

ISPITIVANJE ČVRSTOĆE PIJESKA UREĐAJEM ZA PRSTENASTO SMICANJE

TESTING SAND STRENGTH WITH RING SHEAR APPARATUS

Nika Kamenar*, Martina Vivoda Prodan*

Sažetak

U ovome je radu opisano određivanje parametara posmične čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje (RSA). Prikazan je koncept, građa uređaja i postupak ispitivanja u uređaju, te opis uzorka tla. Ispitivanja su provedena na uzorcima jednolično graduiranog pijeska u dreniranim uvjetima pri normalnim efektivnim napreznjima u rasponu od 32 do 200 kPa. U obzir je također uzet otpor brtve unutar samog uređaja. U sklopu ispitivanja izvršena je konsolidacija, a kasnije je uzorak smican uz povratni pritisak i konstantni prirast posmičnog pomaka. Na temelju rezultata ispitivanja utvrđeni su vršni i rezidualni parametri Mohr-Columbovog kriterija čvrstoće pijeska.

Ključne riječi: uređaj za prstenasto smicanje, efektivno normalno napreznje, posmična čvrstoća, rezidualna čvrstoća, pijesak

Abstract

This paper describes the determination of the shear strength parameters of sand using a ring shear apparatus (RSA). The paper presents the concept, the design of the apparatus and the test procedure in the apparatus, and offers the description of the soil sample. The tests were performed on samples of uniformly graded sand in drained conditions at normal effective stresses in the range of 32 to 200 kPa. The resistance of the seal inside the device itself was also taken into account. Consolidation was performed as part of the test, and then the sample was sheared with back pressure and a constant increase in shear displacement. Test results were used to determine the peak and residual parameters of the Mohr-Columb sand strength criterion.

Key words: ring shear apparatus, effective normal stress, shear strength, residual strength, sand

* Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Radmile Matejčić 3, 51000 Rijeka

E-mail: nkamenar@student.uniri.hr, martina.vivoda@gradri.uniri.hr

1. Uvod

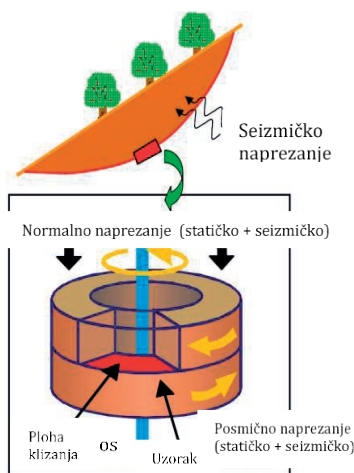
Prilikom gradnje iznimno je važno na kakvom tlu se gradi objekt ili se pak postavljaju temelji. Uvelike u tome pomažu značajke tla na kojem se određeni objekt gradi. Tlo kao površinski sloj Zemlje ima različit sastav [1]. Za svako tlo svakako je važno odrediti parametre čvrstoće tla kako bi se mogla odrediti nosivost tla i prepoznati hoće li njenim prekoračenjem doći do sloma tla [2]. Određivanje značajki čvrstoće tla provodi se na različitim uređajima na terenu i u laboratoriju, gdje su u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci prisutni uređaj za izravno smicanje u saturiranim ili nesaturiranim uvjetima, uređaj za triaksijalno smicanje te uređaj za prstenasto smicanje. Upravo će se u ovom radu ispitivati značajke čvrstoće pijeska pri različitim normalnim naprezanjima u prijenosnom uređaju za prstenasto smicanje, ICL-1 (International Consortium on Landslides), doniranom Građevinskom Fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu hrvatsko-japanskog bilateralnog znanstvenog projekta „Identifikacija rizika i planiranje korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda od klizišta i poplava u Hrvatskoj“. Ispitivani uzorak tla je jednoliko graduirani pijesak ugrađen u umanjeni fizički model kosine i korišten u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja“ (ModLandRemSSU) [3]. Čvrstoća pijeska se ispituje pri rasponu efektivnih normalnih naprezanja od nekoliko kPa do nekoliko stotina kPa, odnosno pri malim naprezanjima kakva se pojavljuju kod umanjениh fizičkih modela u 1g uvjetima, i većim naprezanjima pri svakodnevnim geotehničkim problemima.

2. Koncept i građa uređaja za prstenasto smicanje ICL-1

2.1. Koncept uređaja

Uređaj za prstenasto smicanje simulira nastajanje i formiranje posmične površine klizišta i kretanje nakon sloma, tj. simulira klizište s fokusom na kliznu plohu s mogućnošću neograničenih posmičnih pomaka. Promatra posljedice koje se javljaju zbog mobiliziranog posmičnog otpora kao i posmični pomak nakon sloma te generirani porni pritisak vode. Uzorci koji se ugrađuju u uređaj uzimaju se iz slojeva u kojima je prethodno nastalo klizište ili iz slojeva tla u kojima bi se u budućnosti mogla formirati klizna ploha. Osim uzoraka s klizišta, u uređaj se mogu ugraditi i različiti uzorci tla koji ne moraju direktno potjecati sa klizišta. Uzorak se postavlja u posmičnu ćeliju koja je podijeljena na nepomični, gornji dio i rotirajući, donji dio [4]. Tijekom ispitivanja, uzorak se normalno opterećuje preko posmične ploče koja je spojena na uljni klip.

Donji dio jedinice uređaja se rotira, dok je gornji dio pridržan pomoću dvije ćelije koje ujedno i mjere posmični otpor [4,5]. Sva naprezanja koja se javljaju na potencijalnoj kliznoj plohi (normalno i posmično naprezanje uzrokovano gravitacijom, seizmičko naprezanje uslijed potresa te porni pritisak) mogu se mjeriti u jedinici uređaja. Kada su naprezanja dovoljno velika da izazovu slom uzorka, posmična ploha će se formirati unutar jedinice uređaja te će se rotirajući, donji dio početi okretati [6]. Nastanak navedenih naprezanja prikazan je Slikom 1, na kojoj je ujedno i objašnjen koncept uređaja. Tijekom procesa nastanka posmičnog sloma, kao i pomaka nakon sloma, javlja se povećanje pornog pritiska, mobiliziranog posmičnog otpora i posmičnog pomaka od seizmičkih ili cikličkih opterećenja koji se prate pomoću ćelija opterećenja i senzora pomaka [4].



Slika 1. Koncept uređaja za prstenasto smicanje [6]

2.2. Građa uređaja

Prijenosni uređaj za prstenasto smicanje ICL-1 (Slika 2) razvijen je 2010. godine i omogućuje ispitivanje uzoraka tla pri normalnim naprezanjima do 1 MPa i pornim pritiscima u nedreniranim uvjetima do 1MPa. Instrumentna jedinica prenosivog uređaja za prstenasto smicanje smještena je na ručnim kolicima, teži do 100 kilograma, tlocrtnih je dimenzija 50x50 cm i maksimalne visine 95 cm [7]. Dimenzije uređaja za prstenasto smicanje uvelike su reducirane u odnosu na prijašnje DPRI (Disaster Prevention Research Institute) modele [6]. Takva redukcija dimenzija bila je moguća zbog manje brzine smicanja i novog sustava opterećenja kod kojeg se normalno naprezanje nanosi povlačenjem središnje osi uređaja. Maksimalna brzina smicanja u uređaju iznosi 5,4 cm/s te se zbog manje brzine smicanja mogu koristiti manji servo-motori

koji koriste normalnu električnu energiju te time ujedno i omogućuju smanjenje dimenzija uređaja. Servo-motor od 200 W koristi se za opterećenje normalnim naprežanjem, a servo-motor od 400 W za opterećenje posmičnim naprežanjem.

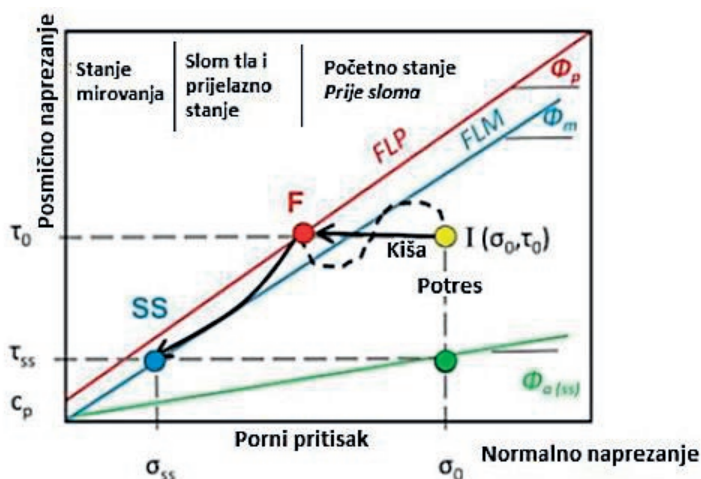
Prijenosni uređaj za prstenasto smicanje ICL-1 (Slika 2) sastoji se od nekoliko odvojenih, lako prenosivih dijelova [4]:

- Instrumentna jedinica (A) – sastoji se od posmične ćelije (najznačajnijeg dijela uređaja) koja sadrži tri servo-motora koji nanose normalno i posmično naprežanje te kontrolu razmaka, senzora za vertikalne pomake, posmične pomake i razmaka, mjerača pornih pritisaka, ćelije za mjerenje normalnog naprežanja te dvije ćelije za mjerenje posmičnog otpora
- Nadzorna jedinica (B)
- Kontrolna jedinica – za praćenje i prikupljanje podataka pomoću software aplikacije (C)
- Sustav za deaeriranje vode, saturaciju uzorka i kontrolu pornih pritisaka (D).



Slika 2. Uređaj za prstenasto smicanje, ICL-1 u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci: A – instrumentna jedinica, B – nadzorna jedinica, C – kontrolna jedinica, D – sustav za deaeriranje vode, saturaciju uzorka i kontrolu pornih pritisaka

ICL-1 uređajem za prstenasto smicanje moguće je provesti osnovna ispitivanja čvrstoće tla, ali i provoditi geotekničke simulacije cijelog procesa sloma uzorka tla: od početnog statičkog (kiša) ili dinamičkog (potres) opterećenja, kroz slom uzorka, sve do post-lomnog kretanja klizišta (Slika 3). Također je moguće mjeriti mobiliziranu posmičnu čvrstoću kao i post-lomnu posmičnu deformaciju i generirani porni pritisak [4,6].



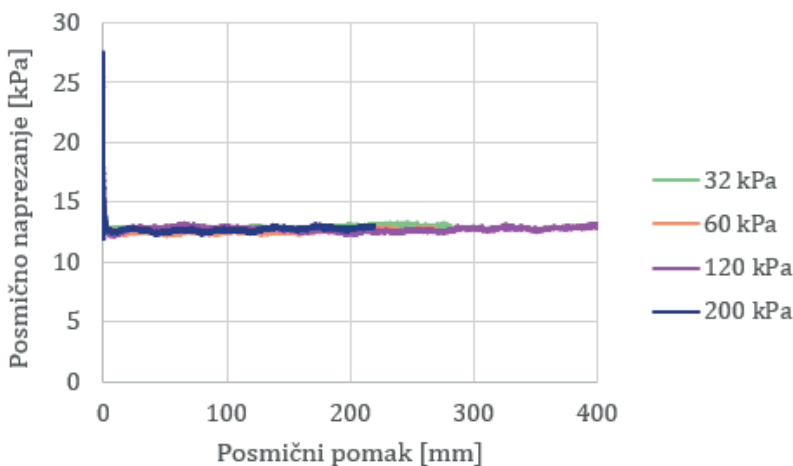
Slika 3. Grafički prikaz efektivnog traga naprezanja za nedrenirani postupak ispitivanja uređajem za prstenasto smicanje [4] (FLP=vršni pravac čvrstoće, FLM=mobilizirani pravac čvrstoće, F=slom, I=inicijacija, SS=stanje dinamičke ravnoteže, σ_0, τ_0 =inicijalni normalno i posmično naprezanje, σ_{ss}, τ_{ss} = normalno i posmično naprezanje pri stanju dinamičke ravnoteže, c_p =vršna kohezija, ϕ_p =vršni kut trenja, ϕ_m =mobilizirani kut trenja, $\phi_{a(ss)}$ =prividni kut trenja u stanju dinamičke ravnoteže)

3. Laboratorijsko ispitivanje i rezultati ispitivanja pijeska u uređaju za prstenasto smicanje

Uzorak koji se koristi za ispitivanje može biti suh ili potpuno saturiran te se stoga primjenjuju drugačije metode ovisno o saturaciji uzorka. Obje procedure opisane su u priručniku te su sažete u nekoliko glavnih koraka [7,8]. Potrebno je navesti kako je prilikom ispitivanja procedura bila modificirana te nisu slijedili koraci koji su navedeni u priručniku. Procedura ispitivanja sastoji se od koraka navedenih u narednim poglavljima: inicijalni korak je pripremanje uzorka, zatim slijedi ugradnja uzorka u posmičnu ćeliju, prilagođavanje razmaka, saturacija posmične ćelije/uzorka, konsolidacija uzorka i kao posljednji korak slijedi smicanje uzorka u dreniranim uvjetima s povratnim pritiskom s konstantnim prirastom brzine smicanja.

3.1. Rezultati inicijalnih ispitivanja

Najprije je potrebno provesti inicijalna ispitivanja samo s vodom kako bi se znale vrijednosti posmičnog otpora brtve. Stoga su provedena inicijalna ispitivanja na vodi za normalna naprezanja od 32 do 200 kPa pri konstantnoj brzini smicanja. Na Slici 4 prikazani su dijagrami posmično naprezanje – posmični pomak za različita normalna naprezanja, dok su rezultati rezidualne čvrstoće, odnosno otpora brtve, za različita normalna naprezanja dani u Tablici 1.



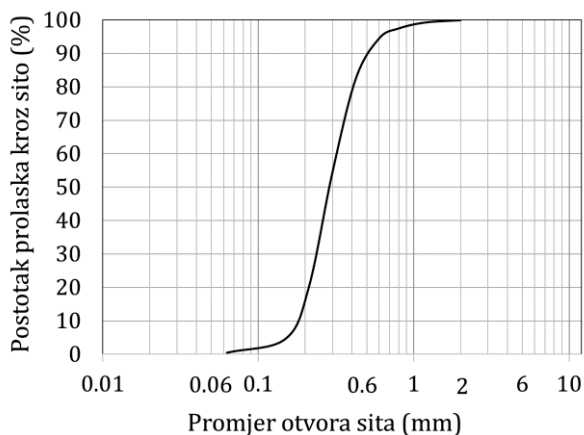
Slika 4. Posmično naprezanje – posmični pomak za različite vrijednosti normalnih naprezanja pri inicijalnom ispitivanju na vodi [9]

Tablica 1. Posmični otpor brtve pri inicijalnom ispitivanju na vodi [9]

Normalno naprezanje (σ) [kPa]	32	60	120	200
Otpor brtve ($\tau_{r,i}$) [kPa]	12,88	12,58	12,79	12,77

3.2. Značajke ispitivanog pijeska

Ispitivani uzorak tla je uzorak jednoliko graduiranog pijeska koji je korišten u sklopu znanstveno-istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost „Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja“ (ModLandRemSSU). Pijesak koji se koristio u svrhu ispitivanja uzet je iz rijeke Drave i veličine je zrna 0-1 mm. [3] Granulometrijska krivulja pijeska prikazana je na Slici 5, dok su njegove osnovne značajke dane u Tablici 2.



Slika 5. Granulometrijska krivulja ispitivanog pijeska [3]

Tablica 2. Osnovne značajke ispitivanog pijeska i inicijalni uvjeti na početku ispitivanja [3]

<i>Parametri</i>	<i>Vrijednosti</i>
Specifična težina, G_s	2,70
Efektivna veličina zrna	
D_{10} (mm)	0,19
D_{60} (mm)	0,37
Koeficijent uniformnosti, c_u	1,947
Minimalni koeficijent pora, e_{\min}	0,641
Maksimalni koeficijent pora e_{\max}	0,911
Hidraulička vodljivost κ_s (m/s)	1,00E-05
Kut trenja, φ (°)	33,5
Kohezija, c (kPa)	0
Inicijalni porozitet, n_i	0,437
Inicijalni koeficijent pora, e_i	0,78
Inicijalni indeks gustoće, I_{Di}	0,5
Inicijalna vlažnost, w_i (%)	2

Uzorku kojeg se ugrađuje u posmičnu ćeliju najprije treba odrediti volumen koji stane u posmičnu ćeliju te odrediti masu čvrstih čestica i vode gdje su poznati inicijalni indeks gustoće, porozitet i vlažnost uzorka (Tablica 2). Izvagani uzorak se zatim postavlja u posudu te se dodavanjem određene mase vode dva materijala međusobno miješaju. Nakon njihovog dobrog povezivanja uzorak je spreman za ugradnju u posmičnu ćeliju uređaja. Volumen pijeska koji je ugrađen u posmičnu ćeliju iznosi 289,55 cm³ te služi za daljnje proračunavanje potrebne mase suhog uzorka (440,1 g) i mase vode (8,8 g). Proračun je prikazan jednadžbama (1) – (6) u nastavku:

Visina uzorka, h (1)

$$h = (80,4 - 42) = 38,4 \text{ mm} = 3,84 \text{ cm}$$

gdje je 80,4 mm visina ćelije od donjih poroznih metala do vrha posmične ćelije, a 42 mm je visina nožića za poravnavanje uzorka.

Ukupni volumen uzorka, V_{TOT}

$$V_{TOT} = (A_1 - A_2) * h = 289,54 \text{ cm}^3 \quad (2)$$

gdje je A_1 površina vanjskog promjera prstena i A_2 površina unutarnjeg promjera prstena posmične ćelije.

Volumen pora, V_V

$$V_V = n * V_{TOT} = 126,5 \text{ cm}^3 \quad (3)$$

Volumen čvrstih čestica, V_S

$$V_S = V_{TOT} - V_V = 163 \text{ cm}^3 \quad (4)$$

Masa čvrstih čestica, m_S

$$m_S = V_S * \rho_S = 440,1 \text{ g} \quad (5)$$

gdje je ρ_S gustoća čvrstih čestica.

Masa vode, m_w

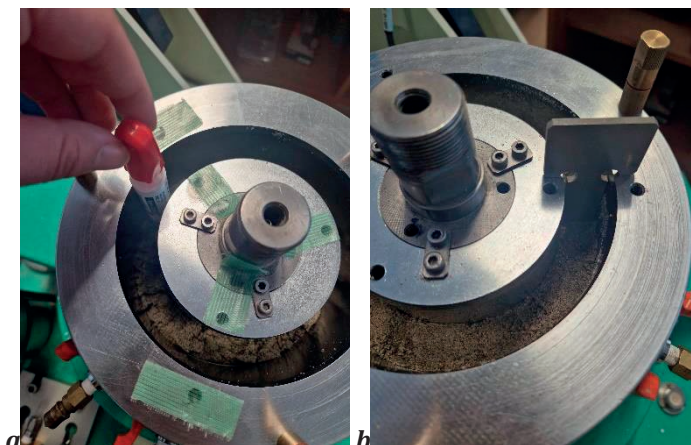
$$m_w = w * m_S = 8,8 \text{ g} \quad (6)$$

Kako je i u Tablici 2 navedeno, pjeskovita tla i šljunci nemaju koheziju, a raspon kuta trenja varira od 30 do 45° te se povećava s graduiranošću, gustoćom i uglatosti zrna [10]. Njihova čvrstoća, stabilnost kosina i kapacitet nosivosti ovise o kutu unutarnjeg trenja (φ) i prividnoj koheziji koja se javlja u vlažnim nesaturiranim pijescima uslijed negativnog pornog tlaka.

3.3. Ugradnja uzorka

Prilikom ispitivanja za potrebe ovog rada, saturacija ćelije provedena je drugačije nego kako je navedeno u priručniku. Najprije je uzorak ugrađen u posmičnu ćeliju vanjskog promjera 14 cm i unutarnjeg promjera 10 cm. Prilikom ugrađivanja, uzorak je bilo potrebno dobro zbiti kako bi se postigla izračunata visina uzorka (3,84 cm) koja stane u posmičnu ćeliju (Slika 6a) te je uzorak nakon toga izravnat nožićem određene visine (4,2

cm) (Slika 6b). Nakon ugradnje uzorka uslijedila je cirkulacija CO₂ i deaerirane vode kroz uzorak te provjera stupnja saturacije ćelije.



Slika 6. Postupak ugradnje uzorka pijeska: **a** zbijanje uzorka u slojevima, **b** izravnavanje uzorka nožićem

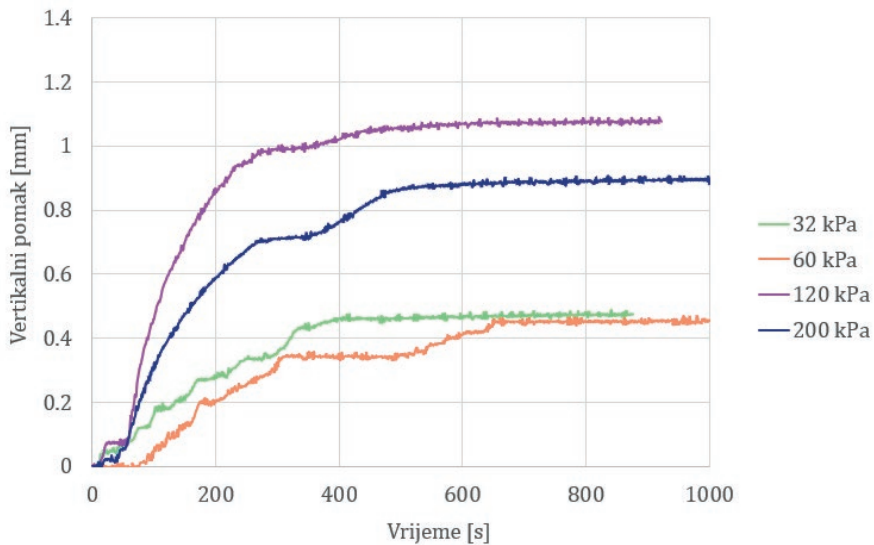
3.4. Rezultati konsolidacije uzoraka pijeska

U ovom poglavlju prikazani su rezultati konsolidacije za različita normalna efektivna naprezanja. Uz dijagram priložena je i tablica gdje su dane vrijednosti ukupnog normalnog naprezanja, efektivnog normalnog naprezanja, vertikalnog otpora brtve i povratnog pritiska. Proračunom je određeno normalno naprezanje kojim je konsolidiran uzorak, a podaci su iščitani iz nadzorne jedinice prstenastog uređaja (Tablica 3). Potrebno je napomenuti kako kod spuštanja opteretne ploče pri efektivnom normalnom naprezanju od 200 kPa nije bilo vertikalnog otpora brtve te otpor nije uzet u obzir. Efektivno normalno naprezanje izračunato je prema izrazu (7):

$$\sigma' = \sigma - (\text{vertikalni otpor brtve} + \text{pwp}) \quad (7)$$

Tablica 3. Vrijednosti ukupnog normalnog naprezanja, efektivnog normalnog naprezanja, vertikalnog otpora brtve i povratnog pritiska [9]

<i>Ukupno normalno naprezanje, σ [kPa]</i>	55,5	90,0	147,5	250,0
<i>Vertikalni otpor brtve [kPa]</i>	8,5	10,0	7,5	bez otpora brtve
<i>Povratni pritisak, pwp [kPa]</i>	15,0	20,0	20,0	50,0
<i>Efektivno normalno naprezanje, σ' [kPa]</i>	32,0	60,0	120,0	200,0



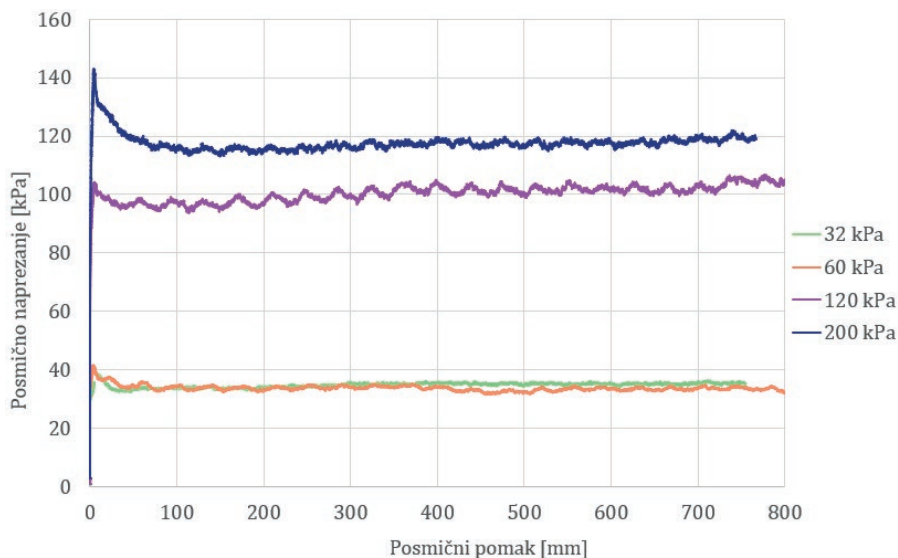
Slika 7. Dijagram vertikalnog pomaka u vremenu tijekom konsolidacije [9]

Dijagram na Slici 7 prikazuje početnu fazu pokusa, gdje je nanošenjem normalnog opterećenja konsolidiran uzorak tla. Prilikom početka nanošenja normalnog naprezanja, svaki ispitni uzorak ima svoju početnu visinu koja se postepenim nanošenjem opterećenja smanjivala te je potpuna konsolidacija postignuta kada nije bilo prirasta vertikalnog pomaka. Slikom 7 prikazan je vertikalni pomak uzorka u vremenu, odnosno konsolidacija. Iako je očekivano da će najveći vertikalni pomak biti postignut za uzorak pri efektivnom normalnom naprezanju od 200 kPa, to se ipak dogodilo kod uzorka pri efektivnom normalnom naprezanju od 120 kPa gdje je pomak iznosio 1,09 mm, dok je najmanji vertikalni pomak iznosio 0,461 mm kod uzorka pri efektivnom normalnom naprezanju od 60 kPa. Posljedica je to različitih uvjeta ugradnje ispitnih uzoraka, gdje je posve iste inicijalne uvjete iz Tablice 2 (porozitet, indeks gustoće) relativno teško postići.

3.5. Rezultati prstenastog smicanja uzorka pijeska

U ovom poglavlju prikazani su rezultati smicanja uz povratni pritisak i konstantan prirast brzine smicanja uzorka pijeska pri različitim efektivnim normalnim naprezanjima u uređaju za prstenasto smicanje. Početne visine uzorka poprimaju vrijednosti koje su postignute završetkom procesa konsolidacije, nakon čega slijedi smicanje uzorka brzinom 0,1 mm/s sve do postizanja stanja dinamičke ravnoteže.

Slika 8 prikazuje dijagram odnosa posmičnog naprezanja obzirom na posmični pomak. Iz dijagrama je vidljiva maksimalna, vršna vrijednost posmičnog naprezanja, kao i rezidualna vrijednost.



Slika 8. Posmično naprezanje – posmični pomak za različite vrijednosti efektivnog normalnog naprezanja [9]

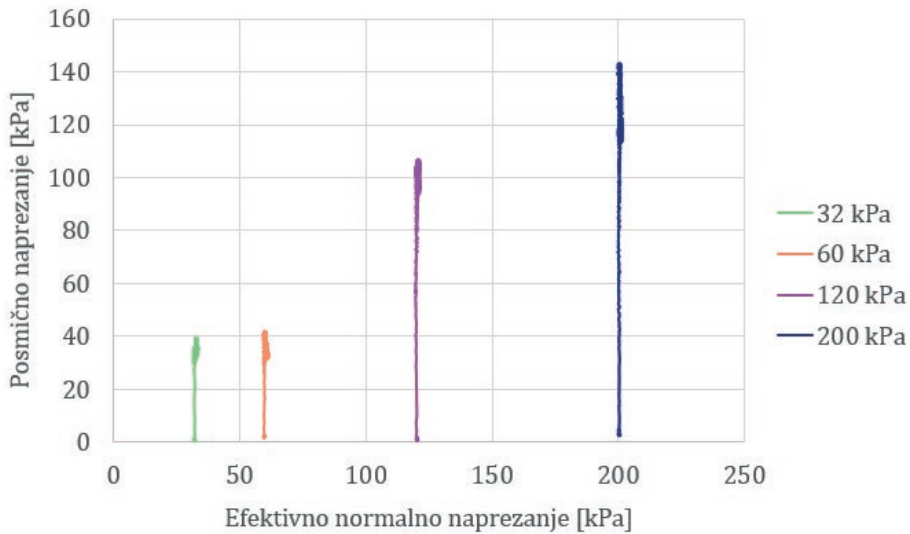
Sa Slike 8 mogu se iščitati vršne i rezidualne vrijednosti posmične čvrstoće pijeska za različita efektivna normalna naprezanja te su one dane u Tablici 4. Jednadžbama (8) i (9) određene su vršna i rezidualna čvrstoća pijeska, a pritom su vrijednosti otpora brtve $\tau_{r,i}$ preuzete iz Tablice 1:

$$\tau_p = \tau_{p,u} - \tau_{r,i} \quad (8)$$

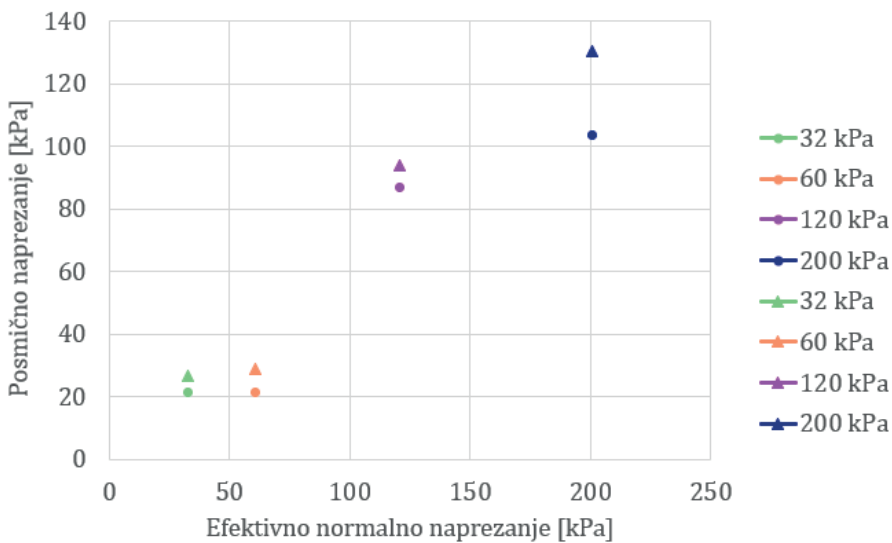
$$\tau_r = \tau_{r,u} - \tau_{r,i} \quad (9)$$

Tablica 4. Vrijednosti vršne i rezidualne posmične čvrstoće pijeska [9]

Normalno naprezanje, σ [kPa]	32,00	60,00	120,00	200,00
Ukupna vršna posmična čvrstoća pijeska, $\tau_{p,u}$ [kPa]	39,33	41,58	106,73	143,01
Ukupna rezidualna posmična čvrstoća pijeska, $\tau_{r,u}$ [kPa]	34,34	33,75	99,58	116,53
Vršna čvrstoća pijeska, τ_p [kPa]	26,45	29,00	93,94	130,24
Rezidualna čvrstoća pijeska, τ_r [kPa]	21,46	21,17	86,79	103,76



Slika 9. Trag efektivnih naprezanja pri smicanju pijeska [9]



Slika 10. Vršna (trokut) i rezidualna (krug) čvrstoća pijeska pri efektivnim normalnim naprezanjima od 32, 60, 120 i 200 kPa [9]

Efektivni tragovi naprezanja pri ispitivanju uz povratni pritisak i konstantan prirast brzine smicanja na uzorcima pijeska prikazani su na Slici 9. Slika 10 prikazuje vršne (trokut) i rezidualne (krug) vrijednosti čvrstoće pijeska. Najveća vršna čvrstoća, kako je i pretpostavljeno, javlja se pri efektivnom normalnom naprezanju od 200 kPa. Ta vrijednost iznosi 143,01 kPa, dok najmanja vrijednost, pri efektivnom normalnom

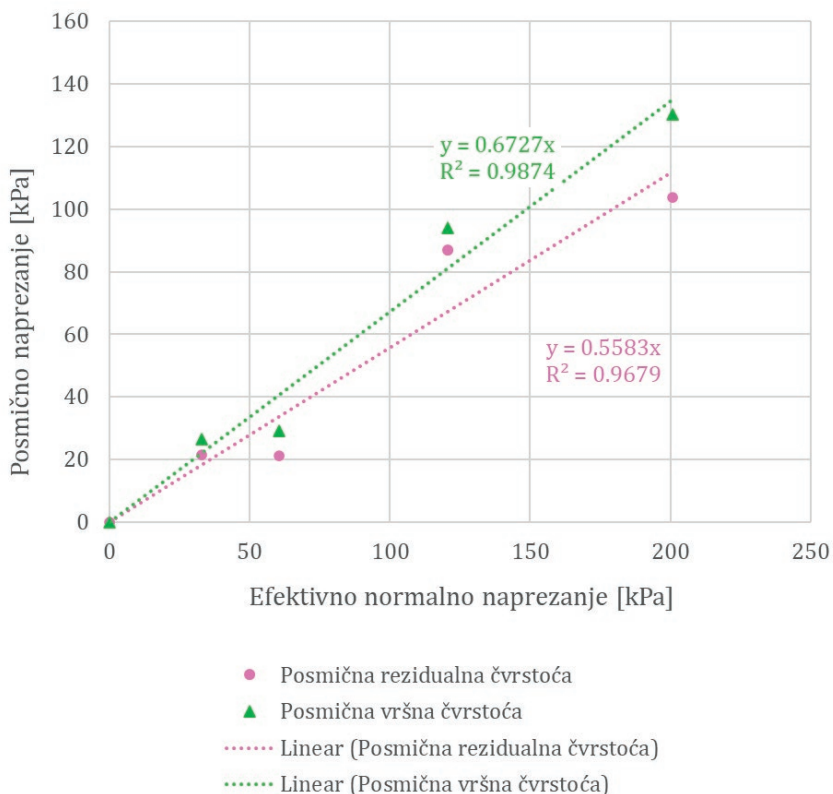
naprezanju od 32 kPa, iznosi 39,33 kPa. Također, Slikom 10 prikazana je i rezidualna čvrstoća. Kod rezidualne čvrstoće također je najveća vrijednost pri 200 kPa i iznosi 116,53 kPa. Međutim, najmanju rezidualnu vrijednost ima uzorak pri naprezanju od 60 kPa te iznosi 33,75 kPa.

Povlačenjem linije linearne aproksimacije kroz točke vršne i rezidualne čvrstoće dobiven je Mohr-Coulombov pravac čvrstoće. Rezultati su prikazani dijagramom na Slici 11, na kojoj linija označena zelenom bojom predstavlja vršni pravac čvrstoće, a linija označena ružičastom bojom rezidualni pravac čvrstoće. Vršna i rezidualna čvrstoća prikazane su sljedećim jednadžbama:

$$\text{Vršna čvrstoća:} \quad \tau_p = \sigma' \cdot 0,6727 \quad (10)$$

$$\text{Rezidualna čvrstoća:} \quad \tau_r = \sigma' \cdot 0,5583 \quad (11)$$

Dobivene jednadžbe daju kut unutarnjeg trenja (φ): vršni kut unutarnjeg trenja iznosi $33,93^\circ$, dok je rezidualni $29,17^\circ$.



Slika 11. Mohr-Coulombov pravac vršne i rezidualne čvrstoće pijeska

4. Zaključak

Uređaj za prstenasto smicanje ICL-1 pokazao se vrlo efikasnim prilikom određivanja čvrstoće uzoraka pijeska. Osim određivanja čvrstoće, uređajem se mogu odrediti brojni parametri koji pomažu prilikom projektiranja i građenja u tlu na kojem može doći do pojave klizišta ili sloma tla. Njegov način rada, gdje uređaj može simulirati dinamičko, cikličko opterećenje ili pak seizmičko opterećenje, čini ga pogodnim za provedbu različitih ispitivanja na različitim uzorcima tla.

Iako efikasan, uređaj ima nedostatak. U njega nije moguće ugraditi neporemećeni uzorak te se stoga koristi za ispitivanje parametara čvrstoće poremećenih materijala. Međutim, kao što je i prije navedeno, prednost uređaja je da se pomoću njega može odrediti vršna i rezidualna čvrstoća ispitivanog uzorka tla, odnosno vršni i rezidualni kut unutarnjeg trenja i kohezija.

Provedena su četiri ispitivanja uzoraka jednoliko građiranog pijeska i četiri inicijalna ispitivanja na vodi za istu veličinu efektivnih normalnih naprezanja. Smicanja uzoraka su provedena u dreniranim uvjetima uz povratne pritiske za efektivna normalna naprezanja od 32, 60, 120 i 200 kPa. Kod inicijalnih ispitivanja s vodom utvrdio se posmični otpor brtve koji je bio ključan za daljnju obradu rezultata.

Nakon provedenih ispitivanja, rezultati su obrađeni te su prikazani kao grafovi vertikalni pomak u vremenu tijekom konsolidacije, posmično naprezanje – posmični pomak i efektivni tragovi naprezanja tijekom smicanja. Nadalje, određeni su vršni i rezidualni parametri čvrstoća uzorka pijeska.

Ovim radom prikazano je koliko je uređaj za prstenasto smicanje ključan dio geotehničkog inženjerstva te kako njegove karakteristike, rezultati i njihova obrada mogu predvidjeti nepovoljne značajke tla i njegov slom, a uz to potaknuti provođenje sanacije klizišta i sprječavanje ponovnog ili budućeg klizanja tla.

Zahvala. *Rad je proizašao iz završnog rada studentice Nike Kamenar pod naslovom „Određivanje čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje“. Ovaj rad je financiran u okviru projektne linije ZIP UNIRI Sveučilišta u Rijeci, za projekt ZIP-UNIRI-1500-1-22 „Investigating landslides using ring shear apparatus“.*

Literatura

- [1] Peranić, J. (2022) *Mehanika tla i stijena*. Predavanja, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.
- [2] Arbanas, Ž. (2006) *Mehanika tla*. Predavanja, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka.
- [3] Vivoda Prodan, M., Peranić, J., Pajalić, S., Arbanas, Ž. (2023) *Physical Modelling of Rainfall-Induced Sandy and Clay-Like Slope Failures.*, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2023, Article ID 3234542. <https://doi.org/10.1155/2023/3234542>
- [4] Oštrić, M., Vivoda, M., Ljutić, K., (2012) *Portable Ring Shear Apparatus – ICL 1*. Priručnik. Kyoto, Japan.
- [5] Oštrić, M., Ljutić, K., Krkač, M., Sassa, K., Bin, H., Takara, K., Yamashiki, Y. (2012) *Portable Ring Shear Apparatus and Its Application on Croatian Landslides*. *Annuals of Diss.Prev.Res.Inst., Kyoto University*, str. 57-65.
- [6] Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Ishikawa, N. (2004) *Undrained Dynamic-Loading Ring Shear Apparatus and Its Application to Landslide Dynamics*. *Landslides 1*, str. 7–19. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0004-y>
- [7] Oštrić, M., Sassa, K., Ljutić, K., Vivoda, M., He, B., Takara, K.. (2013) *Manual of Transportable Ring Shear Apparatus ICL-1*. *Proc of the 1st Reg Symp on Landslides in the Adriatic-Balkan Region*, str. 1 – 5.
- [8] Oštrić, M. (2013) *Development of Portable Undrained Ring Shear Apparatus and Its Application*. Doktorski rad. Sveučilište u Kyotu, Kyoto, Japan.
- [9] Kamenar, N. (2023) *Određivanje čvrstoće pijeska uređajem za prstenasto smicanje*. Završni rad. Građevinski fakulteta u Rijeci.
- [10] Sokolić, I. (2012) *Primijenjena mehanika tla*. Interna skripta, Zagreb.