

Utjecaj sitnozrnastih čestica na posmičnu čvrstoću krupnozrnastog tla

Franjić, Vlatka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:084057>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Vlatka Franjić

**Utjecaj sitnozrnastih čestica na posmičnu čvrstoću krupnozrnastog
tla**

Završni rad

Rijeka, 6. srpnja 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Prijediplomski sveučilišni studij

Eksperimentalna mehanika tla

Vlatka Franjić

0114032619

**Utjecaj sitnozrnastih čestica na posmičnu čvrstoću krupnozrnastog
tla**

Završni rad

Rijeka, 7. srpnja 2023.

Zavod: **Zavod za hidrotehniku i geotehniku**
Predmet: **Eksperimentalna mehanika tla**
Grana: **2.05.01 geotehnika**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 23

Pristupnik: **Vlatka Franjić (0114032619)**
Studij: **Građevinarstvo**

Zadatak: **Utjecaj sitnozrnastih čestica na posmičnu čvrstoću krupnozrnastog tla**

Opis zadatka:

Istražiti utjecaj sitnozrnastih čestica (kaolina) na posmično ponašanje jednoliko graduiranog pijeska. Provesti ispitivanje za masene udjele kaolina od 10% i 15%. Parametre čvrstoće odrediti uređajem za izravno smicanje. Rezultate prikazati koristeći karakteristične dijagrame.

Zadatak uručen pristupniku: 1. veljače 2023.
Rok za predaju rada: 5. srpnja 2023.

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Vedran Jagodnik

IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

Vlatka Franjić

U Rijeci, 6. srpnja 2023.

IZJAVA

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**FIZIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJA ZA SANACIJU KLIZIŠTA U
UVJETIMA STATIČKIH I SEIZMIČKIH DJELOVANJA**

| | |
|---------------------|------------------------------------|
| Voditelj projekta | prof.dr.sc. Željko Arbanas |
| Šifra projekta | IP-2018-01-1503 |
| Financijer projekta | <u>Hrvatska zaklada za znanost</u> |
| Pravna nadležnost | <u>Republika Hrvatska</u> |

U Rijeci, 06. srpnja 2023.

Mentor:



izv.prof.dr.sc. Vedran Jagodnik

IZJAVA

Završni rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta

**LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA STATIČKOG I CIKLIČKOG PONAŠANJA TLA PRI
POKRETANJU KLIZIŠTA**

| | |
|---------------------|---------------------------------|
| Voditelj projekta | izv.prof.dr.sc. Vedran Jagodnik |
| Šifra projekta | uniri-tehnic-18-113 |
| Financijer projekta | <u>Sveučilište u Rijeci</u> |
| Pravna nadležnost | <u>Republika Hrvatska</u> |

U Rijeci, 06. srpnja 2023.

Mentor:



izv.prof.dr.sc. Vedran Jagodnik

SAŽETAK

U prirodi se tlo najčešće pronalazi u mješavinama sitnozrnastih i krupnozrnastih čestica, a rjeđe u "čistim" frakcijama. O mješavinama sitnih i krupnih frakcija ovisi ponašanje tla tj. čvrstoća, nosivost i sigurnost tla za izgradnju budućih građevina. Završnim radom provedeno je sustavno istraživanje na ukupno 15 pokusa: na Dravskom pijesku bez primjesa drugih čestica i Dravskom pijesku s različitim udjelima gline kaolina. Svi uzorci su izloženi djelovanju malih efektivnih naprezanja od: 10, 25 i 50 kPa. Svi rezultati prikazani su dijagramima: odnosa posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, odnosa posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, odnosa vertikalnog i horizontalnog pomaka, odnosa koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja. Usporedba je prikazana dijagramima: odnosa kuta trenja i kohezije sa postotkom čestica kaolina za vršno i kritično stanje, odnosa koeficijenta pora (prema normalnoj kompresijskoj liniji) sa postotkom čestica kaolina i odnosa nagiba kompresijske i kritične linije sa postotkom čestica kaolina. Sva ispitivanja provedena su u Geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Ključne riječi: sitnozrnaste čestice, krupnozrnasto tlo, izravno smicanje, posmična čvrstoća tla, malo efektivno naprezanje

ABSTRACT

In nature, soil is commonly found as a mixture of fine-grained and coarse-grained particles, rarely in "pure" fractions. The behavior of soil, including its strength, load-bearing capacity, and stability for future construction, depends on the mixtures of fine and coarse fractions. This study conducted systematic research on a total of 15 experiments: on clean sand without the presence of other particles and sand with varying proportions of kaolin clay. All samples were subjected to small effective stresses of 10, 25 and 50 kPa. The results were presented in diagrams, showing the relationship between shear stress and horizontal displacement, the relationship between vertical and horizontal displacement, the relationship between void ratio and effective vertical stress. For comparison the diagrams are showing the relationship between the angle of friction and cohesion with the percentage of kaolin particles for peak and critical conditions, the relationship between void ratio (according to the normal compression line) with the percentage of kaolin particles, and the relationship between the slope of the compression and critical lines with the percentage of kaolin particles. All test were conducted at the Geotechnical Laboratory of the Faculty of Civil Engineering at the University of Rijeka.

Keywords: fine-grained particles, coarse-grained particles, direct shear test, shear strength of soil, low effective stress

Sadržaj

| | |
|--|-----------|
| Popis slika | iv |
| Popis tablica | v |
| 1 UVOD | 1 |
| 1.1 Uvod o temi | 1 |
| 1.2 Pregled literature | 1 |
| 1.3 Uvod u završni rad | 3 |
| 2 PRINCIP RADA UREĐAJA ZA IZRAVNO SMICANJE | 5 |
| 2.1 Standardni prikaz rezultata izravnog smicanja | 6 |
| 3 PROVOĐENJE POKUSA I METODOLOGIJA PRIPREME UZORKA | 11 |
| 3.1 Provođenje ispitivanja | 11 |
| 3.2 Metodologija pripreme uzorka | 12 |
| 4 REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA | 15 |
| 4.1 Rezultati za Dravski pijesak oznake S100F0 | 15 |
| 4.2 Rezultati za Dravski pijesak sa 10% kaolina (Dr=50) | 16 |
| 4.3 Rezultati za Dravski pijesak sa 15% kaolina (Dr=50) | 18 |
| 4.4 Rezultati za Dravski pijesak sa 10% kaolina | 19 |
| 4.5 Rezultati za Dravski pijesak sa 15% kaolina | 20 |
| 4.6 Usporedba rezultata parametara čvrstoće i nagiba normalne kompresijske i kritične linije | 21 |
| 5 DISKUSIJA | 27 |
| 6 ZAKLJUČAK | 29 |
| Literatura | 31 |

Popis slika

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Odnos kohezije i udjela glinenih čestica [1] | 2 |
| 1.2 | Promjena kuta trenja i kohezije sa porastom udjela pijeska [2] | 2 |
| 1.3 | Rezultati ispitivanja prema Dafalli [3]: (a) odnos kohezije i udjela gline (b) odnos kuta unutarnjeg trenja i udjela gline | 3 |
| 2.1 | Uređaj za izravan posmik: (a) smična kutija, (b) elektromotor, (c) no- sači utega, (d) mjerač vertikalnog pomaka i (e) mjerač horizontalnog pomaka | 5 |
| 2.2 | Smična kutija: (a) porozne (mjedene) pločice, (b) opteretna kapa, (c) smične pločice (pune i perforirane), (d) vijci za otpuštanje/podizanje okvira, (e) gornji dio smične kutije (fiksni dio) i (f) donji dio smične kutije (pomični) [4] | 6 |
| 2.3 | Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka [5] | 7 |
| 2.4 | Odnos posmičnog i normalnog naprezanja [5] | 7 |
| 2.5 | Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka [5] | 8 |
| 2.6 | Kritična stanja tla: (a) kritični pravac čvrstoće, (b) odnos koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) odnos koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja u logaritamskom mjerilu [6] | 9 |
| 4.1 | Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S100F0: (a) dijagram po- smičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizon- talnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja | 16 |
| 4.2 | Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S90F10 Dr=50%: (a) dija- gram posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram po- smičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog ver- tikalnog naprezanja | 17 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.3 | Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S85F15 Dr=50%: (a) dijagram posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja | 18 |
| 4.4 | Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S90F10 Dr=73%: (a) dijagram posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja | 19 |
| 4.5 | Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S85F15 Dr=74%: (a) dijagram posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja | 21 |
| 4.6 | Rezultati za referentnu vrijednost Dr: (a) dijagram odnosa ϕ_p i c'_p sa postotkom čestica kaolina, (b) dijagram odnosa ϕ_c i c'_c sa postotkom čestica kaolina, (c) dijagram odnosa koeficijenta pora (prema NCL) sa postotkom čestica kaolina i (d) dijagram odnosa nagiba NCL i CSL sa postotkom čestica kaolina | 22 |
| 4.7 | Rezultati za referentnu vrijednost e_o : (a) dijagram odnosa ϕ_p i c'_p sa postotkom čestica kaolina, (b) dijagram odnosa ϕ_c i c'_c sa postotkom čestica kaolina, (c) dijagram odnosa koeficijenta pora (prema NCL) sa postotkom čestica kaolina i (d) dijagram odnosa nagiba NCL i CSL sa postotkom čestica kaolina | 23 |

Popis tablica

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Oznaka uzoraka s obzirom na postotak pijeska, gline i vlažnosti | 13 |
| 4.1 | Sumarna tablica uzoraka sa parametrima čvrstoće | 24 |
| 4.2 | Sumarna tablica uzoraka sa koeficijentima pora prema normalnoj kom- presijskoj (NCL) i kritičnoj liniji (CSL) i njihovi nagibi | 24 |

1. UVOD

1.1 Uvod o temi

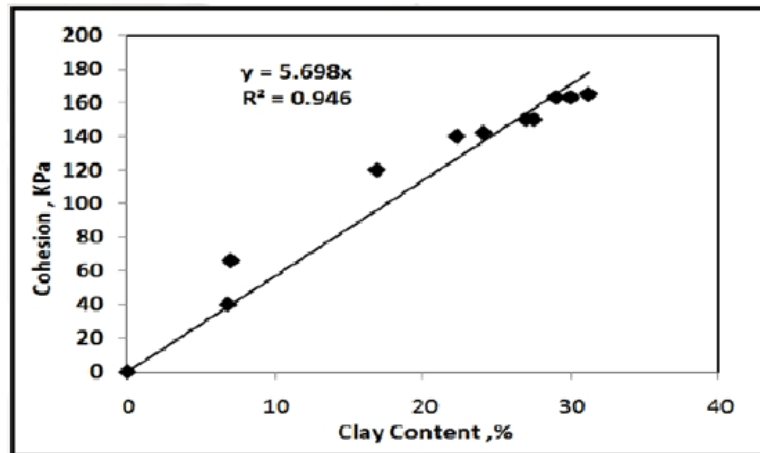
Jedna od osnovnih podjela tla zasnovana je na veličini zrna tla, međutim iz pogleda geotehničkog inženjerstva tlo se može podijeliti ovisno o tome sadrži li koheziju na: krupnozrnasta (nekoherentna) i sitnozrnasta (koherentna) tla. Tlo se u prirodi može pronaći kao isključivo krupnozrnast materijal, npr. Dravski pijesak, ali se najčešće pronalazi u mješavinama sa sitnozrnastim zbog kemijskog i mehaničkog trošenja tokom geološke prošlosti [5]. Količina glinenih čestica ima značajan utjecaj na ponašanje krupnozrnastog tla što utječe na čvrstoću mješavine sitnozrnastog i krupnozrnastog tla. Postotak minerala gline, a time i frakcija gline pokazuje utjecaj na čvrstoću već kod 5% masenog udjela [7, 8]. Uz maseni utjecaj na razlike u posmičnom ponašanju utječe i mineralni sastav sitnozrnastih čestica. Prema tome, niskoplastični materijali imati će potpuno drugačiji utjecaj na ponašanje krupnozrnastih materijala od visokoplastičnih.

1.2 Pregled literature

O temi utjecaja sitnozrnastih čestica na ponašanje i posmičnu čvrstoću krupnozrnastih čestica postoje brojna ispitivanja. U nastavku potpoglavlja dan je osvrt na karakteristična istraživanja koja su provedena na mješavinama krupnozrnastog i sitnozrnastog materijala a usko su vezana za ovaj završni rad.

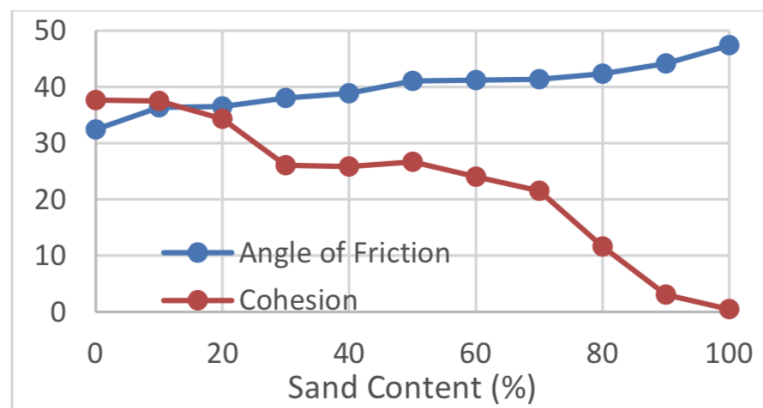
Ratham i suradnici [1] proveli su ispitivanje na mješavini sitnozrnastog i krupnozrnastog materijala odnosno na glinovitom pijesku (SC). Za spravljenje uzoraka su se koristile tri različite veličine zrna pijeska pomiješanih sa različitim udjelima niskoplastične (CL) gline od 15, 20, 30 i 40%. Uzorci su prethodno konsolidirani pri naprezanju od 1600 kPa a zatim izloženi nizu djelovanja normalnih opterećenja od 50, 100, 150, 200, 300 i 400 kPa i pri brzini smicanja od 0.1 mm/min. Na Slici 1.1 prikazani su rezultati porasta kohezije sa glinenim česticama.

Balaban i suradnici [2] provode ukupno 44 pokusa u uređaju za izravan posmik s ciljem proučavanja promjena ponašanja na mješavinama pijeska i gline pri djelovanju malih efektivnih naprezanja i za optimalnu vlažnost. Za ispitivanja je pripremljeno 11



Slika 1.1: Odnos kohezije i udjela glinenih čestica [1]

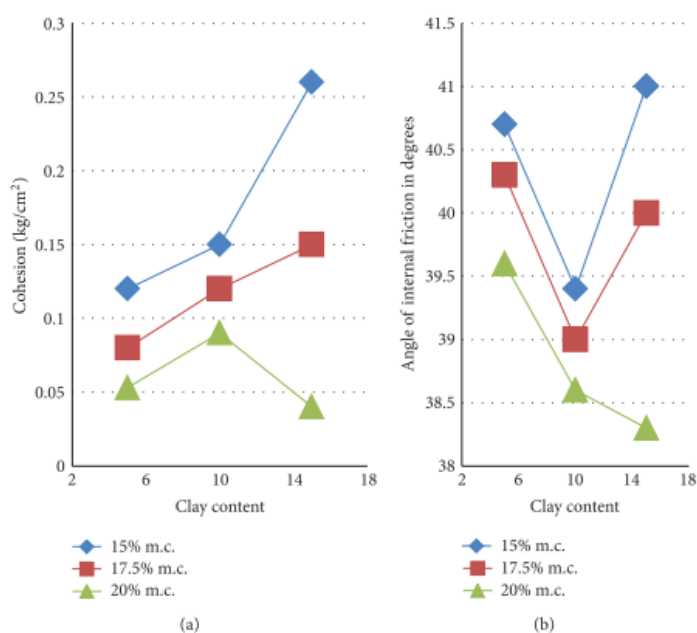
uzoraka materijala od kojih je prvi uzorak "čisti" pijesak a preostali mješavine spravljene na način da se udio gline povećavao za 10% sa svakom mješavinom nakon čega je sproveden pokus sa 100% gline. Svaki od uzoraka je ugrađen u smičnu kutiju dimenzija 10x10 cm i izložen konsolidaciji pod djelovanjem četiri različita normalna naprezanja od 9.81, 19.62, 40.81 i 58.86 kPa. Brzina smicanja uzoraka sa najmanje 50% udjela pijeska u mješavini je 0.25 mm/min, a za preostale mješavine je smanjena na 0.065 mm/min. Na Slici 1.2 prikazani su rezultati za koheziju i kut unutarnjeg trenja s obzirom na udio pijeska.



Slika 1.2: Promjena kuta trenja i kohezije sa porastom udjela pijeska [2]

Daffala [3] provodi ispitivanje na uzorcima finog pijeska po veličini na granici s prahom koji se koristi kao građevinski materijal. Ispitivanja su provedena na "čistom" pijesku, "čistoj" glini i njihovim mješavinama sa 5, 10 i 15%. Također, uzorci su se razlikovali ovisno o postotku vlažnosti: za pijesak bez primjesa gline koristile su se vlažnosti od 7, 10 i 13%, za "čistu" glinu 30, 35 i 40% vlažnosti, a za prethodno spomenute mješavine 15, 17.5 i 20 %. Na svaki od uzoraka su djelovala tri različita normalna naprezanja od 50, 100 i 150 kPa, a smicanje se provodilo pri brzini od 0.12 mm/min za

također sve uzorke. Na Slici 1.3 prikazani su rezultati utjecaja udjela gline na koheziju i kut unutarnjeg trenja.



Slika 1.3: Rezultati ispitivanja prema Dafalli [3]: (a) odnos kohezije i udjela gline (b) odnos kuta unutarnjeg trenja i udjela gline

Iz analiziranih primjera jasno se uočava da sa povećanjem glinenih čestica dolazi do povećanja kohezije, ali i do smanjenja kuta trenja.

1.3 Uvod u završni rad

Završnim radom provest će se sustavno istraživanje utjecaja količine sitnozrnastog materijala sa mješavinama krupnozrnastog materijala na malim efektivnim naprezanjima. Kao sitnozrnasti materijal koristio se kaolin čije su granice tečenja 54% i granice plastičnosti 30%. Kao krupnozrnasti materijal koristio se Dravski pijesak. Za potrebe ovog rada provodit će se laboratorijska ispitivanja u uređaju za izravan posmik na tri različita uzorka tla. Uzorci tla na kojima se provode su:

- Dravski pijesak
- Dravski pijesak sa 10% kaolina
- Dravski pijesak sa 15% kaolina

Provest će se dvije serije ispitivanja:

- Ispitivanja mješavina Dravskog pijeska i kaolina pri relativnoj zbijenosti od 50 %

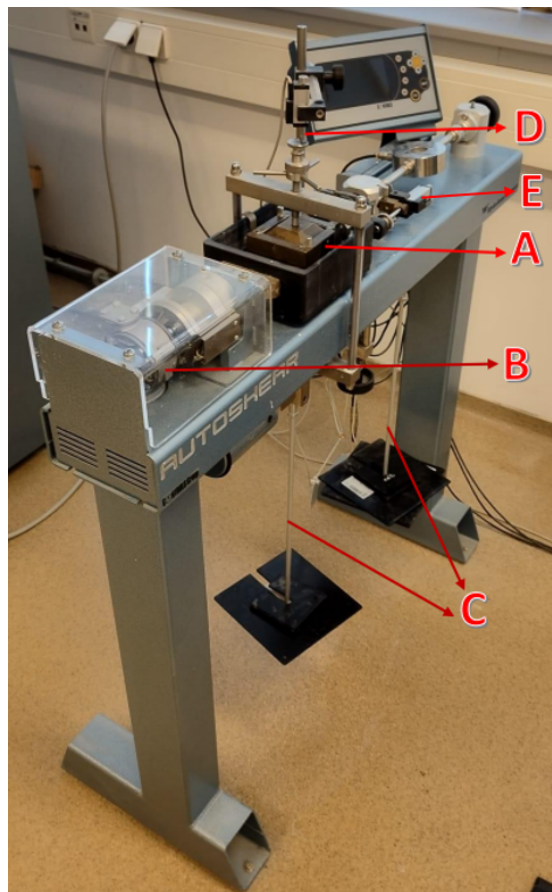
- Ispitivanja mješavina Dravskog pijeska i kaolina pri konstantnom početnom koeficijentu pora $e_0 = 0,776$

Svi uzorci bit će ugrađeni u vlažnom stanju pri vlažnosti koja je omogućavala da čestice gline imaju dovoljnu količinu vode da se aktiviraju. U uređaju za izravan posmik uzorci će biti ispitani pod djelovanjem tri različita normalna opterećenja izazvana normalnim naprezanjima od 10, 25 i 50 kPa.

Detaljan opis načina rada uređaja za izravan posmik, ugradnje uzoraka i prikaza rezultata pokusa bit će opisani u Poglavlju 2. Više o provođenju ispitivanja i metodologiji pripreme uzorka bit će riječ u Poglavlju 3. U Poglavlju 4 prikazani su i opisani svi rezultati mjerenja koji su diskutirani u Poglavlju 5. U posljednjem Poglavlju 6, izvest će se zaključci provedenog istraživanja.

2. PRINCIP RADA UREĐAJA ZA IZRAVNO SMICANJE

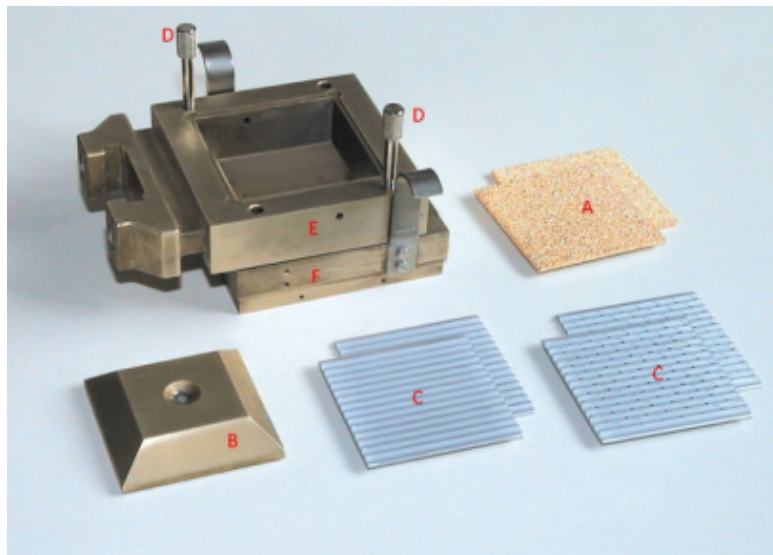
Uređaj za izravno smicanje je laboratorijski uređaj za ispitivanje čvrstoće tla na smicanje u dreniranim uvjetima. Služi za određivanje parametara čvrstoće tla: kuta trenja (ϕ) i kohezije (c).



Slika 2.1: Uređaj za izravan posmik: (a) smična kutija, (b) elektromotor, (c) nosači utega, (d) mjerac vertikalnog pomaka i (e) mjerac horizontalnog pomaka

Uređaj za izravan posmik je najstariji i najjednostavniji uređaj za mjerenje čvrstoće tla kojeg je prvi put upotrijebio Coulomb radi utvrđivanja parametara za jednadžbu čvrstoće tla [5]. Cjelokupni uređaj se sastoji od dva glavna dijela: sustava za nanošenje horizontalne sile i mjernih uređaja i kutije za smicanje (eng. "shear box") s uzorkom

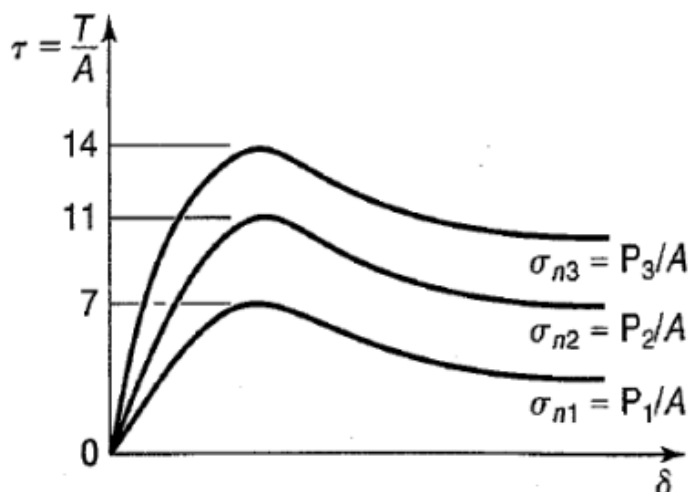
(Slika 2.1(a)). Pokretanjem elektromotora (Slika 2.1(b)) nanosi se horizontalna sila na uzorak, dok se vertikalna sila nanosi preko nosača utega (Slika 2.1(c)) te se ostvareni pomaci mjere pomoću mjerača horizontalnih i vertikalnih pomaka (Slika 2.1(d)) [9]. Smična kutija, kvadratnog ili kružnog oblika, sastoji se od gornjeg i donjeg dijela unutar koje se uzorak izlaže normalnom i posmičnom naprezanju tijekom čega se mjere horizontalni (Slika 2.1(e)) i vertikalni (Slika 2.1(d)) pomak. Pomak se mjeri pomoću analognih mjerača koji se naziva Linearni Varijabilni Diferencijalni Transformator (LV-DTs) [10]. Za provedene pokuse korištena je kvadratna kutija dimenzija 60 x 60 mm. Na dno donjeg dijela kutije postavljaju se: mjedena porozna pločica (Slika 2.2(a)), propusna, ili nepropusna smična pločica (Slika 2.2(c)) te filter papir. Prije postavljanja pločica i poroznog papira potrebno je izmjeriti njihovu debljinu i masu kako bi se izračunale točna masa i dimenzije uzorka. Na pločice i papir se postavlja uzorak na koji se obrnutim redoslijedom naliježu iste pločice i papir. Porozne pločice bitne su kod raspodjele opterećenja na tlo jer omogućavaju prolaz vode kroz uzorak što je značajno bitno kod reguliranja pornog tlaka. Nakon izvršene ugradnje uzorka, izmjeri se masa uzorka i postavlja se opteretna kapa (Slika 2.2(b)) za nanošenje vertikalnog opterećenja i uzorak se postavlja u uređaj za izravan posmik [9].



Slika 2.2: Smična kutija: (a) porozne (mjedene) pločice, (b) opteretna kapa, (c) smične pločice (pune i perforirane), (d) vijci za otpuštanje/podizanje okvira, (e) gornji dio smične kutije (fiksni dio) i (f) donji dio smične kutije (pomični) [4]

2.1 Standardni prikaz rezultata izravnog smicanja

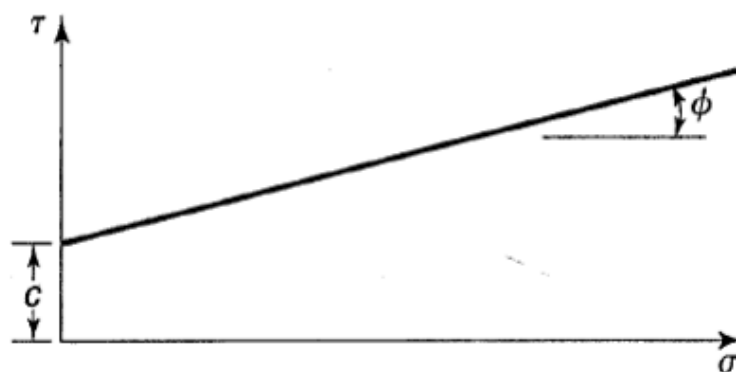
Posmično naprezanje, horizontalna i vertikalna deformacija mjere se tijekom provođenja pokusa smicanja. Nakon što su poznati rezultati ispitivanja moguće je odrediti parametre čvrstoće, kut unutarnjeg trenja (ϕ) i koheziju (c). Ova dva parametra čvrstoće tla osnovne su dvije komponente Mohr - Coulombove jednadžbe čvrstoće tla [11]. Jednadžba dokazuje da je kut trenja ovisan o vertikalnom naprezanju, što je slučaj i za trenje između blokova na kosini, dok je kohezija neovisna o vertikalnom naprezanju [5]. Kohezija predstavlja privlačnu silu između istovrsnih čestica a kut unutarnjeg trenja predstavlja kut trenja između čestica materijala [12]. Da bi se parametri odredili potrebno je odraditi minimalno tri pokusa sa istom vrstom materijala i pri istoj zbijenosti, a sa različitim vrijednostima vertikalnog opterećenja [5]. Slika 2.3 prikazuje rezultate serije od tri pokusa kao odnos posmičnog naprezanja i horizontalnih pomaka.



Slika 2.3: Odnos posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka [5]

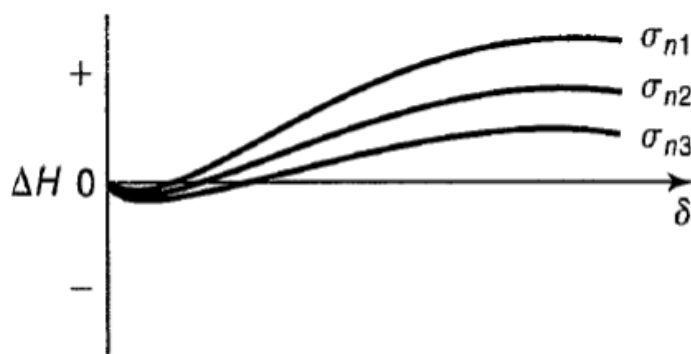
Na dijagramu odnosa posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka (Slika 2.3) prikazane su maksimalne vrijednosti posmičnog naprezanja. Pomoću navedenih vrijednosti maksimalnih posmičnih naprezanja i vrijednosti efektivnih naprezanja konstruira se pravac Slika 2.4. Prikazani pravac zove se pravac čvrstoće i nagib pod kojim je nagnut predstavlja kut unutarnjeg trenja a kohezija se očitava na ordinati za nultu vrijednost vertikalnog naprezanja [5].

Oblik krivulje, prikazanog Slikom 2.3, tipičan je za zbijeni pijesak, ili prekonsolidiranu glinu jer posloženosť čestica rezultira visokom posmičnom čvrstoćom [5]. Dosegom te čvrstoće i postignutim smicanjem dolazi do smanjenja površine sloma što uzrokuje nova ponašanja u uzorku. Ta ponašanja opisana su dijagramom odnosa vertikalnih i horizontalnih pomaka. Na apsisci se prikazuju vrijednosti horizontalnih pomaka a na ordinati vertikalnih pomaka (Slika 2.5). Na vertikalnim pomacima uočljiva je di-



Slika 2.4: Odnos posmičnog i normalnog napreznja [5]

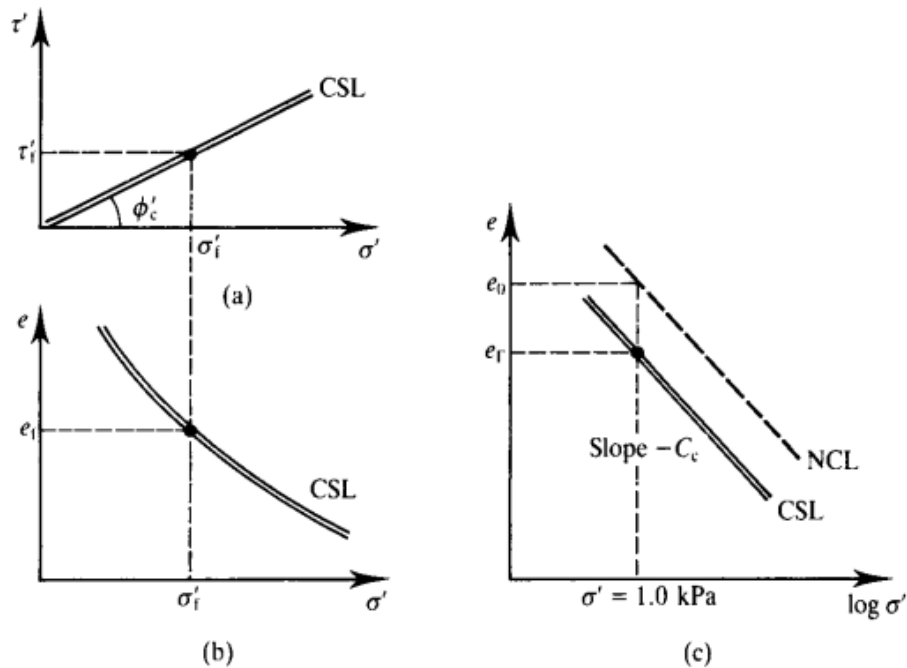
latancija, ili povećanje volumena sa blagom kontrakcijom, ili smanjenjem volumena u početku ispitivanja [5]. Povećanje volumena je karakteristično za zbijena tla, a smanjenje za rahlo ugrađene uzorke.



Slika 2.5: Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka [5]

Pored prethodno opisana tri dijagrama Slika 2.3, Slika 2.4 i Slika 2.5 za prikaz rezultata izravnog smicanja značajan je dijagram odnosa koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja Slika 2.6 (c). Ordinata prikazuje vrijednosti za parametar koeficijenta pora na sljedeći način: parametar e_{Γ} definira poziciju linije kritičnog stanja (CSL) na isti način kao što i parametar e_0 definira poziciju normalne kompresijske linije (NCL). Apcisa prikazuje vrijednosti efektivnog vertikalnog napreznja u logaritamskom mjerilu [6].

Normalna kompresijska linija (NCL) pokazuje krajnu deformaciju uzorka tla nakon nanošenja vertikalnog opterećenja nakon završetka konsolidacije. Karakterizirana je sa konstantnim nagibom, poznat kao indeks kompresije C_c . Što je veći nagib NCL, to je veći indeks kompresije i veća kompresija tla [13]. Linija kritičnog stanja (CSL) pokazuje ponašanje uzorka tla uslijed nanošenja vertikalnog opterećenja i smicanja za stanje koje je karakteristično samo za vrstu tla koje se ispituje. Služi za analizu posmične



Slika 2.6: Kritična stanja tla: (a) kritični pravac čvrstoće, (b) odnos koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja, (c) odnos koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja u logaritamskom mjerilu [6]

čvrstoće, stabilnosti i deformacijskih promjena u uzorku. Predstavlja granicu između zbijenog i rahlog stanja tla. Ukoliko je stanje u kojem je uzorak prije smicanja takvo da je na Slici 2.6 (c) iznad kritične linije, uzorak će težiti kompresiji tijekom smicanja (normalno konsolidirane gline i rahli pijesak), a ukoliko je stanje ispod kritične linije uzorak će dilatirati (prekonsolidirane gline i zbijeni pijesak) [13]. Kritična linija dobiva se pomoću izraza (2.1) i (2.2) gdje indeks f označava da su napreznja i koeficijent pora oni koji se odnose na slom u kritičnom stanju. Kut unutarnjeg trenja (ϕ_c) je kut između linije kritičnog stanja i apcise na dijagramu odnosa posmičnog i efektivnog normalnog napreznja Slika 2.6 (a) [6].

$$\tau'_f = \sigma'_f \cdot \tan \phi'_c \quad (2.1)$$

$$e_f = e_\Gamma - C_c \cdot \log \sigma'_f \quad (2.2)$$

Vrijednosti parametara čvrstoće u kritičnom stanju dobivaju se kada su posmična napreznja i vertikalne deformacije konstatne unatoč povećanju horizontalnog pomaka.

3. PROVOĐENJE POKUSA I METODOLOGIJA PRIPREME UZORKA

3.1 Provođenje ispitivanja

Pomoću uređaja za izravan posmik moguće je odrediti parametre čvrstoće za unaprijed definiranu plohu sloma [10]. Ploha sloma određena je horizontalnom linijom na polovici visine smične kutije čime se ona forsira da bude horizontalna [5]. Ispitivanje se provodi u dvije faze redoslijedom: konsolidacija pod vertikalnim opterećenjem i smicanje. Da bi se odredila naprezanja pri slomu uzorak se optereti sa vertikalnom silom putem ovješanih utega na prijenosnu napravu u omjeru 1:10. Djelovanje vertikalne sile iako djeluje težišno raspodijeljeno je po cijeloj kvadratičnoj površini gornjeg dijela uzorka putem opteretne kape i time se ostvaruje vertikalno naprezanje na uzorak. Djelovanjem vertikalnog naprezanja u vremenskom periodu dolazi do konsolidacije koja se mjeri vertikalnim pomakom opteretne kape [11].

Nakon završene prve faze konsolidacije pristupa se drugom dijelu pokusa odnosno smicanju. Iako je konsolidacija završena vertikalno naprezanje ostaje djelovati na uzorak konstantno. Gornji i donji dio kutije pomiču se u horizontalnoj ravnini jedan u odnosu na drugi djelovanjem horizontalnog opterećenja koje se postupno povećava dok ne dođe do proklizavanja ploha odnosno granice sloma [11]. Brzina pod kojom se odvija smicanje značajno je bitna za rezultate konsolidiranog dreniranog pokusa. Najmanju posmičnu brzinu moguće je odrediti iz konsolidacijske krivulje nakon što odredimo vrijeme potrebno za konsolidaciju i razlikuje se ovisno o materijalu koji se ispituje [5],[14]. Brzina smicanja usko je vezana sa drenažom i pornim tlakom što je jedan od glavnih nedostataka uređaja za izravan posmik: nemogućnost kontroliranja drenaže i mjerenja pornog tlaka stoga je smicanje odnosno nanošenje horizontalnog opterećenja potrebno odraditi što manjoj brzinom da se svaki dodatni porni pritisak koji se može pojaviti troši proporcionalno porastu tog horizontalnog opterećenja [9]. Drugim riječima, za totalna naprezanja se može smatrati da su jednaka efektivnim za dovoljno sporo provođenje

pokusa. Takav postupak je moguće ostvariti korištenjem uređaja sa stalnim prirastom deformacije [11].

Rezultati ovog ispitivanja dobiveni su u uređaju sa stalnim prirastom deformacije u kojem je moguće pomičnom gornjem dijelu kutije dodavati stalni prirast deformacije a mjeriti prirast sile. Na taj način dobiva se "postlomno" ponašanje uzorka. Iako je ovaj pokus odrađen kao konsolidirani drenirani pokus postoje i drugi tipovi pokusa za izravan posmik. Moguće je da se ispitivani uzorak potpuno saturira, da se ugradi s određenim postotkom vlažnosti ili se potpuno suh postavlja u suho postolje. Također je moguće pokus provoditi bez prethodnog nanošenja vertikalne sile čime se direktno pristupa smicanju. Dimenzije uzorka ovise o unutarnjem obliku smične kutije. Ukoliko se radi o kvadratnom presjeku dimenzije su 60 x 60 mm, a ako se radi o kružnom promjer je 60 mm [11]. Svi pokusi odrađeni su u kvadratnim dimenzijama. Što se tiče visine uzorka ona može varirati ovisno ugrađuje li rahli uzorak koji poprima svoju prirodnu visinu ovisno od količine koja se ugradi ili ako je zbijen može se ciljati željena visina [9]. Tijekom ugrađivanja uzorka u smičnu kutiju masa uzorka dijelila se na 3 jednaka dijela da bi se uzorak što lakše zbio. Neka prosječna visina koja se želi postići je 20 mm.

3.2 Metodologija pripreme uzorka

Priprema uzorka, brzina smicanja i sve vezano za sam pokus definirano je standardima BS 1377-8 [15]; ASTM D3080 [14]; ISO/TS 17892-10 [16]. Ukupno je provedeno 15 laboratorijskih ispitivanja: na Dravskom pijesku bez primjesa drugih čestica i Dravskom pijesku s različitim udjelima gline kaolina (Tablica 3.1). Svaki od uzoraka ima odgovarajući naziv s obzirom na postotak Dravskog pijeska (oznaka "S"), gline (oznaka "F"), relativne zbijenosti (D_r) i početnog koeficijenta pora (e_0).

Uzorci su ispitivani u pet serija pokusa i ugrađivani u okvir za smicanje sa zbijanjem da bi se postigla željena visina od 20 mm metodom podzbijanja [17]. Jedna serija pokusa predstavlja pokus za isti uzorak na različitim intenzitetima vertikalnog opterećenja od: 10 kPa, 25 kPa i 50 kPa. Uzorci su prvobitno konsolidirani, a zatim izloženi smicanju pri brzinama od 1 mm/min. Prethodnim istraživanjima [18] i [19] za Dravski pijesak te mješavine pijeska i gline za 10 % i 15 % gline utvrđena su fizička svojstva tla od kojih su se koristila:

- specifična gustoća G_s
- vlažnost w
- vrijednosti koeficijenta pora: e_{min} , e_{max} i e_0

Tablica 3.1: Oznaka uzoraka s obzirom na postotak pijeska, gline i vlažnosti

| Oznaka uzorka | Relativna zbijenost, D_r (%) | Početni koeficijent pora, e_0 | Postotak pijeska, S (%) | Postotak gline, F (%) | Početna vlažnost, w (%) |
|---------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| S100F0 | 50 | 0,776 | 100 | 0 | 2 |
| S90F10 | 50 | 0,884 | 90 | 10 | 5,4 |
| S90F10 | 73 | 0,776 | 90 | 10 | 5,4 |
| S85F15 | 50 | 0,987 | 85 | 15 | 8,1 |
| S85F15 | 74 | 0,776 | 85 | 15 | 8,1 |

Prvu seriju pokusa predstavlja čisti Dravski pijesak bez primjesa gline (oznaka uzorka S100F0) čija su relativna zbijenost $D_r=50$ % i početni koeficijent pora $e_0=0,776$ predstavljali referentne vrijednosti za preostale pokuse na mješavinama materijala. Za pokuse na Dravskom pijeskom sa 10 % i 15 % kaolina koristio se $e_0=0,776$ kao referenca i izračunata je relativna zbijenost D_r pomoću izraza (3.1), zatim se za istu mješavinu materijala koristila referenca $D_r=50$ % i izračunao se e_0 pomoću izraza (3.2).

$$e_0 = e_{max} - D_r \cdot (e_{max} - e_{min}) \quad (3.1)$$

ili

$$D_r = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad (3.2)$$

Tako su definirane serije za:

- S90F10 $D_r=50$ $e_0=0,884$
- S90F10 $D_r=73$ $e_0=0,776$
- S85F15 $D_r=50$ $e_0=0,987$
- S85F15 $D_r=74$ $e_0=0,776$.

4. REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

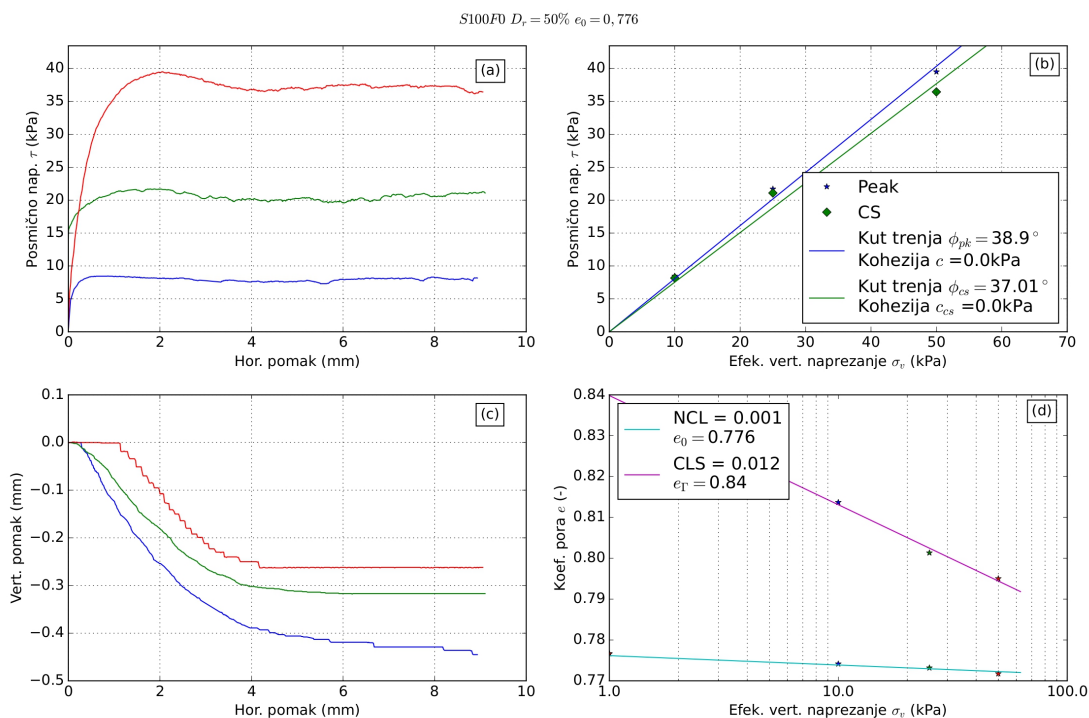
U nastavku teksta prikazani su rezultati provedenih pokusa. Rezultati ispitivanja za čisti Dravski pijesak te rezultati mješavina Dravskog pijeska i kaolina pri konstantnoj početnoj relativnoj zbijenosti prikazani su u Potpoglavljima 4.1 do 4.3, a rezultati pokusa pri konstantnim početnim koeficijentom pora prikazani su u Potpoglavljima 4.4 do 4.5. U Potpoglavlju 4.1 prikazani su rezultati za čisti Dravski pijesak pri relativnoj zbijenosti od 50%, koja odgovara početnom koeficijentu pora $e_0 = 0.776$.

4.1 Rezultati za Dravski pijesak oznake S100F0

Slikom 4.1 prikazani su rezultati za ispitivanje čistog Dravskog pijeska bez primjesa gline. Prikazana četiri dijagrama biti će opisani u daljnjem tekstu.

Na Slici 4.1 (a), prikazan je odnos posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka. Iz krivulje za normalno naprezanje od 50 kPa se može vidjeti jasna razlika između vršne i rezidualne čvrstoće dok su kod krivulja za 25 kPa i 10 kPa razlike manje izražene i vrijednosti su jednolike. Vrijednosti vršnog i rezidualnog tangencijelnog naprezanja mogu se najbolje očitati iz dijagrama posmičnog naprezanja i efektivnog vertikalnog naprezanja (Slika 4.1 (b)). Vršno i rezidualno posmično naprezanje za 10 kPa normalnog naprezanja iznose približno istu vrijednost od 7.5 kPa. Za vršno posmično naprezanje postignut je horizontalni pomak od 2.2 mm. Vršno i rezidualno posmično naprezanje za 25 kPa normalnog naprezanja iznose 22 te 21 kPa. Vršno je postignuto pri pomaku od 1.8 mm. Vršno i rezidualno posmično naprezanje imaju, kako je spomenuto, jasniju razliku vrijednosti. Vršno iznosi 39 kPa za horizontalni pomak od 2 mm, a rezidualno posmično naprezanje 37 kPa.

Pomoću Slike 4.1 (b) i preko trigonometrijske funkcije moguće je odrediti vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja. S obzirom da je u ovom slučaju riječ o čistom pijesku bez primjesa sitnozrnastog materijala, kao takav, materijal neće sadržavati koheziju. Vrijednost vršnog kuta unutarnjeg trenja je 38.90° dok je rezidualna vrijednost kuta unutarnjeg trenja 37.01° . Pravac čvrstoće dobiven je povezivanjem odgovarajućih



Slika 4.1: Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S100F0: (a) dijagram posmičnog napreznja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog napreznja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja

normalnih i posmičnih napreznja.

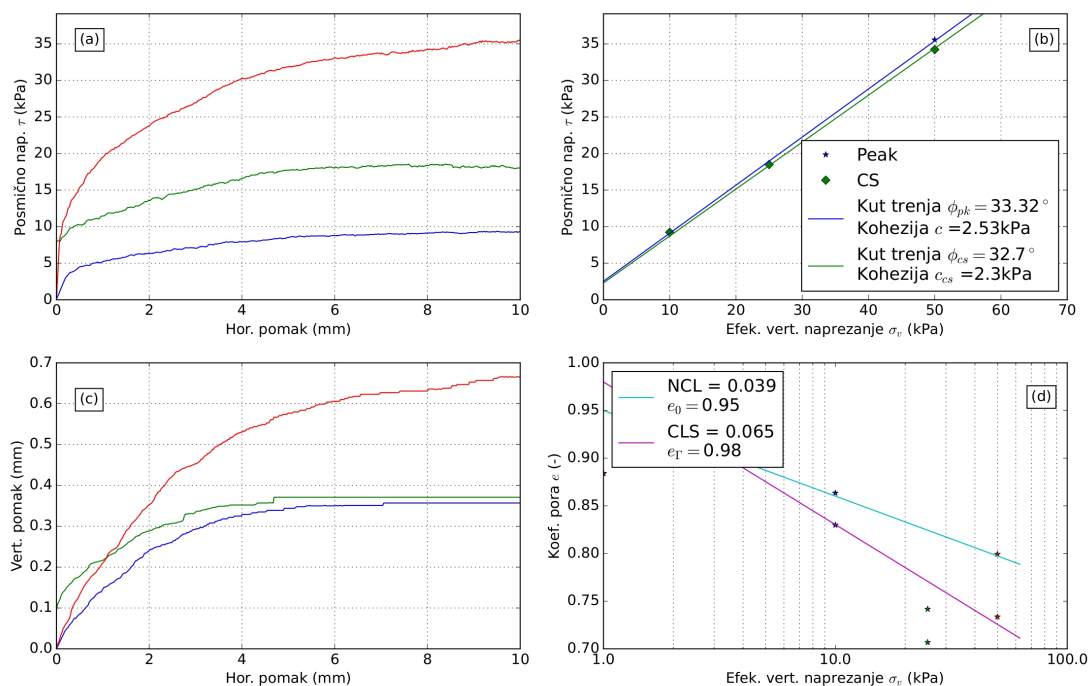
Slikom 4.1 (c) prikazan je odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka na kojoj se mogu uvidjeti promjene volumena uzorka tijekom pokusa. Pošto je vrijednost vertikalnog pomaka negativna znači da je došlo do smanjenja volumena. Maksimalni horizontalni pomak je do 9 mm, a vertikalni do -0.45 mm.

Slika 4.1 (d) je odnos efektivnog vertikalnog napreznja i početnog koeficijenta pora. Prikazuje normalnu (NCL) i kritičnu (CSL) konsolidacijsku liniju. Za normalnu konsolidacijsku liniju početni koeficijent pora ostaje 0.776 za nagib od 0.001, a kritična s nagibom od 0.012 ima početni koeficijent pora 0.840.

4.2 Rezultati za Dravski pijesak sa 10% kaolina ($D_r=50$)

Slika 4.2 prikazuje rezultate za ispitivanje Dravskog pijeska sa 10% gline kaolina i sa zbijenošću od 50%.

Slikom 4.2 (a) se ne vidi jasno razlika između vršnog i rezidualnog tangencijalnog napreznja s obzirom da je prikazan ustaljen rast napreznja u sva tri slučaja pa su vrijednosti ta dva napreznja očitana iz Slike 4.2 (b). Dijagramom odnosa efektivnog vertikalnog i posmičnog napreznja 4.2 (b) također se ne vidi jasna razlika između



Slika 4.2: Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S90F10 $D_r=50\%$: (a) dijagram posmičnog napreznja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog napreznja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja

vršnog i rezidualnog napreznja. S obzirom na to očitane su približne vrijednosti za 50 kPa normalnog napreznja vršno posmično napreznje 36 kPa za pomak od 10 mm i rezidualno napreznje 34 kPa. Vršno i rezidualno posmično napreznje, za 25 kPa normalnog napreznja, iznose približnu vrijednost od 18 kPa za horizontalni pomak od 7.8 mm. Na posljednjoj krivulji, koja prikazuje vrijednosti za 10 kPa normalnog napreznja, vršno i rezidualno napreznja su 9 kPa za horizontalni pomak 9.8 mm.

Što se tiče kohezije i kuta unutarnjeg trenja očitane su vrijednosti: za koheziju pri kritičnom stanju 2.53 kPa i kut unutarnjeg trenja $33,32^\circ$, za koheziju pri rezidualnom stanju 2.30 kPa i kut unutarnjeg trenja $32,70^\circ$. Pravci čvrstoće pokazuju približnu paralelnost.

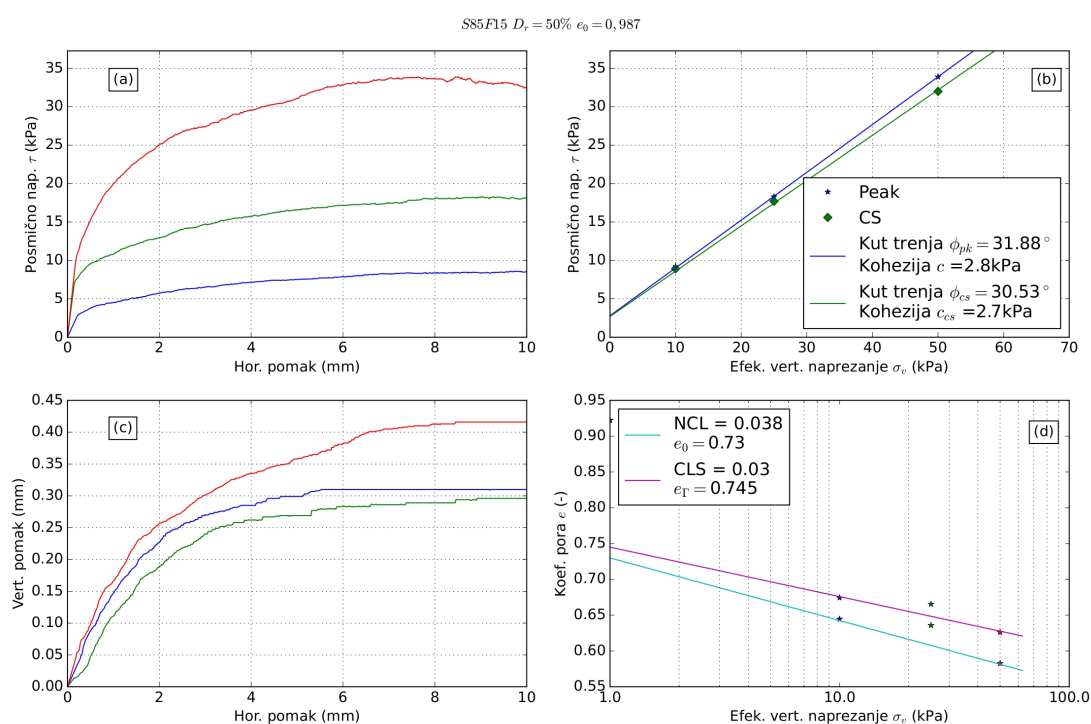
Slika 4.2 (c) tj odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka prikazuje povećanje volumena uzroka tokom provođenja izravnog smicanja pri djelovanju sva tri normalna napreznja (10, 25 i 50 kPa). S obzirom da zelena krivulja, dobivena za normalno efektivno opterećenje od 25 kPa, nije po položaju između preostale dvije, takve vrijednosti se odbacuju. Isto vrijedi i za njene vrijednosti na d dijagramu. Maksimalne vrijednosti vertikalnog pomaka kreću se od 0.35 mm do 0.65 mm, a horizontalnog pomaka do 10 mm.

Na Slici 4.2 (d) linije NCL i CSL ne pokazuju paralelnost. Nagib normalne konsoli-

dacijske linije je 0.039 za početni koeficijent pora od 0.950, a nagib kritične konsolidacijske linije 0.065 i početni koeficijent pora je 0.980. Kao ulazni parametar u proračunu za početni koeficijent pora vrijedio je iznos od 0.884.

4.3 Rezultati za Dravski pijesak sa 15% kaolina (Dr=50)

Slika 4.3 prikazuje rezultate za ispitivanje Dravskog pijeska sa 15% gline kaolina i sa zbijenošću od 50%.



Slika 4.3: Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S85F15 Dr=50%: (a) dijagram posmičnog napreznja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog napreznja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja

Na Slici 4.3 (a) vršno posmično napreznje krivulje koja bilježi veći porast i zakrivljenost od preostalih dviju, za zadani iznos normalnog napreznja od 50 kPa iznosi 34 kPa za horizontalni pomak od 8.50 mm. Rezidualno napreznje za 50 kPa normalnog napreznja iznosi 32 kPa. Preostala dva posmična napreznja imaju slabo izraženu krivulju i pokazuju ustaljen rast. Zato su iz Slike 4.3 (b) očitane vrijednosti vršnog i rezidualnog posmičnog napreznja. Vršno i rezidualno posmično napreznje za 25 kPa normalnog napreznja iznose približno 18.50 kPa za horizontalni pomak od 9.30 kPa. Vršno i rezidualno posmično napreznje za 10 kPa normalnog napreznja iznose 8.50 kPa za horizontalni pomak od 9.90 mm.

Kohezija za vršno stanje iznosi 2.80 kPa i odgovarajući kut unutarnjeg trenja je

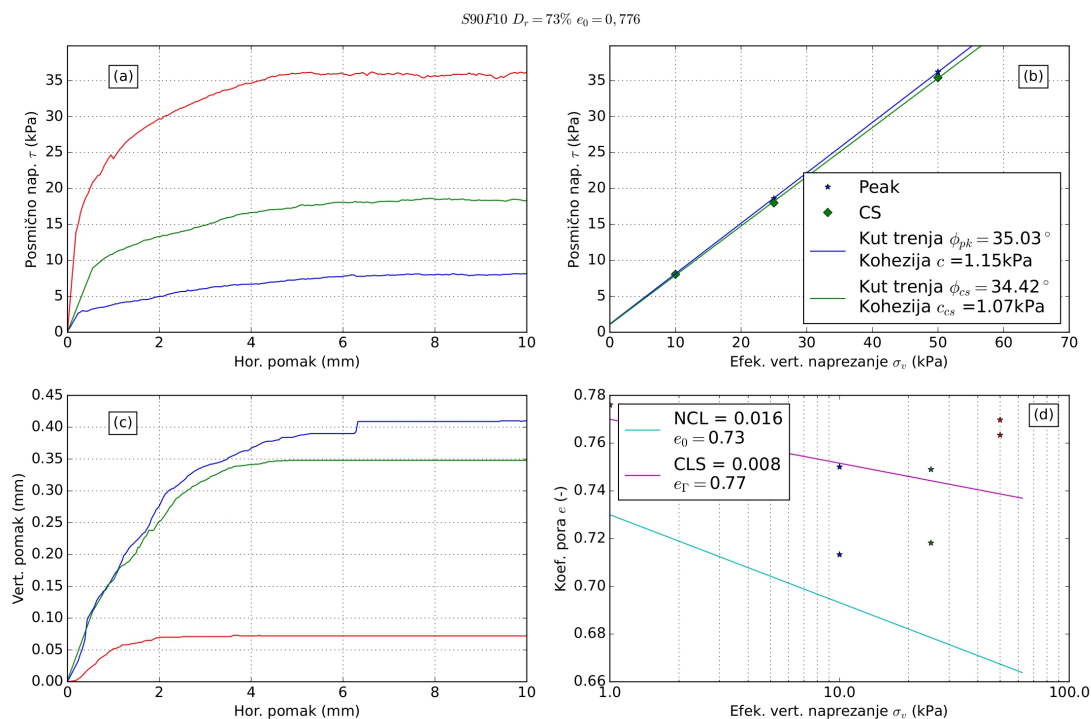
31.88°. Na rezidualnom pravcu čvrstoće kohezija iznosi 2.70 kPa a kut unutarnjeg trenja 30.53°.

Slika 4.3 (c) prikazuje odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka uzorka s 15% gline. Vertikalni pomaci ostvareni tokom smicanja ukazuju na smanjenje volumena u sve tri serije i zatim ustaljenje volumena. S obzirom da bi se vrijednosti zelene krivulje (25 kPa normalnog naprezanja) trebale nalaziti između vrijednosti za 10 i 50 kPa, krivulja se odbacuje.

Na Slici 4.3 (d) linije NCL i CSL su skoro paralelne. Nagib normalne konsolidacijske linije je 0.038 za početni koeficijent pora od 0.730, a nagib kritične konsolidacijske linije 0.030 i početni koeficijent pora je 0.745. Kao ulazni parametar u proračunu za početni koeficijent pora vrijedio je iznos od 0.987. Također, vrijednosti koje odskaču sa pravca ne uzimamo u obzir (za 25 kPa normalnog naprezanja).

4.4 Rezultati za Dravski pijesak sa 10% kaolina

Sljedeća dva pokusa su ujedno i preostala dva pokusa koja su provedena sa drugim parametrom, u ovom slučaju početnim koeficijentom pora e_0 . Uvrštavanjem u jednadžbu (3.2) dobiven je parametar relativne zbijenosti D_r .



Slika 4.4: Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S90F10 $D_r=73\%$: (a) dijagram posmičnog naprezanja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog naprezanja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog naprezanja

Jedan od tih pokusa je i ispitivanje na Dravskom pijesku sa 10% kaolina za $Dr=73\%$. Na Slici 4.4 (a) za normalno naprezanje od 10 i 25 kPa krivulja ima slabije izraženu zaobljenost dok za normalno naprezanje od 50 kPa krivulja ima jasnije izraženo dostizanje vršnog naprezanja od 37 kPa. Za taj iznos naprezanja postignut je horizontalni pomak od 10-tak mm i rezidualno nešto niže vrijednosti iznosa 36 kPa. Krivulja vršnog posmičnog naprezanja za 50 kPa normalnog, pokazuje očekivano ponašanje na Slici 4.4 (a) i (b), dok u volumnim promjenama Slika 4.4 (c) i (d) odstupa od predviđenih vrijednosti i odbacuje se. Vršna posmična naprezanja za 10 i 25 kPa normalnog naprezanja, iznose 8 i 17 kPa pri horizontalnim pomacima od 10 i 9 mm. Rezidualna naprezanja iznose za 10 kPa 8 kPa, a za 25 kPa 16 kPa.

Što se tiče kohezije i kuta unutarnjeg trenja, na Slici 4.4 (b) očitane su vrijednosti: za koheziju pri rezidualnom stanju 1.07 kPa i kut unutarnjeg trenja 34.42° , za koheziju pri kritičnom stanju 1.15 kPa i kut unutarnjeg trenja 35.03° . Pravci čvrstoće pokazuju približnu paralelnost.

Na Slici 4.4 (c) krivulje za 10 i 25 kPa normalnog naprezanja, ukazuju na postupan rast vertikalnih i horizontalnih pomaka odnosno volumno smanjenje. S obzirom na odstupanje vrijednosti crvene krivulje, za 50 kPa normalnog naprezanja, na Slici 4.4 (c) i (d) njene vrijednosti se izbacuju zbog različitog volumnog ponašanja od preostale dvije krivulje koje su dosta sličnije.

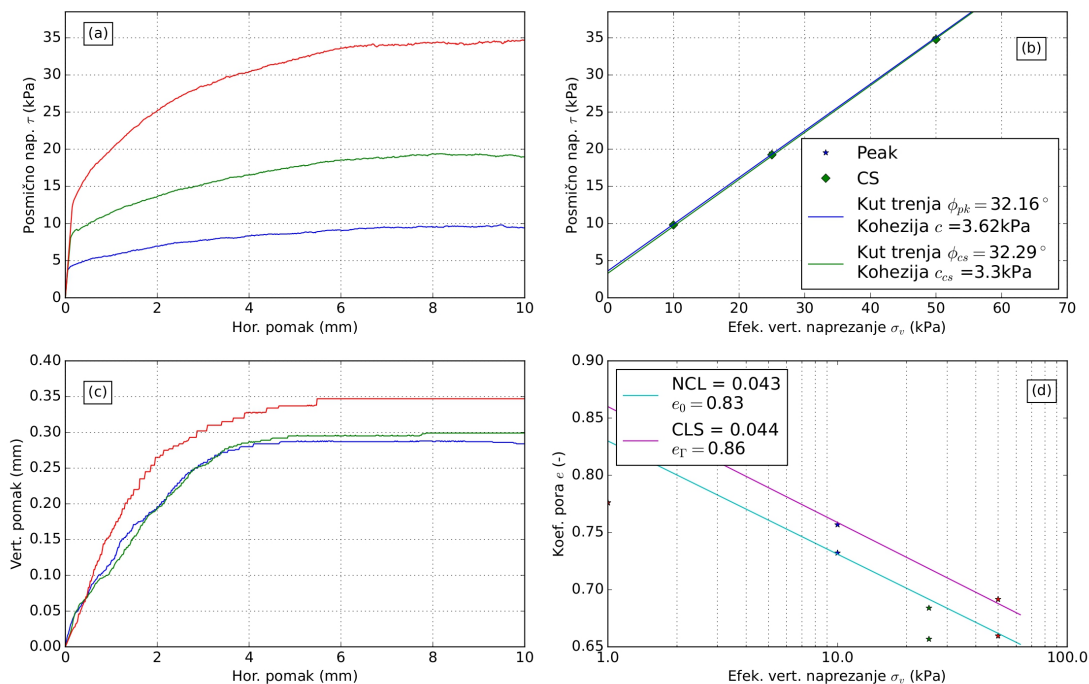
Na Slici 4.4 (d) linije NCL i CSL ne pokazuju paralelnost. Nagib normalne konsolidacijske linije je 0.016 za početni koeficijent pora od 0.730, a nagib kritične konsolidacijske linije 0.008 i početni koeficijent pora je 0.770. Kao ulazni parametar u proračunu za početni koeficijent pora vrijedio je iznos od 0.776.

4.5 Rezultati za Dravski pijesak sa 15% kaolina

Slika 4.5 prikazuje posljednje rezultate za ispitivanje Dravskog pijeska sa 15% kaolina za zbijenost od $Dr=74\%$.

Na Slici 4.5 (a) sve tri krivulje pokazuju slično ponašanje, vidljivo izražen rast koji prelazi u zakrivljenost i postupno povećanje. Zbog toga slabije je izražena razlika između vršnog i rezidualnog posmičnog naprezanja pa su vrijednosti očitane iz Slike 4.5 (b).

Na Slici 4.5 (b) prikazan je odnos efektivnog normalnog naprezanja i posmičnog naprezanja. Vrijednosti za vršno i rezidualno posmično naprezanje se preklapaju stoga su očitane jednake vrijednosti za oba stanja naprezanja: za 50 kPa normalnog naprezanja posmično iznosi 35 kPa, za 25 kPa normalnog naprezanja posmično iznosi 19 kPa i za 10 kPa normalnog naprezanja posmično iznosi 10 kPa. Pri kritičnom stanju naprezanja parametri čvrstoće imaju vrijednosti: $c=3.30$ kPa i $\phi=32.29^\circ$, a pri vršnom: $c=3.62$ kPa i $\phi=32.16^\circ$.



Slika 4.5: Rezultati za Dravski pijesak oznake uzorka S85F15 $D_r=74\%$: (a) dijagram posmičnog napreznja i horizontalnog pomaka, (b) dijagram posmičnog i efektivnog vertikalnog napreznja, (c) dijagram vertikalnog i horizontalnog pomaka, (d) dijagram koeficijenta pora i efektivnog vertikalnog napreznja

Slika 4.5 (c) prikazuje odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka. Ukazuje na stepenast rast do vršnog stanja napreznja nakon čega su vrijednosti većinom konstantne i vodoravne. Također se može vidjeti da je došlo do povećanja volumena uzorka.

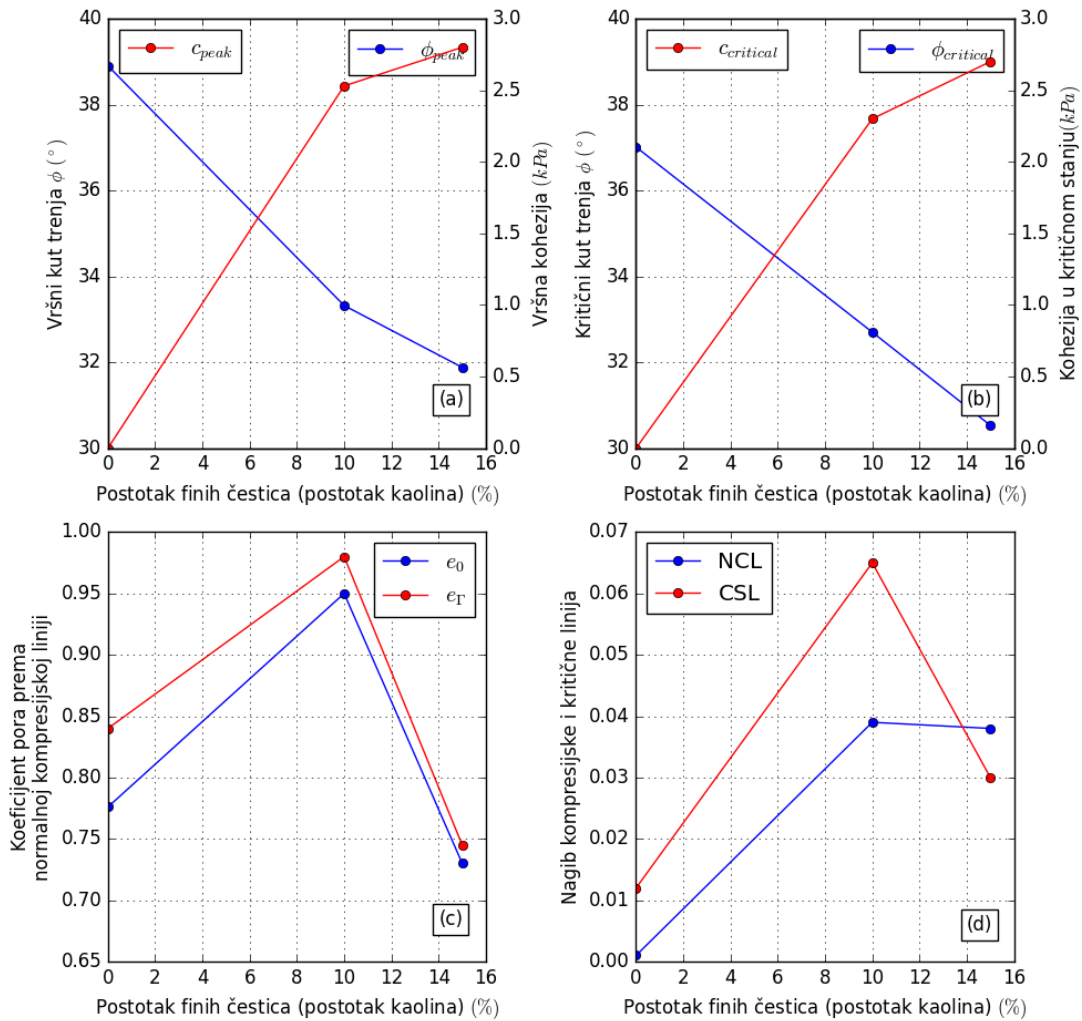
Slika 4.5 (d) prikazuje odnos koeficijenta pora i efektivnog normalnog napreznja pokazuje paralelnost oba prvca čvrstoće pri vršnom i rezidualnom stanju napreznja. Nagib NCL linije iznosi 0.043 a početni koeficijent pora 0.830. Nagib CSL linije iznosi 0.044 a početni koeficijent pora 0.860. Kao ulazni parametar za početni koeficijent pora vrijedio je iznos od 0.776.

4.6 Usporedba rezultata parametara čvrstoće i nagiba normalne kompresijske i kritične linije

U nastavku teksta opisana je međusobna usporedba dva seta dijagrama koji pokazuju kako se parametri čvrstoće, koeficijent pora i nagib kompresijske i kritične linije ponašaju s obzirom na porast udjela finih čestica.

Rezultati koji se uspoređuju su rezultati svih pet pokusa (Potpoglavlja 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5) podijeljenih na dva seta dijagrama Slika 4.6 i Slika 4.7 prema njihovoj odgovarajućoj referentnoj vrijednosti: (i) prema $D_r=50\%$ i (ii) prema $e_0 = 0,776$. S obzirom

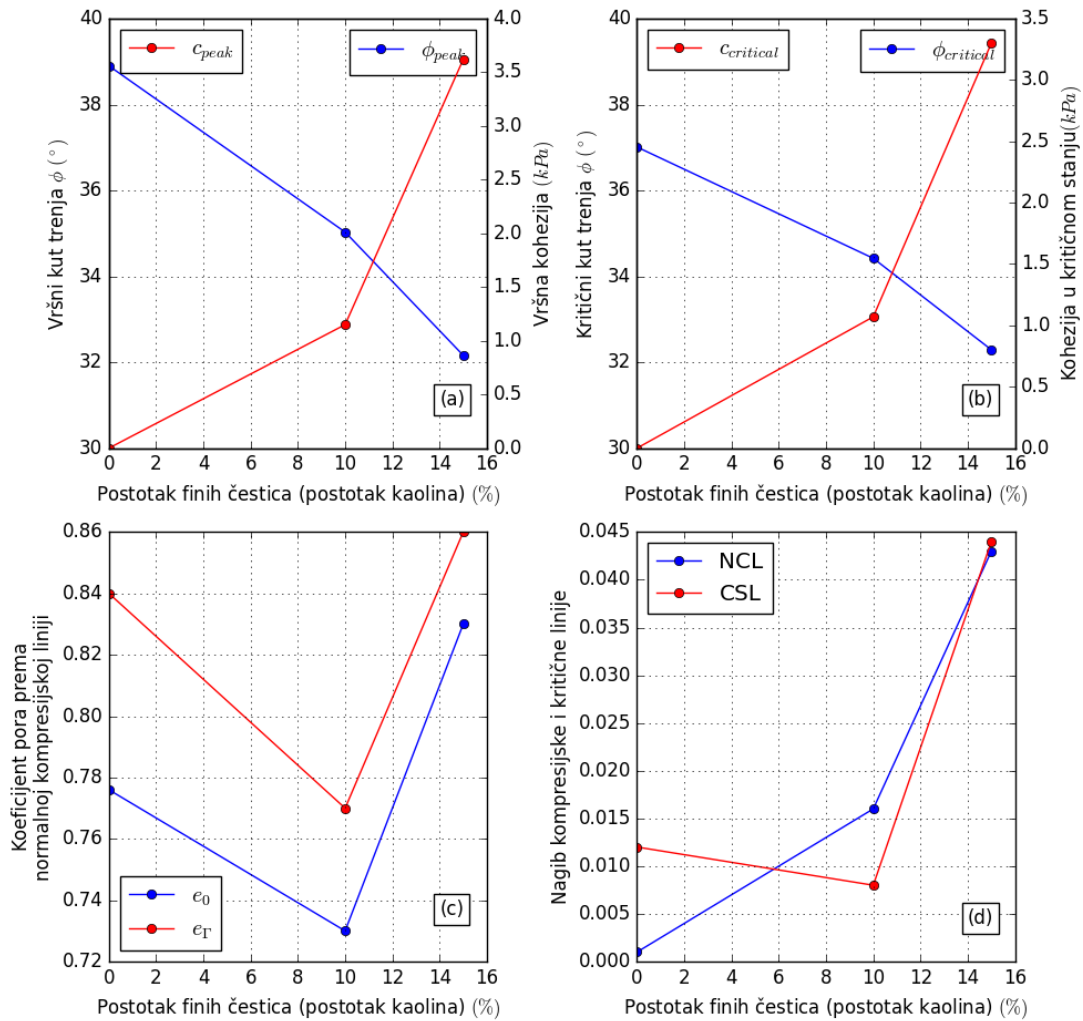
referentna relativna zbijenost $D_r = 50\%$



Slika 4.6: Rezultati za referentnu vrijednost D_r : (a) dijagram odnosa ϕ_p i c'_p sa postotkom čestica kaolina, (b) dijagram odnosa ϕ_c i c'_c sa postotkom čestica kaolina, (c) dijagram odnosa koeficijenta pora (prema NCL) sa postotkom čestica kaolina i (d) dijagram odnosa nagiba NCL i CSL sa postotkom čestica kaolina

na to, prvi set dijagrama sadrži sveukupne podatke za referentnu relativnu zbijenost $D_r=50\%$, a drugi set za referentni relativni koeficijent pora $e_0 = 0.776$. Ono što je zajedničko i jednako u rezultatima oba dijagrama jesu rezultati čistog Dravskog pijeska čiji uzorak sadrži obje reference. Setovi se sastoje od: dijagrama odnosa kuta trenja i kohezije sa postotkom čestica kaolina pri vršnoj čvrstoći (a) i pri kritičnom stanju (b), (c) dijagrama odnosa koeficijenta pora (prema normalnoj kompresijskoj liniji) sa postotkom čestica kaolina i (d) dijagrama odnosa nagiba kompresijske i kritične linije sa postotkom čestica kaolina.

Na Slici 4.6 (a) apcisu predstavlja postotak finih čestica a ordinatu dvije vrijednosti: vršni kuta trenja i vršna kohezija. Vidljivo je da sa porastom gline od 0% prema 10% te do 15% dolazi do rasta vrijednosti kohezije a do opadanja vrijednosti kuta trenja.



Slika 4.7: Rezultati za referentnu vrijednost e_0 : (a) dijagram odnosa ϕ_p i c'_p sa postotkom čestica kaolina, (b) dijagram odnosa ϕ_c i c'_c sa postotkom čestica kaolina, (c) dijagram odnosa koeficijenta pora (prema NCL) sa postotkom čestica kaolina i (d) dijagram odnosa nagiba NCL i CSL sa postotkom čestica kaolina

Slika 4.6 (b) prikazuje rezultate pri kritičnom stanju kuta trenja i kohezije na isti način kako je to prikazano na Slici 4.6 (a). Na sličan način sa porastom udjela gline dolazi do rasta kohezije a smanjenja kuta trenja. Na Slici 4.6 (c) apcisu predstavlja postotak finih čestica a ordinatu koeficijent pora prema normalnoj kompresijskoj liniji (NCL). Prikazani su rezultati za početni koeficijent pora e_0 i kritični koeficijent pora e_{Γ} . Obje linije su približno paralelne i prikazuju rast vrijednosti koeficijenta pora sa rastom udjela gline do 10%, nakon čega slijedi pad sa daljnjim rastom udjela gline do 15%. Također na Slici 4.6 (d) nagibi normalne kompresijske i kritične linije rastu do 10% čestica gline a sa daljnjim povećanjem na 15% opadaju.

Slika 4.7 prikazuje rezultate za referentni koeficijent pora. Dijagrami su prikazani na isti način kao u prethodno opisanom setu prikaza. Na Slici 4.7 (a) i (b) vidljiv je

porast kohezije sa porastom čestica gline i smanjenje kuta unutarnjeg trenja za vršno i kritično stanje. Na Slici 4.7 (c) sa porastom gline na 10% dolazi do smanjenja koeficijenta pora a sa povećanjem čestica gline sa 10% na 15% koeficijenti pora rastu. Slika 4.7 (d) ukazuje na različito ponašanje materijala za normalno kompresijsko stanje i kritično stanje. Porastom gline sa 0% na 10% NCL raste dok CSL opada, a daljnjim povećanjem do 15% obje linije pokazuju rast.

Rezultati na dijagramima su očitani i u dvije sumarne tablice 4.1 i 4.2 koje će također biti opisane u nastavku. Rezultati dobiveni dijagramom odnosa posmičnog i efektivnog normalnog naprezanja za sve mješavine u provedenim laboratorijskim ispitivanjima prikazani su Tablicom 4.1, dok rezultati dobiveni dijagramom odnosa koeficijenta pora i efektivnog normalnog naprezanja prikazani su Tablicom 4.2.

Tablica 4.1: Sumarna tablica uzoraka sa parametrima čvrstoće

| Oznaka uzorka | Referentni parametar | Postotak gline, F (%) | Vršni kut trenja, ϕ_p (°) | Kritični kut trenja, ϕ_c (°) | Vršna kohezija, c'_p (kPa) | Kritična kohezija, c'_c (kPa) |
|---------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| S100F0 | D_r | 0 | 38,90 | 37,01 | 0 | 0 |
| S90F10 | D_r | 10 | 33,32 | 32,70 | 2,53 | 2,30 |
| S85F15 | D_r | 15 | 31,88 | 30,53 | 2,80 | 2,70 |
| S100F0 | e_0 | 0 | 38,90 | 37,01 | 0 | 0 |
| S90F10 | e_0 | 10 | 35,03 | 34,42 | 1,15 | 1,07 |
| S85F15 | e_0 | 15 | 32,16 | 32,29 | 3,62 | 3,30 |

Tablica 4.2: Sumarna tablica uzoraka sa koeficijentima pora prema normalnoj kompresijskoj (NCL) i kritičnoj liniji (CSL) i njihovi nagibi

| Oznaka uzorka | Referentni parametar | Postotak gline, F (%) | e_0 | e_Γ | NCL | CSL |
|---------------|----------------------|-------------------------|-------|------------|-------|-------|
| S100F0 | D_r | 0 | 0,776 | 0,840 | 0,001 | 0,012 |
| S90F10 | D_r | 10 | 0,950 | 0,980 | 0,390 | 0,065 |
| S85F15 | D_r | 15 | 0,730 | 0,745 | 0,038 | 0,030 |
| S100F0 | e_0 | 0 | 0,776 | 0,840 | 0,001 | 0,012 |
| S90F10 | e_0 | 10 | 0,730 | 0,770 | 0,016 | 0,008 |
| S85F15 | e_0 | 15 | 0,830 | 0,860 | 0,043 | 0,044 |

Kao što je već spomenuto, uzorak čistog Dravskog pijeska oznake S100F0 korišten je kao referentni materijal u usporedbi sa ostalim uzorcima. Nakon što su dobiveni referentni rezultati uzorka bez primjesa gline provedeno je ispitivanje na Dravskom pijesku s 10% kaolina za referencu $D_r=50\%$ te se primjećuje smanjenje kuta unutarnjeg trenja u odnosu na Dravski pijesak bez primjesa gline. Također došlo je do povećanja kohezije zbog udjela gline. Nakon toga provedeno je ispitivanje s 15% kaolina za re-

ferencu $Dr=50\%$. Rezultati pokazuju daljnje smanjenje vršnog i kritičnog kuta trenja u odnosu na prethodna dva rezultata, a povećanje vršne i kritične kohezije sa povećanjem udjela gline od 10% na 15%. Zatim su ispitani i opisani rezultati za iste tipove uzoraka i referentnu vrijednost koeficijenta pora e_o . Ispitivanje uzorka Dravskog pijeska s 10% kaolina, u usporedbi sa uzorkom čistog Dravskog pijeska, pokazuje smanjenje kuta trenja i porast kohezije zbog porasta udjela gline. Posljednje ispitivanje provedeno je s 15% kaolina za referencu $e_0=0.776$. Također pokazuje daljnje smanjenje kuta unutarnjeg trenja i porast kohezije sa povećanjem udjela gline za 5%.

Rezultati pokazuju porast koeficijenata pora i nagiba NCL i CSL linija porastom gline za 10% za $Dr=50\%$. Za uzorak oznake S85F15 sa porastom udjela gline za 5% uslijedilo je opadanje vrijednosti koeficijenata pora i nagiba linija. Koeficijenti pora e_0 i e_Γ pokazuju najmanje vrijednosti od sva tri uzorka zajedno, dok nagibi normalne kompresijske i kritične linije su manji od prethodnog uzorka oznake S90F10 a veći od referentnog uzorka oznake S100F0. Zatim su ispitani i opisani rezultati za iste tipove uzoraka i referentnu vrijednost koeficijenta pora e_o . Ispitivanje uzorka Dravskog pijeska s 10% kaolina, u usporedbi sa uzorkom čistog Dravskog pijeska, pokazuje smanjenje e_o i nagiba kritične linije CSL a povećanje e_Γ i nagiba normalne kompresijske linije sa porastom kohezije za 10%. Posljednji uzorak oznake S85F15 za referentnu vrijednost $e_0=0.776$ pokazuje porast sva četiri parametra sa povećanjem gline od 10% do 15%.

5. DISKUSIJA

Termin *glina* sadržava dva značenja: specifični minerali zvani *minerali glina* i tlo koje sadrži minerale gline. U geotehničkom inženjerstvu se pod terminom *glina* misli na tlo koje sadrži dovoljno minerala gline da utječe na ponašanje i inženjerska svojstva tla. Čestice minerala imaju jaka elektrokemijska svojstva i kao takva imaju velik utjecaj na tlo već kod 5% gline. Prema istraživanju, ukoliko bi se u uzorku pješčanog tla nalazilo između 25% i 35% gline, pijesak bi plutao u matrici gline te jako malo pridonosio posmičnoj čvrstoći odnosno parametrima čvrstoće [5].

Ispitivanja su provedena na pijesku s različitim udjelima glinenih čestica kako bi se na koji način glina utječu na parametre čvrstoće, a samim time i na posmičnu čvrstoću pijeska. Kod svih uzoraka uslijed povećanja udjela gline dolazi do povećanja kohezije a smanjenja kuta unutarnjeg trenja. Najveća vrijednost kohezije c'_p i c'_c zabilježena je kod uzorka s 15% gline za $e_o=0.776$ s obzirom na najveći postotak glinenih čestica naspram ostalih uzoraka. Najmanju vrijednost kohezije ima uzorak s "čistim" Dravskim pijeskom s obzirom na to da nema nikako glinenih čestica. Od uzoraka koji sadrže glinu najmanju koheziju c'_p i c'_c ima uzorak s 10% gline za $e_o=0.776$. Najveći kut unutarnjeg trenja ima uzorak bez primjesa gline tj. "čisti" Dravski pijesak. Najveću vrijednost koeficijenta pora e_o i e_Γ ima uzorak s 10% gline za $Dr=50\%$, a najmanju vrijednost uzorak s 15% gline za $Dr=50\%$. Najveći nagib NCL linije od 0.043 ima uzorak s 15% gline za $e_o=0.776$, a najmanji nagib ima uzorak bez primjesa gline. Uzorak s najvećim nagibom CSL linije od 0.065 je uzorak s 10% gline za $Dr=50\%$, a najmanji nagib od 0.008 ima uzorak s 10% gline za $e_o=0.776$.

Ispitivanje koje su proveli Rathnam i suradnici [1] pokazuje da se sa povećanjem glinenih čestica povećavaju oboje i kut trenja i kohezija, a sa povećanjem vlažnosti povećava se kohezija.

Ispitivanjima koja su proveli Balaban i suradnici [2] dobivene su vršne vrijednosti kohezije i kuta unutarnjeg trenja: za 90% udjela pijeska kohezija u uzorku iznosi približno $c=2\text{kPa}$ što je između vrijednosti dobivenih u ovom završnom radu $c=1.15\text{kPa}$ i 2.53kPa . To nije isti slučaj i za udio gline od 15% gdje je značajnija razlika u rezultatima $c=7\text{kPa}$ od $c=2.80$ i 3.62kPa . Sa povećanjem udjela glinenih čestica sa 10% na 15% vrijednosti za ϕ su pale sa 45° na 43° . Ovi podatci potvrđuju da se sa porastom udjela gline povećava kohezija a smanjuje kut unutarnjeg trenja. Uzorci su ugrađivani

uz optimalnu vlažnost i sa maksimalnom suhom gustoćom ρ_D odnosno ugrađeni su sa koeficijentima pora za 10% gline $e_0=0.494$ i za 15% $e_0=0.387$. Sa povećanjem udjela gline sa 10% na 15% koeficijent pora se smanjio zbog ispunjenja pora sitnim česticama, a optimalna vlažnost se smanjila s obzirom da je koeficijent pora manji pa je potrebno manje vode da se tlo zbije. U ovom završnom radu se sa povećanjem gline morala povećavati i vlažnost da bi se sve veći udio gline mogao aktivirati u mješavini pa nije dobiven potpuno isti slučaj ispitivanja. Međutim sa povećanjem gline sa 10% na 15%, u ovom radu, koeficijent pora se smanjio za zbijenost od $D_r=50\%$.

Za ispitivanja koje su proveli Dafalla i suradnici [3], sa porastom glinenih čestica i vlažnosti kut unutarnjeg trenja opada, dok kohezija sa porastom gline raste, a sa porastom vlažnosti opada. Rezultati istraživanja dobiveni su za srednja do velika efektivna naprezanja, no unatoč tomu, trend smanjenja kuta trenja te povećanja kohezije sa rastom glinenih čestica isti je kao i u ovom završnom radu.

6. ZAKLJUČAK

Uređaj za izravno smicanje je laboratorijski uređaj za ispitivanje čvrstoće tla na smicanje u dreniranim uvjetima. Služi za određivanje parametara čvrstoće tla: kuta unutarnjeg trenja (ϕ) i kohezije (c). Tlo se u prirodi sastoji od različitog masenog udjela krupnih i sitnih čestica i različitog mineralnog sastava sitnih čestica. S obzirom na navedeno, zbog postizanja stabilnosti i nosivosti građevina, nužno je imati uvid u utjecaj sitnih čestica na čvrstoću krupnozrnastih čestica.

Ovim završnim radom, dobiven je utjecaj gline kaolina na čvrstoću Dravskog pijeska. Svaki uzorak ugrađen je sa količinom vode prema postotku glinenih čestica i njima odgovarajućoj granici tečenja. Korišteni postotak vlažnosti omogućavao je da čestice gline imaju dovoljnu količinu vode u uzorku da se aktiviraju. Glina je svojim porastom povećavala koheziju u mješavinama a smanjivala kut unutarnjeg trenja. Razlog tomu je to što se povećavanjem kohezije čestice jače povezuju i postaju sve manje slobodne na preraspodijelu i stvaranje sile trenja. Uzorak sa najvećim udjelom gline od 15% imao je najveću koheziju a najmanji kut unutarnjeg trenja. Iz istog razloga, "čisti" Dravski pijesak bez ikakvog utjecaja kohezije među krupnozrnastim česticama, ima veću sklonost preraspodijeli čestica pod djelovanjem opterećenja.

Najveću posmičnu čvrstoću ima uzorak "čistog" Dravskog pijeska gdje nema utjecaja gline, a kako se udio gline povećavao na 10% pa na 15% posmična čvrstoća se smanjivala bez obzira na referentnu vrijednost.

Ukoliko usporedimo posmičnu čvrstoću po referentnim vrijednostima D_r i e_0 i udjelu gline dobijemo sljedeće: uzorci sa 10% gline imaju veću čvrstoću za referentnu vrijednost $D_r=50\%$ nego za početni koeficijent pora $e_0=0.776$, dok uzorci sa 15% gline imaju veću čvrstoću za referentnu vrijednost $e_0=0.776$ nego za $D_r=50\%$.

S obzirom na Holtz-ovu tezu dokazano je da pijesci ili šljunci ne doprinose puno posmičnoj čvrstoći, a glina povećanjem parametra kohezije povećava posmičnu čvrstoću. Na temelju toga, najpovoljnija tla za izgradnju objekata su upravo mješavine krupnozrnastih i sitnozrnastih frakcija.

Ukratko, radom je potvrđeno da:

- glina ima znatan utjecaj na ponašanje pijeska
- pri konstantnoj početnoj relativnoj zbijenosti, vršni kut trenja se smanjuje za približno $\approx 2\%$ za maseni udio glinenih čestica u odnosu na kut trenja za čisti pijesak dok se kohezija povećava za približno 21%. Isto je uočeno kod rezultata sa konstantnim početnim koeficijentom pora, uz nešto manji prirast kohezije (približno 19.5%)
- pri konstantnoj početnoj relativnoj zbijenosti, kritični kut trenja se smanjuje za približno $\approx 2\%$ za maseni udio glinenih čestica u odnosu na kritični kut trenja za čisti pijesak dok se kohezija povećava za približno 20% dok se pri konstantnom početnom koeficijentu pora, kritični kut trenja smanjuje za približno $\approx 1.3\%$ za maseni udio glinenih čestica u odnosu na kritični kut trenja za čisti pijesak, a kohezija povećava za približno 18.5%.

Izneseni zaključci vrijede za pokuse pri vertikalnim naprežanjima do 50 kPa.

LITERATURA

- [1] Rathnam, C Abhishek, Suresh, K, and Uday, DR.K V. Shear Strength Behaviour of Sand Clay Mixture. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering*, 4(6):4658–4666, 2015. doi: 10.15680/IJIRSET.2015.0406117.
- [2] Balaban, Eren, Šmejda, Aleš, and Onur, Mehmet Inanç. An experimental study on shear strength behavior of soils under low confining pressure. *World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, (2012):1–8, 2019. ISSN 23715294. doi: 10.11159/icgre19.110.
- [3] Dafalla, Muawia A. Effects of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures. 2013, 2013. URL <https://doi.org/10.1155/2013/562726>.
- [4] Jagodnik, V. *Eksperimentalna mehanika tla*. 4.1.0 edition, 2023.
- [5] Holtz RD, Kovacs WD, Sheahan TC. *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Pearsons, 2011.
- [6] Atkinson, J. *The Mechanics of Soils and Foundations*. CRC Press, 2017.
- [7] Yin, Kexin, Fauchille, Anne-Laure, Di Filippo, Eugenia, Kotronis, Panagiotis, and Sciarra, Giulio. A review of sand–clay mixture and soil–structure interface direct shear test. *Geotechnics*, 1(2):260–306, 2021. ISSN 2673-7094. doi: 10.3390/geotechnics1020014. URL <https://www.mdpi.com/2673-7094/1/2/14>.
- [8] Cabalar, Ali Firat. The effects of fines on the behaviour of a sand mixture. *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(1):91–100, September 2010. doi: 10.1007/s10706-010-9355-z. URL <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9355-z>.
- [9] Germaine, John T. and Germaine, Amy V. *Geotechnical Laboratory Measurements for Engineers*. Wiley, 2009. doi: 10.1002/9780470548790.
- [10] Fratta, D., Aguetant, J., and Roussel-Smith, L. *Introduction to Soil Mechanics Laboratory Testing*. CRC Press, 2007.
- [11] Nonveiller, E. *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Školska knjiga Zagreb, 1981.

- [12] de Blasio, F.V. *Introduction to the Physics of Landslides: Lecture notes on the dynamics of mass wasting*. Springer Netherlands, 2011.
- [13] Terzaghi, K., Peck, R.B., and Mesri, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, 1996.
- [14] ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Technical report, 2011.
- [15] BS 1377-8. Methods of test for soils for civil engineering purposes. Shear strength tests (effective stress). Technical report, 2015.
- [16] ISO/TS 17892-10. Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil – Part 10: Direct shear tests). Technical report, 2004.
- [17] Ladd, R.S. Preparing test specimens using under compaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1):16–23, 1978. ISSN 01496115. doi: 10.1520/GTJ10364J.
- [18] Prodan, Martina Vivoda, Peranić, Josip, Pajalić, Sara, Jagodnik, Vedran, Čeh, Nina, and Arbanas, Željko. Mechanism of rainfall induced landslides in small-scale models built of different materials.
- [19] Pajalić, Sara, Peranić, Josip, Maksimović, Sandra, Čeh, Nina, Jagodnik, Vedran, and Arbanas, Željko. Monitoring and Data Analysis in Small-Scale Landslide Physical Model. 11(11):5040. ISSN 2076-3417. doi: 10.3390/app11115040. URL <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5040>.