

Primljen / Received: 22.3.2021.

Ispravljen / Corrected: 22.8.2023.

Prihvaćen / Accepted: 15.12.2023.

Dostupno online / Available online: 10.6.2024.

Mehaničko ponašanje stijenske mase pri ispitivanju smicanja simuliranih materijala

Autori:

Prof.dr.sc. **Xing-Chao Lin**, dipl.ing.građ.

Kineski institut za istraživanje vodnih resursa i hidroenergije, Kina

linxc@iwhr.com

Autor za korespondenciju

Mr.sc. **Gui-Na Zhu**, dipl.ing.građ.Beijing Glory PKPM Technology Co., Kina
zhuguina@cabrtech.comDr.sc. **Xing-Song Sun**, dipl.ing.građ.

Kineski institut za istraživanje vodnih resursa i hidroenergije, Kina

sunxs@iwhr.com

Prethodno priopćenje

Xing-Chao Lin, Gui-Na Zhu, Xing-Song Sun

Mehaničko ponašanje stijenske mase pri ispitivanju smicanja simuliranih materijala

U ovom se radu proučava utjecaj raspodjele pukotina na karakteristike deformacije i čvrstoće stijenske mase kroz pokus izravnog smicanja pet tipičnih vrsta raspodjele simuliranih materijala koji uključuju dvije pukotine. Prostorni raspored pukotina određuje proces deformacije i loma te konačni oblik stijenske mase, koji se uglavnom očituje kao slom između pukotina. Usporedbom 25 naponsko-deformacijskih krivulja dobivenih ispitivanjem, one se razvrstavaju u pet tipova. S povećanjem normalnog naprezanja kompozitni posmični tip postupno prelazi u posmični tip, a posmični tip postupno prelazi u tip popuštanja. Raspored pukotina ima velik utjecaj na posmičnu čvrstoću i maksimalna razlika je 64 %.

Ključne riječi:

razlomljena stijenska masa, raspodjela pukotina, pokus izravnog smicanja, mehaničko ponašanje, proces loma

Research Paper

Xing-Chao Lin, Gui-Na Zhu, Xing-Song Sun

Mechanical behavior of rock mass under simulated materials shear testing

In this paper, the influence of joint distribution on the deformation and strength characteristics of rock mass is studied through direct shear tests of five typical distribution types of simulated materials including two joints. The spatial distribution pattern of joints determines the deformation and failure process and the final shape of rock mass, which is mainly manifested as lap failure between joints. By comparing the 25 stress-strain curves obtained from the test, the stress-strain curves are classified into five types. With the increase of the normal stress, the composite shear type gradually transforms to the shear type, and the shear type gradually transforms to the yield type. The joint distribution pattern has a great influence on the shear strength and the maximum difference is 64 %.

Key words:

jointed rock mass, joint distribution, shear test, mechanical behaviour, failure process

1. Uvod

Stijenske mase nastaju dugotrajnim geološkim konformacijskim pomicanjem i sadrže velik broj diskontinuiteta, kao što su rasjedi, pukotine, plohe slojevitosti i brazde. Ti se diskontinuiteti međusobno presijecaju, razvijajući specifičnu strukturu stijenske mase. Na taj način mehanizam sloma stijenske mase i njezina inženjersko-mehanička svojstva, kao što su čvrstoća i krutost, određeni su složenom strukturom. Značajan broj inženjerskih istraživanja potvrdio je da su deformacija, slom i nestabilnost stijenske mase obično uzrokovani deformacijom, slomom, širenjem pa čak i srastanjem pukotina unutar stijenske mase [1-4]. S tog stajališta od velike je važnosti proučavanje utjecaja rasporeda pukotina na mehanička svojstva razlomljene stijenske mase.

Ispitivanje izrađenih pukotina na fizičkom modelu djelotvorno je sredstvo za proučavanje utjecaja strukturnih ravnina na mehanička svojstva razlomljene stijenske mase, uglavnom uključujući pokus jednoosnog tlaka, pokus izravnog smicanja, itd. U prethodnim se istraživanjima mogu pronaći mnogi rezultati o laboratorijskim ispitivanjima na modelskim uzorcima razlomljene stijenske mase [5-25]. Zbog ograničenja uvjeta ispitivanja, bilo da se radi o pokusu jednoosnog tlaka ili pokusu izravnog smicanja, razlomljeni uzorci stijenske mase u navedenim istraživanjima su uglavnom s jednom pukotinom ili specifičnim kombinacijama, što otežava vjerodostojno prikazivanje stvarnih karakteristika sloma razlomljene stijenske mase sa složenijom raspodjelom diskontinuiteta.

Wang i sur. [7] su prikupili više od 100.000 izmjerenih podataka strukturnih ravnina tijekom izgradnje 35 hidroenergetskih projekata. Na temelju tih podataka, statističkom analizom sažeto je pet tipičnih uzoraka distribucije strukturnih ravnina (slika 1.). Većina distribucija strukturnih ravnina može se izvesti iz ovih pet distribucijskih uzoraka, koji mogu bolje odražavati strukturne karakteristike stijenske mase.

U ovom radu, izradom uređaja za modeliranje tipične razlomljene stijenske mase, optimiziranjem ispitivanja i sustava ispitivanja te projektiranjem cjelokupne ispitne sheme, provedeno je istraživanje pokusom izravnog smicanja na

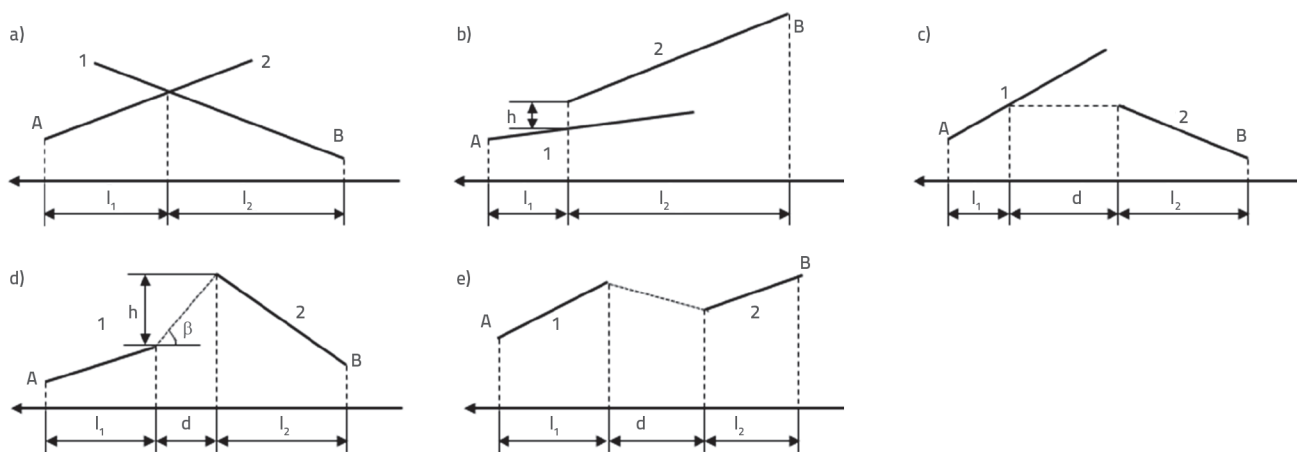
navedenih pet tipova razlomljenih uzoraka stijenske mase s tipičnom raspodjelom pukotina i dvije pukotine. Analiziran je proces deformacije, širenja i loma razlomljene stijenske mase u uvjetima tipičnih distribucija strukturnih ravnina. Dodatno, otkriven je mehanizam različitih uzoraka distribucije pukotina na sveobuhvatnu posmičnu čvrstoću.

2. Eksperimentalna metodologija

2.1. Priprema uzoraka

Uzorci razlomljene stijene izrađeni su od mješavine žbuke, vode, cementa i pijeska u određenim omjerima. Stijene različite čvrstoće mogu se dobiti prilagođavanjem udjela pojedinog materijala u smjesi. Štoviše, čelični limovi i brusni papiri ugrađeni su u procesu izrade uzoraka kako bi se simulirale pukotine. Karakteristike različitih pukotina mogu se simulirati mijenjanjem debljine ugrađenog materijala, načina obrade i vrste materijala. Proces izrade fizičkog modela i kontrolne točke prikazane su kako slijedi:

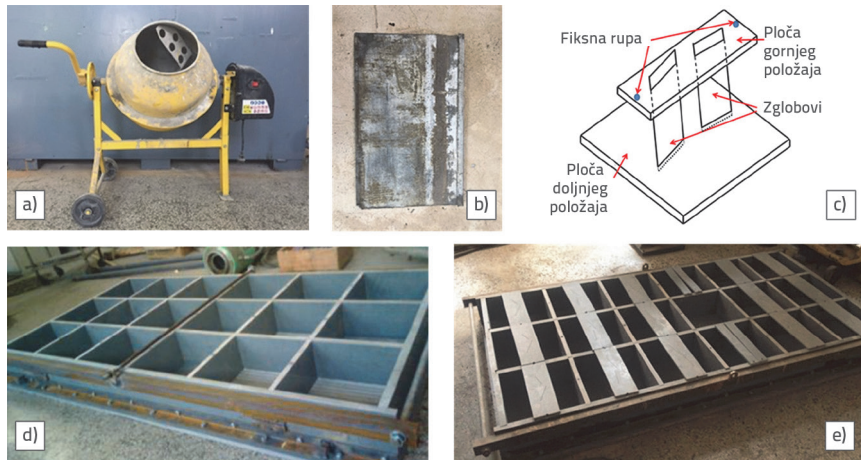
- Omjer mase korišten u ispitivanju bio je pijesak:cement:voda = 3:2:1,13. Za miješanje materijala korištena je mala miješalica za beton, kao što je prikazano na slici 2.a.
- Čelični lim debljine 0,7 mm korišten je kao alat za izradu pukotina, kao što je prikazano na slikama 2.b i 2.c. Proveden je usporedni test kako bi se utvrdilo kada se čelični lim može lako izvući bez narušavanja geometrijske morfologije pukotine, a 8 sati nakon izlivanja modela pokazalo se najboljim vremenom.
- Dimenzije modela pukotina bile su $300 \times 300 \times 150$ mm (duljina \times širina \times visina). Svi uzorci moraju biti proizvedeni istovremeno kako bi se održala sukladnost ispitnih materijala. Uzorci kalupa korišteni u ovom istraživanju prikazani su na slikama 2.d i 2.e.
- Kalupi su uklonjeni dva dana nakon što je završena izrada uzoraka, a zatim su uzorci sušeni 21 dan na sobnoj temperaturi prije ispitivanja. Karakteristični parametri stijenske mase i pukotina određeni su pokusom izravnog smicanja, a rezultati su navedeni u tablici 1.



Slika 1. Pet osnovnih kombinacija oblika spojnika i kamenih mostova [7]

Tablica 1. Fizičko-mehanički parametri stijenske mase i spoja

Materijali	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov omjer	Kut trenja [°]	Kohezija c [MPa]	Gustoća [kg/m ³]
Stijena	3,5	0,16	39,8	2,71	2100
Pukotine	-	-	30,8	0,59	-



Slika 2. Priprema uzoraka

2.2. Projektiranje geometrije pukotina

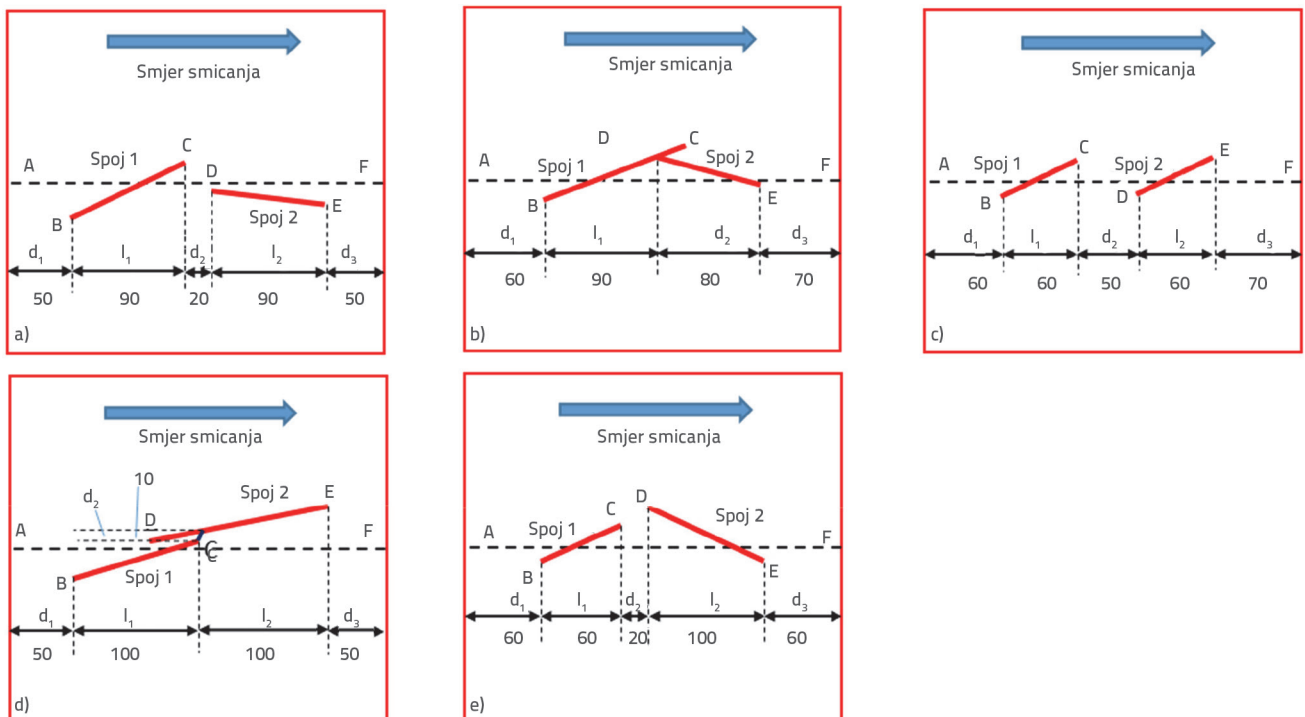
U ovom su radu razlomljeni uzorci stijena projektirani u skladu s obrascima raspodjele koju je predložio Wang, X.G. i sur. [7]. Specifične geometrijske dimenzije uzoraka prikazane su na slici 3. Na tim slikama početna i krajnja točka pukotine 1 su B i C, a

početna i krajnja točka pukotine 2 D i E. Početna i završna točka plohe smicanja su A i F.

2.3. Postupak ispitivanja

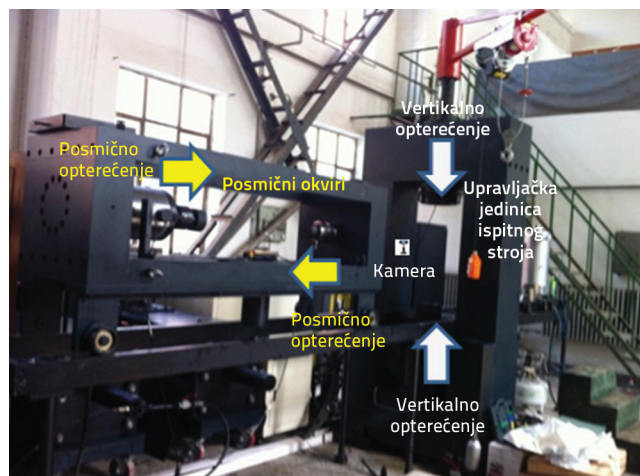
Kao ispitno sredstvo korišten je hidraulički servouniverzalni uređaj za ispitivanje stijena SAJM-2000 (slika 4.). Nakon što je uzorak montiran na posmični okvir, posmični okvir se premješta u glavni ispitni uređaj kako bi se istovremeno nanijelo normalno i posmično opterećenje. Normalno opterećenje u pokusu izravnog smicanja kontrolira se silom. Normalna sila od 5 kN primjenjuje se prva prije početka nanošenja odgovarajućih razina

opterećenja. Treba napomenuti da se tangencijalno opterećenje najprije kontrolira ispitnom silom. Ispitna sila od 3 kN je najprije primijenjena, a zatim pretvorena u kontrolu pomaka pri brzini pomaka od 0,5 mm/min. Kamera ugrađena u okvir (slika 4.) služila je za snimanje procesa loma uzorka tijekom



Slika 3. Fizičke dimenzije uzoraka (mjerne jedinice [mm])

ispitivanja. Dodatno, usvojena je procedura snimanja zaslona za istovremeno bilježenje procesa loma i podataka o naprezanjima i deformacijama tijekom ispitivanja. S ovim postavljanjem, moguće je više puta promatrati bitne karakteristike procesa loma nastale tijekom ispitivanja, kao i krivulje mehaničkih karakteristika.



Slika 4. SAJM-2000 hidraulički servouniverzalni ispitni stroj za stijene

Pokus izravnog smicanja provodi se pod različitim normalnim opterećenjima (0,5 MPa, 1,0 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa i 2,5 MPa) na pet tipičnih modelskih uzoraka stijenske mase. Provedeno je ukupno 25 pokusa izravnog smicanja na modelima stijenske mase kako bi se proučio proces nastanka sloma te čvrstoća razlomljene stijenske mase.

3. Rezultati i analize

3.1. Naponsko - deformacijske krivulje stijena s različitim raspodjelama dviju pukotina pri smicanju

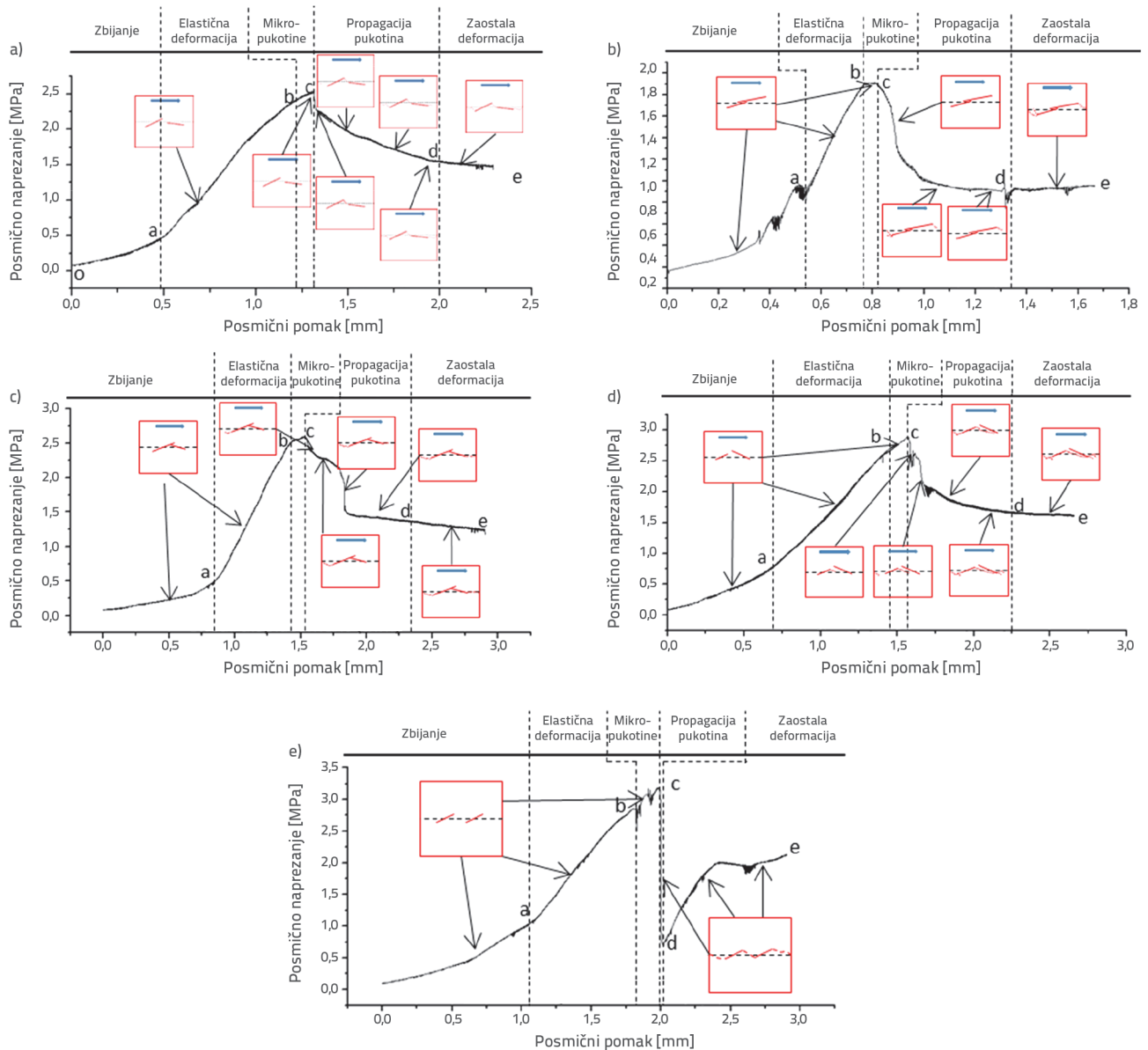
Naponsko-deformacijske krivulje uzoraka mogu se dobiti pokusom izravnog smicanja. Kada je normalno naprezanje 1,0 MPa, naponsko-deformacijske krivulje raznih vrsta razlomljene stijene mogu se podijeliti u pet faza (kao što je prikazano na slici 5.). Podjela i mehanizmi ponašanja tih pet faza su sljedeći:

1. Faza prilagodbe (oa). Posmično opterećenje raste s povećanjem posmične deformacije, a brzina deformacije postupno raste. Mehanički mehanizam te faze je sljedeći: na početku opterećenja može postojati mali razmak i kutno odstupanje između uzorka i okvira za smicanje. Pod djelovanjem posmičnog opterećenja uzorak će proizvesti elastičnu deformaciju i istovremeno proizvesti deformaciju zbijanja i podešavanja. Kada nestane posmično opterećenje, nestat će i elastična deformacija, ali će ostati deformacija zbijanja i podešavanja; sam uzorak se ne deformira. Uzorak je u elastičnom stanju. Kao što je prikazano na slici 5., najveća udaljenost ispod linije \overline{oc} je točka a.

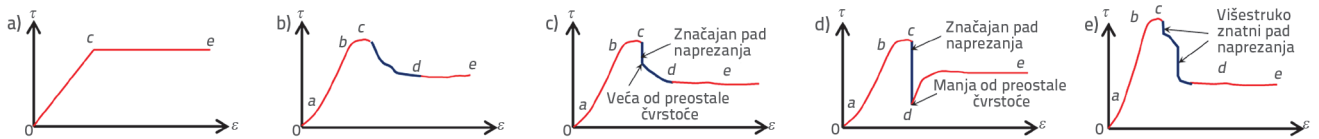
2. Faza linearne elastične deformacije (ab). Posmično opterećenje raste s povećanjem posmične deformacije, a brzina deformacije ostaje konstantna. Mehanizam te faze je sljedeći: kako se ispitivanje nastavlja, posmično naprezanje raste s povećanjem pomaka; kada nestane posmično opterećenje, nestat će i deformacija. Uzorak je u elastičnom stanju. Najveća udaljenost iznad dužice \overline{oc} je točka b.
3. Faza nevidljive pukotine (bc). Posmično opterećenje raste s povećanjem posmične deformacije, a brzina deformacije postupno opada. Mehanizam formiranja te faze je sljedeći: kada je posmično opterećenje blizu vršne čvrstoće razlomljene stijenske mase, može doći do lokalne plastične deformacije na vrhu pukotine i položaju opterećenja. Kada posmično opterećenje nestane, ovaj dio pomaka se ne može u potpunosti povratiti, a lokalni dio uzorka je u plastičnom stanju. Točka koja odgovara najvećoj vrijednosti otpora na smicanje je c.
4. Širenje pukotine (cd). S povećanjem posmičnog pomaka, posmično opterećenje postupno se smanjuje od vršne čvrstoće do rezidualne čvrstoće, a trag naprezanja povezan je s lomom razlomljene stijenske mase. Kada posmično opterećenje dosegne vršnu čvrstoću, dolazi do loma razlomljene stijenske mase i pukotine se postupno šire sve dok ne dođe do potpunog razdvajanja, a posmična čvrstoća razlomljene stijenske mase postupno opada do postizanja rezidualne čvrstoće. Zbog pojave pukotina, uzorak će se deformirati duž smjera smicanja. Kada je brzina deformacije veća od brzine opterećenja uređaja za ispitivanje, pojavit će se fenomen pada naprezanja, kao što je prikazano na slikama 5.a, 5.c do 5.e. Kada je brzina deformacije dovoljno visoka, posmično opterećenje može biti manje od preostale čvrstoće razlomljene stijenske mase i zatim postupno rasti do rezidualne čvrstoće u ispitivanju, kao što je prikazano na slici 5.e. Točka d se određuje prema procesu sloma uzorka.
5. Faza zaostale deformacije (de). S povećanjem posmičnog pomaka, posmično opterećenje se ne mijenja. Mehanizam formiranja mehaničkih karakteristika ove etape je sljedeći: razlomljena stijenska masa je u potpunosti slomljena, a njezine karakteristike su slične rezultatima pokusa izravnog smicanja pukotina s velikim fluktuacijama.

U usporedbi s prethodnim rezultatima pokusa izravnog smicanja stijenske mase i pukotina [27-30], zbog strukturnih karakteristika razlomljene stijenske mase, naponsko-deformacijske krivulje pokazuju različite oblike u fazi širenja pukotine. Krivulje odziva u fazi propagacije loma razlomljene stijenske mase mogu se podijeliti na tip klizanja, tip popuštanja, tip smicanja, tip loma i tip kombinacije smicanja.

- Tip klizanja: U ispitivanju izravnog smicanja glatkih ravnih pukotina, nema faze širenja pukotine (cd) na naponsko-deformacijskoj krivulji (slika 6.a);
- Tip popuštanja: Naponsko-deformacijska krivulja je u cjelini glatka, bez ikakvog očitog pada u fazi širenja pukotine (cd), i najčešći je tip (slika 6.b);

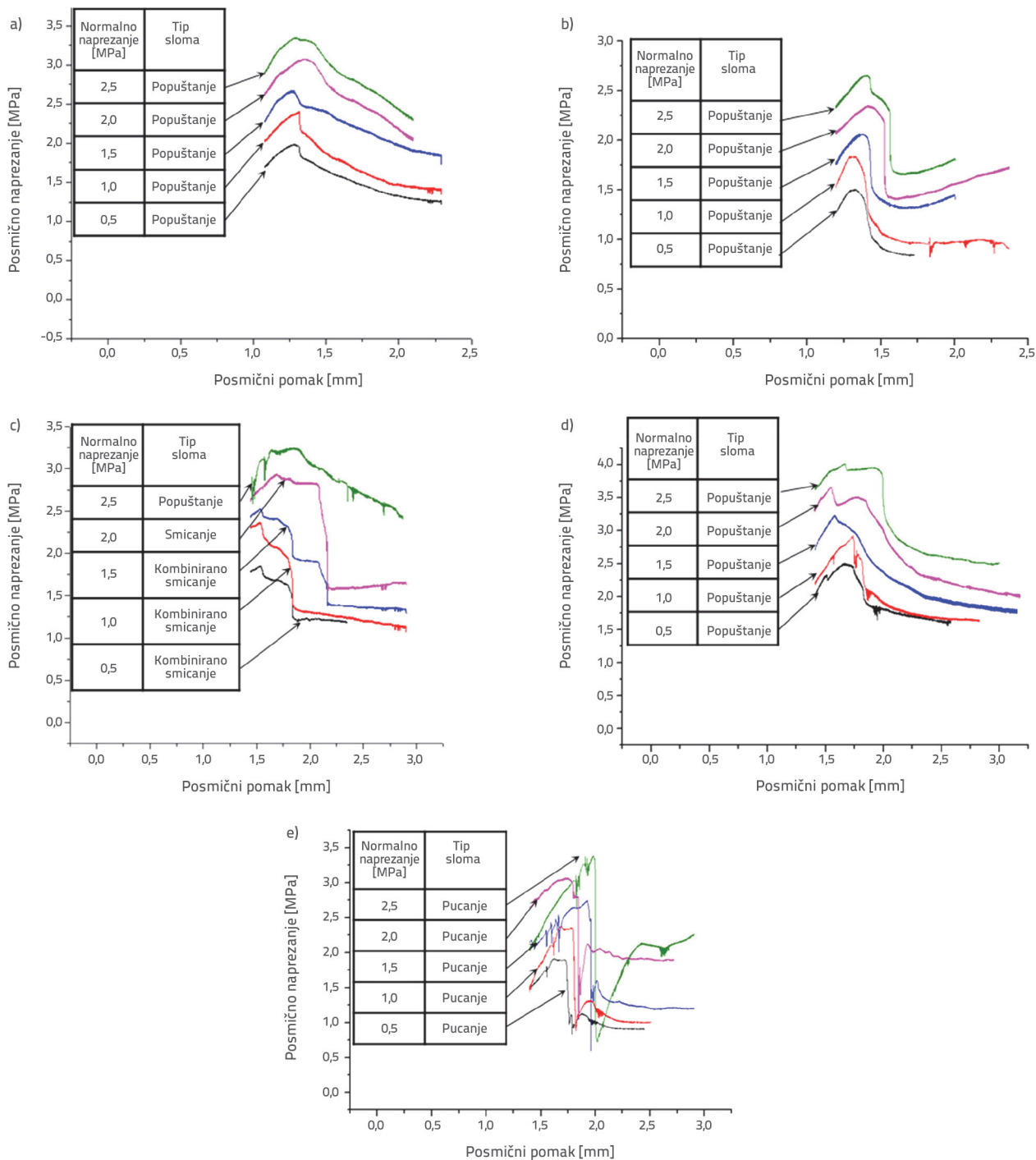


Slika 5. Proceni loma spojenih stijena u tipičnim uzorcima raspodjele



Slika 6. Podjela faza u naponsko – deformacijskim krivuljama za različito razlomljene stijene pod normalnim naprezanjem od 1,0 MPa

- **Tip smicanja:** Naponsko-deformacijska krivulja je u cjelini glatka u ranoj fazi, ima znatan pad naprezanja kada se dostigne vršna čvrstoća, i dostiže rezidualnu čvrstoću kada naprezanje postane malo nakon pada naprezanja. Postoji pad naprezanja veći od 5 % (slika 6.c);
- **Tip loma:** Naponsko-deformacijska krivulja je u cjelini glatka u ranoj fazi, ima znatan pad naprezanja kada se dostigne vršna čvrstoća, i dostiže rezidualnu čvrstoću zajedno s povećanjem naprezanja u kasnijoj fazi. Postoji pad naprezanja veći od 20 % (slika 6.d);
- **Tip kombinacije smicanja:** Naponsko-deformacijska krivulja je u cjelini glatka u ranoj fazi, ima višestruke značajne padove naprezanja nakon postizanja vršne čvrstoće i doseže rezidualnu čvrstoću zajedno sa smanjenjem naprezanja u kasnijoj fazi. Postoji nekoliko padova naprezanja većih od 5 % (slika 6.e).



Slika 7. Podjela faza u naponsko-deformacijskim krivuljama za različito razlomljene stijene pod različitim normalnim naprezanjima

Kako bi se razumjele karakteristike mehaničkog odgovora razlomljenih uzoraka stijena u procesu sloma, naponsko-deformacijske krivulje pet tipičnih uzoraka raspodjele pukotina pod različitim normalnim uvjetima opterećenja prikazane su zajedno (nakon faze nevidljive pukotine), kao što je prikazano na slici. 7.

Podaci na slici 7. jasno pokazuju da raspodjela pukotina u stijenskoj masi ima prevladavajuću ulogu u određenim vrstama

razlomljenih stijena. S povećanjem normalnog opterećenja, različite vrste razlomljenih stijenjskih masa pokazuju sljedeće različite mehaničke karakteristike:

Za tip I, tip II, tip III i tip IV, što je veće normalno naprezanje, tip kombinacije smicanja transformirat će se u tip smicanja, dok će se tip smicanja transformirati u tip popuštanja.

Za tip V, što je veće normalno naprezanje, to je veća posmična čvrstoća razlomljene stijenske mase. Što je očitiji fenomen pada

naprezanja koji se javlja kada dođe do sloma, vrsta sloma ostaje tip krhkog loma.

Razlog za spomenuti fenomen je taj da je proces sloma tipa I, tipa II, tipa III i tipa IV progresivan slom. Što je veće normalno naprezanje, to je očitiji ograničavajući učinak širenja pukotine, to je manja vjerojatnost proizvesti značajan pad naprezanja; Proces sloma tipa V je iznenadni slom, što je veće normalno naprezanje, veća je akumulirana energija, veća je energija oslobođena tijekom sloma i značajniji je fenomen pada naprezanja.

3.2. Proces i načini sloma

Za uzorke s identičnom distribucijom pukotina, njihovi procesi sloma su dosljedni pod različitim normalnim uvjetima naprezanja. Posmična čvrstoća i skica procesa sloma u procesima sloma, širenja i povezivanja pukotina pod normalnim naprezanjem od 1,0 MPa dani su zbog ograničenja prostora, kao što je prikazano u tablicama 2. do 6.

Razlomljena stijena tipa I, kao što je prikazano u tablici 2., uglavnom je karakterizirana progresivnim lomljenjem stijenskih mostova. Slom pukotine, širenje i proces povezivanja mogu se jasno vidjeti u tablicama u stupcu *video*. Kako se posmično opterećenje nastavlja, na uzorku se može uočiti djelomično

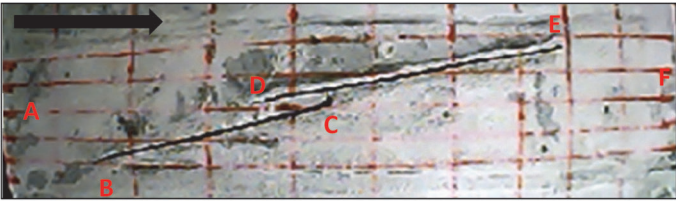
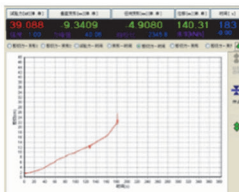
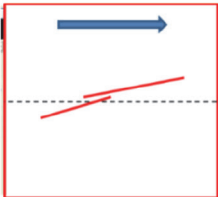
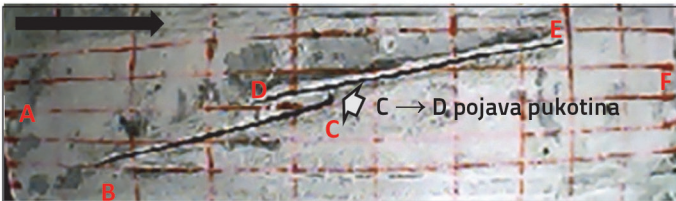
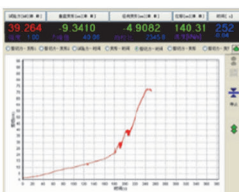
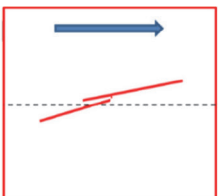
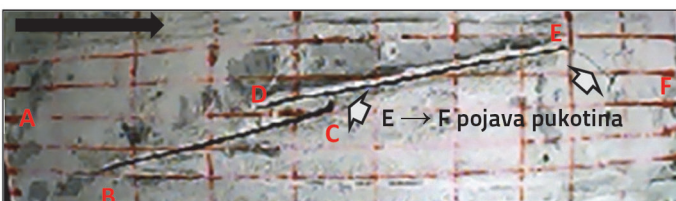
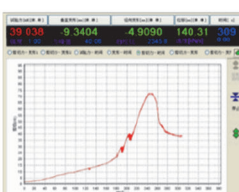
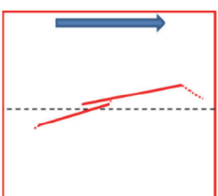
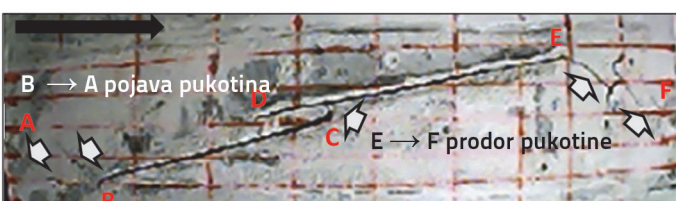

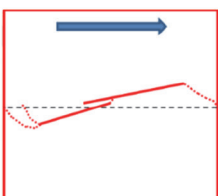
uklonjena površina, što upozorava na stvaranje unutarnjih mikropukotina kada se posmično opterećenje približi krajnjoj posmičnoj čvrstoći razlomljene stijene. Nakon toga, stijenski most "CD" između pukotina "BC" i "DE" naglo popušta uz pratnju slabog zvuka i smanjenje posmičnih opterećenja kada posmično opterećenje dosegne krajnju posmičnu čvrstoću razlomljene stijene. Kako se opterećenje nastavlja, početna točka smicanja A postupno se širi do početne točke B pukotine "BC". Štoviše, pukotina "DE" se širi do krajnje točke smicanja F dok se ne povežu.

Razlomljena stijena tipa II, kao što je prikazano u tablici 3., također je karakterizirana progresivnim lomljenjem stijenskih mostova. Kako se pokus izravnog smicanja nastavlja, stijena se ponaša na isti način kao razlomljena stijena tipa I. Na uzorku se može uočiti djelomično uklonjena površina koja je popraćena stvaranjem mikropukotina kada se posmično opterećenje približi krajnjoj posmičnoj čvrstoći razlomljene stijene. Početna točka C pukotine "BC" propagira do pukotine "DE" kada posmično opterećenje dosegne krajnju posmičnu čvrstoću razlomljene stijene. Ne može se otkriti značajno smanjenje naprezanja u razlomljenoj stijeni tipa II zbog male udaljenosti između točke C i pukotine "DE". Kako se opterećenje nastavlja, početna točka smicanja A postupno se širi do početne točke B pukotine „BC“.

Tablica 2. Proces sloma razlomljene stijene kod tipa I

Video	Posmična čvrstoća	Skica

Tablica 3. Procesi sloma razlomljene stijene kod tipa II

Video	Posmična čvrstoća	Skica
		
		
		
		

Štoviše, pukotina "DE" se širi do krajnje točke smicanja F dok se ne povežu.

Razlomljena stijena tipa III, kao što je prikazano u tablici 4., također je karakterizirana progresivnim lomljenjem stijenskih mostova. Kada posmično opterećenje dosegne krajnju posmičnu čvrstoću razlomljene stijene, dok se pukotina "BC" preklapa s pukotinom "DE", početna točka smicanja A postupno se širi do početne točke B pukotine "BC". Zatim, kako se opterećenje nastavlja, pukotina "DE" se širi do krajnje točke smicanja F dok se ne povežu.

Razlomljena stijena tipa IV, kao što je prikazano u tablici 5., karakterizirana je progresivnim lomljenjem preklopa između pukotine "BC", početne točke smicanja A i krajnje točke F, te pukotine koja se širi preko pukotine "DE". Kada posmično opterećenje dosegne krajnju posmičnu čvrstoću razlomljene stijene, početna točka smicanja A postupno se širi do početne točke B pukotine "BC", a krajnja točka C pukotine "BC" širi se i konačno povezuje s krajnjom točkom smicanja F.

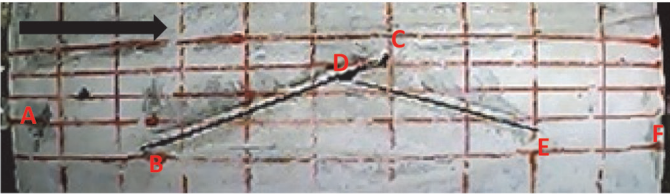

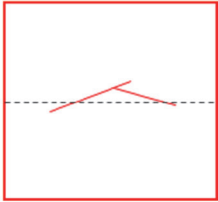
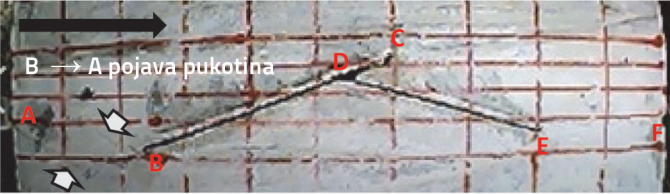
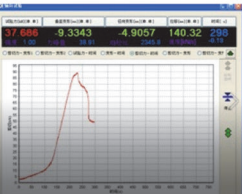

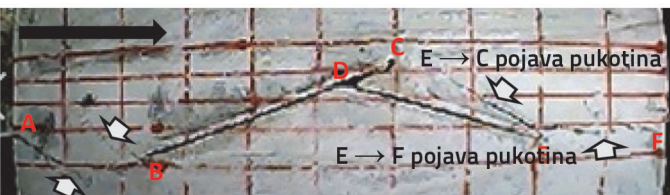
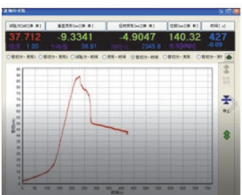
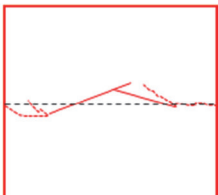
Razlomljena stijena tipa V, kao što je prikazano u tablici 6., karakterizirana je iznenadnim lomljenjem stijenskih mostova. Za razliku od razlomljenih stijena u drugim uzorcima, kada

posmično opterećenje dosegne krajnju posmičnu čvrstoću razlomljene stijene, početna točka smicanja A do početne točke pukotine "BC", završna točka C pukotine "BC" do početne točke D pukotine "DE" i krajnja točka E pukotine "DE" do krajnje točke smicanja F otkazuju istovremeno, uzrokujući očito smanjenje posmičnog opterećenja i stvaranje glasnih zvukova.

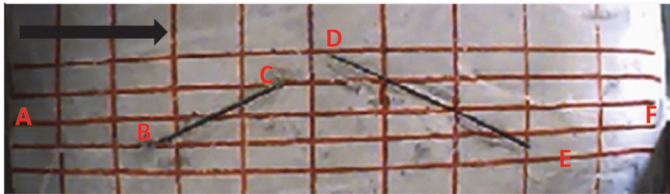
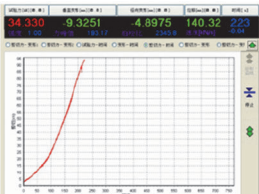
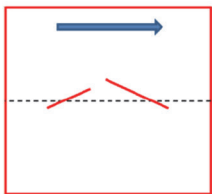
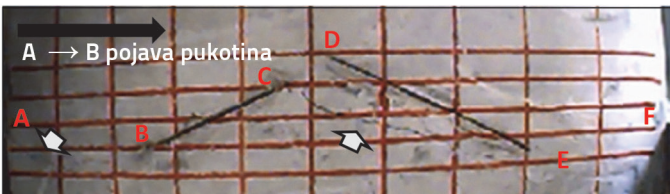

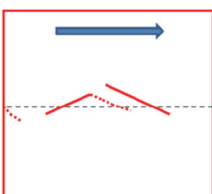
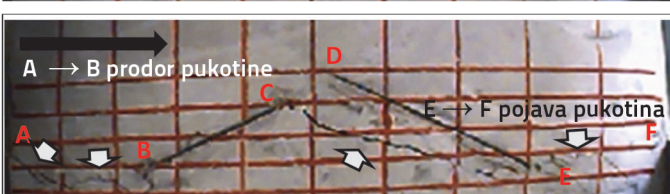

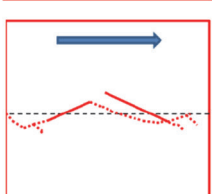
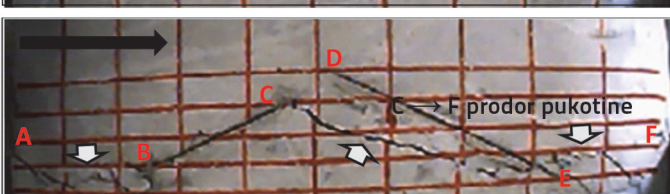

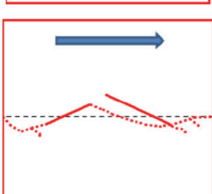
Napomena: ogledne slike i krivulje učitavanja s lijeve strane slike su snimke zaslona iz videozapisa. Panorama uzorka može se snimiti samo širokokutnom kamerom zbog prostornih ograničenja testnog stroja. Budući da širokokutno snimanje dovodi do izobličenja, desno od slika prikazana je skica slike nakon uklanjanja ovog efekta izobličenja.

Pod različitim normalnim uvjetima napreznja (0,5 MPa, 1,0 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa i 2,5 MPa), procesi sloma pet tipova razlomljenih stijena u osnovi su dosljedni. Procesi sloma i širenja razlomljene stijene određeni su rasporedom pukotina. Stijene tipa I, II i III uglavnom su karakterizirane progresivnim lomljenjem stijenskih mostova. Tip IV karakterizira progresivno lomljenje pri preklapanju između pukotine "BC", početne točke smicanja A i krajnje točke F. Tip V razlomljene stijene karakterizira iznenadno istovremeno lomljenje stijenskih mostova.

Tablica 4. Procesi sloma razlomljene stijene kod tipa III

Video	Posmična čvrstoća	Skica
		
 B → A pojava pukotina		
 E → C pojava pukotina E → F pojava pukotina		

Tablica 5. Procesi sloma razlomljenih stijena kod tipa IV

Video	Posmična čvrstoća	Skica
		
 A → B pojava pukotina		
 A → B prodor pukotine E → F pojava pukotina		
 C → F prodor pukotine		

Tablica 6. Procesi sloma razlomljenih stijena kod tipa V

Video	Posmična čvrstoća	Skica

Tablica 7. Statistika konačnih načina sloma razlomljenih stijena u tipičnim uzorcima distribucije

Normalno naprezanje [MPa]	Tip I	Tip II
0,5		
1,0		
1,5		
2,0		
2,5		

Tablica 7. Statistika konačnih načina sloma razlomljenih stijena u tipičnim uzorcima distribucije - nastavak

Normalno naprezanje [MPa]	Tip III	Tip IV
0,5		
1,0		
1,5		
2,0		
2,5		
Normalno naprezanje [MPa]	Tip V	Napomene
0,5		<p>☐ Pukotine u glavnom putu sloma</p> <p>☑ Sekundarne pukotine</p>
1,0		
1,5		
2,0		
2,5		

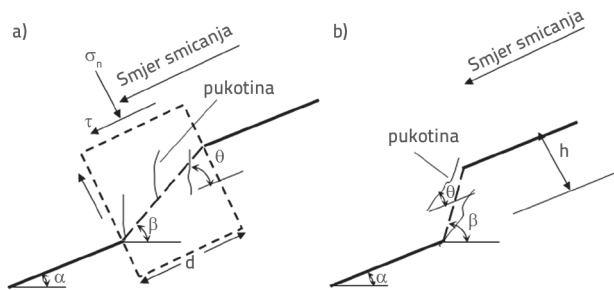
Kada su normalna naprezanja 0,5 MPa, 1,0 MPa, 1,5 MPa, 2,0 MPa i 2,5 MPa, krajnji načini sloma pet uzoraka s tipičnim distribucijama pukotina sažeti su u tablici 7. Na temelju tablice 7. možemo identificirati sljedeće karakteristike:

- Lom stijenskih mostova između dviju pukotina glavni je uzorak sloma u pokusu izravnog smicanja razlomljene stijene u tipičnim obrascima distribucije.
- Razlomljena stijena tipa IV izravno prelazi pukotinu "DE" jer je vlačna čvrstoća između krajnje točke C pukotine "BC" i krajnje točke smicanja F manja od kombinirane posmične čvrstoće "C->D->E->F". Stoga je konačni način sloma stijene određen značajkama distribucije pukotina.
- Pod različitim normalnim uvjetima naprezanja, kada su načini sloma razlomljenih stijena identični, mogu postojati male razlike u položajima preklapanja između dvije pukotine.
- U uvjetima visokog normalnog naprezanja, krilne pukotine koje se također mogu pojaviti u pokusima jednoosnog tlaka pri vrhovima pukotine, ne utječu na primarni put sloma razlomljene stijene.

4. Posmična čvrstoća stijena s različitim raspodjelama dviju pukotina

Indeks posmične čvrstoće razlomljene stijene, koji je značajna osnova za inženjersko projektiranje, izravno je povezan s ekonomičnošću i sigurnošću inženjerske primjene; stoga su ovaj indeks često proučavali znanstvenici diljem svijeta. Pod različitim normalnim naprezanjima, u skladu s eksperimentalnim istraživanjem i teoretskom analizom predložena su tri načina sloma koja bi se mogla dogoditi u stijenskom mostu, uključujući vlačni slom, posmični slom i tlačno-posmični slom. Sažimajući

Lajtaijeva istraživačka postignuća [21-23]. Lajtai je predložio da se tip sloma stijenskog mosta treba odrediti prema smjeru smicanja i nagibu stijenskog mosta (slika 8.); štoviše, izveo je sljedeću metodu proračuna za posmičnu čvrstoću.



Slika 8. Odnos između smjera smicanja i nagnutog kuta stijenskog mosta

Kao što je prikazano na slici 8., α je kut pukotine, β je kut spojnice dvije pukotine, a θ je kut između pukotine i novonastale pukotine. Kada je $\beta < \alpha + \theta$, doći će do posmičnog i vlačnog sloma na stijenskom mostu, a sveobuhvatna posmična čvrstoća R_r izračunava se pomoću izraza (1).

$$R_r = \tau_r d = \sqrt{\sigma_t (\sigma_t + \sigma_n)} d \tag{1}$$

Kada je $\beta > \alpha + \theta$, vlačni slom će se dogoditi na stijenskom mostu, a sveobuhvatna posmična čvrstoća R_r izračunava se pomoću izraza (2).

$$R_r = \sigma_t d \tag{2}$$

Tablica 8. Usporedba teorijskih i eksperimentalnih rezultata posmične čvrstoće razlomljenih stijenskih masa

Rezultati i popogreške	Normalno opterećenje [MPa]					Tip
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	
Rezultati pokusa [MPa]	1,99	2,41	2,67	3,07	3,35	I
Prema izrazu (3) [MPa]	1,94	2,24	2,61	3,11	3,60	
Pogreška [%]	-2,34	-6,95	-2,23	1,14	7,45	
Rezultati pokusa [MPa]	1,85	2,37	2,53	2,94	3,25	II
Prema izrazu (3) [MPa]	1,88	2,18	2,52	3,00	3,49	
Pogreška [%]	1,68	-8,10	-0,43	2,14	7,29	
Rezultati pokusa [MPa]	1,91	2,38	2,75	3,07	3,39	III
Prema izrazu (3) [MPa]	1,96	2,20	2,62	3,15	3,65	
Pogreška [%]	2,51	-7,56	-4,80	2,48	7,73	
Rezultati pokusa [MPa]	1,52	1,86	2,09	2,37	2,68	IV
Prema izrazu (3) [MPa]	1,41	1,89	2,25	2,53	2,80	
Pogreška [%]	-7,43	1,61	7,51	6,77	4,61	
Rezultati pokusa [MPa]	2,49	2,90	3,21	3,64	3,99	V
Prema izrazu (3) [MPa]	2,35	2,70	3,12	3,73	4,32	
Pogreška [%]	-5,66	-6,90	-2,85	2,36	8,27	

Na temelju Lajtaijeve teorije čvrstoće i istraživanja [10, 26], on je prikazao pet osnovnih oblika stijenskih mostova (slika 1.) s odgovarajućim proračunskim jednadžbama. Sveobuhvatna posmična čvrstoća R_f izračunava se pomoću izraza (3):

$$R_f = \sum \tau_{ij} l_i + \sum \tau_{ri} d_i \quad (3)$$

gdje su τ_{ij} i l_i posmična čvrstoća i-te pukotine i projekcija pukotine na vodoravnu ravninu, redom, a τ_{ri} i d_i su posmična čvrstoća (ili vlačna čvrstoća) i duljina projekcije i-tog stijenskog mosta. Kada je $\beta < \alpha + \theta$, $\tau_{ri} = \sqrt{\sigma_t(\sigma_t + \sigma_n)}$ i d_i je projekcija stijenskog mosta na horizontalnu ravninu, kao što je prikazano na slici 8.a. Kada je $\beta > \alpha + \theta$, $\tau_{ri} = \sigma_t$ i d_i je projekcija duž okomitog smjera spoja, kao što je prikazano na slici 8.b.

Navedene dvije teorije čvrstoće mogu se potvrditi čvrstoćom razlomljenih uzoraka stijena s tipičnim pukotinama. Parametri čvrstoće razlomljene stijenske mase navedeni su u tablici 1. Parametri čvrstoće pukotina mogu se dobiti pokusom izravnog smicanja prerezanih pukotina (tablica 1.). Geometrijski karakteristični parametri pukotina prikazani su na slici 3., a rezultati verifikacije sažeti su u tablici 8.

Prema podacima iz tablice 8. karakteristike posmične čvrstoće stijenske mase s dvije pukotine su sljedeće:

- Pod niskim normalnim naprežanjem (0,5 MPa, 1,0 MPa), posmična čvrstoća izračunana izrazom (3) nešto je niža od rezultata ispitivanja. Pod visokim normalnim naprežanjem, posmična čvrstoća izračunana jednadžbom (3) nešto je veća od rezultata ispitivanja. Maksimalna popogreška između proračuna i rezultata ispitivanja je mala pa se metodom jednadžbe može izračunati posmična čvrstoća razlomljene stijenske mase.
- Za tipičnu vrstu sloma razlomljene stijenske mase i preklapanja stijenskih mostova, konačna čvrstoća određena je udaljenošću stijenskih mostova (tip I, tip II, tip III i tip V). Posmična čvrstoća ovih tipova uzoraka od najveće do najmanje je tip V > tip I > tip III > tip III, a duljina istog stijenskog mosta je 180 mm, 120 mm, 110 mm, odnosno 100 mm. Za razlomljenu stijensku masu tipa IV, posmična čvrstoća stijenskog mosta je niža nego kod drugih vrsta razlomljene stijenske mase zbog njenog vlačnog loma. Raspodjela pukotina u razlomljenoj stijenskoj masi kontrolira posmičnu čvrstoću stijenske mase.

LITERATURA

- [1] Hoek, E., Bray, J.D.: Rock slope engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1977.
- [2] Hoek, E., Diederichs, M.S.: Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 43 (2006) 2, pp. 203–215
- [3] Tang, C.A., et al.: Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-Part II: numerical approach, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 38 (2001) 7, pp. 925–939
- [4] Henshell, R.D., Shaw, K.G.: Crack tip finite elements are unnecessary, Int. J. Numer. Methods. Eng., 9 (2010) 3, pp. 495–507
- [5] Zhang, B., et al.: Uniaxial compression mechanical property test, fracture and damage analysis of similar material of jointed rock mass with filled cracks, Rock Soil. Mech., 33 (2012) 6, pp. 1647–1652

5. Zaključak

Laboratorijska ispitivanja pokusom izravnog smicanja u kombinaciji s izradom uređaja za modeliranje tipičnog razlomljenog stijenskog sustava, optimizacijom eksperimentalnog ispitnog sustava i cjelokupnim projektiranjem programa ispitivanja, provedena su kako bi se dobio niz video zapisa i ispitnih podataka. Ovi rezultati ne samo da su pružili temelj za proučavanje procesa sloma, načina sloma i mehanizma mehaničkog odgovora razlomljene stijene, već su ponudili i osnovu za simulaciju deformacije, širenja i sloma razlomljene stijene. Sljedeći zaključci mogu se izvući na temelju 25 pokusa izravnog smicanja na 5 tipičnih razlomljenih uzoraka stijena. Deformacija, slom i razvoj stijenskih masa s tipičnim uzorcima raspodjele pukotina karakterizirani su slomovima preklapanjem između pukotina i stijenskih mostova. Pod različitim normalnim uvjetima naprežanja, uzorak prostorne distribucije pukotina kontrolira način sloma i proces za iste vrste razlomljenih stijena.

Naponsko - deformacijske krivulje uzoraka s tipičnom raspodjelom pukotina dobivene pokusima izravnog smicanja mogu se podijeliti na fazu prilagodbenog zbijanja, fazu linearne elastične deformacije, fazu nevidljive pukotine, fazu stvaranja mikropukotina, fazu širenja pukotine i fazu zaostale deformacije. Nakon usporedbe 25 naponsko-deformacijskih krivulja u cijelom procesu dobivenih pokusima, naponsko-deformacijske krivulje mogu se svesti na tipove klizanja, popuštanja, smicanja, loma i kombinacije smicanja u skladu s karakteristikama distribucije različitih tipova naponsko-deformacijskih krivulja. Tip krivulje određen je uzorkom raspodjele pukotina i normalnim uvjetima naprežanja. Kako se normalno naprežanje povećavalo, tip kombinacije smicanja transformirao se u tip smicanja, a tip smicanja transformirao se u tip popuštanja.

Raspored pukotina ima veliki utjecaj na posmičnu čvrstoću, a najveća razlika je 64 %. Raspodjela pukotina u razlomljenoj stijenskoj masi kontrolirala je posmičnu čvrstoću stijenske mase.

Zahvala

Ovo istraživanje podržali su Nacionalni ključni program za istraživanje i razvoj Kine (br. 2018YFC0407000), Nacionalna zaklada za prirodne znanosti Kine (br. 51809289) i IWHR Program potpore istraživanju i razvoju (br. GE0145B462017 i GE0145B692017). Istraživački projekt tvrtke China Three Gorges Corporation (ugovor br. JG/19055).

- [6] Bahaaddini, M., et al.: Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study, *Eng. Geol.*, 181 (2014), pp. 212-223
- [7] Wang, L.H., et al.: Study of non-consecutive jointed rock mass under uniaxial compression, *J. Hydraul. Eng.*, 45 (2014) 12, pp. 1410-1418
- [8] Huang, C., et al.: Analysis of indoor uniaxial compression test on layered anisotropic rock masses, *J Yangtze River Sci. Res. Inst.*, (2016) 5, pp. 14
- [9] Ma, G.W., et al.: Modelling complex crack problems using the numerical manifold method, *Int. J. Fract.*, 156 (2009) 1, pp. 21-35
- [10] Einstein, H.H., Baecher, G.B.: Probabilistic and statistical methods in engineering geology, *Rock Mech. Rock. Eng.*, 16 (1983) 1, pp. 39-72
- [11] Einstein, H.H., Dershowitz, W.S.: Tensile and shear fracturing in predominantly compressive stress fields - A Review, *Eng. Geol.*, 29 (1990) 2, pp. 149-172
- [12] Shen, B., Stephansson, O.: Numerical analysis of mixed mode I and mode II fracture propagation, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 30 (1993) 7, pp. 861-867
- [13] Shen, B., Stephansson, O.: Modification of the G -criterion for crack propagation subjected to compression, *Eng. Fract. Mech.*, 47 (1994) 2, pp. 177-189
- [14] Shen, B.: The mechanism of fracture coalescence in compression: Experimental study and numerical simulation, *Eng. Fract. Mech.*, 51 (1995) 1, pp. 73-85
- [15] Chau, K.T. Wong, R.H.C.: Uniaxial compressive strength and point load strength of rocks, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 33 (1996) 2, pp. 183-188
- [16] Wong, R.H.C., Chau, K.T.: Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 35 (1998) 2, pp. 147-164
- [17] Chau, K.T., et al.: Fragmentation of brittle spheres under static and dynamic compressions: Experiments and analyses, *Mech. Mater.*, 32 (2000) 9, pp. 543-554
- [18] Wong, R.H.C., et al.: The mechanisms of crack propagation from surface 3-D fracture under uniaxial compression, *Key. Eng. Mater.*, 261-263 (2004) 1, pp. 219-224
- [19] Wong, R.H.C., Lin, P., Tang, C.A.: Experimental and numerical study on splitting failure of brittle solids containing single pore under uniaxial compression, *Mech. Mater.*, 38 (2006) 1, pp. 142-159
- [20] Chen, X.R., Liao, Z., Peng, X.: Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 22 (2012) 2, pp. 213-221
- [21] Lajtai, E.Z.: Shear strength of weakness planes in rock, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 6 (1969) 5, pp. 499-508, IN7-IN8, 509-515.
- [22] Lajtai, E.Z.: A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture, *Tectonophysics*, 11 (1971) 2, pp. 129-156
- [23] Lajtai, E.Z.: Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 9 (1972) 5, pp. 569-578
- [24] Kulatilake, P.H.S.W., et al.: Analysis of structural homogeneity of rock masses, *Eng. Geol.*, 29 (1990) 3, pp. 195-211
- [25] Kulatilake, P.H.S.W., Fiedler, R., Panda, B.B.: Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses, *Eng. Geol.*, 48 (1997) 3-4, pp. 217-229
- [26] Wang, X.G., et al.: Determination of discontinuity persistent ratio by Monte-Carlo simulation and dynamic programming, *Eng. Geol.*, (2016) 203, pp. 83-98
- [27] Huang, T.H., Chang, C.S., Chao, C.Y.: Experimental and mathematical modeling for fracture of rock joint with regular asperities, *Engineering Fracture Mechanics*, 69 (2002) 17, pp. 1977-1996
- [28] Saiang, D., Malmgren, L., Nordlund, E.: Laboratory tests on shotcrete- Rock joints in direct shear, tension and compression, *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 38 (2005) 4, pp. 275-297
- [29] Bahaaddini, M., et al.: Experimental and numerical study of asperity degradation in the direct shear test, *Engineering Geology*, 204 (2016), pp. 41-52
- [30] Zhu, J.B., Li, H., Deng, J.H.: A one-dimensional elastoplastic model for capturing the nonlinear shear behaviour of joints with triangular asperities based on direct shear tests, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52 (2018), pp. 1671-1687