. Četru punktu lieces testa paraugs. [18]

Četru punktu lieces testā paraugs tiek slogots caur augšējiem rullīšiem. Parauga prizmas vidējā punkta deformācijas ierakstīšanai testa laikā izmanto lineāros pārvietojuma detektorus. Slogojums tiek pakāpeniski palielināts, reģistrējot pēc katra soļa sasniegto viduspunkta pārvietojumu.

Lai arī četru punktu lieces tests ir komplicētāks nekā trīs punktu lieces tests, tā priekšrocība ir tīras lieces iegūšana centrālajā reģionā starp augšējiem rullīšiem. Attiecīgi var pieņemt, ka sprieguma intensitātes koeficients un plaisas atvēršanās pārvietojums (*CMOD*) četru punktu testa paraugam ārējā slogojumā ir vienādi ar tīras lieces paraugu, kā parādīts 1.12. attēlā. Četru punktu lieces testā pieņem, ka izliekumu, ko rada bīde, var neņemt vērā [19].

Pārvietojumu sijai $u(x)$ tīrā liecē nosaka ar šādu otrās kārtas diferenciālo vienādojumu un robežnosacījumiem [19]:

$$-EI \frac{d^2 u(x)}{dx^2} = M(x), \quad (1.34)$$



1.12. att. Sakarība starp četru punktu lieces testu un tīru lieci sijā. [20]

$$\frac{du(x)}{dx} \Big|_{x=0} = 0, \quad u(x)|_{x=L_{span}/2} = 0 \quad (1.35)$$

Moments M un pārvietojums u ir aprēķināms pēc sekojošām formulām:

$$M(x) = \frac{P}{2} \left(\frac{L_{span}}{2} - \frac{l_{span}}{2} \right), \quad (1.36)$$

$$u(x) = -\frac{P(L_{span} - l_{span})}{96EI} (12x^2 - 2L_{span}^2 + L_{span}l_{span} - l_{span}^2), \quad (1.37)$$

reģionā, kur

$$0 \leq x \leq \frac{l_{span}}{2} \quad (1.38)$$

un

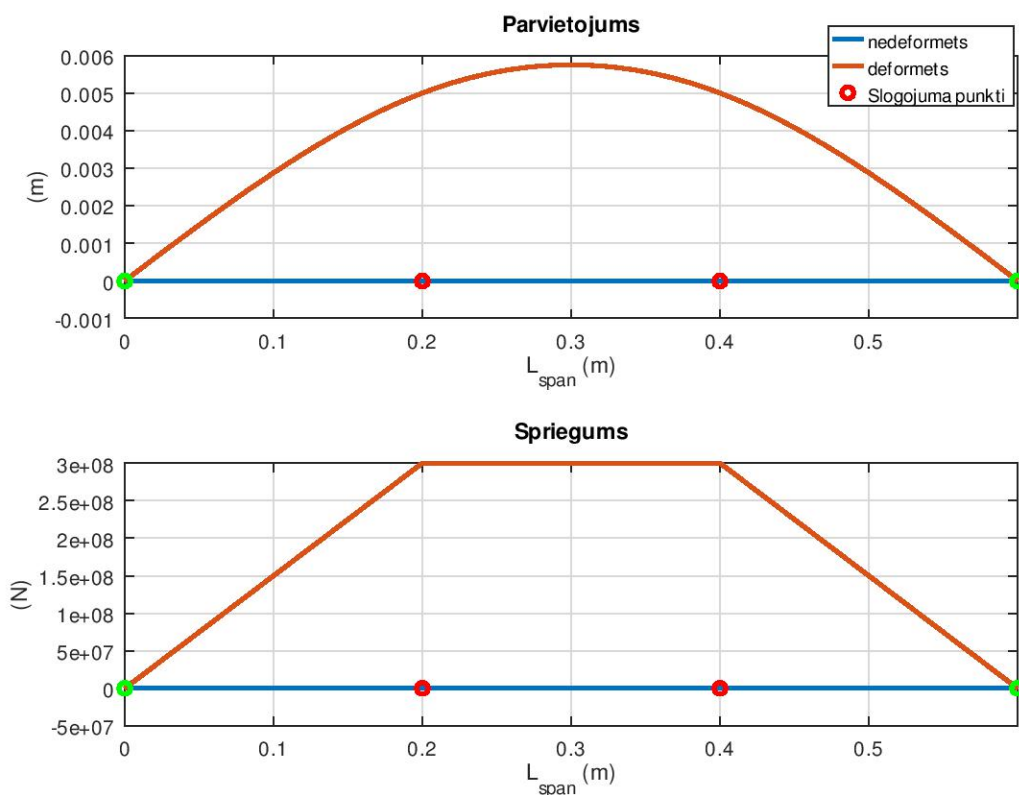
$$M(x) = \frac{P}{2} \left(\frac{L_{span}}{2} - x \right), \quad (1.39)$$

$$u(x) = -\frac{P(L_{span} - l_{span})}{96EI} (-8x^3 + 12L_{span}x^2 - 6l_{span}^2x + 3L_{span}l_{span}^2 - 2L_{span}^3), \quad (1.40)$$

reģionā, kur

$$\frac{l_{span}}{2} \leq x \leq \frac{L_{span}}{2} \quad (1.41)$$

Analītiski aprēķinātā sprieguma un pārvietojuma piemērs ir redzams 1.13. attēlā.



1.13. att. Četru punktu lieces testa analītiskā modeļa rezultātu piemērs. Pārvietojums un spriegums, slogojums pielikts virzienā no apakšas uz augšu.

Maksimālais lieces spriegums ir aprēķināms pēc [18]:

$$\sigma_{max} = \frac{3 F_c (L_{span} - l_{span})}{2 B h^2}, \quad (1.42)$$

kur F_c ir parauga sagraušanas spēks.

Efektīvā plaisas pagarinājuma garuma aprēķināšanai var izmantot šādas formulas [21]:

$$CMOD_P = \frac{4 \sigma_{NP} a}{E_c} V_P(a/h), \quad (1.43)$$

$$\sigma_{NP} = \frac{3 P D}{B h^2}, \quad (1.44)$$

$$V_P(a/h) = 0.8 - 1.7a + 2.4a^2 + \frac{0.66}{(1-a)^2}, \quad (1.45)$$

kur $CMOD_P$ ir plaisas atvēršanās pārvietojums pie jebkura ārēja slogojuma P , σ_{NP} ir nominālais spriegums paraugā pie ārēja slogojuma P , E_c ir aprēķinātais elastības modulis, B ir parauga biezums, D ir horizontālais attālums starp augšējo un atbilstošo apakšējo rullīti un a ir efektīvais plaisas pagarinājums.

Ja tiek ņemts vērā tikai parauga pašsvars, tad [20]:

$$CMOD_T = \frac{4\sigma_{NW}a}{E_c}V_T(a/h), \quad (1.46)$$

$$\sigma_{NW} = \frac{3w_g L_{span}}{4Bh^2}, \quad (1.47)$$

$$V_T(a/h) = 0.76 - 2.28a + 3.87a^2 - 2.04a^3 + \frac{0.66}{(1-a)^2}, \quad (1.48)$$

kur $CMOD_T$ ir plaisas atvēršanās pārvietojums pie parauga pašsvara, σ_{NW} ir nominālais spriegums paraugā pie pašsvara, w_g ir svars vienības garuma paraugam.

Pamatojoties uz superpozīcijas pieņēmumu efektīvo $CMOD$ var aprēķināt kā:

$$CMOD = CMOD_F + CMOD_T. \quad (1.49)$$

Sprieguma intensitātes koeficientu testa paraugam, kuram $D = h$, un uz kuru iedarbojas ārējs slogojums P , var aprēķināt pēc [22]:

$$K_I = \sqrt{\pi a} (\sigma_{NP} F_F(a/h) + \sigma_{NW} F_T(a/h)), \quad (1.50)$$

kur [21]

$$F_F(a/h) = 1.122 - 1.40a/h + 7.33(a/h)^2 - 13.08(a/h)^3 + 14.0(a/h)^4 \quad (1.51)$$

un

$$F_T(a/h) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{1.99 - (a/h)(1-a/h)[2.15 - 3.93a/h + 2.7(a/h)^2]}{(1+2a/h)(1-a/h)^{3/2}}. \quad (1.52)$$

Lai noteiktu kritisko spriegumu plaisas attīstībai, var izmantot kohēzijas stiprību σ_t , t.i. spriegumu, pie kura plaisa sāk atvērties [7]:

$$\sigma_t = \frac{2P_u}{\pi Lh}, \quad (1.53)$$

kur P_u ir maksimālais slogojums un L ir kopējais prizmas garums.

1.5. Šķiedras betona stiprināšanai

Lai arī pateicoties tā uzticamajai darbībai, betons ir kļuvis par plaši lietotu būvmateriālu, tomēr tam ir arī skaidri zināmi trūkumi: zemāka stiepes izturība un trauslums. Kopš 20. gadsimta vidus tiek ieteikts betonam pievienot šķiedru materiālus, lai uzlabotu betona mehāniskās īpašības.

Kad šķiedru šķērso aktīva plaisa, tās ieguldījumu ierobežo divi bojājuma režīmi: šķiedras izvilkšana, kas ir noderīga, lai palielinātu materiāla enerģijas izkliedi; un šķiedras stiepes pārrāvums, no kā jāizvairās, kontrolējot šķiedras garumu, diametru un stiepes izturību pret tās saistīto stiprību ar apkārtējo matricu. Šķiedras izvilkšanas laikā tās savienošanas spēja ir saistīta ar vairākiem apstākļiem, kas parasti ietver: ķīmisko adhēziju, berzi, mehānisko enkurojumu ģeometrisku deformāciju dēļ, piemēram, šķiedra ar āķiem galos, un saspiešanas efekts, kas rodas šķiedras izejas punktā un ir atkarīgs no tās slīpuma attiecībā pret plaisas virsmu. [23]

Betonā tiek izmantotas vairākas šķiedras tajā skaitā dabīgās šķiedras, piemēram, aramīds, tērauds, neilons, stikls, ogleklis, bazalts, azbests un polipropilēns. Biežāk betona stiprināšanai lietoto šķiedru mehāniskās īpašības ir apkopotas Tabulā 1.1.

1.1. tabula

Betonā lietoto šķiedru mehāniskās īpašības [24]

Šķiedru veids	Stiepes izturība (MPa)	Elastības modulis (GPa)	Pārraušanas relatīvais pagarinājums (%)
E-stikla šķiedra	3100-3800	72.5-75.5	4.7
Oglekļa šķiedra	3500-6000	230-600	1.5-2
Tērauda šķiedra	1700-2200	190-210	5-35
Polipropilēna šķiedra	450	5	10-25
Aramīda šķiedra	1377	83	2.8
Bazalta šķiedra	3000-4840	79.3-93.1	3.1-6

Tērauda šķiedru iekļaušana betonā uzlabo betona stingrību un stiepes izturību. Tomēr šādam betonam samazinās apstrādājamības iespējas un to būtiski var ietekmēt arī korozija. Stikla šķiedru pievienošana paaugstina betona stingrību, bet sārnu iedarbības dēļ samazinās betona ilgtermiņa izturība. Oglekļa šķiedrām ir labas stiprības īpašības, bet arī augstas izmaksas. Neilona un polipropilēna šķiedrām ir zems kušanas punkts un elastības modulis. [25]

Industriālās tērauda šķiedras ir viens no visbiežāk izmantotajiem šķiedru materiāliem. Tās tiek izmantotas, lai palielinātu betona sijas izturību un strukturālo integritāti. Tērauda šķiedras tiek izmantotas, lai nodrošinātu augstu izturību pret lieces un trieciena slodzi. Tas arī palielina betona siju kalpošanas laiku, palēninot plaisāšanu un palielinot nodilumizturību. [26].

Pēdējos gados pieaugošās bažas par vidi liek koncentrēties uz ar dabīgām šķiedrām pastiprinātu ilgtspējīgu kompozītmateriālu izstrādi kā arī uz atkārtotu materiālu izmantošanu. Kā vienu no piemēriem var minēt pārstrādātas tērauda šķiedras, ko iegūst no nolietotām automobiļu riepām. Šādas šķiedras var izmantot betona armēšanai tajā pat laikā ietaupot būvniecības izmaksas un nodrošinot ilgtspējīgu attīstību [2]. Cits piemērs ir bazalta šķiedras. Pētnieku uzmanība ir pievērsta bazalta šķiedrai, pateicoties tās rentablajām un izcilajām īpašībām salīdzinājumā ar citām dabiskajām šķiedrām. [25]

Bazalta šķiedras izgatavo no vulkāniskajiem iežiem kausēšanas procesā ar nekaitīgu un videi draudzīgu tehnoloģiju. Šķiedru ražošanas process ir identisks stikla šķiedrai. Taču bazalta šķiedru ražošanai vajag mazāk enerģijas līdz ar to tās ir lētākas. [25], [27]. Bazalta šķiedrām piemīt labas mehāniskās un fizikālās īpašības, piemēram, augsta izturība pret koroziju, liela termiskā pretestība un izturība pret sārmiem un skābēm. [28] Bazalta šķiedru piemēru var aplūkot 1.14. attēlā.



1.14. att. Bazalta šķiedras [29].

Rameša un Esvari [25] pētījums rāda, ka ar bazalta šķiedrām stiprināta betona parauga plīšanas modulis un stiepes izturība ir tiešā veidā atkarīga no šķiedru tilpuma un šķiedru izmēra. Piemēram, ja šķiedras tilpuma daļa ir vienāda ar 1,5 %, tad paraugu stiepes izturības uzlabojums salīdzinājumā ar kontroles paraugiem ir līdz 22,58 %. Bazalta šķiedru iekļaušana betona maisījumos no 0,5 % līdz 1,5 % tilpuma frakcijas palielināja plīšanas moduli 13-17 % robežās. Tajā pat laikā netika novērots būtisks kuba spiedes stiprības uzlabojums betonā ar iekļautām bazalta šķiedrām.

Arī Jang u.c. [29] publicētajos rezultātos par dažādu bazalta šķiedru apjoma ietekmi uz šķiedru armēta betona saspiešanas veiktspēju, bojājumu mehānismu un plaisu izplatīšanās uzvedību ir iegūti līdzīgi secinājumi. Noteikts bazalta šķiedras daudzums uzlabo betona spiedes izturību un maksimālo deformāciju. Tomēr pārmērīgas bazalta šķiedras daudzums samazina betona spiedes stiprību, un maksimālā deformācija paliek nemainīga, sasniedzot piesātinājumu. Pētījumā tiek parādīts, ka pareizs bazalta šķiedras daudzums var aizkavēt betona agrīnu plaisāšanu. Palielinoties bazalta šķiedras saturam, betona virsmas garās plaisas pamazām pārvēršas daudzās mikroplaisās.

1.6. Secinājumi

- Lai arī lineāri elastīgās plīšanas mehānika nav piemērota plaisu aprakstīšanai tādos materiālos kā betons, jo tā neņem vērā detalizētu aprakstu par to, kas notiek lūzuma procesa zonā uzskatot, ka viss process notiek tikai plaisas galā, tomēr tajā ieviestie parametri ir sastopami arī nelineārās plīšanas teorijās.
- Spriegums ir noteicošais parametrs plaisas atvēršanās un izplatīšanās raksturošanai betona tipa materiālos.
- Betonam un citiem cementējošiem materiāliem bilineāra PVS funkcija ir pierādīta kā atbilstošs tuvinājums, lai aprakstītu plaisas atvēršanās procesu.
- Četru punktu lieces tests ļauj tiešā veidā iegūt plaisas atvēršanos tīrā liecē, kas ir pamata mehānisms betona sagraušanai.
- Nejauši sadalītu šķiedru pievienošana konstrukcijas elementam kopumā uzlabo cementa matricas stiepes spēju pēc plaisāšanas un enerģijas absorbcijas veiktspēju tomēr pārmērīgi liels šķiedru daudzums var mehāniskās īpašības pasliktināt.

2. nodaļa

Laboratorijas eksperiments

2.1. Ievads

Šajā nodaļā ir aprakstīta tipiska procedūra, ko izmanto betona paraugu izgatavošanai RTU Teorētiskās mehānikas un materiālu pretestības (TMMP) katedras laboratorijā.

TMMP laboratorijā betona paraugu testēšanai izmanto četru punktu lieces testu, kas ļauj iegūt slogojuma-pārvietojuma raksturlīknes pētījumiem paraugiem. Tiltā likuma iegūšanai izmanto šķiedru izraušanas testu, šķiedru novietojot dažādos leņķos attiecībā pret parauga virsmu, lai iegūtu pilnu šķiedras uzvedības ainu. Abu minēto testu procedūras ir aprakstītas šajā nodaļā.

Laboratorijas eksperimentos iegūtie dati tiek izmantoti gan nepieciešamo ieejas parametru noteikšanai skaitliskajiem modeļiem, gan izstrādāto modeļu validēšanai.

2.2. Betona paraugu izgatavošana

Betona masa sastāv no vairākām komponentēm: cementa, smiltīm, oļiem, šķiedrām, ūdens utt. Betona mehāniskās īpašības ir atkarīgas gan no izmantotajām komponentēm, gan no to proporcijām. Katram betona pielietojumam tiek izmantotas atšķirīgas maisījumu receptes.

Izvēloties izejvielas betona ražošanai, priekšroka tiek dota vietēji pieejamiem minerāliem un cementa materiāliem. Sastāvdaļu proporcijas laboratorijas eksperimentos izmantotajam betona maisījumam ar šķiedrām ir apkopotas 2.1. tabulā. Materiālu proporcijas ir norādītas kilogramos uz m^3 .

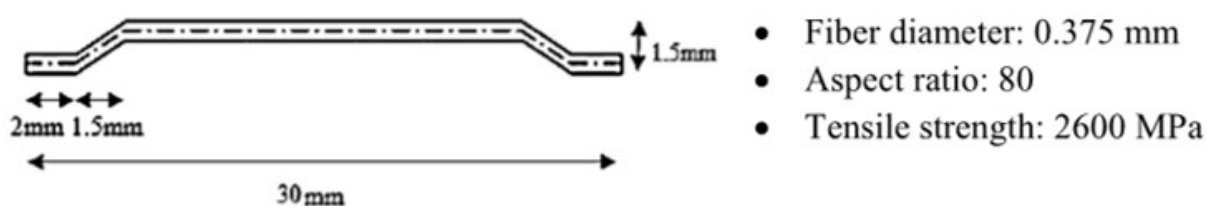
2.1. tabula

Betona maisījuma un izmantoto komponentu sastāvs paraugiem ar šķiedrām

Sastāvs	kg/m ³
Salauzts akmens 4/8 mm (Saulkalne, Latvija)	900
Kvarca smiltis 0,3/2,5 mm (Saulkalne, Latvija)	620
Kvarca smiltis 0-1 mm (Saulkalne, Latvija)	120
Dolomīta milti	75
Portland cements CEM I 42,5N (SCHWENK Latvia Ltd, Latvija)	380
Silica Fume, 971U (Elkem, Norvēģija)	25
Krāna ūdens, H ₂ O	170
Superplastifikators "Sikament 190" (Sika Baltic SIA, Latvija)	4
Šķiedras, tērauda 3D Dramix RC 80/30BP (Bekaert, Beļģija)	60, 90, 120

Tipisks maisīšanas process eksperimentā ir sekojošs: presētā maisītājā tika pievienotas rupjās, smalkās komponentes (visas sastāvdaļas) un cements un sajauktas 3 minūtes. Tad lēni un vienmērīgi maisītājā tiek pievienots ūdens ar plastifikatoru. Maisīšanu turpina vēl 7 minūtes. Pēc tam pievieno šķiedras un turpina masas sajaukšanu 3 min - 8 min atkarībā no šķiedru tipa. [17]

Skaitlisko modeļu validācijai lietotajos laboratorijas eksperimentos izmantoja Dramix 3D RC 80/30BP tērauda šķiedras. Raksturīgo šķiedras ģeometriju un parametrus var aplūkot 2.1. attēlā. Šķiedra ir pārklāta ar misiņu. Šķiedrām nav ķīmiskas saites ar betonu, izņemot iedarbīgos Van der Vālsa spēkus, un to saikni ar matricu var uzlabot mehāniskis enkurojums vai virsmas raupjums [30].



2.1. att. Dramix RC-80/30-BP šķiedra [31].

Iepriekš aprakstītās maisīšanas rezultātā šķiedras ir vienmērīgi sadalītas pa visu betona tilpumu. Vienmērīgi sadalītu šķiedru piemēru var aplūkot 2.2.(a). Ir gadījumi, kad nepieciešams šķiedru stiegrojums tikai noteiktā parauga slānī kā redzams 2.2.(b). To nodrošina paraugu izgatavojot pa slāņiem, lietojot RTU patentētu instrumentu, kas šķiedru presēšanu nodrošina ar tērauda disku komplekta palīdzību. Šādi paraugi ļauj labāk novērtēt tiltveida plaisu veidošanās parametrus.

(a)



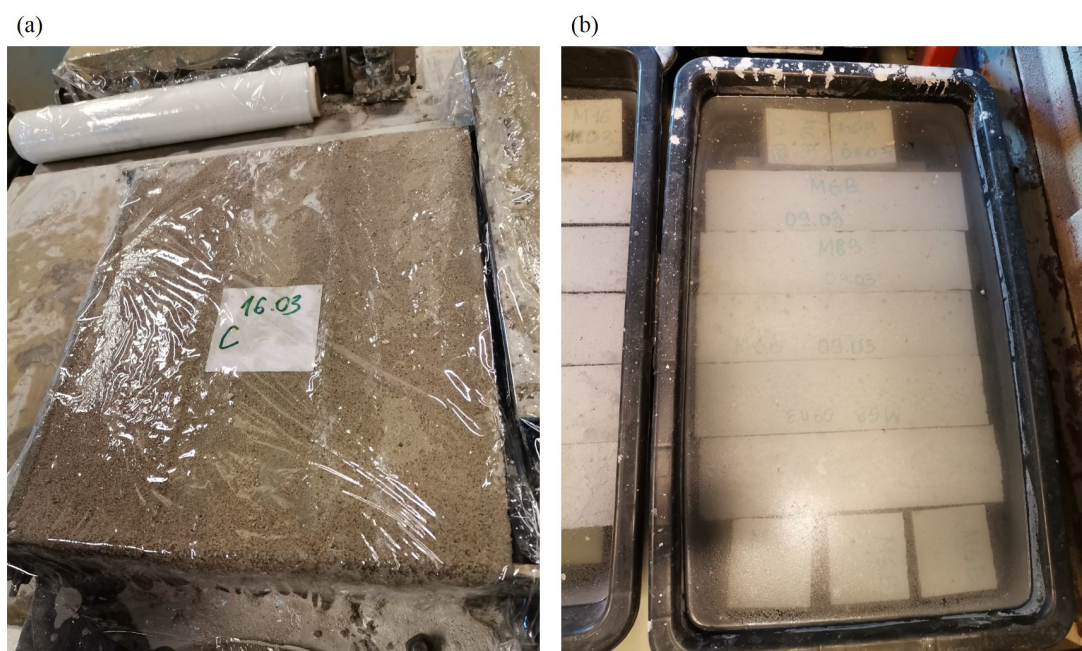
(b)



2.2. att. Šķiedru sadalījums parauga tilpumā. (a) Šķiedras vienmērīgi izkliedētas pa visu tilpumu; (b) šķiedras izvietotas tikai noteiktā prizmas slānī.

Pēc betona maisījuma izgatavošanas tas tiek iepildīts noteikta izmēra formās. Veidnes tiek noņemtas pēc 48 stundām, kurās paraugi ir turēti 20 ± 2 °C temperatūrā un 95% gaisa mitrumā, skat 2.3.(a) attēlu. Četru punktu lieces testam tiek izmantotas 100 mm × 100 mm × 400 mm prizmas. Spiedes testam tipiski izmanto 100 mm × 100 mm × 100 mm kubiskus paraugus. Pēc betona sacietēšanas paraugu noteiktu laiku uzglabā ūdenī istabas temperatūrā, skat. 2.3.(b) attēlu.

Prizmas betona paraugs ar rupju, smalku un degslānekļa pelnu frakcijām bez armējuma šķiedrām ir apskatāms 2.4. attēlā. Parauga šķērsriezums ir iegūts četru punktu lieces testa rezultātā, kas sīkāk aprakstīts nākošajā apakšnodaļā.



2.3. att. Betona prizmu izgatavošana. (a) Betona masa pēc ieliešanas veidnē; (b) paraugu "nogatavināšana" ūdens vannās.

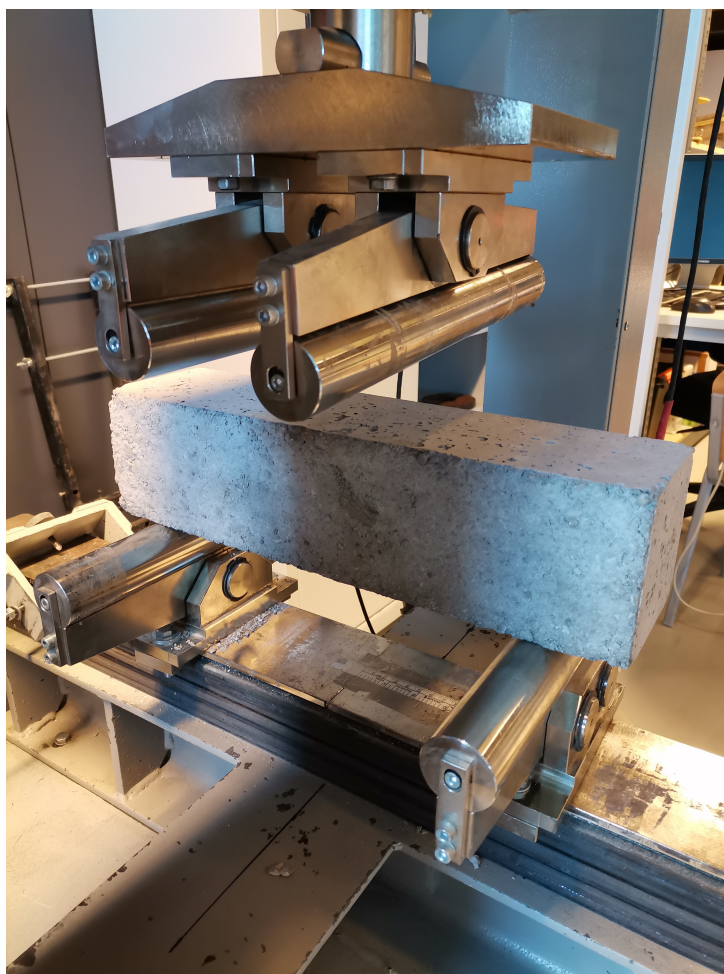


2.4. att. Betona bez šķiedrām prizmas šķērsriezuma piemērs pēc četrpunktu lieces testa.

2.3. Lieces tests

Četrpunktu lieces testus tipiski veic, kad ir pagājušas 28 dienas pēc parauga ieliešanas formā. TMMP katedras laboratorijā testu ar nemainīgu lieces momentu prizmas vidusdaļā, izmantojot slodzes caur augšējiem un apakšējiem rullīšiem, veic, izmantojot

Automax 5 četru punktu lieces testēšanas iekārtu. Testa iekārtu ar betona prizmas paraugu tajā var aplūkot 2.5. attēlā.

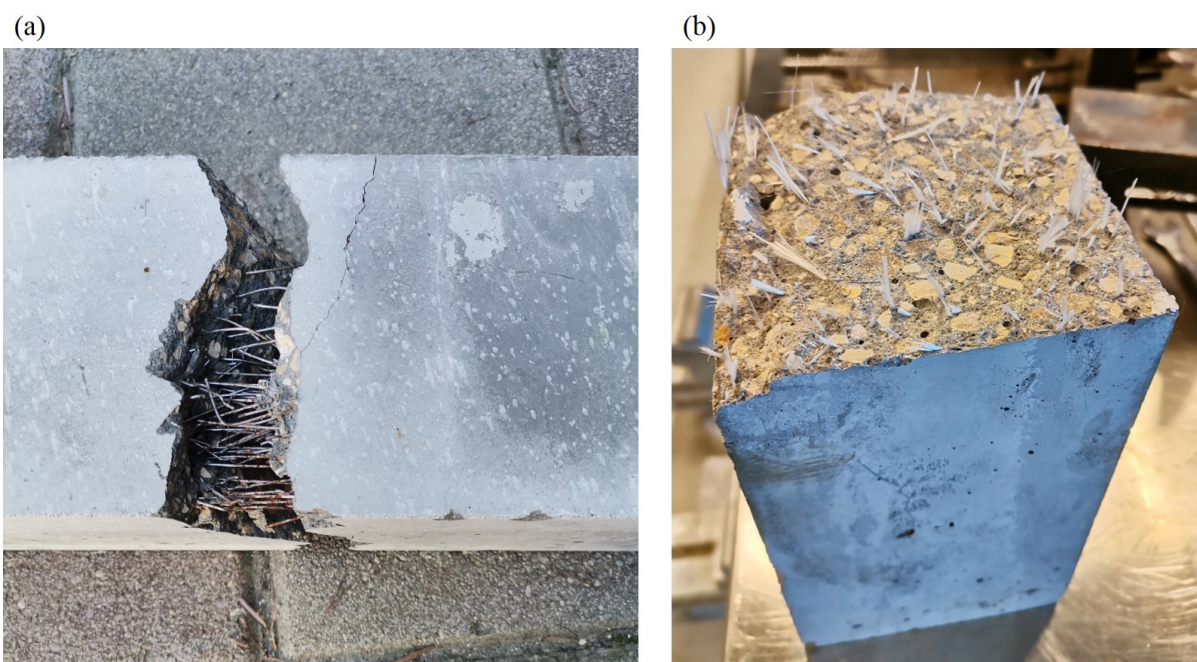


2.5. att. Četru punktu lieces testa mašīna ar betona prizmas paraugu.

50 mm attālumā no prizmas galiem tiek novietoti attiecīgie testa mašīnas apakšējie atbalsta punkti. Prizmas viduspunkta pārvietojuma reģistrēšanai testa laikā uz tās sāniem novieto rāmi ar diviem lineārā pārvietojuma pārveidotājiem (*Linear Displacement Transducers, LVDT*) *HBM W10*.

Testa laikā tiek pielietots monotoni augošs slogojums ar nelielu soli tā, lai 60 sekundēs pieaugums būtu 0,25 kN. Atbilstošā slodze un pārvietojums tiek reģistrēti pie katra palielinājuma. Parauga pārvietojums tiek iegūts, aprēķinot vidējo vērtību no abiem sensoriem. Eksperimenta laikā tiek fiksēta arī lieces izturība. Testa dati no izturības mērījumiem, izmantojot *Spider-8* datu iegūšanas sistēmu, tiek apstrādāti, sinhronizēti un saglabāti.

Sloojums tiek palielināts līdz betons ir pilnībā saplīsis. Atkarībā no šķiedru veida un garuma prizma var arī nebūt sadalīta divās daļās, piemēram, lietojot garas tērauda šķiedras skat. 2.6.(a). Trauslu šķiedru vai īsu šķiedru gadījumā testa beigās iegūst divas atsevišķas prizmas daļas, skat. 2.6.(b).



2.6. att. Betona ar šķiedrām prizmas paraugi pēc četrpunktu lieces testa. (a) Paraugs ar garām tērauda šķiedrām; (b) paraugs ar īsām polipropilēna šķiedrām.

2.4. Šķiedru izraušanas testi

Atsevišķu tērauda šķiedru izvilkšanas testi tiek veikti, izmantojot kaltētus betona paraugus. Katrai pārbaudītajai tērauda šķiedrai tika izmantota betona veidne ar divām vienādām daļām. Vienas daļas izmērs ir 50 mm x 50 mm x 30 mm (garums x platums x dziļums). Starp abām parauga daļām tiek novietota 0,5 mm bieza atdalošā plēve. Šķiedras izraušanas testa betona paraugs ir aplūkojams 2.7. attēlā. Lai paraugu pēc izgatavošanas būtu vieglāk izņemt, veidnes tiek ieļļotas ar speciālu veidnes eļļu. [32]

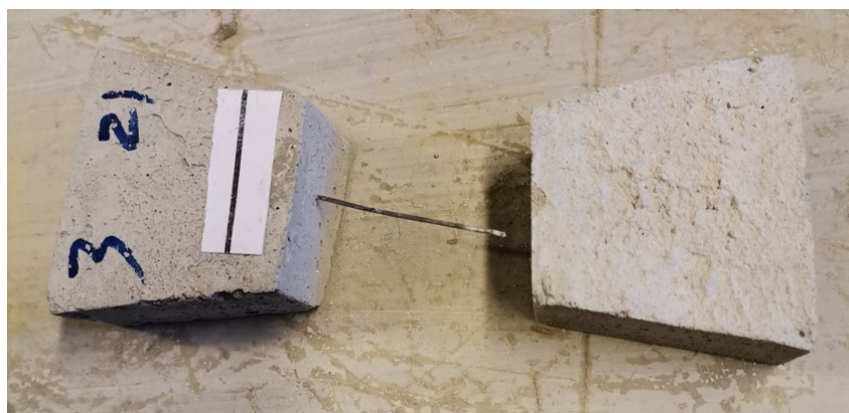
Šķiedra tiek precīzi orientēta parauga izgatavošanas laikā. Lai nepieļautu, ka šķiedras tiek pārvietotas betona matricas liešanas laikā, paraugi (skat. 2.7. attēlu) ir izgatavoti saskaņā ar šādu procedūru:



2.7. att. Betona paraugs šķiedru izraušanas testam.

- viena veidnes daļa tika piepildīta ar betonu un pēc tam puse no šķiedras garuma tiek iegremdēta betonā, izvēloties vajadzīgo šķiedras orientāciju;
- pēc 24 stundām tiek piepildīta betona veidnes otra daļa; tā kā veidnes pirmajā daļā betons jau ir sacietējis, tad šķiedras orientācija paliek nemainīga.

Pēc vienas dienas paraugi tiek izņemti no veidnēm un novietoti sacietēšanai ūdens vannā nemainīgā 20 °C temperatūrā saskaņā ar standartu. Parauga piemēru pēc šķiedras izraušanas testa var redzēt 2.8. attēlā.



2.8. att. Betona paraugs pēc šķiedru izraušanas testa.

2.5. Secinājumi

- Betona paraugu izgatavošana ir laikietilpīgs process, kas sastāv no virknes precīzi izpildāmiem soļiem.
- Lai veiktu mehānisko īpašību testus ir nepieciešams izgatavotos paraugus uzglabāt atbilstošos apstākļos vismaz 28 dienas. Testu rezultātā paraugi tiek sagrauti.

3. nodaļa

Šķiedrbetona plaisas attīstības skaitliskā modelēšana

3.1. Ievads

Iepriekšējās nodaļas secinājumi rada pamatojumu skaitlisko modeļu izveides nepieciešamībai. Tie ļauj ietaupīt gan materiālus, gan laiku, kas nepieciešams betona mehānisko īpašību izpētei.

Sākotnēji plaisas attīstība un atbilstošais PVS likums tika pētīts, lietojot galīgo elementu modeli un laboratorijas eksperimentu datus GEM modeļa validēšanai. PVS likums apraksta plīšanas procesa zonas raksturlielumus betonā un ir galvenais ievades parametrs galīgo elementu simulācijā.

Tomēr sarežģītu sistēmu skaitliskā modelēšana, lai veiktu parametru pētījumus, arī ir laikietilpīgs process. Tādēļ arvien lielāka nozīme daudzās inženierzinātņu jomās ir modeļiem, kas var iegūt precīzas ieejas – izejas parametru attiecības tiešsaistes režīmā, nevis skaitļošanas ziņā dārgas galīgo elementu vai galīgo tilpuma elementu simulācijas. Meta-modelēšana ir viena no šādām iespējām.

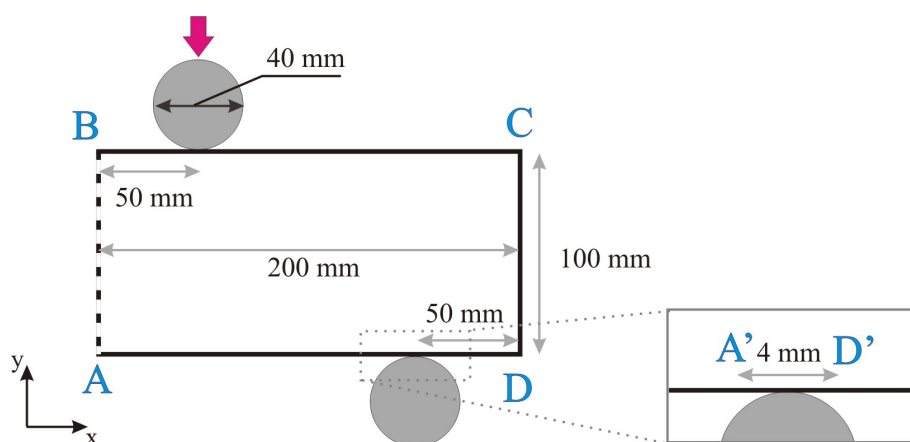
Metamodelis ir uz datiem balstīts modelis, kas mēģina paredzēt sistēmas uzvedību, izmantojot ierobežotu, skaitļošanas ziņā dārgu simulāciju kopu. Saistībā ar betona paraugu pētījumiem viens no visbiežāk sastopamajiem metamodelēšanas pielietojumiem ir sprieguma intensitātes faktora prognozēšana. Piemēram, Keprate u.c. [33] kā galīgo elementu metodes alternatīvu intensitātes faktora noteikšanai iesaka lietot Gausa procesa regresijas modeli. Kriginga metodes, kas ir viena no izplatītākajām aproksimācijām metamodelēšanā, pielietojums betona plīšanas enerģijas paredzēšanai tiek aprakstīts avotā [34]. Čens

u.c. [35] lieto atbildes virsmas metodi, lai pētītu divu faktoru – bazalta šķiedru daudzuma un otrreizējās pārstrādes betona apjoma savstarpējo ietekmi uz materiāla stiprību.

3.2. Galīgo elementu modeļa (GEM) apraksts

Lai samazinātu aprēķiniem nepieciešamo laiku, tika apskatīta 2D problēma. Pieņem, ka parauga materiāls ir izotrops ar noteiktu elastības moduli E un Puasona koeficientu ν .

Galīgo elementu modeļa skice un analizētā betona parauga dimensijas milimetros ir redzamas 3.1. attēlā. Tiek izmantoti pirmās kārtas trīsstūrveida galīgie elementi. Pieņem, ka plaisa AB sāks veidoties prizmas vidū garenvirzienā (x ass virziens) un attīstīsies taisnā līnijā uz augšu (y ass virziens). Šādā gadījumā var modelēt tikai pusi no reālā betona parauga. No iepriekš minētā izriet, ka plaisa veido divas simetriskas virsmas attiecībā pret y asi. Slogojuma pielikšanas virziens atbilst negatīvam y ass virzienam. Skaitļošanas domēna apakšējais kreisais stūris atrodas koordinātu ass sākumpunktā.

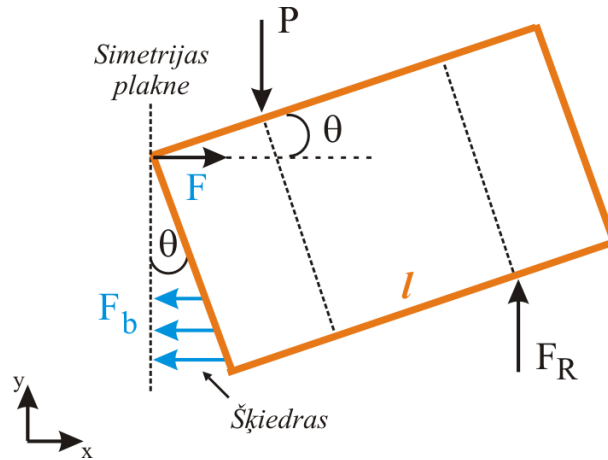


3.1. att. Skaitliskā modeļa shēma un dimensijas.

Ir zināms, ka plaisas ceļš nav absolūti taisna līnija, kas vērsta perpendikulāri pret parauga garāko malu (skat. 2.7. attēlu) un tādēļ pieņēmumi nav spēkā katram atsevišķam betona paraugam. Tomēr, tā kā darba mērķis ir iegūt plaisas attīstības reprezentāciju "vidējai" plaisai, tad uzskatāms, ka simetrijas ieviešana ir attaisnojama.

Papildus plaisas izplatīšanās ceļam tiek analizēts arī plaisas atvērums, kas ir netriviāla plaisas ceļa funkcija atkarībā no slogojuma. No laboratorijas eksperimentiem var noteikt, ka leņķis, kas veidojas starp plaisas virsmām ir mazs un tādēļ modelī tiek izmantots mazo deformāciju tuvinājums. Modeļa rezultāti tiek iegūti nedeformējot skaitļošanas režģi.

Vienkāršotu, lineāru analizētās sistēmas spēku līdzsvara modeli var aplūkot 3.2. attēlā. Šādā gadījumā plaisas funkcija ir lineāra un plaisas atvēršanās notiek visā plaisas ceļa garumā vienlaicīgi. Tiek aplūkots ideāls, ciets ķermenis (deformāciju enerģija ir nulle).



3.2. att. Spēku līdzsvara modelis vienkāršotai, lineārai sistēmai. P ir testa mašīnas pieliktais spēks, F_b ir šķiedru radītais spēks, l ir atbilstošais spēka plecs un θ ir puse no leņķa starp plaisas virsmām.

No mehānikas zināms, ka jābūt spēkā sekojošiem nosacījumiem:

$$\sum F_x = 0, \quad (3.1)$$

$$\sum F_y = 0, \quad (3.2)$$

$$\sum M = 0, \quad (3.3)$$

No testa mašīnas un šķiedru momentu līdzsvara nosacījuma analizētai sistēmai var iegūt momentu šķiedrām:

$$M_b = \int h_i f_b(\theta h_i) dh, \quad (3.4)$$

kur h_i ir punkta koordināte uz plaisas virsmas un f_b ir PVS funkcija.

Līdzīga situācija kāda ir aprakstīta 3.2. attēlā ir novērojama plaisāšanas procesa beigu fāzē četru punktu lieces testā. Šāds vienkāršots modelis ir lietojams mehānikas aprakstam plaisas noslēguma fāzē, kā arī $P - \delta$ līknes iegūšanai plīšanas procesa beigās. Sākotnējā plaisas attīstības fāzē ir jāņem vērā ķermeņa deformācijas un tam ir lietderīgi izmantot galīgo elementu modeļa aprēķinus visā prizmas laukumā (2D gadījumā).

3.2.1. Robežnosacījumi

Plaisas atvēršanās nosacījums tiek uzlikts uz malas AB (skat. 3.1. att.). Mala CD var brīvi pārvietoties xy plaknē. Gadījumos, kad tiek modelēti šķiedru betona paraugi, uzdod nosacījumu, ka B punktam PVS likums netiek pielietots. Tādējādi paraugs vienā punktā paliek savienots un tas ļauj modelēt garu šķiedru iedarbību.

Ārējo sloģojumu, kas tiek definēts ar pārvietošanu laikā, pieliek augšējā rullīša kontaktvirsmi. Sloģošanas un atbalsta rullīši, kuru diametrs ir 40 mm, tiek modelēti kā kontaktvirsmas apgabali (skat. 3.1. attēlā A'D'), kam pielieto specifisku algoritmu enerģijas minimizēšanai.

Enerģiju, ieviešot vispārināto koordināti q , var formulēt sekojoši:

$$E = \sum K_{ij} q_i q_j, \quad (3.5)$$

kur K matrica ir simetriska un q_i var būt gan pārvietojums, gan leņķis. Atbilstošās matricas K konstantes atrod lietojot GEM modeli un sekojošus sešus modeļus:

1. Balsta (apakšējā) rullītim ir definēts nemainīgs pārvietojums $du_y^s = 0$ un pagrieziņa leņķis $\theta^s = 0$. Testa mašīnas (augšējai) rullītis tiek sloģots ar pārvietošanu du_y^t , bet leņķis $\theta^t = 0$.
2. Balsta rullītim tiek definēts nemainīgs pārvietojums $du_y^s = 0$, sloģots tas tiek ar pagrieziņa leņķi $d\theta^s$. Testa mašīnas rullītim pārvietojums ir nemainīgs $du_y^t = 0$ un leņķis ir nulle.
3. Balsta rullītim ir nemainīgs pārvietojums $du_y^s = 0$ un pagrieziņa leņķis $\theta^s = 0$, savukārt testa mašīnas rullītis tiek sloģots ar pagrieziņa leņķi $d\theta^t$, bet pārvietojums ir nemainīgs $du_y^t = 0$.
4. Balsta rullītim ir nemainīgs pārvietojums $du_y^s = 0$, bet sloģots tas tiek ar pagrieziņa leņķi $d\theta^s$, savukārt testa mašīnas rullītis tiek sloģots ar pārvietošanu du_y^t , bet $\theta^t = 0$.
5. Balsta rullītim pārvietojums ir nemainīgs $du_y^s = 0$ un pagrieziņa leņķis ir nulle, bet testa mašīnas rullītis tiek sloģots gan ar pārvietošanu du_y^t , gan pagrieziņa leņķi $d\theta^t$.
6. Gan balsta, gan testa mašīnas rullītis tiek sloģots ar pagrieziņa leņķi, bet pārvietojumi abiem rullīšiem ir nemainīgi.

Pēc konstanšu atrašanas veic enerģijas minimizēšanu. Zinot enerģiju var pielietot otro Kastiljāno teorēmu, lai noteiktu spēkus:

$$-F = \frac{\partial E}{\partial u} \quad (3.6)$$

un momentus

$$-M = \frac{\partial E}{\partial \theta}, \quad (3.7)$$

kur u ir testa mašīnas rullīša pārvietojums un θ ir leņķis pie balsta vai testa mašīnas rullīšiem.

Šāda algoritma pielietošana ļauj izvairīties no neatbilstības, kas rastas, ja spēks tiktu pielikts tikai vienā režģa punktā.

Tabulā 3.1. ir salīdzināts skaitliski iegūtais maksimālais spēks pie dažādiem kontaktvirsmas garumiem. Pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem turpmākiem aprēķiniem tiek izmantots modelis ar 4 mm kontaktvirsmas garumu.

3.1. tabula

Rullīša kontaktvirsmas garuma ietekme uz maksimālo spēku

Garums (mm)	Maksimālais spēks (kN)
10	25,81
5	24,82
4	24,70
2.5	24,50

3.2.2. Režģa ietekmes novērtējums

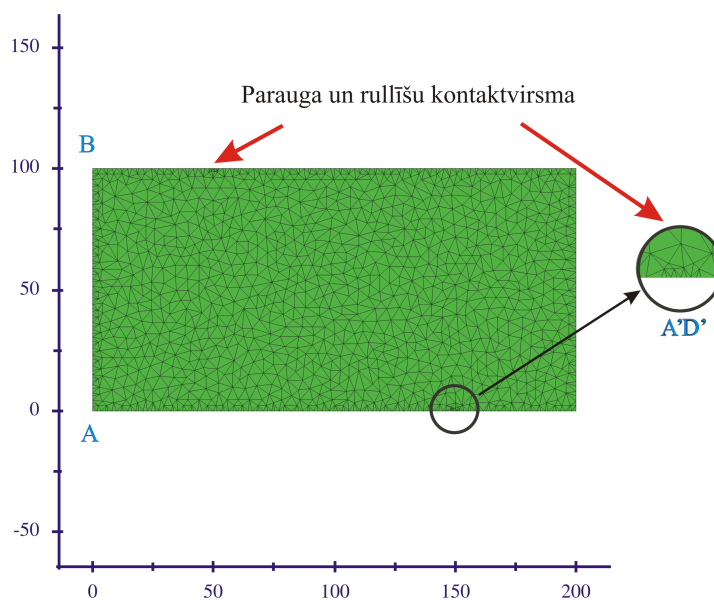
Skaitļošanas apgabala režģis ir izveidots no trīsstūrveida šūnas elementiem. Lai novērtētu šūnas elementu izmēra ietekmi uz iegūto rezultātu apskatīja trīs režģu veidus. Aprēķinātās maksimālā spēka vērtības atkarībā no režģa elementu maksimālā izmēra ir apkopotas Tabulā 3.2.

3.2. tabula

Šūnu izmēra ietekme uz maksimālo spēku

	Elementu skaits modeļi	Maksimālais spēks (kN)
M1	4949	24,39
M2	2357	24,54
M3	713	25,00

Ņemot vērā iegūtos rezultātus un skaitļošanai nepieciešamo laiku kā optimāls gadījums turpmākiem aprēķiniem tika izvēlēts modelis M2. Skaitļošanas domēna režģa piemēru var redzēt 3.3. attēlā. Papildus režģa elementu smalcinājumu pielietoja plaisas ceļam AB un rullīšu kontaktvirsmām ar paraugu (skat. A'D' apgabalu 3.3. att.).



3.3. att. Skaitļošanas domēna režģa piemērs.

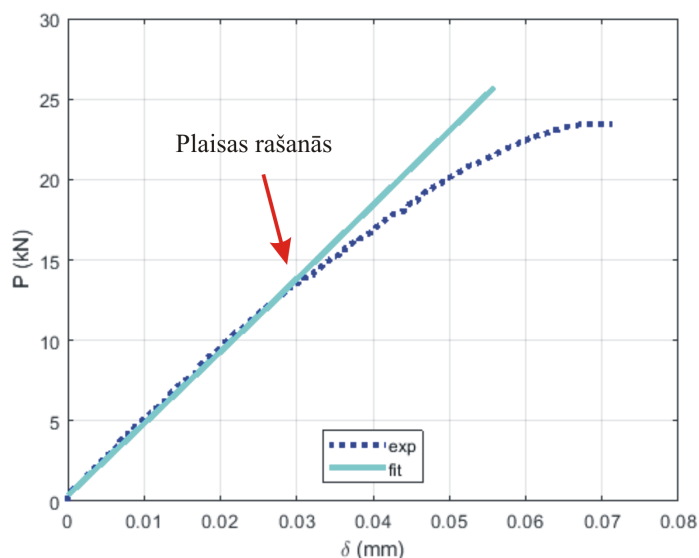
3.3. PVS funkcijas atrašana lietojot GEM

Betons līdz plīšanai ir lineāri-elastīgs materiāls. To nevar teikt par kohēzijas zonas apgabalu, kas ir relatīvi mazs un ko apraksta ar PVS funkciju. Lai izmantotu kohēzijas zonas modeli, ir svarīgi noteikt PVS līknes formu. Vienkāršās formas, ērto aprēķinu un augstās precizitātes dēļ bilineāru plaisas virsmas slokojuma līkni (1.8. att.) lieto, lai definētu plīšanas sākumu pie kohēzijas stiprības, lai noteiktu parauga maksimālo slodzi un aprakstītu parauga uzvedību pēc maksimālās vērtības sasniegšanas [36]. PVS likuma parametru, tostarp stiepes stiprības, iegūšana nav vienkārša no tiešiem stiepes testiem. Pamatojoties uz lieces testu eksperimentālajiem rezultātiem, PVS līkni var netieši noteikt ar inverso analīzi, ko izmantot betona nelineāro plīšanas parametru noteikšanai. Princips sastāv no atšķirību samazināšanas starp izmērīto un modelēto $P - CMOD$ līkni, tādējādi ļaujot definēt sakarību starp spriegumu σ un plaisas atvērumu w , proti, PVS līkni [13].

3.3.1. Paraugi bez šķiedrām

Bilineāro funkciju, kas apraksta kohēzijas zonu betonā, var sadalīt divās daļās (skat. 1.7. attēlu). Parametru noteikšanai pirmajai funkcijas daļai var izmantot eksperimentu rezultātus betona paraugiem bez šķiedrām.

Paraugiem ar elastības moduli $E = 35$ GPa un Puasona koeficientu $\nu = 0,2$ pēc 28 dienām no to izgatavošanas veicot spiedes testu tika noteikts, ka vidējā paraugu spiedes stiprība ir 72,4 MPa. Lietojot laboratorijas eksperimentā nomērīto slodze-pārvietojuma līkni noteica spēku, pie kāda sāk veidoties plaisa četru punktu lieces testā. Izmantoto $P-\delta$ līkni var aplūkot 3.4. attēlā. Ar nepārtrauktu līniju ir attēlota lineārās regresijas funkcija. Var redzēt, ka sākumā P un δ atkarība ir lineāra. Punktā, kurā līkne kļūst nelineāra, sāk veidoties plaisa.

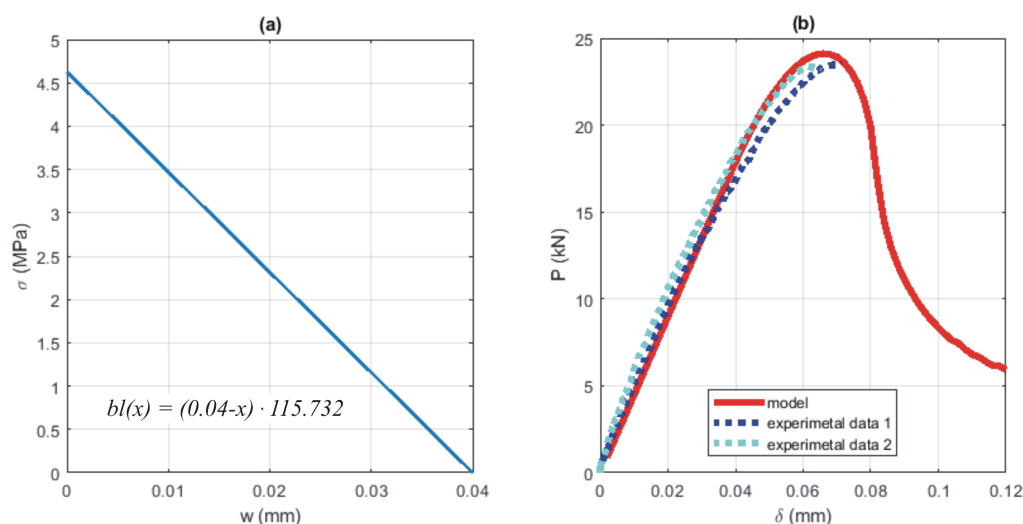


3.4. att. Eksperimentālā slodzes-pārvietojuma līkne betona paraugam bez šķiedrām.

Lietojot iegūto spēka vērtību un galīgo elementu modeli, noteica parauga stiepes stiprību, kas apskatītajam paraugam ir $f_t = 4,63$ MPa. Betona paraugam bez šķiedrām plaisas attīstību var aprakstīt ar taisni (skat. 3.5.(a)). Pielietojot šādu tuvinājumu iegūto slodzes-pārvietojuma līkni betona paraugam var aplūkot 3.5.(b) attēlā.

Modeļa kļūda maksimālajam slodzes-pārvietojumam salīdzinot ar laboratorijas eksperimentiem aprēķināta lietojot (3.8.) vienādojumu ir mazāka par 1,8 %.

$$e_1 = \frac{P_{exp}^{avg} - P_{mod}}{P_{exp}^{avg}}, \quad (3.8)$$



3.5. att. Slogojuma-pārvietojuma līknes betona paraugam bez šķiedrām. (a) PVS funkcija; (b) GEM modeļa un eksperimentu salīdzinājums.

kur P_{exp}^{avg} ir vidējā maksimālā slogojuma vērtība no diviem laboratorijas eksperimentiem.

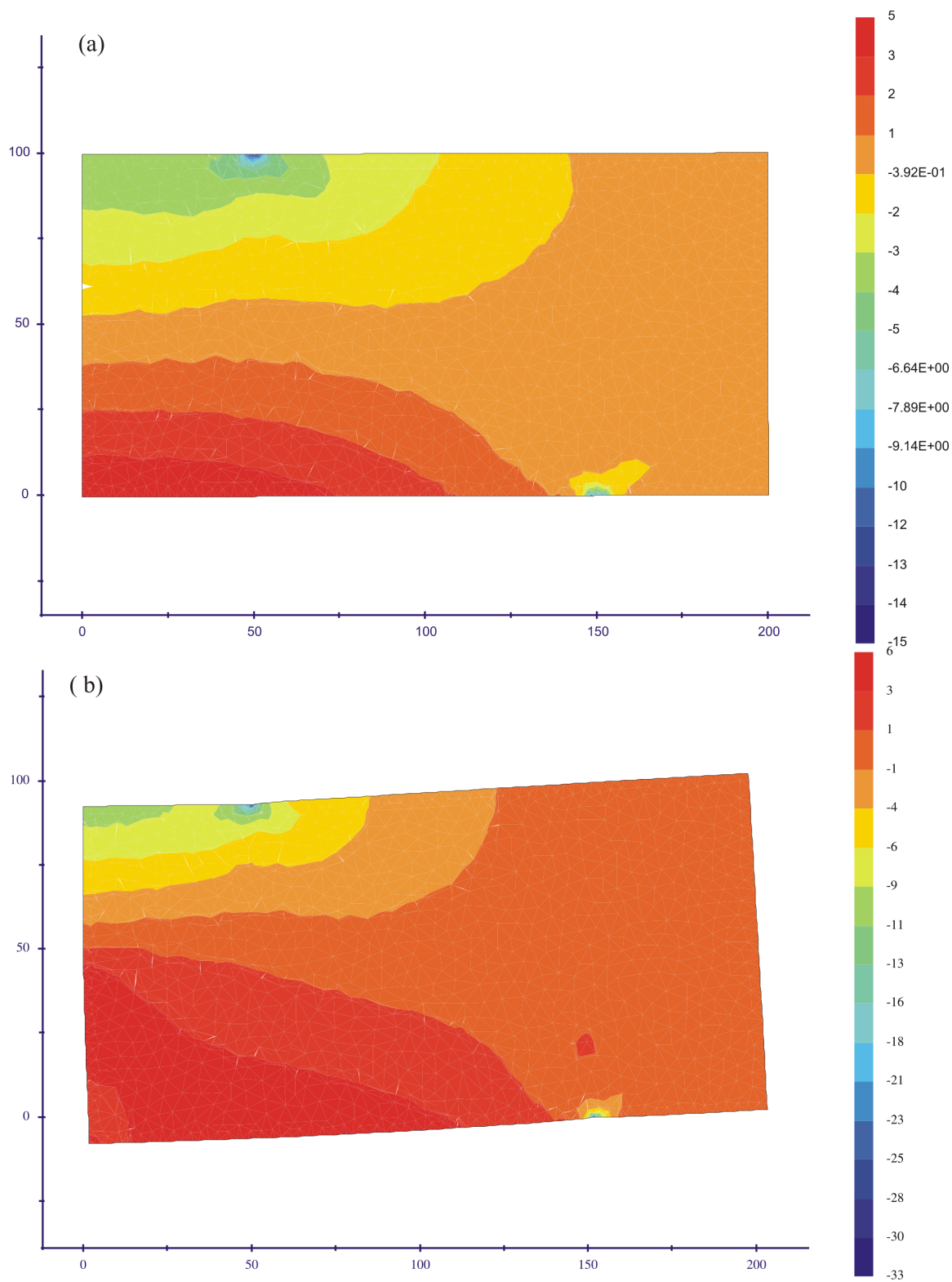
Iegūtie modelēšanas rezultāti rāda, ka plaisa sāk atvērties, kad slogojums ir $P = 14,36$ kN. Sprieguma sadalījumu skaitļošanas domēnā brīdī, kad plaisa sāk veidoties un kad paraugs ir daļēji salauzts var aplūkot 3.6. attēlā. Labākai uzskatāmībai attēlā redzamās deformācijas ir 50 reīzu palielinātas. Tā kā tiek izmantoti pirmās kārtas GEM elementi, tad sprieguma sadalījums ir gabaliem gluda funkcija.

Ar GEM modeļa palīdzību iegūtā enerģijas izdalīšanās attiecība ir $G_{IC} = 0,036$ kJ/m² un sprieguma intensitātes koeficients $K_{IC} = 1,129$ MPa/m^{1/2}. Salīdzinājumam, piemēram, avotā [20] betona paraugam ar 32.46 GPa elastības moduli un $0,2h$ sākotnējo iecirtumu intensitātes koeficients ir $K_{IC} = 1,510$ MPa/m^{1/2}, ar sākotnējo plaisu $0,5h$ sprieguma intensitātes koeficients $K_{IC} = 1,880$ MPa/m^{1/2}. Tipiska G_{IC} vērtība betonam ir 0.03 kJ/m². Līdz ar to var secināt, ka izveidotais galīgo elementu metodes modelis ir pielietojams plaisas prognozēšanai betona paraugā bez šķiedrām.

3.3.2. Paraugi ar tērauda šķiedrām

Metodikas un sākotnējā galīgo elementu modeļa izveidei, kas ļautu noteikt PVS likuma parametrus šķiedru betona paraugiem, izmantoja datus no laboratorijas eksperimentiem paraugu grupām ar sekojošu šķiedru apjomu:

- G1 - paraugi, kuros vienmērīgi iemaisīti 60 kg/m³ šķiedru;

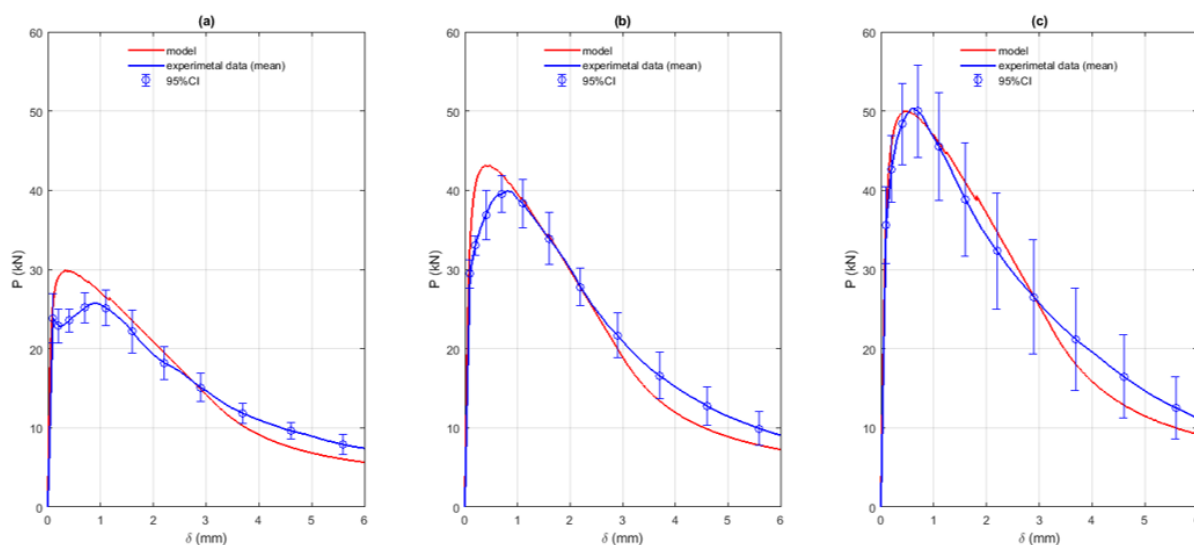


3.6. att. Sprieguma sadalījums galīgajos elementos modelētajā parauga daļā. (a) Plaisa sāk atvērties; (b) paraugs ir daļēji salauzts (deformācijas ir 50 reizes palielinātas).

- G2 - paraugi, kuros vienmērīgi iemaisīti 90 kg/m^3 šķiedru;
- G3 - paraugi, kuros vienmērīgi iemaisīti 120 kg/m^3 šķiedru.

PVS likumu šķiedru betona gadījumā formulēja lietojot bilineāru funkciju. Stiepes stiprību f_t noteica iteratīvi, izmantojot četru punktu lieces testa rezultātus un galīgo elementu modeli. Atlikušos trīs ievades parametrus (w_s , σ_s un w_0) aprēķināja lietojot attiecīgi (1.27.), (1.28.) un (1.29.) vienādojumus. Enerģiju G_f , noteica izmantojot laboratorijas eksperimentos iegūtās slogojuma-pārvietojuma līknes un formulu (1.31.).

Galīgo elementu modeļa un vidējoto eksperimentālo datu salīdzinājums slogojuma-pārvietojuma līknei ir aplūkojams 3.7. attēlā. G1 grupas rezultāti ir redzami 3.7.(a) attēlā, G2 paraugi ir 3.7.(b) attēlā un G3 grupai atbilstošā līkne ir aplūkojama 3.7.(c) attēlā. Papildus attēlos ir parādīts arī 95% ticamības intervāls, kas iegūts no sešiem laboratorijas eksperimentiem katrā no paraugu grupām.



3.7. att. GEM modeļa un vidējoto eksperimentālo datu (ar norādītu 95% ticamības intervālu) salīdzinājums slogojuma-pārvietojuma līknei betona paraugiem ar tērauda šķiedrām. (a) Paraugā vienmērīgi izkliedēti 60 kg/m^3 šķiedru (grupa G1); (b) paraugā vienmērīgi izkliedēti 90 kg/m^3 šķiedru (grupa G2); (c) paraugā vienmērīgi izkliedēti 120 kg/m^3 šķiedru (grupa G3).

No grafikiem 3.7. attēlā redzams, ka šķiedru apjoma pieaugums betona maisījumā, ļauj palielināt betona paraugu stiprību. Palielinot šķiedru daudzumu divas reizes, parauga stiepes stiprība palielinājās 1,8 reizes un maksimālā slogojuma vērtība pieauga no 26,25 kN līdz 50,4 kN. Otrkārt, salīdzinot GEM modeļa prognozēto $P - \delta$ līkni ar eksperimentālo

likni, var redzēt, ka izstrādātā metodika ļauj prognozēt šķiedru betona paraugu plaisas attīstību.

Tabulā 3.3. ir apkopotas slogojuma-pārvietojuma līknes integrāļa vērtības GEM modeļu rezultātiem un laboratorijas eksperimentos iegūtajām vidējotajām līknēm. Redzams, ka atšķirība ir mazāka par 3%, tādējādi var secināt, ka izstrādātais algoritms un izmantotais GEM modelis ar bilineāru PVS funkciju ir atbilstošs slogojuma-pārvietojuma līknes prognozēšanai šķiedru betona paraugā.

3.3. tabula

$P - \delta$ līknes integrāļa vērtības.

Paraugu grupa	Eksperiments	Modelis	Kļūda
G1	92,66	94,60	2,09%
G2	135,19	131,72	2,56%
G3	162,40	166,76	2,61%

Turpmāk aprakstītajā metamodelēšanā izmanto datus tikai no galīgo elementu modeļa rezultātiem.

3.4. Metamodelēšana PVS funkcijas noteikšanai

Metamodelēšana ļauj efektīvi izprast un novērtēt modeļa faktoru (ieejas) un atbildes (izejas) parametru savstarpējo atkarību, neizmantojot laboratorijas vai skaitliskos eksperimentus. Vispārīgā gadījumā mērķis ir iegūt atbildes funkciju Y , kas ir atkarīga no faktoru vērtībām X_i :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (3.9)$$

kur X_1, X_2, \dots, X_n koordinātas veido faktoru telpu. Atbildes funkcijas Y ģeometrisku attēlojumu faktoru telpā sauc par atbildes virsmu.

Metamodelēšana sastāv no sekojošiem etapiem:

- eksperimenta plāna izvēle, lai ģenerētu datus, ko izmantos metamodela izveidei;
- aproksimācijas modeļa izvēle, lai attēlotu datus;
- modeļa pielāgošana novērojumu datiem.

Pieredze rāda, ka labākus rezultātus iegūst metamodelēšanas etapus pielietojot iteratīvi.

3.4.1. Eksperimentu plāni

Vispārīgi eksperimentu realizēšanu var iedalīt divās grupās: (1) viena faktora eksperimenti, kuros maina tikai vienu no faktoriem, pārējos atstājot nemainīgus un (2) daudzfaktoru eksperimenti, kad vienlaicīgi tiek izmainīti visi analizētie faktori. Otrajā gadījumā ir lietderīgi izmantot speciālas metodes, lai izvēlētos konkrētās faktoru vērtības, nodrošinot gan faktoru telpas pārklājumu, gan iespējami zemākas izmaksas un mazāku laika patēriņu. Iepriekš minēto nodrošina eksperimentu plānošana.

Zinātniskajā literatūrā ir pieejams plašs klāsts dažādu eksperimentu plānu. Klasiski ir centrālie kompozītu plāni, kas bieži tiek izmantoti otrās kārtas atbildes virsmu izveidei fizikāliem eksperimentiem. Datoru eksperimentu plānošanai visefektīvāk ir izmantot telpu aizpildīšanas plānus, piemēram, dažādus latīņu hiperkuba (LH) plānu veidus [37]. Gan fizikālo, gan skaitlisko eksperimentu plānos iztvēruma punkti ir neatkarīgi. Tas ļauj datoreksperimentos izmantot paralelizāciju, tādējādi būtiski ietaupot skaitļošanai nepieciešamo laiku.

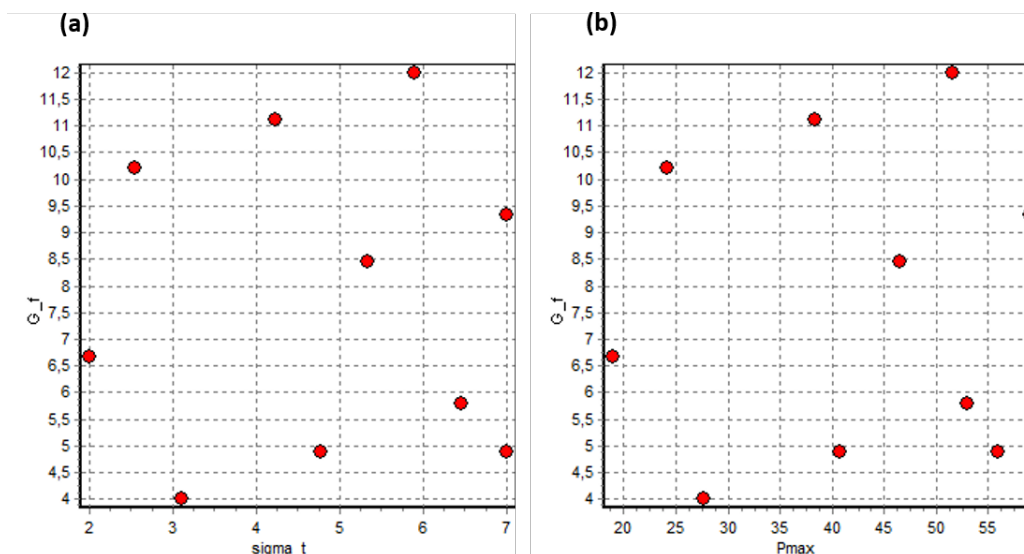
Ir pieejama arī specifiska programmatūra eksperimentu plānu un metamodeļu izveidei. Šajā maģistra darbā izmantoja *EDAOpt* programmatūra [38], kas ir izstrādāta RTU Mašīnu un mehānismu dinamikas zinātniskās pētniecības (MMDZP) laboratorijā. MMDZP laboratorijā izveidotā metodoloģija no citām atšķiras ar to, ka LH tipa plāni tiek optimizēti, izmantojot vidējo kvadrātisko kļūdu.

Lai prognozētu PVS funkcijas parametrus, šajā darbā izveidoja gan tiešo metamodeli, gan inverso modeli. Faktori un atbildes tika izvēlētas tā, lai tos pēc iespējas varētu noteikt no četrpunktu lieces testu datiem, t.i., pamatā no $P - \delta$ līknes. Tādējādi tiešajam modelim par faktoriem izvēlējās enerģiju $G_f = [4; 12]$ (N/m) un stiepes stiprību $f_t = [2; 7]$ (MPa) un par atbildi maksimālo slogojumu P_{max} (kN).

Tiešā metamodeļa izveidošanai lietotais desmit punktu LH eksperimentu plāns ir redzams 3.8.(a) attēlā.

Pēc eksperimentu plāna izveides tiešajam metamodelim izveidoja desmit PVS likumus lietojot atbilstošās enerģijas un stiepes stiprības kombinācijas. Veicot GEM simulācijas ar jaunajiem PVS likumiem, ieguva $P - \delta$ līknes un noteica atbilstošās maksimālā slogojuma vērtības katram modelētajam gadījumam.

Četrpunktu lieces testa rezultāts ir slogojuma-pārvietojuma līkne, bet stiepes stiprību noteikt laboratorijas eksperimentos ir sarežģīti. Tādēļ lietderīgi ir izveidot modeli, kas spēj prognozēt PVS likuma parametrus izmantojot $P - \delta$ līkni. To var paveikt izveidojot inverso modeli par pamatu ņemot iepriekš aprakstīto tiešo metamodeli. Inversajam modelim ieejas parametri ir enerģija G_f (N/m) un maksimālais slogojums P_{max} (kN), bet



3.8. att. Desmit punktu eksperimentu plāni: (a) Latīņu hiperkuba plāns tiešajam modelim, (b) inversā metamodeļa plāns.

izejas parametrs ir stiepes stiprība f_t (MPa). Inversā metamodeļa eksperimentu plāns ir parādīts 3.8.(b) attēlā.

3.4.2. Aproximācijas modeļa atrašana

Pēc eksperimenta plāna izvēles un nepieciešamo simulāciju veikšanas sekoja metamodelēšanas posms, kurā izvēlējās piemērotāko aproximācijas (matemātisko) modeli. Šajā pētījumā pārbaudīja atbildes virsmas metodes (AVM) un Kriginga metodes aproximācijas. AVM ir viens no klasiskiem aproximācijas modeļu tipiem. Metode ir ieteicama gadījumos, kad sistēmas parametru skaits ir neliels un tās uzvedība nav izteikti nelineāra. Metamodeļa konstruēšanai izmantojot AVM, saistību starp atbildēm un faktoriem apraksta ar polinomiem.

Salīdzinot pirmās, otrās kārtas polinomu un Kriginga metodes modeļu rezultātus, vislabākos rezultātus deva otrās kārtas polinomu aproximācijas gan tiešajam, gan inversajam metamodelim. Vispārīgā formā otrās kārtas polinomu var uzrakstīt sekojoši:

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \beta_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \beta_{ij} x_i x_j, \quad (3.10)$$

kur β ir polinoma koeficients.

Metamodeļa precizitātes novērtēšanai parasti izmanto vairākus nosacījumus. Determinācijas koeficients R^2 un Pīrsona hī kvadrāta (χ^2) kritērijs tiek izmantots, lai raksturotu metamodeļa atbilstību. R^2 tiek iegūts kā:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.11)$$

kur \bar{y} ir novēroto atbilžu y vidējā vērtība. Ja modelis precīzi paredz atbildes, tad $R^2 = 1$. χ^2 tests mēra, cik labi novērotais datu sadalījums atbilst sadalījumam, kas tiek sagaidīts, ja mainīgie lielumi ir neatkarīgi.

Lai izvairītos no papildu skaitliskiem aprēķiniem, metamodeļa verifikācijai tiek izmantota *leave-k-out* krosvalidācijas pieeja. Lai novērstu prognozēšanas kļūdas pārvērtēšanu, krosvalidācijas procentuālo kļūdu $e_{2cr\%}$ apraksta kā:

$$e_{2cr\%} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (\hat{y}_{-i} - y_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum y_i} 100\%, \quad (3.12)$$

kur \hat{y}_{-i} ir paredzētais tuvinājums, neņemot vērā punktu i ($i = 1, 2, \dots, N$). Tiek pieņemts, ka metamodelim ir pieņemama precizitāte, ja krosvalidācijas procentuālā kļūda ir mazāka par 10 % skaitliskajiem eksperimentiem un zem 5 % – fizikālajiem eksperimentiem.

EDAOpt programmatūra nodrošina virkni rādītāju, kas ļauj ērti novērtēt atbildes funkcijas aproksimācijas kvalitāti tiešā veidā. Būtiskākie no tiem ir [39]:

- *Sigma Cross* un *Sigma Cross %* - attiecīgi absolūtā un relatīvā (procentos attiecībā pret vidējo kvadrātisko novirzi no vidējās vērtības eksperimentālajos punktos) vidējā kvadrātiskā krosvalidācijas kļūda;
- *R2 adjusted* - determinācijas koeficients;
- *Sigma* un *Sigma %* - absolūtā un relatīvā (procentos attiecībā pret vidējo kvadrātisko novirzi no vidējās vērtības eksperimentālajos punktos) aproksimācijas vidējā kvadrātiskā novirze, kas sarēķināta nefiltrētajos punktos;
- *MaxError* un *MaxRelError* - attiecīgi maksimālā absolūtā un relatīvā aproksimācijas kļūda eksperimentu punktos.

3.4.3. Maksimālā slogojuma un stiepes stiprības prognozēšanas modeļi

Tabulās 3.4. ir salīdzināti pārbaudīto aproksimācijas modeļu kvalitātes kritēriji. Kā jau iepriekšējā apakšnodaļā bija minēts, abos gadījumos vismazākā krosvalidācijas kļūda ir novērojama otrās kārtas polinomu modeļiem. Tiešajam metamodelim tā ir 1,8% un inversajam modeli 2,9%, kas atbilst arī nosacījumam, ka skaitliskajos eksperimentos krosvalidācijas kļūda nedrīkst pārsniegt 10%. Arī determinācijas koeficienta vērtības apstiprina modeļa atbilstību. Abos gadījumos tiek izpildīts Pīrsona χ^2 kritērijs.

3.4. tabula

Metamodeļu kvalitātes kritēriji.

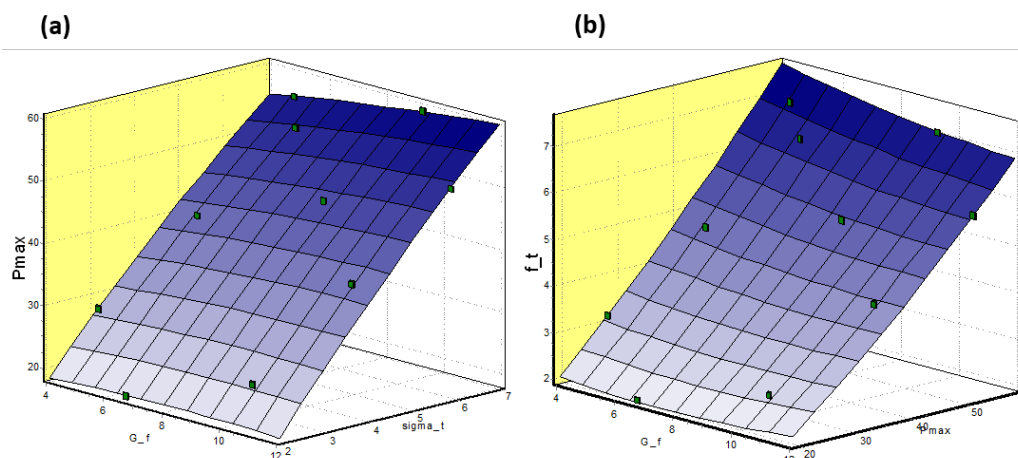
Modeļa veids	Krosvalidācijas kļūda	R^2	χ^2 tests
Tiešais modelis			
Pirmās kārtas polinoms	7,2%	0,996	+
Otrās kārtas polinoms	1,8%	0,999	+
Kriginga metode	33,4%	-	-
Inversais modelis			
Pirmās kārtas polinoms	7,1%	0,996	+
Otrās kārtas polinoms	2,9%	0,999	+
Kriginga metode	30,6%	-	-

No izveidotā metamodeļa izriet, ka maksimālo slogojumu P_{max} kā funkciju no enerģijas G_f un stiepes stiprības f_t var iegūt sekojoši:

$$P_{max}(f_t, G_f) = 0,278 + 8,728f_t + 0,293G_f - 0,209f_t^2 + 0,121f_tG_f - 0,032G_f^2. \quad (3.13)$$

Tiešā un inversā metamodeļu atbildes virsmas, kas iegūtas lietojot otrās kārtas polinoma aproksimāciju, un skaitlisko eksperimentu punkti ir redzami 3.9. attēlā.

Metamodeļa verificēšanai izvēlējās trīs punktu faktoru telpā. Lietojot galīgo elementu modeli aprēķināja $P - \delta$ liknes un noteica maksimālo slogojumu. GEM modeļa un tiešā metamodeļa rezultāti attiecīgajos punktos ir apkopoti Tabulā 3.5. Redzams, ka zinot divus PVS funkcijas parametrus ar metamodeļa palīdzību var precīzi prognozēt maksimālo slogojuma vērtību četru punktu lieces testā.



3.9. att. Atbildes virsmas un skaitlisko eksperimentu punkti: (a) tiešais metamodelim, (b) inversais metamodelis.

3.5. tabula

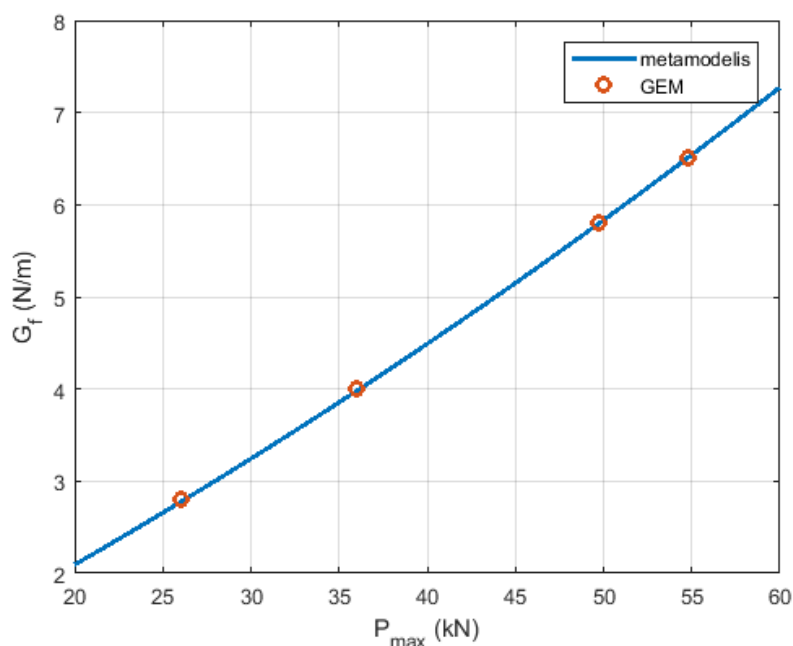
Metamodeļa un GEM modeļa rezultātu salīdzinājums.

f_t (MPa)	G_f (N/m)	P_{max}		Kļūda (%)
		Metamodelis	GEM	
3,0	5,0	27,05	27,09	0,15
4,0	8,0	35,99	35,94	0,14
6,0	11,0	52,41	52,36	0,1

Inverso modeli veidoja stiepes stiprībai f_t kā funkcijai no enerģijas G_f un maksimālā slogojuma P_{max} , jo abus šos ieejas parametrus var viegli noteikt no lieces testa mērījumiem. Izmantojot iepriekš izveidoto tiešo modeli un otrās kārtas polinoma aproksimāciju, ieguva sekojošu inverso modeli:

$$f_t(P_{max}, G_f) = 0,084 + 0,110P_{max} - 0,054G_f + 0,0005P_{max}^2 - 0,0024P_{max}G_f + 0,0067G_f^2. \quad (3.14)$$

Inversā modeļa verifikācija tika īstenota, izvēloties konstantu enerģijas vērtību $G_f = 4$ N/m, bet maksimālo slogojumu mainot intervālā no 20 līdz 60 kN. Inversā modeļa prognozēto stiepes izturības grafiku, kas aprēķinātu pēc (3.14.) vienādojuma un skaitliskajos eksperimentos iegūtās vērtības (attēloti ar punktiem) pie konstantas enerģijas var aplūkot 3.10. attēlā. Var redzēt, ka arī iegūtais inversais modelis labi saskan ar galīgo elementu modeļa rezultātiem. Kļūda analizētajos punktos ir mazāka par 1%.



3.10. att. Inversā metamodela verifikācija pie konstantas enerģijas $G_f = 4$ N/m. Salīdzinājums ar galīgo elementu modeļa rezultātiem.

Veiktā analīze liecina, ka izstrādātā metamodelēšanas metodoloģija nodrošina, ka iegūtajām faktoru un atbilžu attiecībām ir laba atbilstība skaitliskajiem eksperimentiem, tādēļ tā ir lietojama gan PVS funkcijas parametru noteikšanai, gan slogojuma-pārvietojuma līknes rekonstruēšanai. Papildus var piebilst, ka metamodela izmantošana ļauj iegūt rezultātu uzreiz, turpretī GEM modeļa aprēķins ilgst aptuveni 1,5 h.

3.5. Secinājumi

- Izveidotais galīgo elementu metodes modelis ir pielietojams plaisas attīstības prognozēšanai betona paraugā bez šķiedrām. Modeļa kļūda maksimālā slogojuma paredzēšanai ir mazāka par 3%. Plaisas virsmu slogojuma likumu betonā bez šķiedrām var aprakstīt ar lineāru funkciju.
- Izstrādātā modelēšanas metodika un izmantotais GEM modelis ar bilineāru PVS funkciju ir atbilstošs slogojuma-pārvietojuma līknes prognozēšanai šķiedru betona paraugā. Salīdzinot skaitliskos un laboratorijas eksperimentu rezultātus $P-\delta$ līknes integrāļa vērtībām, iegūtā atšķirība bija mazāka par 3%.

- Viena no PVS funkcijas parametra – stiepes stiprība, noteikšana laboratorijas eksperimentos ir sarežģīta, tajā pat laikā tipisks četrpunktu lieces testa rezultāts ir sloojuma-pārvietojuma līkne. Tādēļ lietderīgi izmantot metamodelis, kas spēj prognozēt PVS likuma parametrus izmantojot $P - \delta$ līkni. Iegūtā inversā metamodeļa kļūda salīdzinot ar GEM modeļa rezultātiem ir mazāka par 1%.

Secinājumi un turpmākais darbs

Šajā darbā tika pētīta plaisas attīstība šķiedru betonā, lietojot gan galīgo elementu modeli, kas tika validēts ar laboratorijā iegūtiem četrpunktu lieces testu datiem, gan metamodelēšanas pieeju.

Apkopojot pētījuma rezultātus, var izdarīt vairākus secinājumus.

1. Spriegums ir noteicošais parametrs plaisas atvēršanās un izplatīšanās raksturošanai betona tipa materiālos.
2. Lai veiktu mehānisko īpašību testus betonam ir nepieciešams izgatavot paraugus uzglabāt atbilstošos apstākļos vismaz 28 dienas, papildus tam, testu laikā paraugi tiek sagrauti, tādēļ ir lietderīgi izveidot skaitliskos modeļus, kas ļauj ietaupīt gan laiku, gan materiālus.
3. Iegūto galīgo elementu modeļu rezultātu salīdzinājums ar laboratorijas eksperimentu datiem rāda, ka bilineāra PVS funkcija ir atbilstošs tuvinājums, lai aprakstītu plaisas atvēršanās procesu betonā. Modeļu atšķirība no laboratorijas eksperimentu rezultātiem četrpunktu lieces testiem ir mazāka par 3%.
4. Viena no PVS funkcijas parametra – stiepes stiprība, noteikšana laboratorijas eksperimentos ir sarežģīti, tajā pat laikā tipisks četrpunktu lieces testa rezultāts ir sloojuma-pārvietojuma līkne. Tādēļ tika izveidots metamodelis, kas spēj prognozēt PVS likuma parametrus izmantojot $P - \delta$ līkni. Iegūtā inversā metamodeļa kļūda salīdzinot ar GEM modeļa rezultātiem ir mazāka par 1%.

Turpmākā darba virzieni.

1. Pielāgot izveidotos skaitliskos modeļus betona paraugiem ar īsākām šķiedrām, piemēram, bazalta vai bazalta-bora šķiedrām.
2. Papildināt galīgo elementu modeli ar iespēju definēt dažādas fāzes betona paraugā, tādējādi ļaujot prognozēt reālistiskāku plaisas ceļu.

Autora ieguldījums

Darba autore veica maģistra darbā iekļautās informācijas un zinātniskās literatūras apkopojumu, kā arī apguva GEM programmas vidi, kurā patstāvīgi formulēja visas atrisināmās skaitliskās problēmas. Autore ir izveidojusi eksperimentu plānus un metamodeļus, kas tiks turpmāk vispārināti, lai tos varētu pielietot plašākam uzdevumu klāstam. Darbā izmantotos laboratorijas eksperimentu datus ir ieguvis kolēģis Vitālijs Lūsis no Rīgas Tehniskās Universitātes.

Pateicības

Izsaku pateicību darba zinātniskajam vadītājam Normundam Jēkabsonam par palīdzību un padomiem darba izstrādes gaitā. Īpašs paldies par atļauju izmantot viņa izstrādāto galīgo elementu programmatūru.

Paldies Vitālijam Lūsim par laboratorijas eksperimentu datiem.

Literatūra

- [1] Hanadi Abdulridha Lateef, Rafil Mahmood Laftah, and Nabeel Abdulrazzaq Jasim. Investigation of crack propagation in plain concrete using phase-field model. *Materials Today: Proceedings*, 57:375–382, 2022.
- [2] Xia Qin and Sakdirat Kaewunruen. Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 327:126967, 2022.
- [3] edit. Alberto Carpinteri. *Nonlinear Crack Models for Nonmetallic Materials*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [4] Zdeněk P. Bažant and Jaime Planas. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials. 4th Edition*. CRC Press, 1998.
- [5] Marreddy Ambati, Tymofiy Gerasimov, and Laura De Lorenzis. A review on phase-field models of brittle fracture and a new fast hybrid formulation. *Comput Mech*, 55: 383–405, 2015.
- [6] Philip K Kristensen, Christian F Niordson, and Emilio Martínez-Pañeda. An assessment of phase field fracture: crack initiation and growth. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 379:20210021, 2021.
- [7] Elices E., Rocco C., and Rosello C. Cohesive crack modelling of a simple concrete: Experimental and numerical results. *Engineering Fracture Mechanics*, 76:1398–1410, 2009.
- [8] T.L. Anderson. *Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications. 4th Edition*. CRC Press, 2017.
- [9] Zihai Shi. *Crack Analysis in Structural Concrete. Theory and Applications*. Butterworth-Heinemann, 2009.

-
- [10] Bhushan L. Karihaloo. *Fracture mechanics and structural concrete*. Longman Scientific and Technical Publishers, John Wiley, 1995.
- [11] Meinhard Kuna. *Finite Elements in Fracture Mechanics*. Springer, 2013.
- [12] Seung Hee Kwon, Zhifang Zhao, and Surendra P. Shah. Effect of specimen size on fracture energy and softening curve of concrete: Part ii. inverse analysis and softening curve. *Cement and Concrete Research*, 38:1061–1069, 2008.
- [13] Shaowei Hu and Bing Fan. Study on the bilinear softening mode and fracture parameters of concrete in low temperature environments. *Engineering Fracture Mechanics*, 211:1–16, 2019.
- [14] Per-Erik Petersson. *Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials*. Division of Building Materials, LTH, Lund University, 1981.
- [15] G.V. Guinea, J. Planas, and M. Elices. A general bilinear fit for the softening curve of concrete. *Materials and Structures*, 27:99–105, 1994.
- [16] RILEM. *FMC1 Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams*. 1994.
- [17] Vitalijs Lūsis, Krishna Kiran Annamaneni, and Andrejs Krasnikovs. Concrete reinforced by hybrid mix of short fibers under bending. *Fibers*, 10:1–11, 2022.
- [18] Aurélien Doitrand, Ronan Henry, and Sylvain Meille. Brittle material strength and fracture toughness estimation from four-point bending test. *Journal of Theoretical, Computational and Applied Mechanics*, pages 1–17, 2021.
- [19] Pronk A.C. *Theory of the four point dynamic bending test*. 2006.
- [20] Yangyang Yina un Yanmin Qiaob un Shaowei Hu. Four-point bending tests for the fracture properties of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 211:371–381, 2019.
- [21] Tada H., Paris P.C, and Irwin G.R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. ASME Press, 2000.
- [22] Murakami Y. *Stress intensity factors hand book*. Pergamon Press, 1987.
- [23] M.R. Carvalho, J.A.O. Barros, Y. Zhang, and D. Dias da Costa. A computational model for simulation of steel fibre reinforced concrete with explicit fibres and cracks. *Comput. Methods Appl. Engrg*, 363:112879, 2020.

-
- [24] Sruthi Jalasutram, Dipti Ranjan Sahoo, and Vasant Matsagar. Experimental investigation on mechanical properties of basalt fibre-reinforced concrete. *Struct. Conct*, 2016.
- [25] Ramesh B and Eswari S. Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete: An experimental study. *Materials Today: Proceedings*, 43:2317–2322, 2021.
- [26] Vajrala Kavya Sameera and Lakshmi Keshav. Properties and performance of steel fiber reinforced concrete beam structure – review. *Materials Today: Proceedings*, In Press, 2022.
- [27] S.S Asadi, S.P. Asadi, Sai S. Asadi, S. Alla, and M. Sujatha. An experimental crack evolution of concrete with fly-ash and hybrid fibers. *Materials Today: Proceedings*, 43:2083–2090, 2021.
- [28] Sim J., Park C., and Moon D.Y. Characteristics of basalt fibre as a strengthening material for concrete structures. *Compos. Part B Eng.*, 36:504–512, 2005.
- [29] Liyun Yang, Huanzhen Xie, Shizheng Fang, Chen Huang, Aiyun Yang, and Yuh J. Chao. Experimental study on mechanical properties and damage mechanism of basalt fiber reinforced concrete under uniaxial compression. *Structures*, pages 330–340, 2021.
- [30] ACI Committee. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. *Farmington Hills, MI, USA*, 544, 2002.
- [31] Y.Y.Y. Cao, Q.L. Yua, H.J.H. Brouwers, and W. Chen. Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from ultra-high performance concrete (uhpc). *Cement and Concrete Research*, 120:164–175, 2019.
- [32] Vitalijs Lusiš, Olga Kononova, Arturs Macanovskis, Rimvydas Stonys, Inga Lasenko, and Andrejs Krasnikovs. Experimental investigation and modelling of the layered concrete with different concentration of short fibers in the layers. *Fibers*, 9:1–24, 2021.
- [33] Arvind Keprate, R.M. Chandima Ratnayake, and Shankar Sankararaman. A surrogate model for predicting stress intensity factor: An application to oil and gas industry. *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, pages 1–13, 2017.

-
- [34] Iman Afshoon Mahmoud and Miri Seyed Roohollah Mousavi. Combining kriging meta models with u-function and k-means clustering for prediction of fracture energy of concrete. *Journal of Building Engineering*, 35:102050, 2021.
- [35] Xue-Fei Chen, Shi-Cong Kou, and Feng Xing. Mechanical and durable properties of chopped basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete and the mathematical modeling. *Construction and Building Materials*, 298:123901, 2021.
- [36] Jeffrey Roesler, Glaucio H. Paulino, Kyoungsoo Park, and Cristian Gaedicke. Concrete fracture prediction using bilinear softening. *Cement and Concrete Composites*, 29:300–312, 2007.
- [37] S. Upnere. *Lieljaudas ūdensdzeses sistēmu dinamikas un drošuma izpēte*. RTU Izdevniecība, 2019.
- [38] J. Auzins, A. Janusevskis, J. Janusevskis, and E. Skuķis. Software edaopt for experimental design, analysis and multiobjective robust optimization. *Proc. of OPT-i International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization*, pages 101–123, 2014.
- [39] J. Auziņš and A. Januševskis. *Ekperimentu Plānošana un Analīze*. RTU Izdevniecība, 2007.
-

Maģistra darbs "GEM bāzēts metamodelis betona plaisas virsmu vienojošu šķiedru sloģojuma likuma identifikācijai" izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētģjums veikts patstāvģgi, izmantoti tikai tajā norādģtie informāģijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopģja atbilst izdrukai.

Autors: Sabģne Upnere

Rekomendģju darbu aizstāvēģanai:

Darba vadģtāģjs: PhD Normunds Jģkabsons

Recenzents: Dr. phys Sandris Lāģis

Darbs iesnieģts Fizikas nodaģģ 20.06.2022.

Dekāna pilnvarotā persona:

Darbs aizstāvēģts maģistra gala pārbaudģjumu komisģjas sģdģ
27.06.2022. protokols nr.

Komisģjas sekretārs: