

ODREĐIVANJE PARAMETARA ČVRSTOĆE PIJESKA U PRIJENOSNOM UREĐAJU ZA IZRAVNI POSMIK

DETERMINATION OF SAND STRENGTH PARAMETER IN PORTABLE DIRECT SHEAR APPARATUS

Vedran Jagodnik, Kristijan Ljutić

Sažetak. U geotehničkom inženjerstvu parametri čvrstoće tla definirani su preko kohezije i kuta unutrašnjeg trenja. Poznavajući parametre čvrstoće moguće je odrediti ponašanje tla primjenom Mohr – Coulombovog kriterija čvrstoće, koji, iako idealiziran, ima veliku uporabu u praksi zbog svoje jednostavnosti.

U sklopu članka prikazat će se određivanje parametara čvrstoće primjenom prijenosnog uređaja za izravni posmik na pijescima nastalim riječnim depozitom. Uz prethodno definirani geološki postanak materijala, prikazat će se dvije vrste pokusa: pokus s konstantnim vertikalnim naprežanjem i pokus uz konstantnu visinu uzorka. Za svaki od navedena dva pokusa provest će se tri serije ispitivanja uzorka za različite vrijednosti početnog vertikalnog naprežanja. Kao rezultat prikazat će se Mohr – Coulombov kriterij čvrstoće ispitanog materijala.

Ključne riječi: parametri čvrstoće, Mohr – Coulombov kriterij, prijenosni uređaj za izravni posmik, konstantno vertikalno naprežanje, konstantna visina uzorka

Abstract. In geotechnical engineering, soil strength parameters are defined by cohesion and friction angle. Knowing soil strength parameters, soil behaviour can be defined by the Mohr - Coulomb strength criterion which, although idealized, has great practical application due to its simplicity.

This paper presents soil strength parameter determination by using portable direct shear apparatus on sands made by river deposits. Two types of tests with previously defined geological genesis will be presented: the test with the

constant vertical stress and the test with the constant height. For each of the two mentioned types of test, three series of tests will be performed for different initial vertical stress. As a result Mohr - Coulomb strength criterion will be presented for the tested material.

Key words: *soil strength parameters, Mohr – Coulomb criterion, portable direct shear apparatus, constant vertical stress, constant height*

1. Uvod

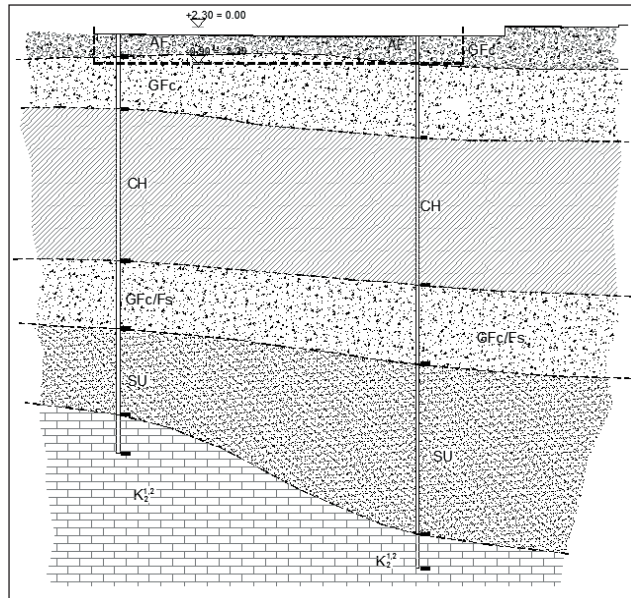
U geotehničkom inženjerstvu prilikom proračunavanja nosivosti temelja, pilota, stabilnost potpornih zidova i zagatnih stijena te stabilnosti kosina značajnu ulogu imaju parametri čvrstoće tla. Dva najosnovnija parametra čvrstoće tla su kohezija i unutarnji kut trenja. Poznavanjem ta dva parametra moguće je definirati Mohr – Coulombov kriterij čvrstoće koji, iako idealiziran, ima široku primjenu u praksi zbog jednostavnosti primjene.

Parametri čvrstoće određuju se laboratorijskim ispitivanjem, i to korištenjem triaksijalnog uređaja ili uređaja za izravan posmik. U ovom radu prikazat će se određivanje parametara čvrstoće sa prijenosnim uređajem za izravni posmik. Prijenosni uređaj za izravni posmik proizvela je tvrtka Marui & Co., a doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu Hrvatsko – Japanskog projekta za identifikaciju rizika i korištenje zemljišta i monitoringa klizišta (Croatia – Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia). Uređaj je slabo poznat u Europi te postoji vrlo malo radova u kojima se spominje. Razvijen je za ispitivanje parametara čvrstoće plitkih klizišta [1, 2, 3].

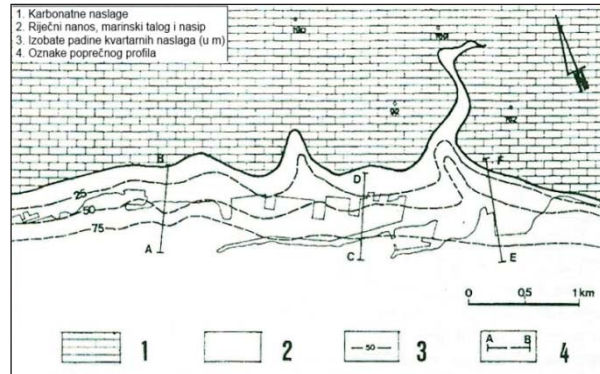
Unutar rada prikazat će se rezultati dobiveni ispitivanjem pijesaka u uređaju za izravni posmik, i to u dvije serije ispitivanja za tri različita početna vertikalna naprezanja. Prva serija rezultata ispitivanja provedena je s konstantnim vertikalnim naprezanjem, a druga serija rezultata s konstantnom visinom uzorka. Na kraju su dani zaključci doneseni na temelju rezultata i prijedlozi za poboljšanje uređaja.

2. Lokacija materijala ispitivanja

Lokacija na kojoj su izvedeni istražni radovi i izvađen uzorak tla nalazi se na estuariju ušća Rječine nastalom nasipavanjem materijala nakon 1550. god. [4]. Razina tla nalazi se na 2,3 m iznad razine vode. Na tom području provedena su geotehnička istraživanja kako bi se formirao geotehnički profil lokacije. Geotehnički profil sastoji se od pokrivača i vapnenačke podloge. Debljina stijenske podloge varira od 35 do 50 m. Pokrivač se sastoji od nasipa te sedimenata praha, gline i pijeska, što se može vidjeti na Slici 1.



Slika 1. Inženjersko geološki profil lokacije [5]



Slika 2. Geološka građa priobalnog područja grada Rijeke [6]

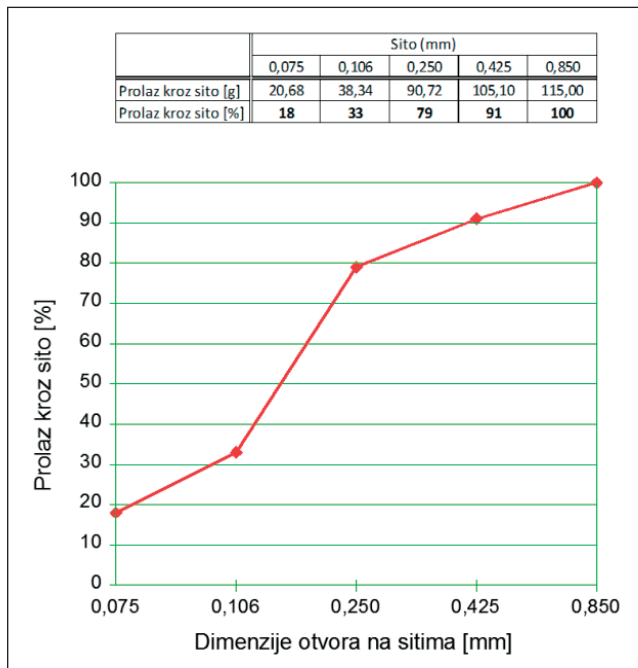
Glinoviti slojevi imaju visoku plastičnost, dok su slojevi pijeska jednolično graduirani [6]. Shematski prikaz geološke građe ušća Rječine može se vidjeti na Slici 2 koja jasno prikazuje riječne nanose, marinski talog i nasip. Prema tome, može se zaključiti da lokacija uz ušće Rječine nije nimalo „bezazlena“ i da je potrebno dobro poznavanje ponašanja tla. Prema inženjersko – geološkom profilu, sloj pijeska se nalazi na dubini od oko 25 – 27 m. Debljina sloja pijeska koji će unutar ovog rada biti ispitan kreće se od 8 – 15 m s pravcem pružanja jug - sjever [4].

3. Granulometrijski sastav uzorka

Uzorak za ispitivanje bio je u vezanom, ali u potpuno suhom stanju te ga je bilo potrebno razmrviti i usitniti prije prosijavanja. Usitnjavanje je obavljeno ručno sa mužarom u posudi. Za ispitivanje predviđeni dio uzorka ukupne mase 2014,80 g prosijan je kroz sito dimenzije otvora 0,850 mm, čime se dobiva uzorak srednjih (sa malim udjelom krupnih) i sitnih pijesaka mase 1682,28 g, gustoće 1519,05 kg/m³.

Granulometrijski sastav uzorka određen je na osnovu prosijavanja kroz seriju sita dimenzija otvora 0,850 mm, 0,425 mm, 0,250 mm, 0,106 mm i 0,075 mm. Prosijavanje se vršilo na reprezentativnom uzorku mase 115 grama dobivenom četvrtanjem [7].

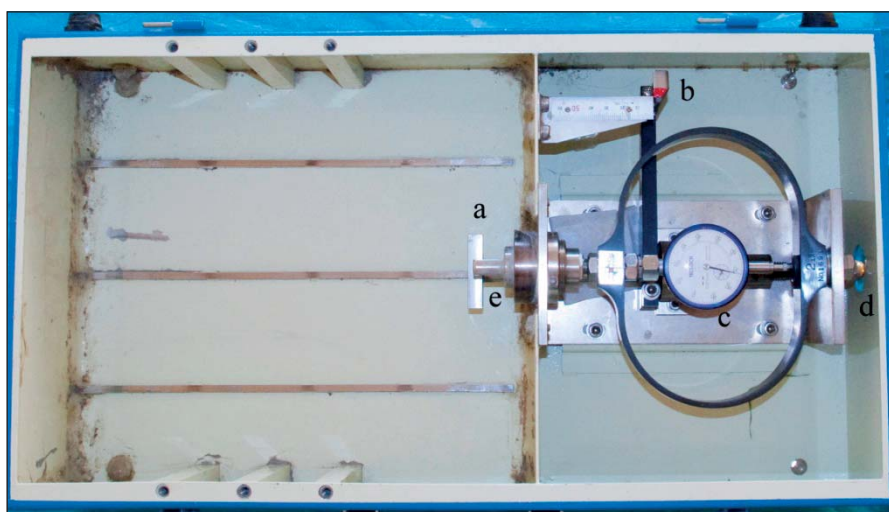
Ovako dobivena granulometrijska krivulja nije potpuna. Zbog nemogućnosti laboratorijskih ispitivanja provedena su samo ispitivanja prosijavanjem. Za potpunu granulometrijsku krivulju potrebno je provesti areometriranje.



Slika 3. Granulometrijska krivulja uzorka [8]

4. Prijenosni uređaj za izravni posmik

Prijenosni uređaj za izravni posmik doniran je Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu Hrvatsko – Japanskog projekta za identifikaciju rizika i korištenje zemljišta i monitoringa klizišta (Croatia – Japan Project on Risk Identification and Land-use Planning for Disaster Mitigation of Landslides and Floods in Croatia). Uređaj se sastoji od dva osnovna dijela: prijenosni dio za opterećenje uzorka na posmično naprezanje (u daljnjem tekstu t) (Slika 4) i prijenosni dio za opterećenje uzorka na vertikalno naprezanje (u daljnjem tekstu s_v) (Slika 5). Donji dio uređaja prikazan Slikom 4 sastoji se od: a) dijela uređaja za guranje donjeg dijela okvira uzorka, b) mjerka za očitavanje inkrementa pomaka, c) mjerne urice za očitavanje posmične sile, d) vijka za dodavanje posmične sile i e) otvora za osiguranje gornjeg dijela okvira uzorka. Gornji dio uređaja (Slika 5) sastoji se od: a) ručice za dodavanje vertikalne sile, b) mjerne urice za očitavanje vertikalnog naprezanja, c) mjerne urice za očitavanje vertikalnog pomaka i d) ploče za prenošenje opterećenja na uzorak.



Slika 4. Donji dio prijenosnog uređaja za izravni posmik

Uređaj je razvijen za ispitivanje parametara čvrstoće na terenu, i to kod plitkih klizišta kakva se događaju u Japanu [1, 2, 3]. Uređaj je lagan i ne iziskuje puno napora za transport [2]. Okvir uređaja za izravni posmik omogućuje uzimanje neporemećenih uzoraka s terena. Uzorci se mogu uzeti s malih dubina, čime je ujedno i definiran bitni nedostatak ovog uređaja. Zbog dimenzija okvira (20 x 20 x 10 cm) i graničnog opterećenja za posmičnu i normalnu silu od 2 kN, maksimalna naprezanja koja se mogu dobiti uređajem

su oko 50 kPa što omogućuje ispitivanje uzoraka za male dubine [3]. Kao jedna od mogućnosti povećanja vertikalnih, a i posmičnih naprezanja, predlaže se primjena manjeg okvira, dimenzija 10 x 10 x 10 cm, čime bi se moglo doseći naprezanja do 200 kPa.



Slika 5. Gornji dio prijenosnog uređaja za izravni posmik

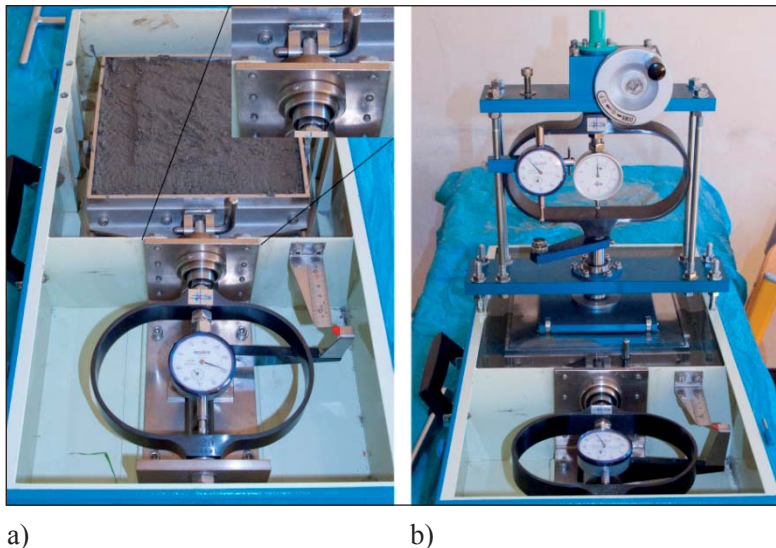
Iako je namjenjen za male dubine, uređaj se može koristiti za definiranje početnih vrijednosti parametara čvrstoće s kojima se ulazi u numeričke analize radi uvida u ponašanje materijala. Na Slici 6 prikazani su dijelovi uređaja za izravni posmik: okvir uređaja načinjen od visokovrijednog nehrđajućeg čelika koji se bez većih problema može pobijati u raspadnute meke stijene (kao što je raspadnuti fliš), a) nosači, b) vijci za pričvršćivanje gornjeg dijela uređaja za donji dio, c) “kopča” za fiksiranje gornjeg dijela okvira za uređaj za izravni posmik, d) okvir za smicanje, e) donja, podložna ploča, f) gornja ploča za opterećivanje i g) ručica za dodavanje posmičnog pomaka. Ukoliko se ispituje materijal kao što je pijesak, tada se u laboratoriju vrši izravno ugrađivanje u okvir. Pijesak, čiji su rezultati ispitivanja prikazani ovim radom, ugrađen je u okvir uređaja prethodnim mrvljenjem i usitnjavanjem kako bi se poništila cementacija nastala isušivanjem materijala tijekom njegovog skladištenja. Slikom 7 prikazan je ugrađeni uzorak u okvir uređaja za izravni posmik smješten u dio za dodavanje posmičnog pomaka. Gornji dio okvira učvršćen je “kopčom” prikazanom na Slici 6e) za pregradu segmenta za dodavanje

pomaka, što je vidljivo na detalju Slike 7a). Vijci prikazani Slikom 6 učvrste se na rupe u dijelu uređaja za posmičnu silu te se na njih postavlja drugi, gornji dio uređaja kojim se dodaje vertikalna sila koja uzrokuje vertikalna naprezanja (s_v) u uzorku. Izgled uređaja pripremljenog za ispitivanje prikazan je na Slici 7b).

Nakon ugradnje uzorka i njegovog potapanja u vodi, uzorci se konsolidiraju te se pristupa ispitivanjima koja će biti pojašnjena u sljedećem poglavlju.



Slika 6. Djelovi okvira uređaja za izravni posmik



Slika 7. a) Uzorak pijeska ugrađen u donji okvir uređaja, b) Pripremljeni uzorak za ispitivanje u uređaju za izravni posmik

5. Ispitivanje pijesaka

Provedene su dvije vrste ispitivanja: ispitivanje uz konstantno vertikalno naprezanje i ispitivanje uz konstantnu visinu uzorka. Unutar ovog poglavlja opisan je način ispitivanja. Pijesci su ispitivani za tri različita vertikalna naprezanja, 5, 10 i 20 kPa.

Svaki uzorak prije ispitivanja konsolidiran je na vrijednost normalnog naprezanja (5, 10 ili 20 kPa) za koje se provodilo ispitivanje. Vertikalno naprezanje se dodavalo postepeno, u intervalima od 0.5 kPa. Na sljedeći interval opterećenja krenulo se tek kada se mjerna urica za očitavanje vertikalnog naprezanja (Slika 5b) umirila na trenutnom intervalu naprezanja. Vrijeme konsolidacije nije bilježeno, kao ni vrijeme između intervala. Način konsolidiranja bio je isti za sve vrste pokusa.

Pokus uz konstantno vertikalno naprezanje jedan je od karakterističnih pokusa kod uređaja za izravni posmik. Prilikom ispitivanja mjeri se vertikalni pomak i posmično naprezanje. Prije početka ispitivanja potrebno je definirati pomak za koji će se pomicati donji dio okvira za izravni posmik. Za pomak je odabrano 0,5 mm bez obzira o kojim se vertikalnim naprezanjima radilo. Kod vertikalnog naprezanja od 5 kPa bilježile su se promjene vertikalnog pomaka i posmičnog naprezanja za svakih 0,5 mm, dok su se kod naprezanja od 10 kPa i 20 kPa bilježili pomaci i naprezanja pri pomaku od 1 mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 5.1.1.

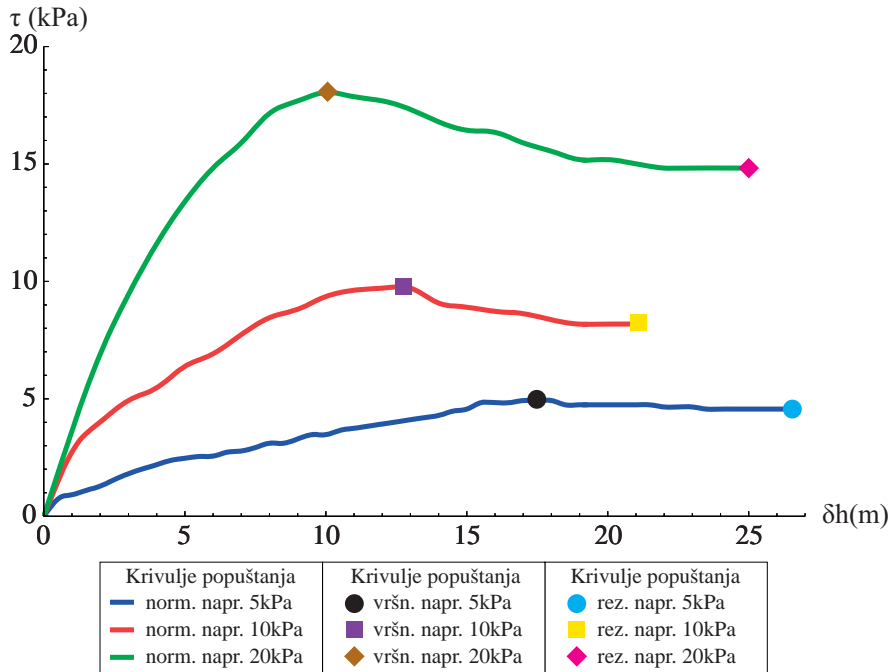
Pokus uz konstantnu visinu uzorka nije jedan od karakterističnih pokusa, no može dati uvid u ponašanje materijala kada mu je pomak iz nekih razloga spriječen. Prilikom ovog ispitivanja visina uzorka održavala se konstantnom dok su se bilježile promjene posmičnog i vertikalnog naprezanja za zadani pomak. Kao i kod prethodno spomenutog pokusa, zadani posmični pomak bio je 0,5 mm te se za početno vertikalno naprezanje od 5 kPa bilježilo vertikalno i posmično naprezanje za svakih 0,5 mm, dok se kod većih naprezanja bilježila promjena svakih 1 mm. Rezultati ispitivanja prikazani su u poglavlju 5.1.2.

5.1. Rezultati ispitivanja

U sklopu ovog poglavlja prikazat će se suodnosi naprezanja i deformacija, vršna i rezidualna naprezanja na temelju kojih su se odredili vršni rezidualni parametri čvrstoće.

5.1.1. Rezultati ispitivanja pijesaka pri konstantnom vertikalnom naprezanju

Na Slici 8 prikazan je dijagram posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za pokuse od 5, 10 i 20 kPa pri konstantnom vertikalnom naprezanju.



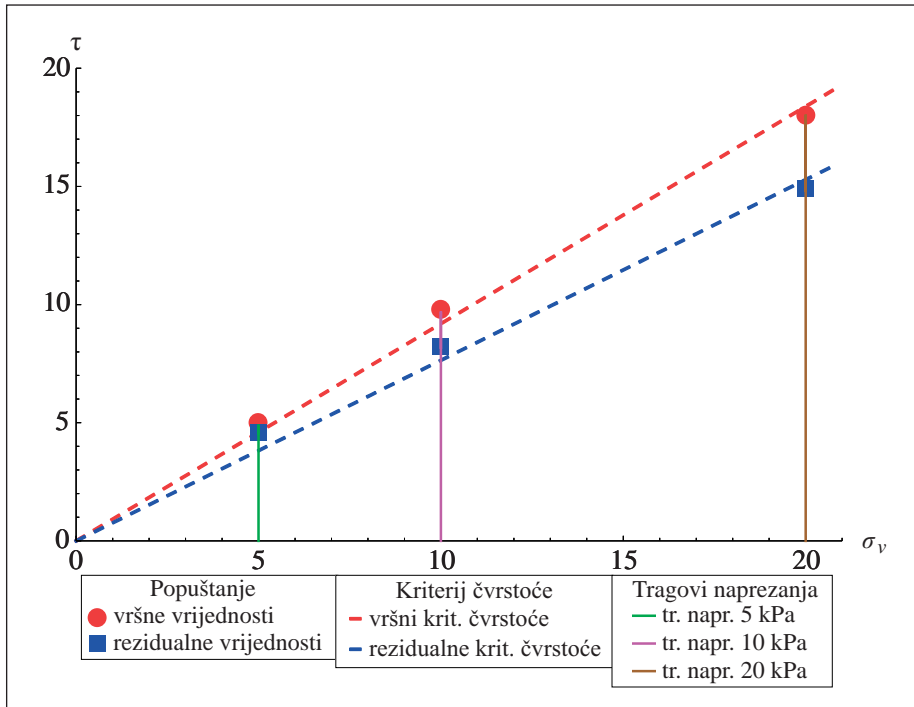
Slika 8. Krivulje posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka za pokuse pri konstantnom vertikalnom napreznju

Na Slici 9 vidi se da s povećanjem vertikalnog napreznja raste i posmično napreznje. Tablicom 1 prikazane su vrijednosti vršnih i rezidualnih napreznja dobivenih za ovaj tip pokusa.

Tablica 1. Vršna i rezidualna napreznja za pokus s konstantnim vertikalnim napreznjem

Vršna napreznja		Rezidualna napreznja	
σ_v [kPa]	τ [kPa]	σ_v [kPa]	τ [kPa]
5	● 4.92	5	● 4.56
10	■ 9.71	10	■ 8.18
20	◆ 18.04	20	◆ 14.82

Na Slici 9 prikazani su tragovi napreznja za navedene pokuse s naznačenim vršnim i rezidualnim napreznjima ($t - s_v$ ravnina). U poglavlju 5.2 prikazat će se proračun parametara čvrstoće na temelju linearne regresije. Na Slici 9 ujedno su prikazani i regresijski pravci. Navedeni regresijski pravci ujedno predstavljaju kriterij čvrstoće.



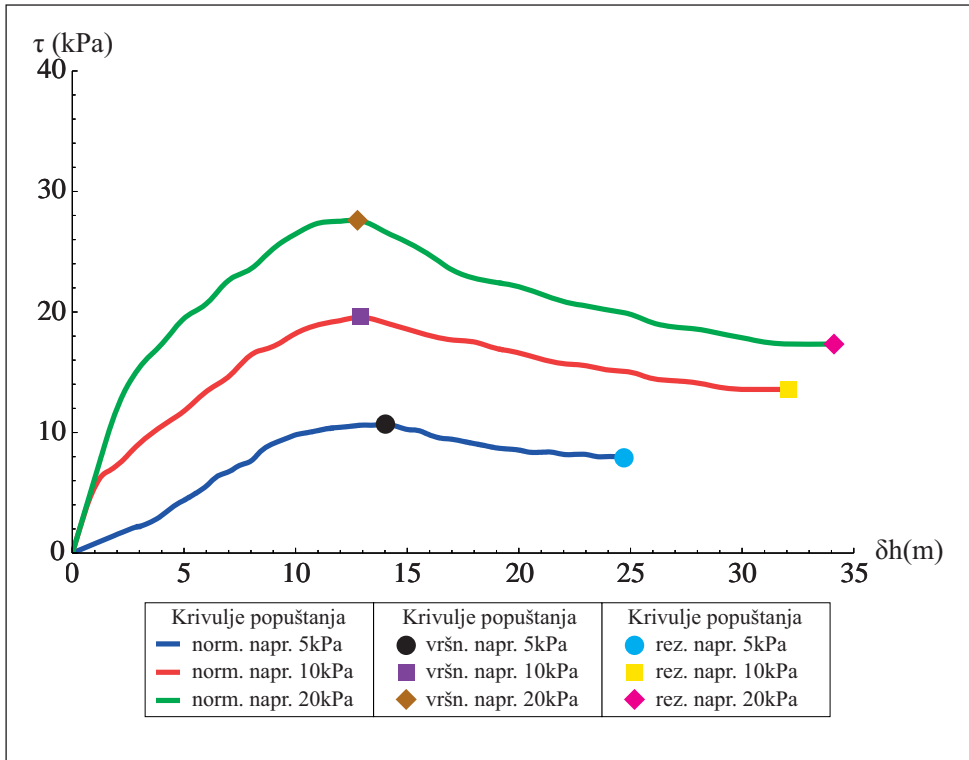
Slika 9. Tragovi naprezanja s vršnim i rezidualnim kriterijem čvrstoće te naznačenim vrijednostima vršnih i rezidualnih naprezanja za pokus s konstantnim vertikalnim naprezanjem

5.1.2. Rezultati ispitivanja pijesaka uz konstantnu visinu uzorka

Na Slici 10 prikazan je dijagram posmičnog naprezanja i posmičnog pomaka za pokuse od 5, 10 i 20 kPa pri konstantnoj visini uzorka.

Tablicom 2 dane su vrijednosti vršnih i rezidualnih naprezanja za ovaj tip pokusa.

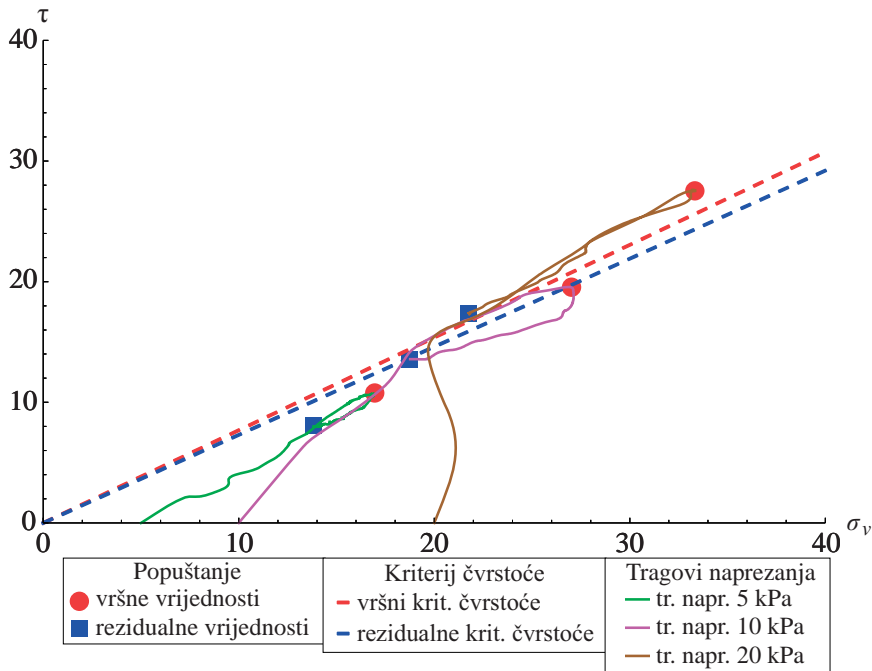
Na Slici 11 prikazani su tragovi naprezanja za navedene pokuse sa naznačenim vršnim i rezidualnim naprezanjima ($t - s_v$ ravnina). Na temelju tragova naprezanja prikazanih na Slici 11 može se uočiti da se oni približavaju liniji kriterija čvrstoće kako se uzorak približava vršnoj čvrstoći. Oblik tragova naprezanja karakterističan je za srednje-zbijene do zbijene zrnaste materijale [9].



Slika 10. Krivulje posmičnog napreženja i horizontalnog pomaka za pokuse pri konstantnoj visini uzorka

Tablica 2. Vršna i rezidualna napreženja za pokus s konstantnom visinom uzorka

Vršna napreženja		Rezidualna napreženja	
σ_v [kPa]	τ [kPa]	σ_v [kPa]	τ [kPa]
16,854	● 10,7013	13,8258	● 7,999753
26,918	■ 19,5531	18,7633	■ 13,57217
33,140	◆ 27,5274	21,7605	◆ 17,33005



Slika 11. Tragovi naprežanja s vršnim i rezidualnim kriterijem čvrstoće te naznačenim vrijednostima vršnih i rezidualnih naprežanja za pokus s konstantnom visinom uzorka

5.2. Proračun parametara čvrstoće

Kako bi se odredili parametri čvrstoće na temelju prikazanih rezultata, primjenit će se jednačba linearne regresije [10], (1):

$$y - \bar{y} = k \cdot (x - \bar{x}) \quad (1)$$

gdje je:

\bar{x} – aritmetička sredina varijabli na x osi

\bar{y} – aritmetička sredina varijabli na y osi

k – koeficijent smjera pravca (ujedno i koeficijent regresije).

Koeficijent smjera k , dobije se primjenom (2):

$$k = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot (n-1) \cdot s_x^2} \quad (2)$$

gdje je:

n – broj točaka regresije.

Varijabla s_x^2 u nazivniku (2) može se odrediti na temelju (3):

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_j \right)^2 \right] \quad (3)$$

Tablicom 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće, vršnih i rezidualnih, za obje vrste ispitivanja.

Tablica 3. Vrijednosti kriterija čvrstoće za pokus s konstantnim vertikalnim naprežanjem i konstantnom visinom uzorka

Oblik čvrstoće/ parametar čvrstoće	Konstantno vertikalno naprežanje		Konstantna visina uzorka	
	Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]	Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]
Vršna čvrstoća	0.	42.57	0.	37.54
Rezidualna čvrstoća	0.	37.38	0.	36.14

Rezultati i ponašanje uzorka u skladu su s rezultatima iz nekih prethodnih ispitivanja pijesaka [9]. Na Slici 9 tragovi naprežanja su vertikalni zbog vrste ispitivanja uzorka (ispitivanje sa konstantnim vertikalnim naprežanjem s_v). Pravci kriterija čvrstoće dovoljno dobro koreliraju s vršnim vrijednostima. Na Slici 11 jasno se može uočiti da se trag naprežanja za pokus uz konstantnu visinu postepeno približava kriteriju čvrstoće. U Tablici 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće.

6. Zaključak

Određivanje parametara čvrstoće tla bitna je stavka u određivanju ponašanja tla, proračunu nosivosti građevnih konstrukcija i modeliranja ponašanja tla. U sklopu ovog članka prikazane su dvije vrste ispitivanja na temelju kojih se mogu dobiti parametri čvrstoće, kut trenja i kohezija, ispitivanje s konstantnim vertikalnim naprežanjem i ispitivanje s konstantnom visinom uzorka. Poznavajući navedena dva parametra moguće je definirati kriterij čvrstoće po kojemu će se materijal ponašati. Također, uz prethodno poznavanje elastičnih konstanti poput modula elastičnosti i Poissonovog koeficijenta, moguće je u

sklopu numeričkih analiza pretpostaviti idealno plastično ponašanje materijala, koji, iako idealiziran, može dati uvid u ponašanje tla i konstrukcije te ga se može koristiti u početnim parametarskim analizama.

Unutar poglavlja 4 navedene su njegove prednosti i mane, no autori izdvajaju neke najbitnije. Osnovna prednost uređaja je što je prijenosan i lagan, ne iziskuje puno napora u transportu niti u uzimanju neporemećenog uzorka s lokacije ispitivanja. Nedostaci su uglavnom vezani za veličinu okvira. Obzirom da se radi o velikom okviru (20 x 20 x 10 cm), uz ograničenu vrijednost vertikalnog i posmičnog opterećenja od 2 kN, maksimalno naprezanje koje se može ostvariti je oko 50 kPa, što u grubo odgovara dubinama između 2 i 3 m. Prema tome, može se zaključiti da je navedeni uređaj namjenjen za ispitivanje stanja materijala relativno blizu površine (posmična čvrstoća materijala za određivanje stabilnosti plitkih klizišta). Predlaže se korištenje okvira dimenzija 10 x 10 x 10 cm čime bi se moglo postići vrijednosti naprezanja maksimalno 200 kPa, što bi odgovaralo dubinama od 9 do 11 m. Uz smanjenje okvira predlaže se zamjena analognih mjernih urica uređaja (Slika 4 c) i Slika 5 b)) s digitalnim LVDT uređajima koji omogućavaju automatsko bilježenje rezultata na računalo čime se umanjuje greška prilikom upisivanja očitanih vrijednosti.

Rezultati i ponašanje uzorka u skladu su s rezultatima iz nekih prethodnih ispitivanja pijesaka [9]. Vršne vrijednosti parametara čvrstoće karakteristične su za ispitani materijal. Na Slici 9 tragovi naprezanja su vertikalni zbog vrste ispitivanja uzorka (ispitivanje sa konstantnim vertikalnim naprežanjem s_v). Pravci kriterija čvrstoće dovoljno dobro koreliraju s vršnim vrijednostima. Na Slici 11 jasno se može uočiti da se trag naprezanja za pokus uz konstantnu visinu uzorka postepeno približava kriteriju čvrstoće, što je karakteristično za zrnate materijale. U Tablici 3 prikazane su vrijednosti parametara čvrstoće.

Zahvala. *Zahvaljujemo se Japanskoj međunarodnoj agenciji za suradnju, JICA, za donaciju prijenosnog uređaja za izravan posmik u sklopu Hrvatsko-Japanskog Projekta identifikacije rizika i planiranja korištenja zemljišta za ublažavanje nepogoda kod odrona zemlje i poplava u Hrvatskoj.*

7. Literatura

- [1] K. Sassa. The Mechanism to initiate debris flows as undrained shear of loose sediments. International Symposium, Interpraevent. Villach, Austrija, 73-87, 1984
- [2] M. Kaibori, K. Sassa. A portable Field Direct Shear Apparatus – Some test results and comparison with conventional shear tests. International Symposium. Villach, 263-274, 1984 (na njemačkom)

- [3] K. Sassa. *Osobna komunikacija*, 2011
- [4] Ž. Arbanas, V. Jagodnik, M. Grošić, D. Goršić. Foundation of new buildings in old urban areas. U: M.J. Brown, M.F. Bransby, A.J. Brennan, J.A. Knappett, *Proceedings of 2nd BGA International Foundation Conference (ICOF 2008)*,975-984, Balkema, Dundee, Scotland, 2008.
- [5] V. Jagodnik. Analiza naprezanja i deformacija stambeno – poslovnog objekta Stari Grad. *Diplomski rad*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2007
- [6] Ž. Arbanas, Č. Benac, B. Jardas. Geotničke značajke priobalnog područja grada Rijeke. *Pomorski zbornik*, 32: 467-480, 1984
- [7] ASTM D421 - 85. Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, 2007
- [8] V. Jagodnik, K. Ljutić. Ispitivanje pijesaka. *Seminarski rad*, Teorijska mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010.
- [9] D.M.Wood. *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Text, Cambridge, 1990.
- [10] E. Kreyszig. *Advanced Engineering Mathematics*. John Wiley & Sons, Inc., Singapore, 2006.