Sergejs Tarasovs

Nelineāras plaisu problēmas ar pielietojumiem kompozītos un ǵeomehānikā

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs:
Dr. habil. sc. ing.
Prof. Vitauts Tamužs

Latvijas Universitāte
Polimēru mehānikas institūts

Rīga — 2008

Promocijas darba veids: zinātnisku publikāciju kopa.

Zinātniskais vadītājs: Prof. Dr. Habil. Sc. Ing. **Vitauts Tamužs** (Latvijas Universitāte)

Darba recenzenti:

1. Vad. pētnieks, Dr. Habil. Phys. **Donāts Millers**, LU CFI
2. LZA kor. loc., Profesors, Dr. Sc. Ing. **Andris Čate**, RTU
3. Asoc. profesors, Dr. Phys. **Andris Jakovičs**, LU

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

2008. gada ___________________

Pulksten ___________________

______________________________________ auditorijā.

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

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

Šis darbs izstrādāts ar Europas Sociālā fonda atbalstu nacionālās programmas "Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem" projekta "Doktorantu un jauno zinātnieku atbalsts Latvijas Universitātē" ietvaros.

This work has been partly supported by the European Social Fund within the National Programme "Support for the carrying out doctoral study programm's and post-doctoral researches" project "Support for the doctoral students and young researchers at University of Latvia".

Anotācija

Nelineāru problēmu risinājums mehānikā parasti ir sarežģīts uzdevums. Tas prasa lielu darba ieguldījumu analītiskajā un skaitliskajā risinājuma daļā (analītiskais risinājums lielākai problēmu daļai neeksistē). Šīs darbs ietver sevī nelineāru problēmu risinājumu ieskaitot plaisu izplatīšanos un materiāla sabrukšanu.

Darba pirmā daļā tika izstrādāta eksperimentāla metodika ar mērķi noskaidrot vienvirziena un transversāli stiegrotu kompozītu atslāņošanas īpašības. Šķērssaišu likums, kas var tikt aprēķināts, izmantojot eksperimentālus datus tiek uzskaitīts par svarīgu materiāla īpašību. Vienkārša skaitliska procedūra ar iepriekšnoteiktu šķērssaišu likuma izmantošanu ir ierosināta plaisu palielināšanās slāņainos kompozītos simulēšanai.

Darba otrā daļā tiek piedāvāts trīsdimensiju matemātiskais modelis Hot Dry Rock ģeotermāla rezervuāra analīzei. Izmantojot Laplasa integrālo transformāciju un Grīna funkciju risinājums tiek pārvērsts integrāla vienādojuma veidā plaisas virsmā, kas izslēdz vajadzību diskredizēt bezgalīgu 3D rezervuāru.

Izmantojot esošo modeli temperatūra un inducētie termiskie spriegumi var būt noteikti rezervuārā jebkura laika momentā, kas padara sistēmu ļoti efektīvu ģeotermālu rezervuāru analīžu veikšanā.

1 Ievads

1.1 Darba mērķis

Darba galvenais mērķis ir eksperimentālas un skaitliskas metodikas izveidošana kompozītu atslāņošanas analizēšanai un ģeotermāla rezervuāra trīsdimensiju skaitliska modeļa izveidošana. Sekojošie uzdevumi tiek veikti mērķu sasniegšanai:

- Vienvirziena un transversāli stiegrotu kompozītu atslāņošanas eksperimentālo datu analīze.
- Šķērssaišu likuma kā materiāla īpašības izpēte un tā izmantošana kompozītu atslāņošanas prognozēšanā.
- Ģeotermāla rezervuāra trīsdimensiju skaitliska modeļa izstrāde izvades temperatūras prognozēšanai ilglaicīgam periodam.
- Termiski inducētu spriegumu ietekmes uz ģeotermāla rezervuāra plīsumu stabilitāti pētīšana.

1.2 Darba aktualitāte

Ar šķiedrām stiegrotie kompozīti tiek plaši pielietoti mūsdienās lidmašīnu un citu konstrukciju būvniecībā. Šī materiāli ir viegli un viņiem piemīt augstākas kvalitātes īpašības. Tajā paša laikā kompozītu nehomogēna struktūra ir sarežģītākas mehāniskas uzvedības iemesls salīdzinājumā ar tradicionāliem materiāliem. Kompozītiem ir dažādas sagraušanas modas, tāpēc ir jāizmanto jaunās eksperimentālas un skaitliskas metodes, lai prognozētu kritisko slodzi no kompozītiem veidotām konstrukcijām. Šajā darbā tika pētīta šķērssaišu ietekme uz stiegrotu kompozītu atslāņošanās īpatnībām.

Ģeotermālās enerģijas izmantošana ir svarīga, vairākus gadus pētīta tēma. Viens no galvenajiem ģeotermālu rezervuāru plānošanas un vadības jautājumiem ir enerģijas iegūšanas apjomu palielināšana ilglaicīgas darbības periodā.

Šīs problēmas risinājumam ir nepieciešama sarežģītu matemātisku un skaitlisku modeļu pielietošana. Šajā darba rezultātā tiek izveidots jaunais trīsdimensiju modelis.

1.3 Zinātniskais jaunieguvums un galvenie rezultāti

Tika izstrādāta eksperimentālā tehnoloģija vienvirziena kompozītu atslāņošanas īpašību mērīšanai. Līdzīga metodoloģija tika veiksmīgi pielietota transversāli stiegrotu kompozītu atslāņošanai. Tika piedāvāta skaitliska metodika atslāņošanas procesa prognozēšanai kompozītos izmantojot eksperimentāli iegūtus datus.

Tika izstrādāts jaunais skaitliskais modelis ģeotermālu rezervuāru simulēšanai. Ar piedāvātā modeļa palīdzību ir iespējams aprēķināt temperatūras sadali un termiski inducētus spriegumus rezervuārā iekšpusē ilglaicīgam periodam un prognozēt plaisu slīdi apkārtējo akmeņu termiskas dzesēšanas dēļ. Uz piedāvātā skaitliska modeļa pamata tika izstrādāta datorprogramma.

1.4 Darba aprobācija un autora publikācijas

Darba galvenie rezultāti publicēti sešos SCI rakstos.

1. A. Ghassemi, S. Tarasovs, A. H.-D. Cheng A 3-D study of the effects of thermomechanical loads on fracture slip in enhanced geothermal reservoirs, Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 44, 2007, pp. 1132–1148.

2. A. Ghassemi, S. Tarasovs, A. H.-D. Cheng Three-Dimensional Integral Equation Modeling of Injection Induced Thermal Stress in an Enhanced Geothermal Reservoir, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 2005, 29, 829–844.

3. A. Ghassemi, S. Tarasovs, A. H.-D. Cheng An integral equation solution for three-dimensional heat extraction from planar fracture in hot dry rock. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 2003, 27, 989–1004.

4. V. Tamuzs, S. Tarasovs Fracture toughness and bridging law of 3D woven composites. Fracture of Polymers, Composites and Adhesives II, 2003, ESIS Publication 32, 515–524.

5. V. Tamuzs, S. Tarasovs, U. Vilks Delamination properties of translaminar-reinforced composites. *Comp. Sci. Technol.*, 2003, 63, 1423–1431.

6. V. Tamuzs, S. Tarasovs, U. Vilks Progressive delamination and fiber bridging modeling in double cantilever beam composite specimens, *Eng. Frac. Mech.*, 2001, 68, 513–525.

Darba galvenie rezultāti tika ziņoti un apspriesti 13 starptautiskās zinātniskās un tehniskās konferencēs:

1. A. Ghassemi, S. Tarasovs Fracture slip and opening in response to water injection, Proc. of GRC 2006 Annual Meeting, San Diego, California, USA, September 10–13, 2006.

2. A. Ghassemi, S. Tarasovs A three-dimensional numerical study of fracture slip due to cold water injection in enhanced geothermal reservoirs, Proc. of 41st. U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), Golden, Colorado, USA, June 17–21, 2006.

3. A. Ghassemi, S. Tarasovs Fracture slip and opening in response to fluid injection into a geothermal reservoir, Proc. of 31th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, USA, January 30–February 1, 2006.

4. A. Ghassemi, S. Tarasovs Three-dimensional modeling of Injection Induced Thermal Stresses, Proc. of 6th North American Rock Mechanics Symposium – GulfRocks04, Houston, Texas, June 5–10, 2004.

5. S.Tarasovs Three-dimensional finite-element modeling of fiber bridging in unidirectional composites, 13th International Conference "Mechanics of Composite Materials", Riga, Latvia, May 16–20, 2004, Book of Abstracts, p.186.

6. A. Ghassemi, S. Tarasovs Three-dimensional modeling of Injection Induced Thermal Stresses with an Example from Coso, Proc. of 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, USA, January 26–28, 2004.

7. V. Tamuzs, S. Tarasovs The revised technique of composite delamination tests. Proc. of 6th International Fracture Conference, 10-12 Sep. 2003, Selcuk University Konya, Turkey, 295–304.

8. V.Tamuzs, S.Tarasovs, A.Bogdanovich, J.Singletary Toughness and Bridging Law of 3D Woven Composites, 3rd ESIS TC4 Conference on Polymer and Composites, Les Diablerets, Switzerland, 15–18 September, 2002.

9. V. Tamuzs, S. Tarasovs, U. Vilks Delamination and fiber bridging phenomenon experimental and numerical investigation. Proc. of International Conference on New Challenges in Mesomechanics, Vol. 2, Aalborg University, Denmark, August 26–30, 2002, pp. 605–611.

10. V.Tamuzs, S.Tarasovs, U.Vilks, A.Bogdanovich, J.Singletary Delamination Fracture toughness of 3D Woven Composites, 10th European Conference on Composite Materials: ECCM-10: Composites for the Future, Brugge, Belgium, June 3–7, 2002, Booklet of Abstracts, p. 3.

11. A. Ghassemi, A. H.-D. Cheng, S. Tarasovs A three-dimensional solution for heat extraction from a fracture in Hot Dry Rock using the boundary element method. Proc. of 27th Annual Workshop "Geothermal Reservoir Engineering", Stanford, California, USA, January 28–30, 2002.

12. V.Tamuzs, S.Tarasovs Modelling of progressive delamination and fiber bridging in DCB specimens, Conference on Mechanics of Composite Materials, Riga, Latvia, June, 2000, Book of Abstracts.

13. V.Tamuzs, S.Tarasovs Fiber Bridging and R-Curve for Interlaminar Fracture of Unidirectional Epoxy-Carbon Composites, ASME Mechanics & Materials Conference, Blacksburg, USA, June, 1999, Book of Abstracts, p. 89.

2 Kompozītmateriālu atslāņošanās

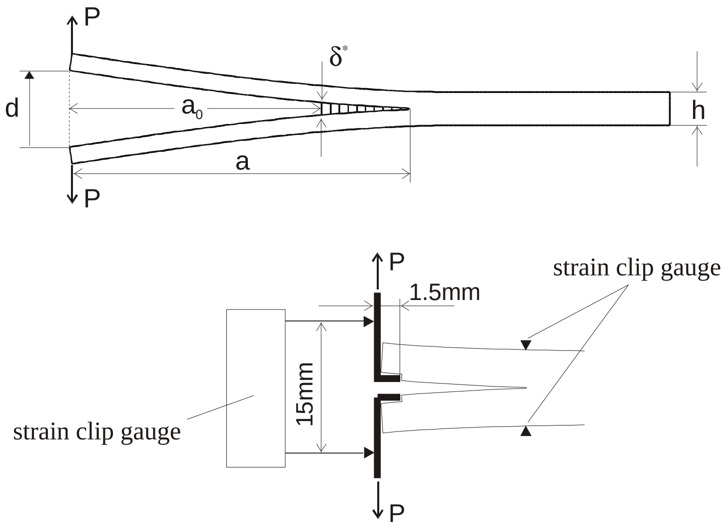
Pretestība atslāņošanai ir viena no būtiskākajām slāņainu un vienvirziena stiegrotu kompozītu raksturīpašībām. Viena no interesantām īpašībām plīsumu izplatīšanās procesā ir plaša šķierssaišu veidošanās, kas ir novērojama atslāņošanas laikā. Šī parādība var paaugstināt kompozītu sabrukšanas pretestību pirmajā plīsuma modā pat 10 reizēs, tāpēc ir ļoti svarīgi zināt materiāla īpašības, materiāla pareizas mērīšanas paņēmienus un rezultātu izmantošanas iespējas skaitliskos aprēķinos.

Vispopulārākā starpslāņu sabrukšanas pretestības noteikšanas metode kompozītiem ir dubultas konsolsijas (DCB) parauga pārbaude [1]. Viena no standartmetodēm materiālu spējas paaugstināt sabrukšanas pretestību plaisu izplatīšanas laikā izteikšanai ir tā saucamas R-līknes – sabrukšanas izturība kā plaisu izplatīšanas funkcija.

Šķērssaišu likuma koncepcija, spriegumi plaisas virsmā kā funkcija no plaisas atveres tika ieviesta 1992. gadā [2] materiāla plaisu palielināšanas pretestības raksturojumam. Promocijas darbā tika izpētīta parauga izmēru ietekme uz R-līknēm un ir piedāvāta mērījumu un aprēķinu metodika plaisu izplatīšanas pretestības noteikšanai.

2.1 Enerģijas atbrīvošanas ātrums DCB paraugos

DCB paraugu izmēri ir paradīti 1. attēlā, kur h ir parauga biezums, kas ir mainīgs, a_0 ir sākotnējais iegriezums, a - izplatītās plaisas garums, d ir plaisas atvere zem spēka P ietekmes un δ^* ir plaisas atvere sākotnēja iegriezuma galā. Slogošana un mērījuma metode ir aprakstīti darba eksperimentālajā daļā.



Att. 1: Parauga ģeometrija, slogošanas shēma un mērītie parametri.

Enerģijas atbrīvošanas ātrums DCB paraugos tiek noteikts pieņemtajā veidā:

$$G = -\frac{\partial \Pi}{b \partial a} \tag{1}$$

kur b ir parauga platums, a ir plaisas garums, Π ir sistēmā akumulētā potenciālā enerģija. Lineārai elastīgai sistēmai vienādojumu var pierakstīt kā

$$G = \frac{P^2}{2b}\frac{\partial c}{\partial a} \tag{2}$$

kur $c = d/P$ ir padevīgums.

Neņemot vērā šķērssaites efektu, ideālas konsoles ar garumu a un lieces stingumu $EI = Ebh^3/12$ izliece pie slodzes P ir vienāda ar $a^3P/3EI$. Pilns DBC atvērums ir vienāds ar dubultu novirzi,

$$d = \frac{2a^3P}{3EI} \tag{3}$$

un padevīgums ir

$$c = \frac{2a^3}{3EI} \tag{4}$$

Ar vienādojumu (2) un (4) palīdzību tiek iegūsta vispopulārākā DCB aprēķinu formula:

$$G(P,a) = \frac{P^2a^2}{EIb} \tag{5}$$

Apvienojot vienādojumus (5) un (3) tiek iegūts modificētais vienādojums G aprēķinam

$$G(P,d) = \frac{P^2}{EIb}\left(\frac{3EId}{2P}\right)^{2/3} \tag{6}$$

Pielietojot vienādojumus (5) un (6) ideālai izotropai konsolsijai tiks iegūti vienādi rezultāti. Tomēr, stingri ņemot, visi šie rezultāti būs nederīgi DCB paraugiem, jo robežnosacījumi parauga ieplīsušai daļai nav vienādi ar konsolsijas iespīlētu galu. Rezultātā reālā parauga izliece pie dotās slodzes ir lielāka par prognozēto izmantojot sijas teoriju (3). Izliece ir vēl lielāka vienvirziena kompozītmateriāliem, jo vienādojumā (3) starpslāņu bīde netiek ņemta vērā. Īsām plaisām kļūda ir ļoti liela un tā samazinās, kad plaisa paplašinās. Tādā veidā augstāk iegūtie vienādojumi dos dažādus rezultātus un salīdzinot tieši no galīgo elementu metodes analīzes aprēķināto G ar vienādojumiem (5) un (6) tika iegūts, ka vienādojums (6) ir pielietojams vislabāk pat īsām plaisām un pie intensīvām šķērssaitēm.

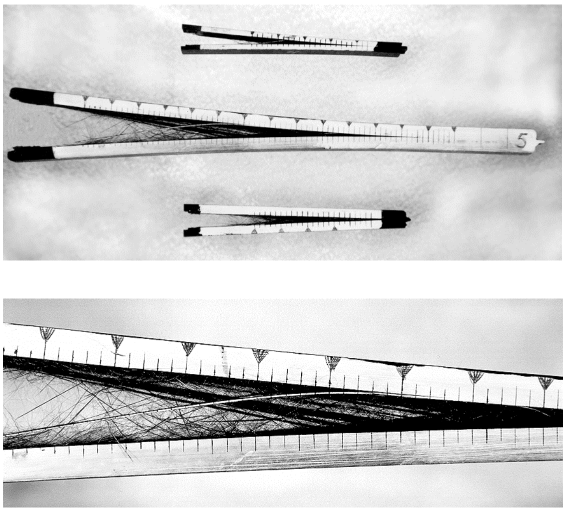
2.2 Eksperimentālā daļa

Pētītie paraugi bija taisīti no 1.3. mm biezām epoksīdsveķu/oglekļa loksnēm. Sākotnējā plaisa bija iegriezta ar 0.1 mm biezu dimanta zāģi un saasināta ar plānu asmeni sākotnējas plaisas pagarināšanai līdz 25 mm. Parauga platums b bija 11.1 mm. No tāda paša materiāla veidotas strēmeles tika pielīmētas papildus, lai izveidotu paraugus ar atšķirīgu kopēju biezumu – 3.93, 6.56 un 9.15 mm 3-slāņainām, 5-slāņainām, un 7-slāņainām paraugam atbilstoši. Šķiedras paraugā bija orientētas gareniski. Paraugu garumi ir 80 mm (3-slaņains) un 200 mm (5-slāņains un 7-slāņains).

Materiāls ir raksturojams ar sekojošām elastības konstantām: šķiedru virziena modulis $E_1 = 155$ GPa, šķerssmodulis $E_2 = E_3 = 9$ GPa, bīdes modulis $G_{12} = 5$ GPa un Puasona koeficients $\nu = 0.28$.

Visi paraugi tika noslogoti ar pārvietojuma kontroli ar nemainīgu ātrumu 1 mm/min. Septiņi paraugi ar biezumu 3.93 mm, astoņi paraugi ar biezumu 6.56 mm un trīs paraugi ar biezumu 9.15 mm tika izmantoti testēšanā.

Slodzes vērtības tika reģistrētas ar MTS testēšanas aparāta dinamometru, plaisas atvērums d paraugu galā tika mērīts ar pārvietojuma sensoru kā parādīts 1. attēlā. Plaisas atvērums δ^* pirmsplaisas galā tika mērīts ar otru pārvietojuma sensoru, kas tika pievienots parauga apakšējai un augšējai daļai. Plaisas palielināšanas tika mērīta vizuāli. Tātad, P, d un δ vērtības tika mērītas un apkopotas katram plaisas pagarinājumam Δa, kas ir vienāds ar 2mm.



Att. 2: Dažādu biezumu paraugi pēc testēšanas un 7-slāņu paraugs ar palielinātu šķērssaites zonu.

Plaisas palielināšanas laikā tika novērotas ekstensīvas šķērssaites. Piemēri ar palielinātām un atvērtām plaisām ir paradīti 2. attēlā.

Mērītas stiepes diagrammas 7-slāņainām paraugam ir paradītas 3. attēlā. Katrs līknes punkts atbilst plaisas palielinājumam $\Delta a = 2$ mm. Šīs vērtības tika izmantotas R-līkņu aprēķināšanai (4. att.), enerģijas atbrīvošanas ātrums visos gadījumos tiek aprēķināts izmantojot vienādojumu (6).

2.3 Šķērssaišu likums

Sekojošie rezultāti tika iegūti aprēķinot J-integrālu ap plaisas galu un gar plaisas virsmu ar šķērssaites zonu [8]:

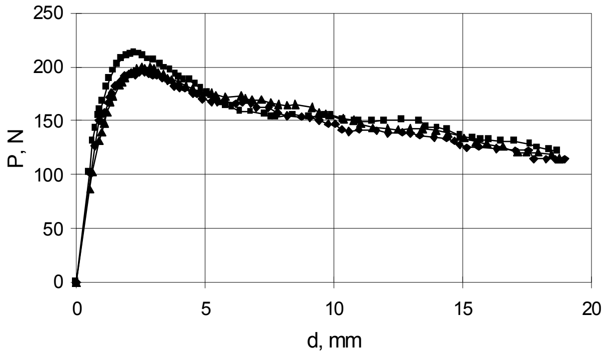
$$G = J = \int_S w(\epsilon_{ij})dy - \int_S P_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dS = 2\int_a^{a_0} \sigma(x) \frac{\partial u_y}{\partial x} dx + G_0 = \int_0^{\delta^*} \sigma(\delta) d\delta + G_0 \tag{7}$$

no kā seko[4,5], ka

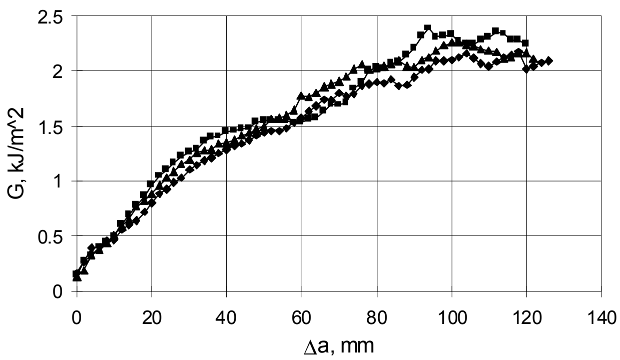
$$\sigma(\delta) = \frac{\partial G}{\partial \delta^*} \tag{8}$$

kur $\sigma(\delta)$ ir spriegumi plaisas virsmā kā funkcija no plaisas atvēruma.

Tika izmērītas atkarības $P(a)$, $d(a)$ un $\delta^*(a)$ paraugiem ar biezumu h, kur δ^* ir plaisas atvere punktā, kur tika izvietots sākotnēja plaisa gals. Zinot $G(a)$ un $\delta^*(a)$ tika iegūts šķērssaišu likums no vienādojuma (8), kas var būt

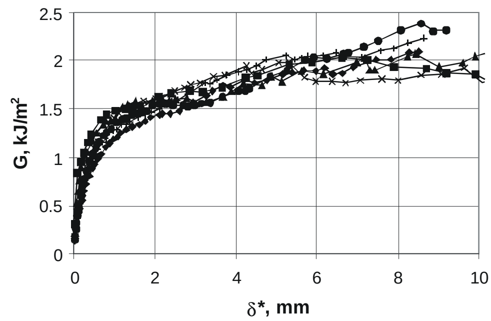


Att. 3: Tipiskas eksperimentālas stiepes diagrammas: $h = 9.15$ mm.

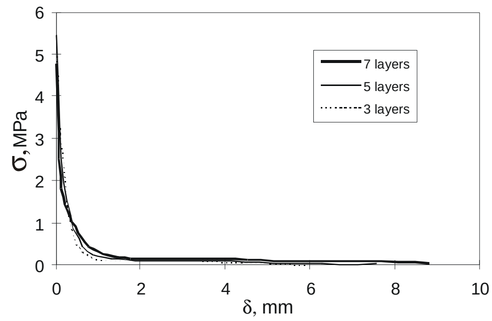


Att. 4: Eksperimentālās R-līknes paraugiem ar biezumu $h = 9.15$ mm.

a)



b)



Att. 5: (a) enerģijas atbrīvošanas ātrums G kā funkcija no plaisas atvēruma sākotnēja iegriezuma galā, (b) eksperimentāli iegūts šķērssaišu likums.

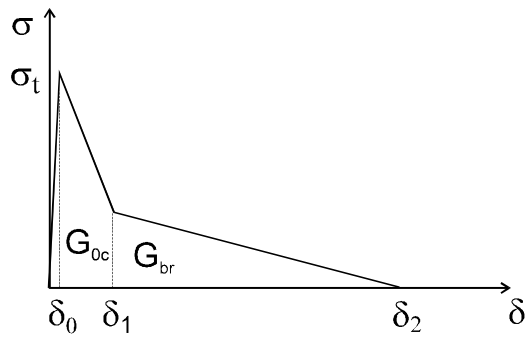
izmantots vēlāk skaitliskai simulācijai plaisu izplatīšanai DCB paraugos ar dažādu biezumu.

5a. attēlā enerģijas atbrīvošanās ātrums G kā funkcija no plaisas atvēruma ir aprēķināts visiem pētītiem paraugiem. Paraugu ar dažādiem biezumiem līknes gandrīz sakrīt ņemot vērā sabrukšanas testa tipisku izkliedi. Aprēķinātie šķērssaišu likumi šiem paraugiem ir paradīti 5b. attēlā.

2.4 GEM skaitliskā modelēšana

Plaisu izplatīšanas simulācijas skaitliskā procedūra ņemot vērā šķiedru šķērssaiti ir balstīta uz galīgo elementu metodes ar nelineāriem interfeisa elementiem, izvietotiem gar potenciālas atslāņošanas līniju. Plaisu izplatīšanās ir modelēta ieviešot spriegumu-pārvietojuma attiecības interfeisa elementiem.

Lai modelētu šķiedru šķērssaites efektu, mēs sadalīsim enerģijas disipāciju paraugā divās daļās, kas ir saistītas ar plaisas gala izplatīšanos un šķiedru



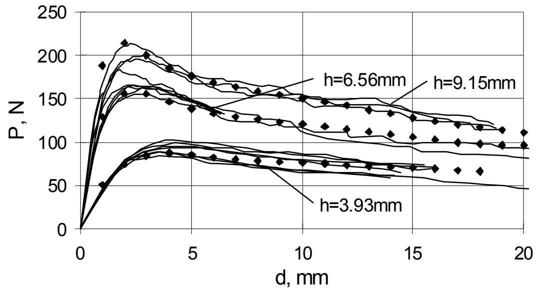
Att. 6: Spriegumu-pārvietojumu attiecība interfeisa elementiem.

šķērssaiti. Tādējādi, mums ir nepieciešams izvēlēties atbilstošu spriegumu-pārvietojumu attiecību interfeisa elementiem (6. attēls), kur σ ir spriegumi elementā un δ ir elementa atvērums. Šī uzdevumā tika apskatīta tikai pirmā plīsuma moda, tādējādi spriegumi un pārvietojumi ir virzīti normāli plaisas virsmai.

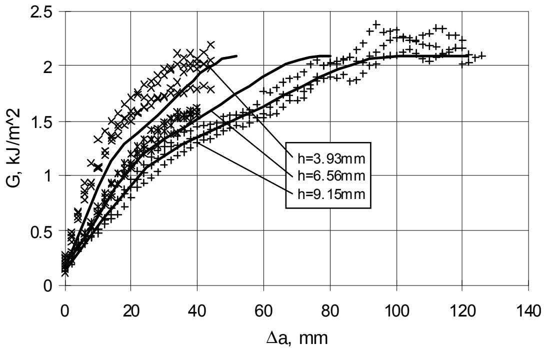
6. attēlā paradītā σ līkne sastāv no trim daļām atbilstoši pārvietojuma intervāliem $(0, \delta_0)$, (δ_0, δ_1) un (δ_1, δ_2). Pirmā un otrā daļas atbild par plaisas izveidošanās fāzi un plaisas gala izplatīšanos. Kad spriegums pirms plaisas gala sasniedz σ_t (materiāla stiprības robežu), attālums starp elementiem (interfeisu biezums) ir vienāds ar δ_0, un plaisa sāk izplatīties. Aiz plaisas gala spriegums samazinās un attālums starp plaisas virsmām palielinās līdz δ_1. Šī zona tiek saukta par plīsuma norises zonu. Skaitliskie testi rāda, ka tiešai δ_0 vērtībai nav liela efekta uz risinājumu ja δ_0 ir pietiekami mazs, lai simulētu ļoti stingru interfeisu. Plaisas atvērums δ_1 ir atkarīgs no sākotnējas kritiska enerģijas atbrīvošanās ātruma G_{0c}, kas tiek uzskatīts par materiāla raksturīpašību. Tādejādi, plaisas atvērums ir izvelēts tā, lai laukums zem līknes līdz punkta δ_1 būtu vienāds ar G_{0c}.

Trešā spriegumu-pārvietojumu attiecības daļa (intervāls no δ_1 līdz δ_2) ir atkarīga no šķērssaišu likuma un laukums zem līknes parāda enerģijas disipāciju šķērssaites dēļ, G_{br}. Plaisai atvēroties, sprieguma līmenis pazeminās līdz nullei šķērssaites zonā. Bieži materiāliem ar paplašinātu šķērssaiti enerģijas atbrīvošanas ātrums plaisas izplatīšanas stabilā stāvoklī, G_{ss}, ir līdz 10 reizēm augstāks nekā plaisas veidošanas sākumā, G_c, un δ_2 būs vairakkārt lielāks nekā δ_1. Tipiska vērtība oglekļa šķiedru stiegrotam plastikām ir daži milimetri. Ja materiālam ir zināms faktisks šķērssaišu likums, tam jābūt pielietotam interfeisa elementu īpašību noteikšanā.

Izmantojot paraugu ar biezumu 9.15 mm šķērssaišu likumu, kas tika aprēķināts iepriekšējā nodaļā, kā spriegumu-pārvietojumu attiecība interfeisa

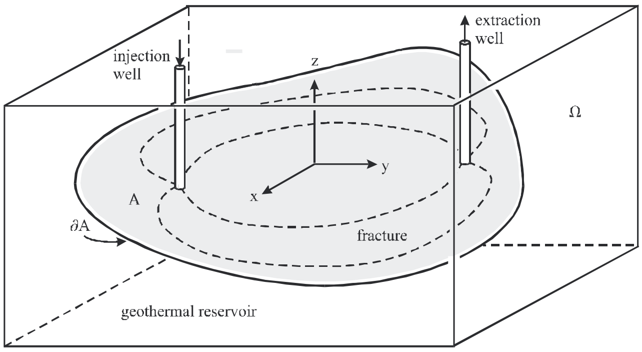


a)



b)

Att. 7: Prognozētās un mērītās stiepes diagrammas un R-līkņu salīdzinājums dažādiem paraugu izmēriem: a) tievā līnijas atspoguļo eksperimentālas līknes, punkti – prognozi; b) prognozētas R-līknes un eksperimentālas R-līknes.



Att. 8: Siltuma ieguve no plakana plīsuma.

elementiem, tika aprēķinātas stiepes diagrammas un R-līknes pārbaudāmiem paraugiem. Rezultāti ir apkopoti 7. attēlā, kur ir novērojama pietiekami laba saskaņa starp eksperimentāliem datiem visu izmēru paraugiem.

3 Ģeotermāla rezervuāra trīsdimensiju analīze

Nelineārā plaisu mehānika var tikt pielietota ļoti plašā mērogu diapazonā: sākot no nelieliem kompozītu paraugiem līdz plaisām klinšu masīvos. Pazemes karstie akmeni un ģeotermālie ūdeņi var kalpot kā izdevīgie enerģijas avoti. Pazemes akmeņu temperatūra var celties līdz 350°C piecu kilometru dziļumā. Pēc avotā [6] sniegtajiem datiem 72 valstīs ir paziņojušas par ģeotermālas enerģijas izmantošanu (telpu apkure, izmantošana ražošanā, karsta ūdens un peldbaseinu nodrošināšana). Kopēja uzstādīta jauda ir 28 268 MW_t. Kopējais enerģijas patēriņš gadā ir 273,372 TJ (75,943 GWh), kas sastāda 43% palielinājumu no 2000. gada apjomiem. Ģeotermāla elektroenerģija pašlaik tiek ražota 24 valstīs ar kopējo darbības jaudu ap 8030 MW_e un elektroenerģijas ražošanu ap 57,000 GWh [7].

The Hot Dry Rock (HDR) enerģijas ražošanas koncepcija ietver sevī divu vai vairāk aku urbšanu rezervuārā, lai sasniegtu dabiskas vai mākslīgas izcelsmes caurlaidīgus plīsumus un ievadot aukstu ūdeni akas viena daļā, iegūt karstu ūdeni no otrās.

Fizikālie un matemātiskie modeļi spēlē svarīgu lomu ģeotermālu rezervuāru plānošanā un izveidošanā. Eksistē vairums analītisku un skaitlisku risinājumu siltuma ieguves prognozēšanai no ģeotermālu rezervuāru plīsuma sistēmas. Fizikālie mehānismi dažreiz ir sarežģīti un ietver sevī mehāniskus, termiskus, ķīmiskus efektus un tos savienojumus.

Darba galvenais mērķis bija izmantojot nelineārās plaisu mehānikas koncepciju izstrādāt jaunu trīsdimensiju matemātisku HDR ģeotermālā rezervuāra modeli. Modelis prognozē temperatūras un termiski inducētus spriegumu attīstību rezervuārā aukstu ūdeni ievadot. Arī plīsuma atvērums un slīde var tikt prognozēts modeļa ietvaros.

3.1 Šķidruma plūsma

8. attēlā ir parādīts siltuma ieguves no karstas akmeņu sistēmas shematiskais skats ūdenim cirkulējot caur mākslīgu plīsumu. Plīsums tiek uzskatīts par plakanu, ar galīgu lielumu un zināmu formu. Savukārt, ģeotermālam rezervuāram ir bezgalīgie lielumi. Ir pieņemts arī, ka ģeotermālais rezervuārs ir ūdens necaurlaidīgs un viņam piemīt konstantas siltuma vadītspējas īpašības. Siltuma uzglabāšana un plīsuma šķidruma plūsmas dispersijas efekts netiek ņemti vērā. Plīsuma platums ir mazs, tāpēc plūsma plīsumā ir lamināra un var būt aprakstīta ar vienādojumu:

$$\nabla_2\, p(x,y) = -\frac{\pi^2\mu}{w^3(x,y)}\,\mathbf{q}(x,y); \qquad x,y \in A \tag{9}$$

kur p ir plūsmas spiediens, μ - šķidruma viskozitāte, w – plīsuma platums, A – plīsuma virsma (sk. 8. attēlu). Pieņemot, ka šķidrums ir nesaspiežams, rezervuārs ir šķidruma plūsmas necaurlaidīgs un plīsuma platums nemainās ar laiku, mēs varam uzrakstīt šķidruma nepārtrauktības vienādojumu kā:

$$\nabla_2 \cdot \mathbf{q}(x,y) = Q\,\delta(x-x_e, y-y_e) - Q\,\delta(x-x_i, y-y_i) \tag{10}$$

kur $\nabla_2\cdot$ ir diverģences operators divās dimensijās. Iesūknēšanas urbums izvietojums augstāk tika pieņemts kā (x_i, y_i), bet iegūšanas urbuma atrašanas vieta ir (x_e, y_e), abi ar intensitāti Q, δ ir Diraka delta funkcija. Apvienojot vienādojumus (9) un (10), mēs iegūsim otras kārtas parciālu diferenciālu vienādojumu

$$\nabla_2 \cdot \left[w^3(x,y)\,\nabla_2\, p(x,y)\right] = \pi^2\mu\, Q\left[\delta(x-x_i, y-y_i) - \delta(x-x_e, y-y_e)\right] \tag{11}$$

kas pakļaujas robežnosacījumiem

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \qquad \text{uz } \partial A \tag{12}$$

kur ∂A ir plakana plīsuma fronte (8. attēls) un n ir ārēja ∂A normāle. Zinot plīsuma platumu vienādojums (11) var atrisināt izmantojot galīgo elementu metodi lai noteiktu spiedienu sadali plīsumā.

3.2 Siltuma pārnese

Siltuma pārneses process notiek kā ģeotermālā rezervuārā, tā arī plīsumā. Ģeotermāla rezervuārā siltuma vadība regulējama ar trīsdimensiju difūzijas vienādojumu:

$$K_r \nabla^2 T_\mathrm{d}(x,y,z,t) = \rho_r c_r \frac{\partial T_\mathrm{d}(x,y,z,t)}{\partial t}, \qquad x,y,z \in \Omega \tag{13}$$

kur ρ_r ir akmens blīvums, c_r ir akmens īpatnējais siltums, K_r ir akmens siltuma vadītspēja, kas pastāv neierobežotajā ģeotermālā rezervuārā (1. attēls) un T_d ir normalizētas temperatūras deficīts ar vērtību starp nulli un viens:

$$T_\mathrm{d} = \frac{T_0 - T}{T_0 - T_\mathrm{inj}} \tag{14}$$

kur T ir temperatūra, T_0 ir sākotnēja akmens temperatūra, T_inj ir ievadītas ūdens temperatūra.

Siltuma pārneses vienādojums plaisā ir:

$$\mathbf{q}(x,y) \cdot \nabla T_\mathrm{d}(x,y,0,t) = \frac{2K_r}{\rho_w c_w} \left.\frac{\partial T_\mathrm{d}(x,y,z,t)}{\partial z}\right|_{z=0^+} \tag{15}$$

kur ρ_w ir ūdens blīvums, c_w ir ūdens īpatnējais siltums.

Pirms siltuma ieguves procedūras akmens un plīsuma temperatūras tiek pieņemtas par konstantām, $T(x,y,z,0) = T_0$, ieviešanas vietā $(x_i, y_i, 0)$ temperatūra ir vienāda ar ievadāmas ūdens temperatūru: $T(x_i, y_i, 0, t) = T_\mathrm{inj}$. Izvadīšanas temperatūra nav zināma. Sākotnējos un robežnosacījumus var izteikt ar T_d ieviešanas palīdzību:

$$T_\mathrm{d}(x,y,z,0) = 0; \qquad T_\mathrm{d}(x_i,y_i,0,t) = 1 \tag{16}$$

Lai atvieglotu laika mainīgas apstrādi, pielietojam Laplasa transformāciju:

$$K_r \nabla^2 \widetilde{T}_\mathrm{d}(x,y,z,s) = s\rho_r c_r \widetilde{T}_\mathrm{d}(x,y,z,s) \tag{17}$$

$$\mathbf{q}(x,y) \cdot \nabla \widetilde{T}_\mathrm{d}(x,y,0,s) = \frac{2K_r}{\rho_w c_w} \left.\frac{\partial \widetilde{T}_\mathrm{d}(x,y,z,s)}{\partial z}\right|_{z=0^+} \tag{18}$$

$$\widetilde{T}_\mathrm{d}(x_i,y_i,0,s) = \frac{1}{s} \tag{19}$$

kur tilde apzīmē Laplasa transformāciju, s ir transformācijas parametrs. Vienādojumi (17) – (19) veido pilnīgu risinājuma sistēmu.

Vienādojumu (17) – (18) sistēma ir noteikta trīs telpiskās dimensijās. Ir pierādīts, ka ja tiek izmantota Grīna funkcija trīsdimensiju difūzijas vienādojumam, risinājuma sistēmu var samazināt līdz divdimensiju integrālvienādojumam. Temperatūrai uz plīsuma virsmai ($z = 0$) mēs iegūstam:

$$\widetilde{T}_d(x, y, 0, s) = -\frac{\rho_w c_w}{4\pi K_r} \int_A \left[\mathbf{q}(x', y') \cdot \nabla \widetilde{T}_d(x', y', 0, s) \right] \frac{1}{r} \exp\left(-\sqrt{\frac{\rho_r c_r s}{K_r}}\, r \right) dx'dy'; \qquad x, y \in A \tag{20}$$

kur $r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$.

Vienādojuma (20) risinājuma vispārīgā shēma ietver sevī plīsuma ar patvaļīgu formu diskretizāciju elementu grupā, kas ir definēti ar $n + 1$ mezgliem. Nezināmas temperatūras deficīts $\widetilde{T}_d^i$ attiecās uz katru mezglu, izņemot ieviešanas vietu, kur $\widetilde{T}_d = 1/s$ ir uzliktais robežnosacījums. Rezultātā pastāv n nezināmas atsevišķas temperatūras. Vienādojums (20) tiek pielietots n mezgliem izvelēties pēc kārtas mezglu koordinātes pēc bāzes punkta. Rezultātā tiek iegūsti n vienādojumi, lai atrastu n nezināmos.

Laukuma integrēšana vienādojumā (20) tiek veikta secībā elements pēc elementa atsaucoties uz lokālām koordinātēm (η, ξ):

$$\widetilde{T}_d(x, y, s) = \frac{-\rho_w c_w}{4\pi K_r} \sum_{m=1}^{n_e} \int_{A_m} \left[q_x(\eta, \xi) \frac{\partial \widetilde{T}_d(\eta, \xi, s)}{\partial \eta} + q_y(\eta, \xi) \frac{\partial \widetilde{T}_d(\eta, \xi, s)}{\partial \xi} \right] \frac{1}{r} \exp\left(-\sqrt{\frac{\rho_r c_r s}{K_r}}\, r \right) d\eta d\xi \tag{21}$$

q_x, q_y, $\partial \widetilde{T}_d / \partial \eta$, un $\partial \widetilde{T}_d / \partial \xi$ vērtības elementa robežās interpolē ar savām mezglu vērtībām pamatojoties uz bilineāras formas funkciju. Rezultātā iegūta lineāra sistēma satur temperatūras kā nezināmās mezgla vērtības. Gausa metode tiek izmantota tālāk matricas risinājumam. Augstāk iegūtais risinājums atrodas Laplasa telpā. Ir nepieciešams pārveidot risinājumu atpakaļ laika telpā. Tas tiek panākts pielietojot aptuvenu Laplasa inversijas metodi. Šim mērķim tiek izmantota Stēfesta metode [8].

3.3 Termiski inducēti spriegumi

Pieņemsim, ka rezervuāra akmens iz izotrops, homogēns un elastīgs. Temperatūru izmaiņas $\Delta T = T - T_0$ var būt attiecināmas uz termoelastīgu pārvietojuma potenciālu Φ ar Puasona vienādojuma palīdzību:

$$\nabla^2 \Phi = m\, \Delta T \tag{22}$$

kur

$$m = \frac{(1+\nu)\alpha_T}{(1-\nu)} \tag{23}$$

ir termoelastīska konstanta, α_T it termiskās izplatīšanās koeficients un ν ir Puasona koeficients. Šajā sakarā atcerēsimies definīciju:

$$\mathbf{u} = \nabla\Phi \tag{24}$$

kur $\mathbf{u}$ ir pārvietojuma vektors.

Pieņemsim, ka vienības intensitātes siltuma avots ir izvietots koordinātēs (x', y', z') un laikā t'. Risinot pārvietojuma potenciālu, kas ir noteikts vienādojumā (22) mēs iegūsim Grīna funkciju:

$$\Phi^*(x-x', y-y', z-z', t-t') = -\frac{m}{4\pi\rho_r c_r R}\,\mathrm{erf}\left(\frac{R}{\sqrt{\vartheta}}\right) \tag{25}$$

kur

$$\vartheta = 4\kappa(t-t') \tag{26}$$

un

$$\kappa = \frac{K_r}{\rho_r c_r} \tag{27}$$

Jebkādam punktam un laikam var no superpozīcijas principa iegūt pārvietojuma potenciālu siltuma avotu sadalei ar intensitāti $\mu(x, y, t)$ uz plīsuma virsmas A:

$$\Phi(x, y, z, t) = \int_0^t \int_A \mu(x', y', t')\ \Phi^*(x-x', y-y', z, t-t')\ dx'dy'dt' \tag{28}$$

Līdzīgi vienādojumam (20) iepriekšējais vienādojums ietver tikai galīga plīsuma virsmas integrēšanu. Lai veiktu laika apstrādi, mēs pielietojam Laplasa transformāciju vienādojumam (28) un iegūstam:

$$\widetilde{\Phi}(x, y, z, s) = \int_A \widetilde{\mu}(x', y', s)\ \widetilde{\Phi}^*(x-x', y-y', z, s)\ dx'dy' \tag{29}$$

kur

$$\widetilde{\Phi}^*(x-x', y-y', z, s) = -\frac{m}{4\pi s\rho_r c_r R}\left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\kappa}}R\right)\right] \tag{30}$$

Avota intensitāte $\widetilde{\mu}$ ir tikai temperatūras plūsma uz plīsuma virsmas, un

$$\widetilde{\mu} = -2K_r\frac{\partial\widetilde{T}}{\partial z}\bigg|_{z=0^+} \tag{31}$$

Ievietojot siltuma pārneses vienādojumu (18) augstāk noradītājā un ievietojot (31), iegūstam

$$\begin{aligned}\widetilde{\Phi}(x, y, z, s) \quad &= \quad \frac{m\, \rho_w\, c_w}{4\pi s \rho_r c_r} \int_A \left[\mathbf{q}(x', y') \cdot \nabla \widetilde{T}(x', y', 0, s)\right] \\ &\quad \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\kappa}} R_1\right)\right] \; dx'\, dy'\end{aligned} \tag{32}$$

Vienādojuma labā puse sastāv pilnīgi no zināmiem lielumiem, jo šķidrumu plūsma un temperatūra plīsumā ir iegūti no risinājuma iepriekšēja posma pamatojoties uz vienādojuma (20). Spriegumu attiecību uz pārvietojuma potenciālu izsaka vienādojums:

$$\widetilde{\sigma}_{ij} = 2G \left(\frac{\partial^2 \widetilde{\Phi}}{\partial x_i \partial x_j} - \delta_{ij} \nabla^2 \widetilde{\Phi}\right) \tag{33}$$

Ar vienādojumu (33) termiskie spriegumi var tikt aprēķināti jebkurai vietai ģeotermālajā rezervuārā.

3.4 Plīsuma slīde

Šajā darbā plīsuma atvere un slīde tika noteikti izmantojot 3D elastīga pārvietojuma pārtraukuma (displacement discontinuity, DD) metodi. Pārvietojuma pārtraukuma metode ir netiešu robeželementu metode, kuras pamatā ir pārvietojuma pārtraukuma (DD) punkta fundamentālais risinājums bezgalīgā elastīgā vai elastīgi porainā vidē. Šī metode tiek plaši pielietota kalnrūpniecībā un hidraulisku plaisu veidošanā.

Spriegumi plaisas virsmā pārvietojuma pārtraukuma deļ var būt pierakstīti pirmā veida integrālvienādojuma veidā:

$$\sigma_{ij}(x) = \int_\Gamma \sigma^*_{ijkn}(\xi, x)\ \Delta D_{kn}(\xi)\ d\Gamma \tag{34}$$

ar zināmu σ_{ij} vērtību un nezināmām ΔD_{kn} vērtībām. Kodols σ^*_{ijkn} pārstāv punkta pārvietojuma pārtraukuma ietekmi punktā ξ uz spriegumiem punktā x. Šī vienādojuma vispārējs analītisks risinājums nav iespējams, tāpēc ir nepieciešams risināt to skaitliski pārvēršot integrālu vienādojumu algebrisku vienādojumu sistēmā. Plaisas virsma ir sadalīta elementos un transversālās un bīdes pārvietojumos elementā "r" ietekmi uz izraisītos spriegumos uz elementa "m" ir:

$$\sigma^m_{ij}(x) = S^{rm}_{ijkn}(\xi, x) \Delta D^r_{kn}(\xi) \tag{35}$$

Ir svarīgi atzīmēt, ka plakanam plīsumam bīdes spriegumi ir atkarīgi no pārvietojuma pārtraukuma bīdes komponentēm, bet normālie sprieguma komponenti ir atkarīgi tikai no DD normālas komponentes. Tādējādi, σ_{zz} sprieguma elementu komponente ir neatkarīga no σ_{xz} un σ_{yz}, tāpēc tie var tikt atrisināti atsevišķi. Pielietojot vienādojumu (35) transversālām un bīdes spriegumam un saliekot kopā visu elementu ietekmes koeficientus, iegūstam divas algebrisku vienādojumu sistēmas. Kas ir izveidotas priekš N atveres un $2N$ slīdes nezināmiem:

$$\sigma_{zz} = K_{zz} D_{zz} \tag{36}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{xz} \\ D_{yz} \end{bmatrix} \tag{37}$$

kur K ir ietekmes koeficientu matrica, K_{zz} parāda normālus spriegumus transversālās DD's z-virzienā rezultātā, K_{xy} parāda bīdes spriegumu DD's bīdes x-virzienā rezultātā un tā tālāk.

Ja plīsums paliek atvērtā stāvoklī, šos vienādojumus var viegli atrisināt. Tāda gadījumā slīde atbilst bīdes pārvietojuma pārtraukuma lielumam. Tomēr, ir nepieciešama atšķirīga pieeja gadījumam, ja plīsums ir slēgts. Šajā gadījumā plīsums tiek modelēts izmantojot ideāli plastisku Mora-Kulona elementu. Mora-Kulona elementa bīdes stiprība tiek noteikta kā:

$$\tau = c_0 + \sigma_n \tan \phi_{ef} = c_0 + \sigma_n \tan(\phi_{in} + \varphi_{dil}) \tag{38}$$

kur ϕ_{ef} ir efektīvs plaisas virsmas berzes leņķis, ϕ_{in} ir raksturīgs berzes leņķis, φ_{dil} ir dilatācijas leņķis, σ_n ir spiedes spriegums, kas darbojas uz plīsuma virsmas un c_0 ir kohēzija. Standarta Kulona berzes modelis pieņem, ka nenotiek relatīvas kustība ja ekvivalentais bīdes spriegums (vienādojums 39) ir mazāks par kritisko spriegumu, kuru prognozē ar vienādojumu (38).

$$\tau_{eq} = \sqrt{\sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2} \tag{39}$$

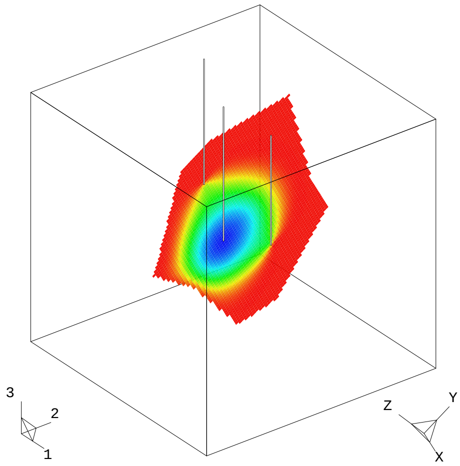
Plaisas atvērumu nosaka bīdes pārvietojuma lielums un ir vienāds ar:

$$a = U \tan(\varphi_{dil}) \tag{40}$$

kur φ_{dil} ir dilatācijas leņķis un $U = \sqrt{D_{xz}^2 + D_{yz}^2}$.

Lai izveidotu vienādojumu sistēmu dotajai problēmai uz vietas esošie spriegumi un hidrauliskais spiediens ir izmantoti risinājuma sākuma solī. Tad pieaugoši tiek pielietota termiska slodze un iteratīvs risinājuma process tiek izmantots ņemot vērā Mora-Kulona berzes kritēriju.

Šīs matemātiskais modelis tika iestrādāts datorprogrammā temperatūras un spriegumu problēmas risinājumam ievadot aukstu ūdeni karstā plīsumā.



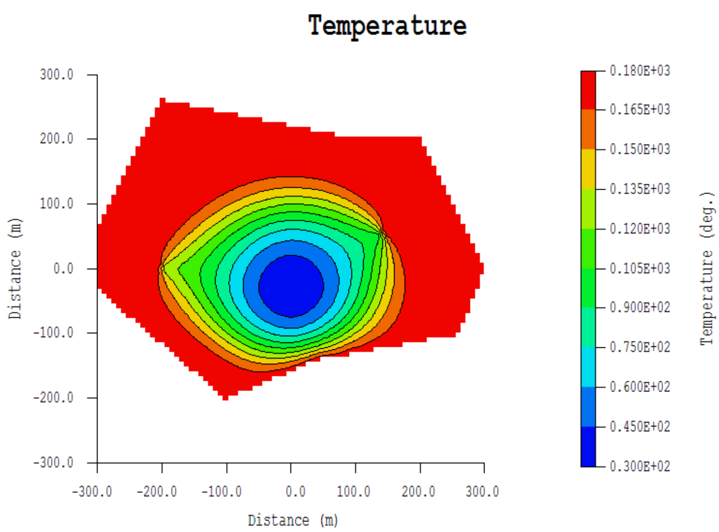
Att. 9: Slīps plīsums ar vienu ievada aku un divām izvada akām.

Programmai ir lietotājam draudzīgs grafiskais interfeiss, kas ļauj uzstādīt rezervuāra īpašības un risinājuma vizualizācijas īpašības. Trīsdimensiju slīpa plīsuma shēma ar vienu ievada aku un divām izvada akām ir paradīta 9. attēlā. Pelēks apgabals apzīmē akmens atdzišanas zonu aukstas ūdens ieviešanas ģeotermālajā rezervuārā dēļ.

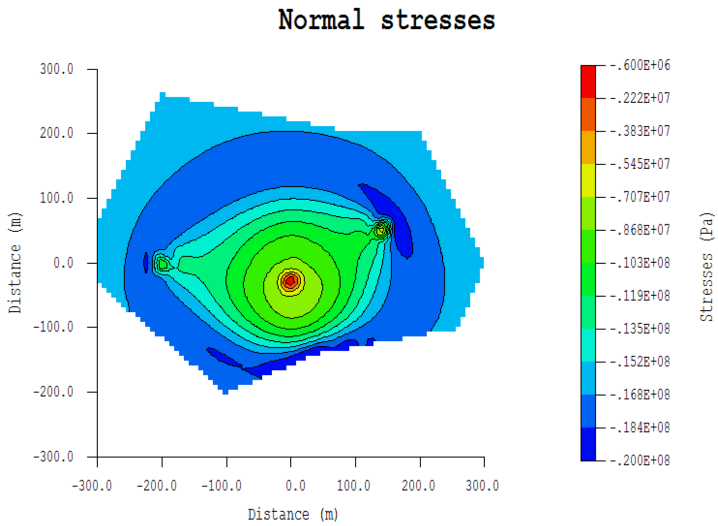
10.–14. attēlos tika paradīti temperatūras sadalījums, termiskie spriegumi un plaisas atvērums/slīde slīpai plaisai (att. 9.) pēc 90 dienām no ūdens ievadi sākuma. Aprēķinos tika izmantoti dati no 1. tabulas. Tika pieņemts, ka plaisa atrodas 2330 m dziļumā ar iekšējas spriegumiem $\sigma_v = 60.13$ MPa, $\sigma_{h\,\min} = 34.81$ MPa, $\sigma_{H\,\max} = 50.88$ MPa un ūdens spiedienu 25 MPa. Rezultāti rāda, ka plaisas atvērums un slīde ir stipri atkarīgi no termiskiem spriegumiem un tos jāņem vērā geotermāla rezervuāra pētīšanā.

E	Junga modulis	65.0	GPa
ν	Puasona koeficients	0.185	
ρ_r	akmens blīvums	2650	kg/m^3
ρ_w	ūdens blīvums	1000	kg/m^3
c_r	akmens īpatnējais siltums	790	J/(kg K)
c_w	ūdens īpatnējais siltums	4200	J/(kg K)
κ	termodifūzijas koeficients	5.1×10^{-6}	m^2/ sec
α_T	termiskās izplatīšanās koeficients	8.0×10^{-6}	1/K
Q	ūdens ievades intensitāte	40	ℓ/ sec
T_R	sākotnēja akmens temperatūra	180	°C
T_{inj}	ievadītas ūdens temperatūra	30	°C
w	sākotnējais plaisas atvērums	10^{-3}	m

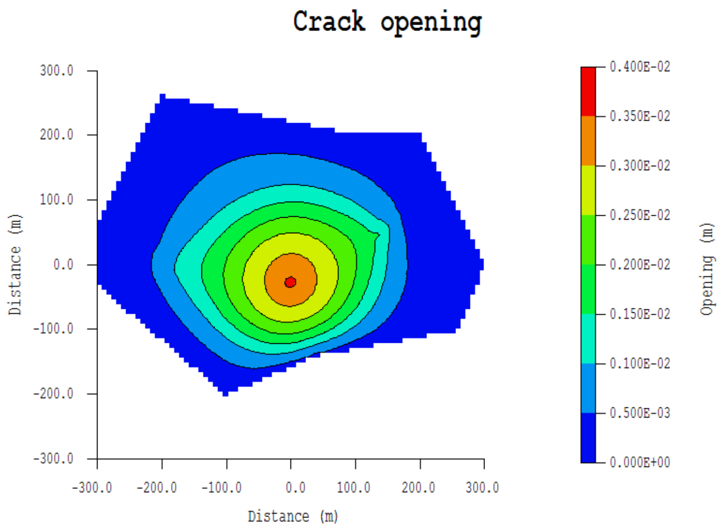
Tabula 1: Ieejas dati.



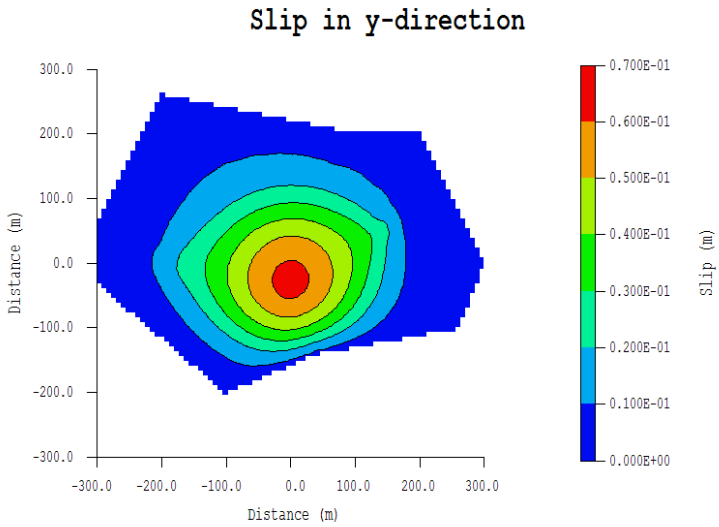
Att. 10: Temperatūras sadalījums plaisā pēc 90 dienām.



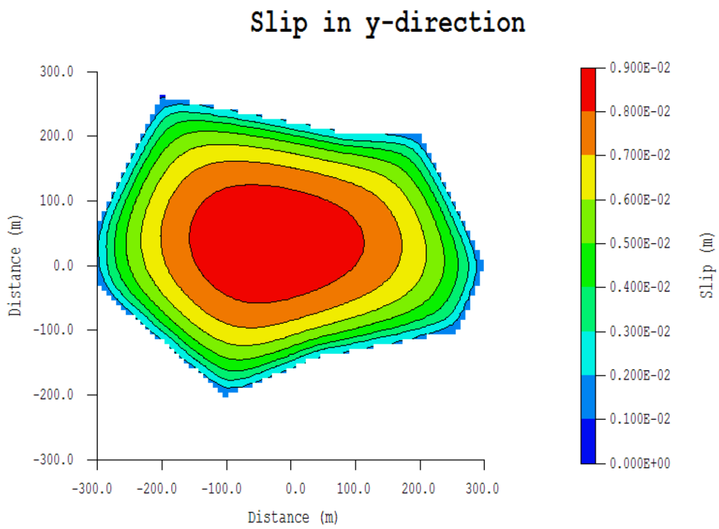
Att. 11: Normālie spriegumi plaisas virsmā pēc 90 dienām.



Att. 12: Plaisas atvērums (maksimālais atvērums – 4 mm).



Att. 13: Plaisas slīde y virzienā.



Att. 14: Plaisas slīde y virzienā bez termiski inducētiem spriegumiem.

4 Secinājumi

Nelineārās plaisu mehānikas metodoloģija tika pielietota plašam uzdevumu lokam. Tika izstrādāta eksperimentāla procedūra vienvirziena kompozītu starpslāņu sabrukšanas pretestības noteikšanai. Papildus parametrs – plaisas atveres pārvietojums sākotnējā plaisas galā (ICOD) tika mērīts šķērssaišu likuma iegūšanai, kas ir nav atkarīgs no parauga izmēra. Līdzīga metodoloģija tika pielietota transversāli stiegrotiem kompozītiem.

- Tika demonstrēts, ka šķērssaišu likums ir materiāla rakstūrīpašība un tāpēc ir izmantojams plīsumu prognozēšanai dažādās situācijās.
- Plaisas paplašināšanas simulēšanai vienvirziena kompozītos tika izmantota vienkārša skaitliska procedūra ar eksperimentāli aprēķinātu šķērssaišu likumu.
- Ir rekomendēts izmantot grafikus G_{IC} vs. ICOD R-likņu vietā (G_{IC} vs. Δa) atslāņošanas un sabrukšanas pretestības raksturošanai kompozītiem ar plašu šķērssaiti veidošanu.
- Šķērsšķiedru klātbūtne neaizkavē bojājuma uzsākšanos, bet tādiem materiāliem piemīt daudz lielāka pretestība plaisu augšanai.

Trīsdimensiju robeželementu modelis siltuma izvades/termiskam spriegumam tika apvienots ar trīsdimensiju elastisku pārvietojuma pārtraukuma metodi plīsuma atveres un slīdes pētīšanai kā reakcijas uz spiedienu un akmens dzesēšanos zem dotā sprieguma lauka. Izmantojot šo pieeju, tika novērtēts katra mehānisma efekts uz akmens spriegumiem un plaisas slīde. Siltuma ieguves no ģeotermālā rezervuāra skaitliskas simulācijas rezultātā tika noskaidrots, ka:

- Šajā darba prezentēta integrālu vienādojumu shēma piedāvā ātru un skaitliski efektīvu metodi temperatūras sadales ģeotermālā rezervuārā analīzei.
- Jāņem vērā trīsdimensiju siltuma vadības mehānismu vērtējot enerģijas izvades apjomus no ģeotermālā rezervuāra ilglaicīgas darbības periodā.
- Termisku spriegumu analīze rāda, ka dzesēšanas rezultātā veidojas ne tikai stiepes spriegums, bet arī spiedes spriegumi tiek veidoti diapazona uzreiz ārpus dzesēšanas zonas.

- Pārvietojuma analīzes rezultāti rāda, ka pie noteiktiem apstākļiem tiek novērots nozīmīgs plīsuma slīdes palielinājums, ja termiskie spriegumi tiek ņemti vērā. Slīdes vērtība ir atkarīga no akmens īpašībām, spriegumiem uz vietas, spiediena, ievades līmeņa un dzesēšanas pakāpes. Slīdi var notikt kopā ar seismiskumu un tas arī rādīs spriegumu pārdalījumu akmeņu masā un var rādīt slīdi un seismiskumu rezervuāra citā vietā.

Literatūras saraksts

[1] ASTM D 5528–94a. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

[2] Suo Z., Bao G. and Fan B. (1992) Delamination R-curve phenomena due to damage. *J.Mech.Phys.Solids.* 40,1.

[3] Rice J.R. (1968) A path independent integral and the approximate analysis of strain concentrations by notches and cracks. *J. Appl. Mech.*, 35, 379–386.

[4] Li V.C., Chan C.M., Leung K.Y. (1987) Experimental determination of the tension-softening relations for cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 17, 441–452.

[5] Bao G., Suo Z. (1992) Remarks on crack-bridging concepts. *Applied Mech. Rev.*, 45, 355–366.

[6] Lunda, J.W., Freeston, D.H. and Boyd, T.L Direct application of geothermal energy: 2005 Worldwide review, *Geothermics,* **34** (2005), 691–727.

[7] Bertani, R. World geothermal power generation in the period 2001–2005, *Geothermics,* **34** (2005), 651–690.

[8] Stehfest H. Numerical inversion of Laplace transforms. *Communication ACM* 1970; **13**: 47–49 and 624.