

# Cikličko troosno ispitivanje umjetne mješavine pijeska i gline pri malim efektivnim naprežanjima

---

**Katalinić, Duje**

**Master's thesis / Diplomski 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:157:421951>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-28**



*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**

**Diplomski studij  
Geotehnika  
Dinamika tla**

**Duje Katalinić  
0114031029**

**Cikličko troosno ispitivanje umjetne mješavine pijeska i gline pri  
malim efektivnim naprežanjima**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 18. rujna 2023.**



## **IZJAVA**

Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/mentoricom 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.

---

Duje Katalinić

U Rijeci, 18. rujna 2023.



## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svima koji su bili uz mene u posljednjih 5 godina i poticali me da završim fakultet. Posebno se zahvaljujem bliskom krug prijatelja, a najveću zahvalu za moj uspjeh dobivaju članovi moje obitelji sa informatičkim zaleđem.

## SAŽETAK

Istraživanje ponašanja tla jedna je od najvažnijih stavki prilikom izvedbe građevine. Rezultati istraživanja nam služe kako bi dobili uvid u karakteristike materijala, njegovog ponašanja prilikom nanošenja opterećenja kao i mogućnost pojave likvefakcije. Unutar ovog istraživanja provedeno je ukupno 10 pokusa koji su korišteni u evaluaciji cikličkog ponašanja. Za ispitivanje koristili su se uzorci napravljeni od umjetne mješavine pijeska i kaolina u masenom omjeru 85% - 15%. Ciklička ispitivanja provedena su pomoću dinamičkog troosnog uređaja. Provedene su dvije vrste ispitivanja, ispitivanje pri kontroliranom naprezanja te ispitivanja pri kontroliranoj deformaciji. Kod ispitivanja, uzorci su bili podvrgnuti različitim efektivnim opterećenjem, a ono je iznosilo 25.0 kPa, 50.0 kPa i 100.0 kPa. Kod kontroliranog naprezanja ispitivanje se razlikovalo po cikličkom odnosu naprezanja, CSR. CSR pri kojim su uzorci bili opterećeni, dijelio se na vrijednosti 0.01, 0.05, 0.1. Svi uzorci imali su relativnu zbijenost od 80%. Kao rezultat istraživanja prikazani su karakteristični dijagrami degradacije čvrstoće kao i utjecaja prirasta pornog pritiska sa brojem ciklusa. U analizi rezultata korišten je analitički model predložen u literaturi. **Ključne riječi: troosno cikličko smicanje, CSR, likvefakcija, kontrolirano naprezanje, kontrolirani pritisak**

## ABSTRACT

Investigation of soil behavior is one of the most important points during construction. The results of the research serve us to gain insight into the characteristics of the material, its behavior when applying load as well as the possibility of liquefaction. Within this work, a total of 12 experiments were conducted, of which only 10 were used in the evaluation. During the tests, samples of artificial mixtures were used, which were tested with cyclic load within triaxial device, during triaxial shear. There were performed two types of tests, the stress controlled test, with only 4 tested samples and strain controlled test, that has a total of 6 tested samples.

During the tests, the samples were subjected to different effective loads, 25.0 kPa, 50.0 kPa and 100.0 kPa. Stress controlled tests were varied by Cyclic Stress Ratio (CSR) and effective loads. Cyclic Stress Ratio with which the samples were loaded was divided into values 0.01, 0.05, 0.1. All samples, except for one, had a relative compaction of 80%, but the first experiment was compacted at a relative compaction of 50%.

**Keywords: Triaxial cyclic shear, CSR, liquefaction, stress controlled test, strain controlled test**



# Sadržaj

<b>Popis slika</b>	<b>iv</b>
<b>Popis tablica</b>	<b>v</b>
<b>1 Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Karakteristike materijala</b>	<b>7</b>
2.1 Općenito o materijalu . . . . .	7
2.2 Cikličke značajke materijala . . . . .	11
2.3 Cikličko ponašanje pijeska . . . . .	17
2.4 Klasifikacija materijala . . . . .	21
2.4.1 Granulometrijska krivulja . . . . .	21
2.4.2 Specifična gustoća . . . . .	26
2.4.3 Relativna zbijenost . . . . .	26
<b>3 Ispitivanje pjeskovitog materijala pri malim efektivnim napreznjima i sa malim confining stress</b>	<b>27</b>
<b>4 Metodologija</b>	<b>29</b>
4.1 Općenito o uređaju . . . . .	29
4.2 Priprema uzorka . . . . .	31
4.2.1 Postupak ugradnje . . . . .	32
4.2.2 Postupak ispitivanja . . . . .	38
4.2.3 Saturacija . . . . .	39
4.2.4 Konsolidacija . . . . .	40
4.2.5 Pokusi kontroliranih napreznja i deformacija . . . . .	40
<b>5 Rezultati laboratorijskih pokusa</b>	<b>41</b>
5.1 Ciklički troosni pokusi sa kontroliranom relativnom deformacijom . . . .	41
5.1.1 Odnos relativne cikličke posmične deformacije $\gamma$ i porasta por-nog pritiska $r_u$ . . . . .	42
5.1.2 Odnos indeksa degradacije $\delta$ i broja ciklusa $N$ . . . . .	43

5.1.3	Odnos porasta pornog pritiska $r_u$ i degradacije $\delta$ . . . . .	44
5.2	Ciklički troosni pokusi sa kontroliranim devijatorom naprezanja . . . . .	45
5.2.1	Odnos omjera trenutnog ciklusa sa ciklusom likvefakcije $N/N_L$ i porasta pornog pritiska $r_u$ . . . . .	46
5.3	Analitički modeli prirasta pornog pritiska . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Diskusija</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Zaključak</b>	<b>51</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>

# Popis slika

1.1	Vrste razmicanja tektonskih ploča, [1] . . . . .	2
1.2	Prikaz prolaska seizmičkog vala u druge materijale, modificirano prema [2] . . . . .	3
1.3	Prikaz seizmičkih valova, [3] . . . . .	4
2.1	Fazni dijagram, modificirano prema [4] . . . . .	8
2.2	Stanja konzistencije i granice vlažnosti [5] . . . . .	9
2.3	Podjela tla prema veličini, modificirano prema [6] . . . . .	9
2.4	Prikaz nekoherentnih i koherentnih tla [7] . . . . .	10
2.5	Skica pomaka čestica: (a) rahlo stanje, (b) zbijeno stanje, prema [8] . . . . .	11
2.6	Tipična $\tau - \gamma$ petlja prvog ciklusa, modificirano prema [9] . . . . .	13
2.7	Prikaz prvog ciklusa i N-tog ciklusa pokusa sa kontroliranom cikličkom posmičnom deformacijom, modificirano prema [9] . . . . .	14
2.8	Prikaz idealizirane krivulje, modificirano po Vučetiću [9] . . . . .	15
2.9	Prikaz izračuna površine petlje, modificirano prema [10] . . . . .	16
2.10	Prikaz utjecaja broja ciklusa i amplitude na maksimalan posmični modul [11], modificirano prema [12] . . . . .	17
2.11	Odnos pornog pritiska i broja ciklusa smicanja pri troosnom smicanju [11], modificirano prema [13] . . . . .	18
2.12	Odnos stupnja naprezanja i amplitude cikličke posmične deformacije [11], modificirano prema [13] . . . . .	19
2.13	Primjer cikličke deformacije tla [11], modificirano prema [14] . . . . .	20
2.14	Vrste granulometrijskih krivulja za nekoherentna tla . . . . .	22
2.15	Prikaz različitih veličina metalnih sita [15] . . . . .	22
2.16	Prikaz različitih veličina metalnih sita [16] . . . . .	23
2.17	Prikaz granulometrijske krivulje korištene pri u laboratorijskim pokusima . . . . .	25
4.1	Prikaz triaksialnog aparata korištenog za izvedbu pokusa . . . . .	30
4.2	Prikaz laboratorijske posude, kaolina i menzure za mjerenje količine vode . . . . .	32
4.3	Materijal nakon miješanja . . . . .	33
4.4	Latex membrana, O – ringovi, porozni kamen i porozni papir . . . . .	34

4.5	Prikaz kalupa sa cijevima za usis, pored kojeg su metalni obroč za nemještanje O - ringova i kapa za ugradnju zadnjeg sloja materijala . . . . .	35
4.6	Silika gel na lijevo i vakuumska pumpa na desno . . . . .	36
4.7	Postolje na kojem je postavljena ćelija . . . . .	37
5.1	Omjer deformacije i porasta pornog pritiska . . . . .	42
5.2	Odnos indeksa degradacije i ispitanih ciklusa . . . . .	43
5.3	Odnos porasta pornog pritiska i degradacije . . . . .	44
5.4	Odnos omjera trenutnog ciklusa sa ciklusom likvefakcije i porasta pornog pritiska . . . . .	46
5.5	Rezultati laboratorijskih pokusa pri konstantnoj deformaciji . . . . .	47

# Popis tablica

2.1	Rezultati prosijavanja . . . . .	24
4.1	Indeksi plastičnosti za ispitani materijal modificiran prema [17] . . . . .	32
4.2	Visine slojeva za zbijanje . . . . .	36
4.3	Amplitude cikličkog smicanja . . . . .	38
5.1	Aproksimacijski parametri analitičkog modela prirasta pornog pritiska .	47



# 1. UVOD

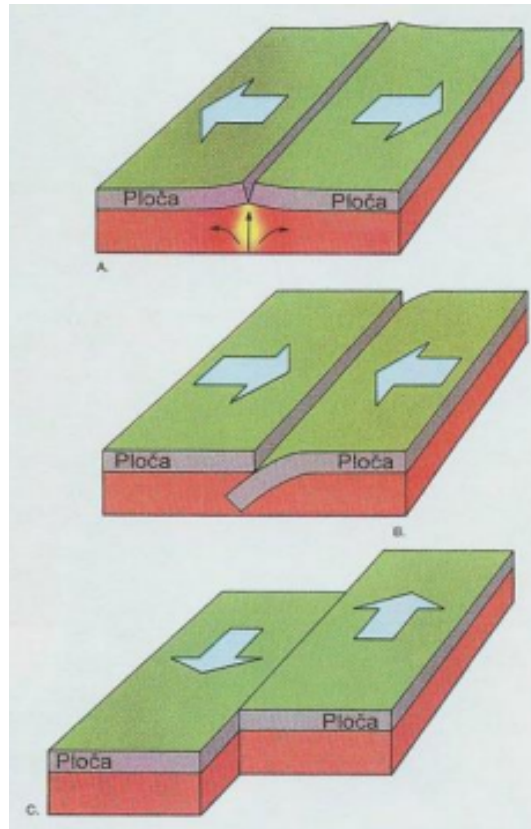
Ukoliko dođe do zanemarivanja istraživanja karakteristika tla, vjerovatnost za smanjenje sigurnosti i kvalitete konstrukcije se povećavaju. Isto tako u područjima pogodnim za pojavu potresa, uslijed iznenadnog seizmičkog pomicanja, može doći do pojave likvefakcije. Likvefakcija tla je pojava naglog gubitka čvrstoće ili krutosti rahlog tla zasićenog vodom u kojem materijal prelazi u tekuće stanje. Likvefakcija može imati kobne posljedice, a neka od njih su potonuće tla, pojave pukotine na površini, bočno ramicanje, pojava klizišta te izbacivanje vode i pijeska na površinu terena[3]. Jedni od glavnih čimbenika pojave likvefakcije su stupanj zbijenosti tla, veličina i oblik zrna materijala te stupanj zasićenosti vodom (saturacije) [18]. Tla osjetljiva na likvefakciju su nastala u doba holocena, geološke ere koja je započela prije 10 000 godina te tla koja u sastavu sadrže čestice pijeskovitih, prahovitih i šljunkovitih materijala. U osjetljiva tla isto tako spadaju i rastresita tla kao i jednoliko graduirana tla.

Ukoliko su u slabo graduiranom pijesku zrna zaobljenja, materijal će biti podložniji likvefakciji nego kod dobro graduiranog pijeska sa uglastim zrnima [18]. Glavni uzrok pojave likvefakcije je potres, iako ona može nastati i zbog drugih pobuda unutar tla

Potres podrazumijeva svako naglo podrhtavanje tla uzrokovano prolaskom seizmičkih valova kroz Zemljinu koru [19]. Potresi mogu biti izazvani erupcijama vulkana, eksplozijama, urušavanjem terena, iako uglavnom nastaju uslijed pomicanja tektonskih ploča. One se mogu razmicati na tri osnovna načina kao šta je to prikazano na Slici 1.1, a to su: razmicanje (divergentne tektonske ploče), klizanje jedne o drugu (kvergentne tektonske ploče) te kretanje jedne prema drugoj (transformne tektonske ploče). Posljedice potresa ovise o reljefu, magnitudi i lokalnom sastavu tla na kojem se potres dogodio. Ukoliko se potres dogodi na čvrstom tlu posljedice će biti manje nego ukoliko je tlo slabije, šta se može vidjeti na Slici 1.2.

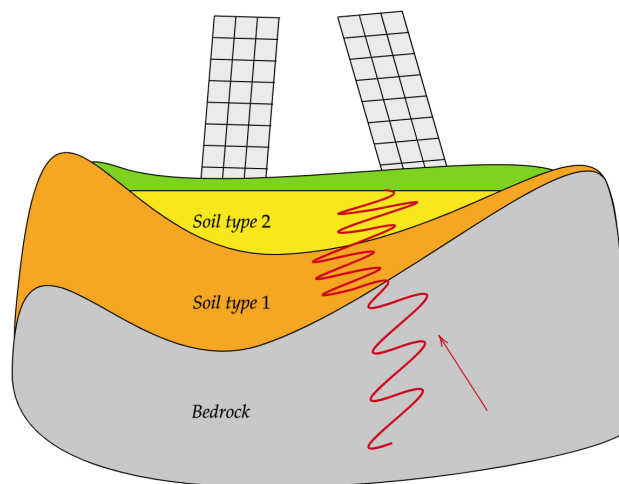
Seizmički valovi su valovi koji nastaju tijekom potresa, uslijed oslobađanja seizmičke energije. Tijekom prelaska vala u drugi materijal, energija valova se naglo mijenja, a čimbenici o kojima ovisi mijenjanje vala su: mekoća tla i stijene, debljina tla, sedimentni bazeni i topografija [20].

Seizmičke valove možemo podijeliti u dvije skupine, a to su prostorni seizmički valovi i površinski seizmički valovi. Površinske valove sačinjavaju Rayleigh-ovi i Love-ovi valovi te se kod njih energija širenja koncentrira blizu površine Zemlje, zbog čega se



Slika 1.1: Vrste razmicanja tektonskih ploča, [1]

smatraju najdestruktivnijim valovima. Nadalje, prostorni valovi se raspršuju iz žarišta prema svim smjerovima, a oni se dijele na Primarne (P valove) i Sekundarne (S valove) [21].



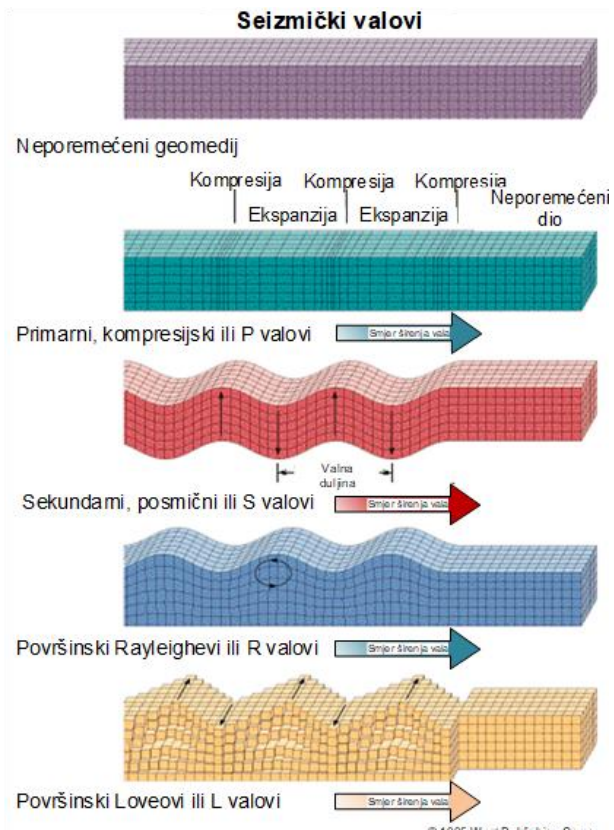
Slika 1.2: Prikaz prolaska seizmičkog vala u druge materijale, modificirano prema [2]

Primarni valovi (P-valovi) označavaju one valove koje se šire u unutrašnjosti Zemlje te imaju veliku brzinu longitudinalnog rasprostiranja. Materijal kroz koji prolazi primarni val biti će podvrgnut kompresiji uslijed cikličkom gibanju.

Sekundarni valovi (S-valovi) imaju transverzalno rasprostiranje valova, zbog čega su sporiji od prethodno opisanih P-valova. Ovakvi valovi mogu samo prolaziti kroz krute tvari, dok se ne mogu širiti kroz tekućinu .

Love-ovi valovi (L-valovi) su opasni jer se oni šire površinski u horizontalnoj ravni sa lijeva na desno. Dok su Rayleigh-ovi valovi rasprostiru eliptičnom putanjom u smjeru obrnutom od kazaljke na satu, što ujedno doprinosi dužini širenja ove vrste valova.

Primjer razornog utjecaja potresa i posljedice uzrokovane pojavom likvefakcije mogu se vidjeti na primjeru potresa na području Petrinje. Nakon seizmološkog mirovanja, koje je trajalo više od sto godina, niz potresa pogodio je Hrvatsku na području Petrinje krajem 2020. godine [22]. Najjači potres iznosio je 6,4 po Richteru, a likvefakcija se dogodila zbog naslaga pijeska koje su se zbog poplavlivanja okolnih rijeka Save, Gline i Kupe taložile godinama na tom području. Ujedno naslage pijeska su bile zasićene vodom, što je doprinijelo pojavi likvefakcije tla.



Slika 1.3: Prikaz seizmičkih valova, [3]

Važnost poznavanja karakteristika tla, kao i njegovog ponašanja prilikom djelovanja cikličkih sila na njega značajno je za procjenu cikličke nosivosti i stabilnosti tla te procjenu rizika i hazarda. Karakteristike tla se moraju odrediti prije samog početka gradnje kako bi izbjegli neželjene situacije te kako bi uvjetii za gradnju i korištenje bili osigurani.

Slijedom gore navedenog cilj diplomskog rada je provesti ispitivanja u cikličnom troosnom uređaju na umjetnim mješavinama pijeska i kaolina. Pokusi se izvode na prethodno definiranoj zbijenosti od 80%, za tri različita odnosa cikličkog naprezanja (CSR): 0.05, 0.01 i 0.1. Ovi pokusi su provedeni u nedreniranim uvjetima koristeći različita efektivna naprezanja: 25 kPa, 50 kPa i 100 kPa kako bi saznali kako se tlo ponaša pri određenom naprezanju . Ukupno su provedena 12 pokusa, od kojih se samo 10 koristili pri evaluaciji.



# 2. KARAKTERISTIKE MATERIJALA

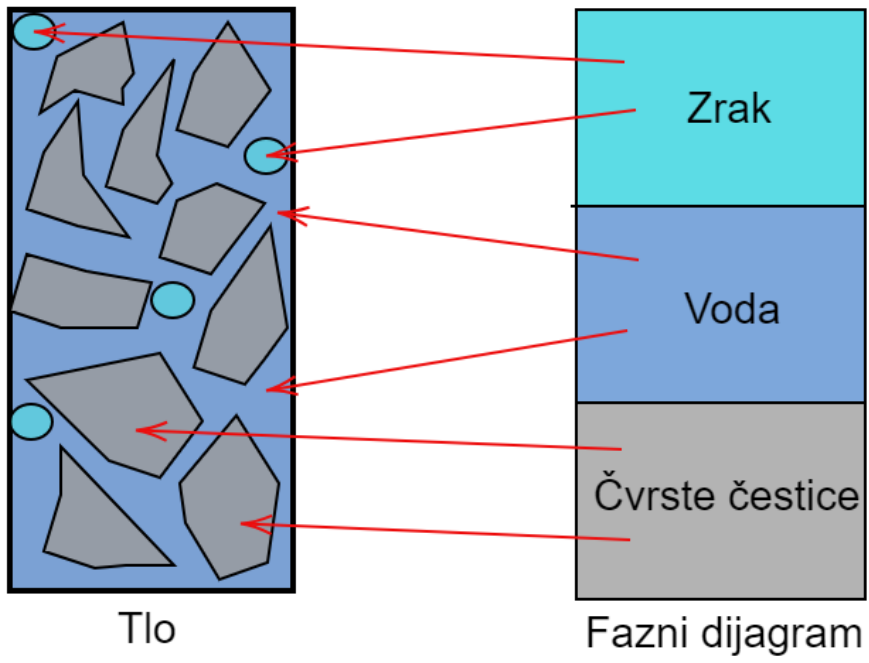
## 2.1 Općenito o materijalu

U inženjerstvu, tlo se smatra svaki materijal koji je fizičko-mehanički oslabljen te kojeg je moguće iskopati bez miniranja. Ujedno se pojam tlo odnosi i na skup čestica materijala nastalih dugogodišnjem trošenjem stijenske mase. Čestice materijala mogu biti transportirane ili taložene na mjestu postanka [23].

Trošenje stijene je vrlo složeni i spori proces prirodnog raspadanja stijene pod utjecajem vode i zraka (atmosfera) na njih. Proces trošenja nepovoljno utječe na svojstva stijene, te se trošenje stijenske mase može podijeliti na tri vrste. Fizičko trošenje je ono kod kojeg dolazi do usitnjavanja stijenske mase uslijed učestalih utjecaja atmosfera, kemijsko trošenje uzrokuje promjene u mineralnom sastavu stijene, dok kod biološkog trošenja dolazi do fizičkog trošenja kao i do promjene u mineralnom sastavu stijene [23].

Dvije glavne komponente od kojih je svako tlo napravljeno su čvrste čestice i prazan prostor [23]. Isto tako prazan prostor naziva se još i porama. One ujedno mogu biti ispunjene vodom, plinom ili zrakom vidljivo na Slici 2.1. Stupanj pora u materijalu naziva se porozitetom, a on označava omjer volumena pora i ukupnog volumena tla. Zbog mogućih različitih količina vode u tlu, određene su granice vlažnosti koje nam ukazuju na konzistenciju tla.

Konzistencija tla se definira kao sadržaj vode u tlu u trenutku kada tlo mijenja svoje ponašanje u odnosu na neko naprezanje. Atterbergove granice ili granice vlažnosti između stanja konzistencije se određuju uz pomoć jednostavnih standardiziranih laboratorijskih pokusa, a one se dijele na: granicu stezanja (PL), granicu plastičnosti (PL) i granicu tečenja (LL) te su prikazane Slikom 2.2. Određivanje granice plastičnosti provodi se uz pomoć laboratorijskog pokusa sa valjčićima promjera 3,0 mm, dok se za određivanje granice tečenja koristi Casagrande-ov aparat. Slikom 2.3 nam prikazane su Atterbergove granice plastičnosti.



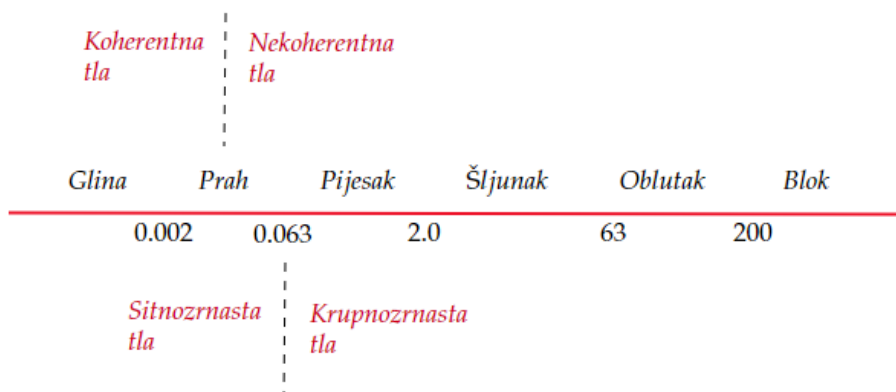
Slika 2.1: Fazni dijagram, modificirano prema [4]





Slika 2.2: Stanja konzistencije i granice vlažnosti [5]

Osnovna podjela tla zasniva se na veličini zrna, koherentnosti i mogućoj koheziji između njih. Prema veličini zrna, tla se dijele na krupnozrnasta i sitnozrnasta tla. U krupnozrnasta tla spadaju pjeskoviti u šljunkoviti materijali, kojima su zrna veća od 0.063 mm te se njihove čestice mogu vidjeti bez primjene mikroskopa, odnosno golim okom, što je ujedno i norma za klasifikaciju tla. U sitnozrnasta tla ubrajamo prahovita i glinovita tla kod kojih je veličina zrna stoga manja od 0.063 mm.



Slika 2.3: Podjela tla prema veličini, modificirano prema [6]

Kohezija predstavlja privlačnu silu između susjednih zrna u tlu. Takva tla nazivaju se koherentnim tlima, a ona imaju međusobno „slijepljene“ čestice, neovisno o tome jesu li zrna vlažna ili suha. U koherentna tla spadaju sitnozrnasta tla, kao što su glina i prah. Tla koja nemaju međusobno „slijepljene“ čestice nazivaju se nekoherentna tla, a u njih se ubrajaju krupnozrnasta tla poput pijeska i šljunka. Takva tla imaju izrazito mali udio sitnih čestica. Postoje i iznimke, kao što je to kameno brašno koje spada pod sitnozrnasta tla i nema koheziju.



Slika 2.4: Prikaz nekoherentnih i koherentnih tla [7]

## 2.2 Cikličke značajke materijala

Prilikom snažnih podrhtavanja tla, uslijed jakih potresa, dolazi do cikličkog opterećenja tla. Cikličko opterećenje najjednostavnije je objasniti kao kontinuirano i repetitivno opterećenje tla u dva različita smjera [24]. Navedene dvije vrste opterećenja razlikuju se po tome što su smjerovi opterećenja suprotnih orijentacija. Unatoč tome, tijekom opterećenja materijal u jednom od smjerova dolazi do rasterećenja uzorka u suprotnom smjeru te uzastopnog ponavljanja opterećenja i rasterećenja samo u suprotnim smjerovima. Uslijed ponavljanja cikličkog opterećenja i rasterećenja pri različitim frekvencijama i amplitudama dolazi do trenutnih i nepovratnih deformacija unutar promatranog uzorka u određenom vremenu. Frekvencija ukazuje na broj ponavljanja u jedinici vremena, dok se amplitudom smatra najveći otklon kojim se opisuje pomicanje čestica unutar uzorka. Zbog navedenih razloga potrebno je promotriti odaziv seizmičkih valova na tlo.

Cikličko opterećenje ovisi o mnogo faktora, a neki faktori koji utječu na odaziv tla su: (a) koeficijent pora u materijalu, (b) veličina cikličke deformacije, (c) plastičnost materijala, (d) stupanj prekonsolidacije i (e) broj ispitanih ciklusa [24]. Prilikom ispitivanja odaziva tla koriste se određeni parametri kako bi rezultati ispitivanja na uzorcima bili što točniji, odnosno bliži onima u stvarnosti sa terena. Zbog toga se koriste neki od sljedećih parametara: (a) kvocijent prigušenja  $\lambda$ , (b) maksimalni sekantni posmični modul  $G_{max}$ , (c) posmični modul  $G_s$ . Isto tako, neke od veličina koje se mjere tijekom cikličkog pokusa su: (a) hidrostatski pritisak  $\sigma_r$ , (b) osna sila  $F$ , (c) promjena visine promatranog uzorka  $\delta L$  te (d) porni tlak  $u$ .

Slijedom ispitivanja uzorka na cikličko opterećenje dolazi do deformacija tla u uzorku, drugim riječima unutar uzorka tla dolazi do preraspodjele čestica. Preraspodjela između zrna materijala dijele se na nekoliko vrsta, a to su: kidanja veze između susjednih čestica, promjene volumena te klizanje čestica za šta je zaslužna posmična deformacija.



Slika 2.5: Skica pomaka čestica: (a) rahlo stanje, (b) zbijeno stanje, prema [8]

Ukoliko se ispitivanje uzorka odvija na materijalu u nedreniranih uvjeta, dolazi do povećanja pornog pritiska unutar uzorka prilikom provođenja cikličkog napreznja. Pod pretpostavkom da vrijednost pornog tlaka bude jednaka ukupnim napreznjima u uzorku dolazi do naglog gubitka posmične čvrstoće tla te u krajnosti prelaska materijala u tekuće stanje, odnosno pojava likvefiranja tla.

Kao dobar pokazatelj čvrstoće materijala pri cikličkom smicanju koristi se omjer cikličkog napreznja (eng. *Cyclic Stress Ratio*), nadalje CSR, izražen kao odnos posmičnog cikličkog napreznja  $\tau_{cyc}$  i efektivnog geostatičkog napreznja  $\sigma'_{v,0}$  [25]. Odnosno, veći CSR označava pojavu sloma uzorak u kraćem vremenskom intervalu. Izrazom (2.1) definiran je odnos cikličkog napreznja.

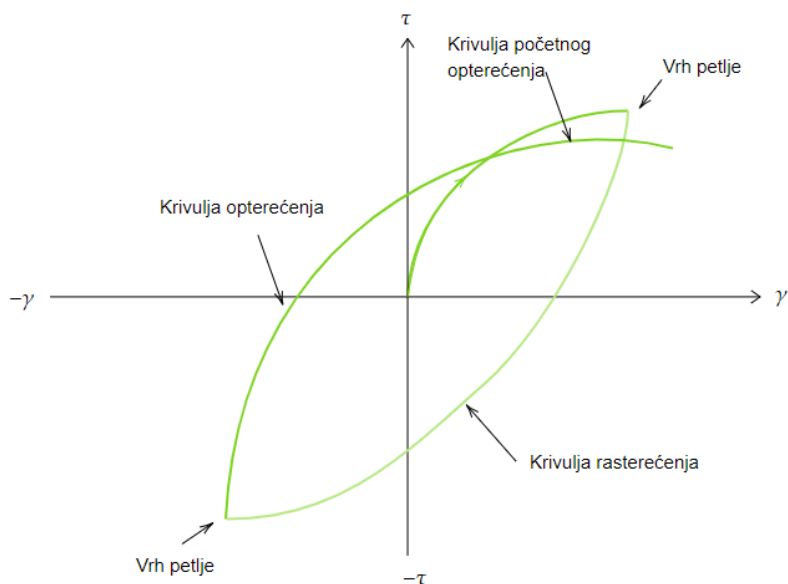
$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_{v,0}} \quad (2.1)$$

Posmičnu deformaciju definiramo kao posmično napreznje  $\tau$  u modulu posmika,  $G_s$ , kao šta je to prikazano Formulom (2.2). Posmična deformacija uoči cikličkih repetitivnih opterećenja raste (karakteristika pokusa sa kontroliranim napreznjem). Granica posmične deformacije nakon koje dolazi do nepovratnih promjena u uzorku, naziva se deformacijski prag (eng. *"threshold"*).

$$\gamma = \frac{\tau}{G_s} \quad (2.2)$$

Deformacijski prag se razlikuje u praksi ovisno o materiju, zbog toga se u teoriji uzima da prag kod pijeska iznosi 0.01%, dok kod gline threshold bilježimo na 0.1% [9]. Kako je gore napisano, jedne od iznimno važnih značajka prilikom cikličkog opterećenja jest preraspodjela čestica slijedom deformacije tla čije posljedice su uglavnom promjene u volumenu uzorka. Do takvih promjena u volumenu dolazi ukoliko je posmična deformacija veća ili jednaka thresholdu. Takve preraspodijele čestica u materijalu možemo podijeliti u dvije kategorije, kao što su zbijanje ili dilatiranje. Naime, do zbijanja dolazi ukoliko se nekoherentni krupnozrnasti suhi materijal optereti te prilikom opterećenja dolazi do smanjenja volumena uzorka. Suprotno tome, fenomen dilatiranja predstavlja smicanje čestica tla kod kojeg dolazi do povećanja volumena.

Cikličke značajke materijala se mogu najpraktičnije dočarati prikazom ponašanja materijala uz pomoć cikličke petlje u  $\tau - \gamma$  ravnini. Prilikom promatranja cikličke petlje, najvažniji je ciklus onaj prvi te početna četvrtina drugog ciklusa, zbog toga jer se uz pomoć njih može opisati ponašanje promatranog materijala na početku cikličkog opterećivanja [11]. Kako bi se promatralo ponašanje tla tijekom repetitivnog cikličkog opterećenja svaki sljedeći ciklus se uspoređuje sa onim početnim. Na Slici 2.6 prikazane su glavne značajke simetrične cikličke petlje za pokus kontroliran deformacijom.

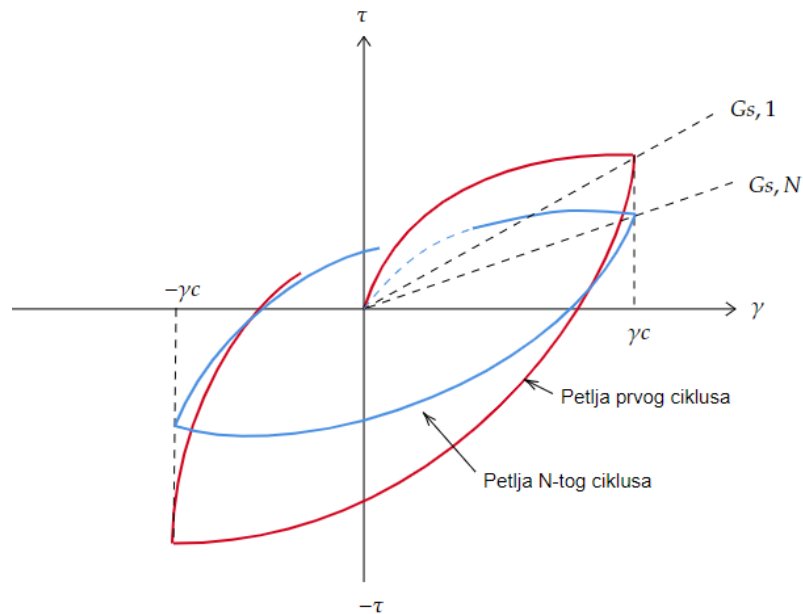


Slika 2.6: Tipična  $\tau - \gamma$  petlja prvog ciklusa, modificirano prema [9]

Kao što je vidljivo na Slici 2.6 petlja se sastoji od dijelova poput vrhova petlji, krivulja rasterećenja, krivulja (ponovnog) opterećenja i krivulje početnog opterećenja, koja se može vidjeti na Slici 2.8. Krivulja početnog opterećenja prikana je kao prva četvrtina prvog ciklusa kod projiciranja odaziva tla u koordinatnom sustavu  $\tau - \gamma$ , početak krivulje se nalazi u ishodištu te možemo zaključiti da je na tom dijelu uzorak podvrgnut opterećenju jer krivulja raste prema pozitivnim vrijednostima  $\tau - \gamma$ .

Vrha petlje može biti različitih oblika, ovisno o tome o kojem je materijalu riječ. Krivulja rasterećenja pokazuje nam dio pokusa na kojem se uzorak rasterećuje te je taj dio označen na grafu kao krivulja koja počinje u pozitivnom dijelu grafa  $\tau - \gamma$ , pa sve do negativnog dijela gdje završava ponovno u vrhu petlje iako ovaj puta u negativnim koordinatama. Nakon krivulje rasterećenja ponovno dolazi krivulja ponovnog opterećenja te sa njom završava ciklus. Graf će se sastojati od onog broja petlji koliko se ciklusa provelo. Na Slici 2.7 prikazana je petlja prvog i N-tog ciklusa.

Svaka petlja je specifična po svojim vrijednostima te je svaka definirana svojim unikatnim parametrima. Nekolicina parametara koja definira oblik i veličinu cikličke petlje su sljedeći: amplituda deformacije  $\gamma_c$  i posmično opterećenje  $\tau_c$ , oni ujedno i oblikuju veličinu petlje, zatim nagib petlje  $G_s$ , koji označava kut između apscise i linije koja prolazi ishodištem grafa do vrha petlje, takva linija naziva se još i sekantnim posmičnim modulom, dok  $G_{max}$  označava maksimalni posmični modul koji sa brojem ciklusa raste, isto tako petlja je definirana i sa površinom petlje.



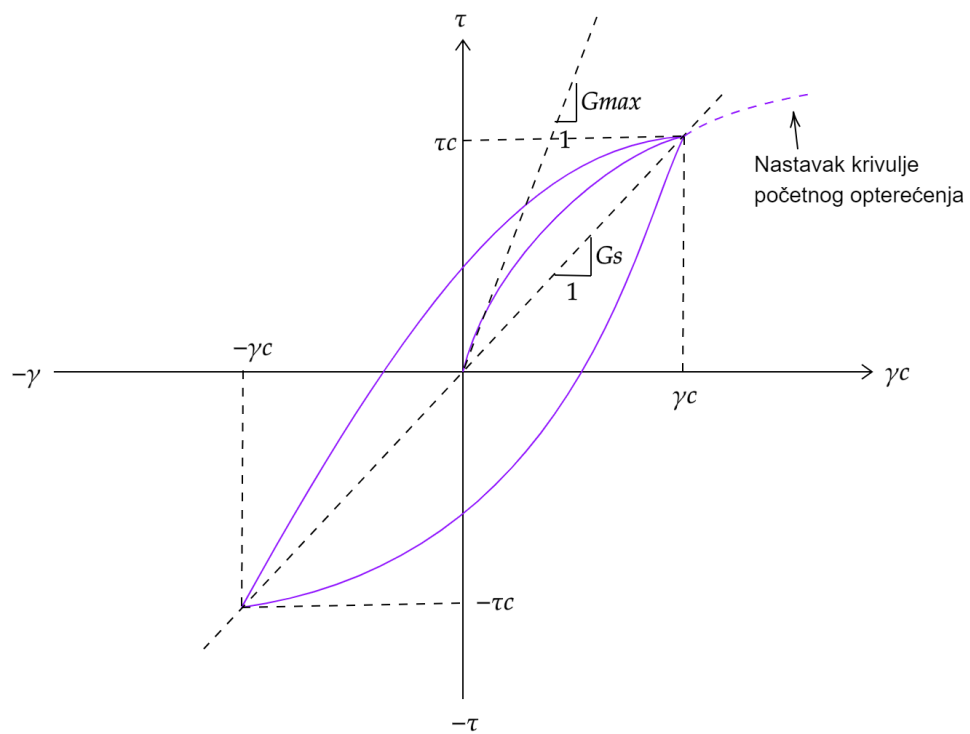
Slika 2.7: Prikaz prvog ciklusa i N-tog ciklusa pokusa sa kontroliranom cikličkom posmičnom deformacijom, modificirano prema [9]

Površina petlje predstavlja potrošenu energiju za vrijeme trajanja analiziranog ciklusa [24]. Površina petlje u direktnoj je korelaciji sa prigušenjem tla. Drugim riječima ukoliko se površina cikličke petlje poveća, istovremeno će se i prigušenje tla povećati. Niti jedna ciklička petlja nije idealnog oblika te se zbog toga mora pojednostaviti analiziranje ponašanja cikličke petlje. To će se uspostaviti tako da se petlja idealizira, točnije petlja će biti zatvorena, to jest vrijednosti deformacije i opterećenja biti će iste samo drugih predznaka.

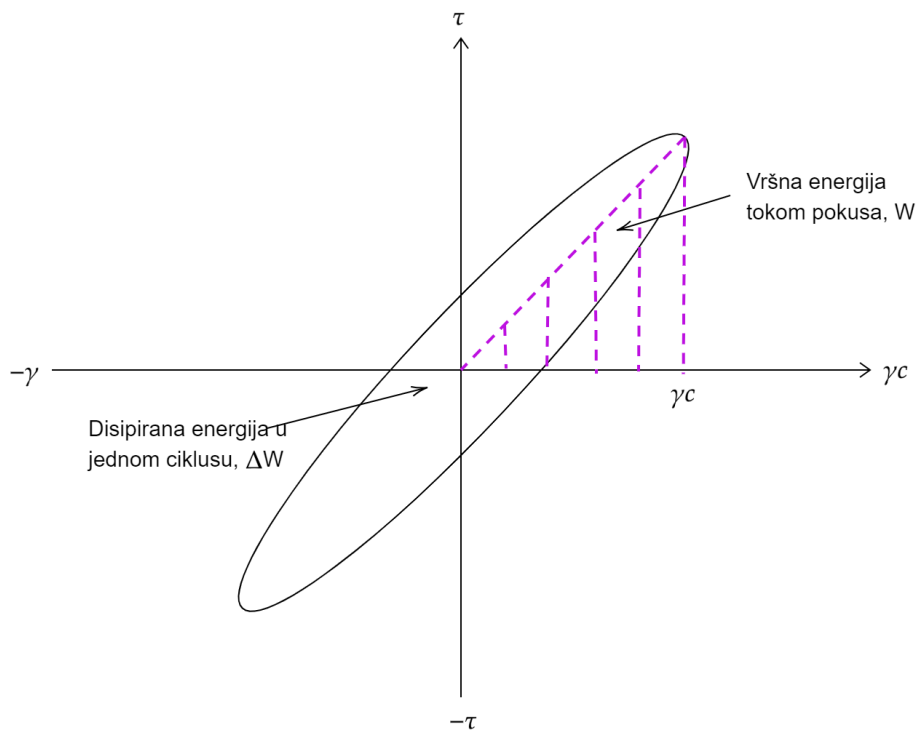
Površina petlje za idealiziranu petlju izračunava se uz pomoć izraza (2.3)

$$\lambda = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad (2.3)$$

gdje je: površinu petlje  $\Delta W$ , ona označava disipiranu energiju tijekom jednog ciklusa, površinu trokuta  $W$ , koja označava vršnu energiju tokom ciklusa. Uz pomoć grafa na Slici 2.9 prikazane su vrijednosti koje se uzimaju prilikom proračuna.



Slika 2.8: Prikaz idealizirane krivulje, modificirano po Vučetiću [9]



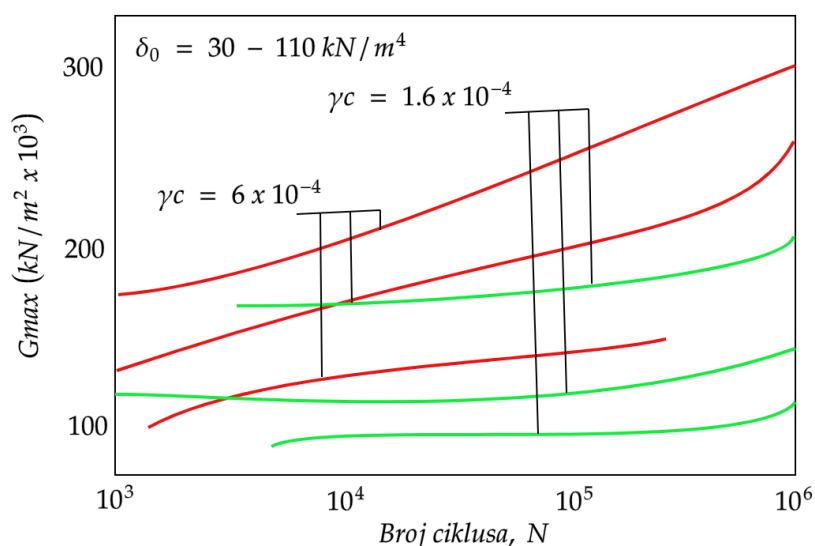
Slika 2.9: Prikaz izračuna površine petlje, modificirano prema [10]



## 2.3 Cikličko ponašanje pijeska

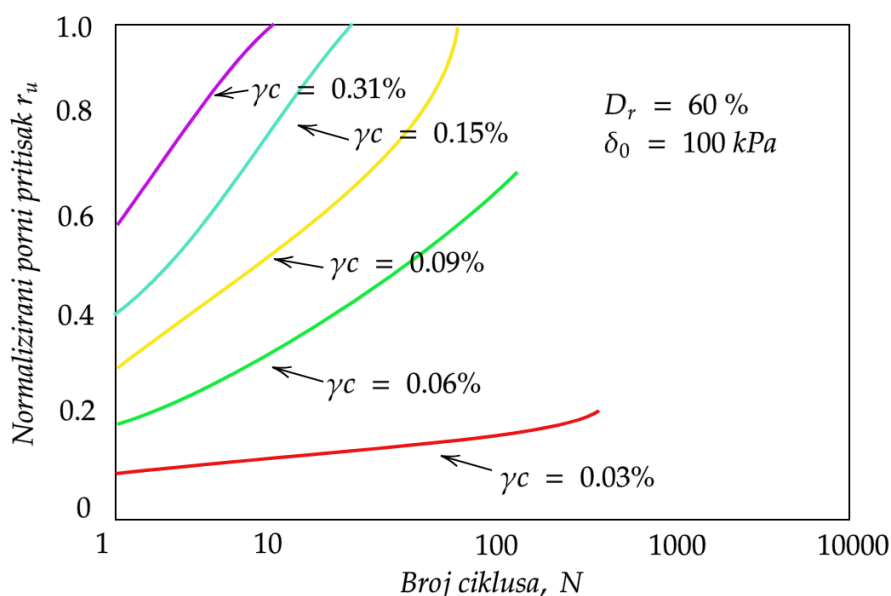
Ispitivanje cikličkog ponašanja pijeska ispituje se uz pomoć triaksnog aparata koje djeluje na principu istovremenog opterećivanja uzorka u tri suprotna smjera. Prije samog ispitivanja uzorka pijeska isti možemo opisati kao anizotropni, negomogeni i nelinearni materijal.

Kod opisivanja dinamičkih svojstava pijeska maksimalni posmični modul  $G_{max}$  nam je od iznimne važnosti jer nam opisuje utjecaj naprezanja na deformaciju, primjer maksimalnog posmičnog modula može se vidjeti na slici 2.8. Kako raste broj cikličkih naprezanja tako će rasti i  $G_{max}$ . Najizraženiji rast maksimalnog posmičnog modula dogoditi će se kod cikličke posmične deformacije, prilikom smicanja uslijed povećanja amplitude,  $\gamma_c$  [11]. Zbog čega se može pojaviti proces zbijanja pijeska tijekom potresa [9]. Utjecaj broja ciklusa i amplitude cikličke deformacije na  $G_{max}$  prikazan je na Slici (2.10).



Slika 2.10: Prikaz utjecaja broja ciklusa i amplitude na maksimalan posmični modul [11], modificirano prema [12]

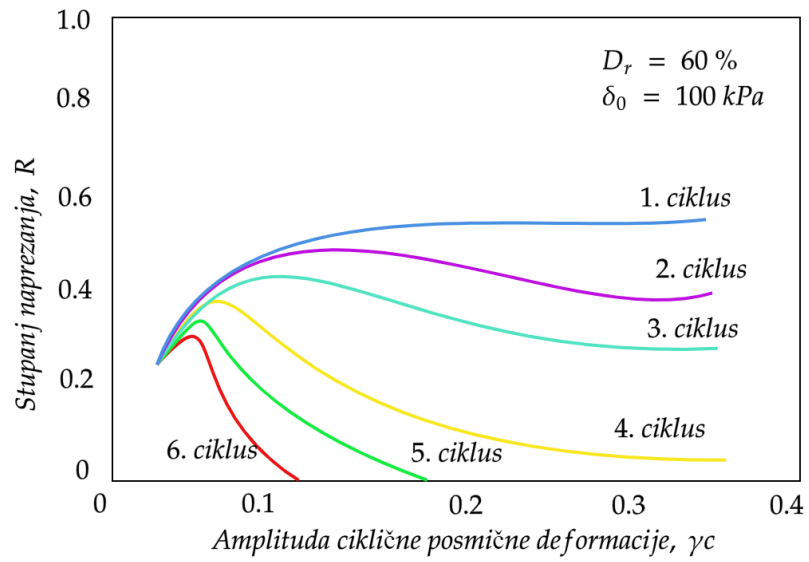
Prilikom djelovanja potresa, uslijed povećanja naprežanja, unutar uzorka dolazi do povećanja pornog tlaka,  $u$ . Glavna značajka o kojoj ovisi rast pornog pritiska u materijalu je magnituda amplitude cikličke deformacije [11]. Analiziranje pornog tlaka tijekom cikličkog ispitivanja, prilikom povećanja broja ciklusa, možemo promatrati odaziv tla na likvefakciju. U normaliziranom obliku porast pornog pritiska označen je sa  $r_u$ , za pijeske može rasti sve do vrijednosti od 0,5 nakon čega dolazi do nagle promjene u pritisku unutar pora te pojave likvefakcije materijala kao i preraspodijele čestica unutar uzorka koju smo prethodno prikazali na slici 2.5 [13]. Maksimalna vrijednost pornog pritiska će biti kada se dosegne 1,0 što ujedno označava potpuni gubitak čvrstoće i prelazak materijala u tekuće stanje uslijed likvefakcije.



Slika 2.11: Odnos pornog pritiska i broja ciklusa smicanja pri troosnom smicanju [11], modificirano prema [13]

U prethodnoj temi smo već spomenuli odnos cikličkog naprežanja, ali sada ćemo ga detaljnije opisati za pijeske. *CyclicStressRatio* (CSR) nam pomažu da kod ispitivanja pjeskovitih materijala dobijemo opširniju „sliku“ učinka naprežanja na moguću pojavu likvefakcije. Silver i Park [13] u svom radu opisali su kako odnos cikličkog naprežanje kod pijeska ostaje uglavnom konstantan u prvih nekoliko ciklusa prilikom cikličkog opterećenja uzorka, pritom poslije prvih ciklusa dolazi do nagle degradacije CSR-a uslijed povećanja amplitude cikličke posmične deformacije  $\gamma_c$ .

Isto tako CSR je moguće izračunati preko odnosa devijatorskog i efektivnog naprežanje. Tijekom izrade ovog rada uzimala se vrijednost efektivnog naprežanja u iznosu

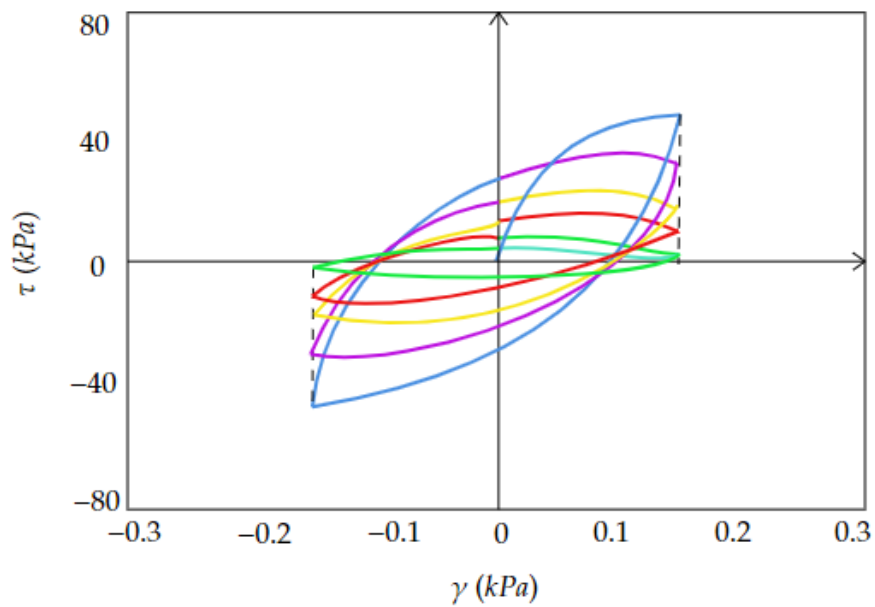


Slika 2.12: Odnos stupnja naprezanja i amplitude cikličke posmične deformacije [11], modificirano prema [13]

od 100,0 kPa, dok se vrijednost devijatorskog naprezanja razlikovala od pokusa do pokusa.

$$CSR = \frac{\Delta q}{2 \cdot \sigma'_0} \quad (2.4)$$

gdje je: .... Prilikom ispitivanja u triaksialnom aparatu, ponašanja pjeskovitog materijala dočarana su uz pomoć cikličkih petlji u  $\tau - \gamma$  koordinatnom sustavu. Kao šta je prikazano na slici (2.13) može se zaključiti kako sa porastom broja cikličkih naprezanja dolazi do postepene deformacije cikličke petlje prema apscisnoj osi.



Slika 2.13: Primjer cikličke deformacije tla [11], modificirano prema [14]

## 2.4 Klasifikacija materijala

Tijekom laboratorijskog ispitivanja materijala, u svrhu istraživanja cikličkog ponašanja promatranog uzorka, koristila se umjetna mješavina tla. Takva umjetna smjesa bila je spravljana kao mješavina više materijala, a komponente od kojih sastojala su pijesak i kaolin. Pijesak se odnosi na prirodni materijal nastao usitnjavanjem stijena, koje smo detaljnije opisali u prethodnim cjelinama, kao i podjelu pijeska po veličinama zrna koje mogu varirati između 0,063 – 2,0 mm. Kaolin ili kineska glina odnosi se na minerale gline koji su uglavnom u svom prirodnom okruženju bijele boje i mekani na dodir. Minerali kaolina nastali su kemijskim trošenjem minerala aluminijevih silikata. Nedavna laboratorijska istraživanja pokazuju da dodavanje kaolina tlima niske to srednje plastičnosti može spriječiti rano omekšavanje i fluidizaciju tla [26].

### 2.4.1 Granulometrijska krivulja

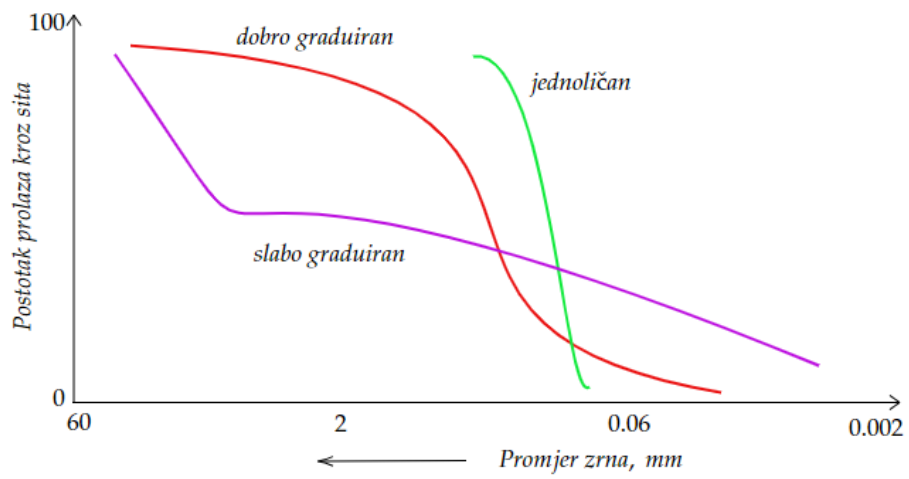
Sva tla se sastoje od zrna čvrstih čestica koje su različitih veličina i oblika. Čestice se ovisno o veličini i obliku grupiraju u frakcije koje tvore granulometrijski sastav tla. Takav sastav tla koristi se prilikom procjene fizikalnih i mehaničkih svojstava tla, a određuje se uz pomoć laboratorijskih pokusa.

Granulometrijski sastav tla određuje se za zrna veća od 0,063 mm uz pomoć sita standardnih veličina kroz koje se sije materijal. Proces sijanja može se provoditi sa suhim ili mokrim postupkom. Za materijale koji sadržavaju zrna manjih od 0,063 mm koristi se proces sedimentiranja u vodi, gdje se sitne čestice talože u određenom vremenskom intervalu. Uz pomoć dobivenih podataka izrađuje se granulometrijski dijagram koji nam pokazuje udjele pojedinih frakcija za promatrani uzorku tla.

Nekoherentna tla se s obzirom na rezultat sijanja mogu podijeliti u tri podgrupa, a to su: dobro graduirana, gdje su čestice materijala raznovrsne i idealne, jednolična u kojem prevladavaju pojedine frakcije, te slabo graduirani materijal u kojem određene frakcije su premalo, odnosno previše zastupljene.

Određivanje granulometrijskog sastava za krupne frakcije, u koje spadaju pijesak i šljunak, može se provoditi ručno ili strojno, a provodi se tako da se određena masa uzorka, u kojoj smo prethodno odstranili neželjene organske materijale, postavlja u najgornje sito. Sita su posložena jedna na drugom, a ovisno o veličini zrna ista će se zadržavati na sitima. Nakon svršetka prosijavanja mjeri se svaka masa zaostala na pojedinom situ, preko koje se dobivaju rezultati za izradu granulometrijskog dijagrama.

Za fine frakcije, poput praga i gline, ispitivanje granulometrijskog sastava provodi se uz pomoć areometra. Areometar je laboratorijski instrument koji služi za mjerenje gustoće tekućine, odnosno suspenzije tla. Određivanje promjera čestica i njihovog udjela u tlu određuje se preko gustoće tekućine, dubine na kojoj je ona izmjerena i vremena

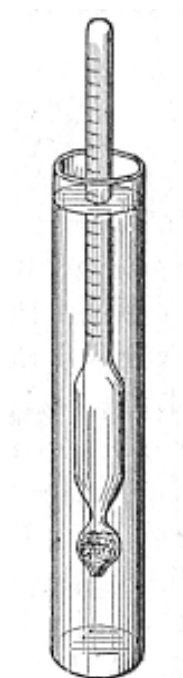


Slika 2.14: Vrste granulometrijskih krivulja za nekoherentna tla



Slika 2.15: Prikaz različitih veličina metalnih sita [15]

potrebnog za taloženje čestica.



Slika 2.16: Prikaz različitih veličina metalnih sita [16]

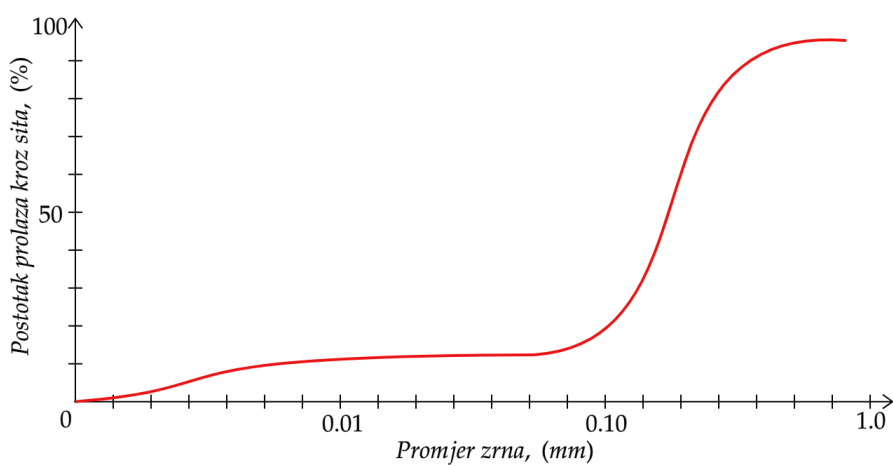
Tablica 2.1: Rezultati prosijavanja

Širina sita (mm)	Postotak prolaza kroz sita (%)
2	100
1.18	99.34
0.8	97.82
0.6	95.17
0.425	84.72
0.3	59.34
0.212	31.86
0.15	19.18
0.063	15.31
0.052	15.00
0.037	15.00
0.026	15.00
0.018	15.00
0.013	14.50
0.009	13.75
0.007	12.75
0.005	11.15
0.004	9.42
0.003	6.55
0.002	2.80
0.001	0.30
0.001	0.13

Ako više od jedne polovine materijala prosijanog kroz sita ima zrna veća od 0,063 mm radi se o krupnozrnastim i nekoherentnim materijalima, odnosno ako ima više od polovine zrna manjih od 0.063 mm materijal je sitnozrnast i koherentan. Rezultati prosijavanja materijala korištenih u ovom radu prikazani su na sljedećoj slici.



Rezultati prosijavanja mogu se prikazati grafički na koordinatnom sustavu u kojem se na apscisnoj osi nalazi promjer zrna iskazan u milimetrima, pritom se na ordinatnoj osi nalazi postotak prolaza čestica izraženog u postotcima. Unutar koordinatnog sustava rezultati ispitivanja nacrtani su uz pomoć granulometrijske krivulje. Na sljedećoj slici prikazana je granulometrijska krivulja koju smo grafički konstruirali nakon ispitivanja uzorka kroz sito i aerometar.



Slika 2.17: Prikaz granulometrijske krivulje korištene pri u laboratorijskim pokusima

Potom se iz grafičke krivulje očitavaju karakteristične vrijednosti promjera zrna  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  i  $D_{60}$ , koji u ovom slučaju iznose  $D_{10} = 0.003$ ,  $D_{30} = 0.2$  i  $D_{60} = 0.4$ . Ovi parametri označavaju karakteristične promjere zrna za određene postotke prolaznosti materijala, a preko iščitanih karakterističnih promjera dobivaju se koeficijent uniformnosti,  $C_u$  kao i koeficijent zakrivljenosti,  $C_c$ , a formule za njihov proračun napisane su u sljedećim formulama (2.6) i (2.5).

$$C_u = \frac{D_{10}}{D_{60}} \quad (2.5)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad (2.6)$$

## 2.4.2 Specifična gustoća

Specifična gustoća je fizikalna veličina koja označava odnos između jediničnog volumena tla i težine vode. Ona nam pomaže u razumijevanju dinamičkih karakteristika uzorka. Vrijednost specifične gustoće dobiva se uz pomoć piknometra, gdje se prethodno prokuhani potpuno potopljeni pijesak u deaeriranoj vodi postavlja u kalup standardiziranih dimenzija. Nakon mjerenja temperature vode u kojoj se ispitani uzorak ohladio od prokuhavanja, mora se pažljivo izmjeriti ukupna masa piknometra, vode i pijeska. Poslije niza ispitivanja dobivena je konačna vrijednost, koja za ovo ispitivanje iznosi  $2.67 \text{ g/cm}^3$ .

## 2.4.3 Relativna zbijenost

Kao šta smo na početku ovog rada spomenuli, svako tlo se sastoji od tri elementa, odnosno od čvrstih čestica, vode i zraka. Voda i zrak ispunjeni su porama, a ovisno o karakteristikama tla razlikovati će se i koeficijent pora. Koeficijent pora,  $e$ , označava odnos između volumena pora i volumena čvrstih čestica. Uzima se da će u sasvim zbijenim tlima taj koeficijent biti iznimno malen pa se označava sa  $e_{min}$ , dok se u iznimno rahlim pijescima koeficijent pora označava sa  $e_{max}$ , zbog toga jer se u takvim tlima očekuju velike količine pora u uzorku.

Proračunavanje svih navedenih vrijednosti može se dobiti uz laboratorijske pokuse ili uz pomoć formula. U ovom radu jedan od zadataka bio je proračun koeficijenta pora,  $e$ , koji se može dobiti korištenjem prethodno napomenutih nepoznanica. Vrijednost nepoznanica  $e_{max}$  i  $e_{min}$  dobili smo iščitavajući ih iz tablica za koeficijente pora. Dobiveni parametri iznose  $e_{max}= 1.430$ , a  $e_{min}=0.544$ . Za relativnu zbijenost,  $D_r$  svih uzorka uzimali smo vrijednost od 0.8 koja označava da je uzorak zbijen 80 % te smo za proračun koeficijenta pora,  $e$ , koristili sljedeću formulu za proračun relativne zbijenosti.

$$D_r = \frac{e_{min} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (2.7)$$

Kako bi dobili vrijednost  $e_0$ , jednadžbu prikazano uz pomoć formule (2.7) smo prvotno pomnožili sa razlikom  $e_{max}$  i  $e_{min}$ , nakon čega smo od umnoška razlike  $e_{max}$  i  $e_{min}$  i relativne zbijenosti,  $D_r$  oduzeli maksimalni koeficijent pora, uz pomoć kojeg smo dobili traženu vrijednost. Iz proračuna se izračunalo kako in situ koeficijent pora,  $e_0$  iznosi 0.7212.

# 3. ISPITIVANJE PJESKOVITOG MATERIJALA PRI MALIM EFEKTIVNIM NAPREZANJIMA I SA MALIM CONFINING STRESS

Kako bi lakše razumjeli karakteristike korištenog materijala u ovom poglavlju biti će navedeno nekolicina primjera istraživanja pjeskovitih materijala. Uz pomoć opisanih ispitivanja dobiveni su određeni rezultati koji će nam pomoći u daljnjem radu. Sva ispitivanja provedena su uz pomoć troosnog uređaja.

Ispitivanja iz sljedećih članaka provedena su na pjescima sa malim ograničavajućim napreznjima, u struci se koristi engleski naziv *low confining stress*, kao i ispitivanja pjeskovitog materijala pri malim efektivnim napreznjima. Confining stress možemo opisati kao pokus gdje se pokušava simulirati kako u prirodi na uzorak u tlu djeluje težina materijala iznad njega, uz uvjet da se uzorak ne pomiče. Ispitivanja pri malim efektivnim napreznjima koriste se kako bi dobili uvid u odaziv površinskih naslaga. Ukoliko se radi o kosinama koje imaju tendenciju formiranja plitkih kizišta (prema ICL [27] dubina do 5m), materijal od kojeg je izgrađena kosina potrebno je ispitati pri malim efektivnim napreznjima.

U istraživanju provedeno od strane Hyodo-a i drugih [28], a pokusi su bili različitih intenziteta napreznja kako bi se dobile informacije pri kojim napreznjima će uzorak doći do sloma te na koji način. Takvi pjeskoviti materijali bili su podvrgnuti testu na malim ograničavajućim napreznjima jačine od 5,0 MPa. Na kraju ispitivanja, autori su utvrdili kako pri malim efektivnim napreznjima dolazi do povećanja cikličke jačine [28].

Koseki i drugi [29] proveli su niz nedreniranih cikličkih pokusa sa torzijskim smicanjem kako bi odredili svojstva čistog Toyoura pijeska. Takva vrsta pijeska javlja se uglavnom unutar granica Japana, a koristi se uglavnom za pripremljanje laboratorijskih ispitivanja. Ispitivanja su se provodila na umanjenim modelima pod normalnom gravitacijom gdje je amplituda cikličkog smicanja bila konstantna [29]. Iz rezultata se moglo

zaključiti kako se otpornost na likvefakciju Toyoura pijeska povećavala sa smanjenjem naprezanja. Isto tako pod malim efektivnim naprezanjima svojstva likvefakcije bila su pod utjecajem otpora na smicanje [29].

Pokuse na muljevitim pijescima testove je proveo Thevanayagam [30] gdje je u svom članku takvu mješavinu opisao kao iznimno delikatnom smjesom za provođenje pokusa zbog svojih osobina. Thevanayagam je došao do zaključka kako je međuzrnska relativna gustoća kao i omjer šupljina u materijalu od iznimne važnosti za posmičnu čvrstoću uzorka kod pokusa sa nedreniranim materijalima. Istim pokusima dokazano kako relativna gustoća u uzorku raste sa udjelom finih čestica te kako relativna čvrstoća u muljevitim pijescima može biti u rasponu od 20% do 30% [30].

U članku [14] su Kumar i drugi [14] utvrdili kako ispitani materijal pokazuje veći koeficijent prigušenja prilikom malih efektivnih naprezanja negoli kod većih efektivnih naprezanja. Kumar, Krishna i Dey [14] su za izradu laboratorijskih pokusa koristili za mala efektivna naprezanja sile od 50kPa, dok su se sile od 100 kPa do 150 kPa koristile prilikom ispitivanja većih efektivnih naprezanja.

Prilikom ispitivanja dreniranog pijeska pri malim efektivnim naprezanjima u troosnom uređaju, T. Chakraborty i R.Salgado [31] ispitivali su kut trenja i dilatiranje materijala prilikom naprezanja istog. U radu su Chakraborty i Salgado uočili kako sa manjom zbijenosti i većim efektivnim naprezanje dilatiranje pijeska se umanjuje [31].

## 4. METODOLOGIJA

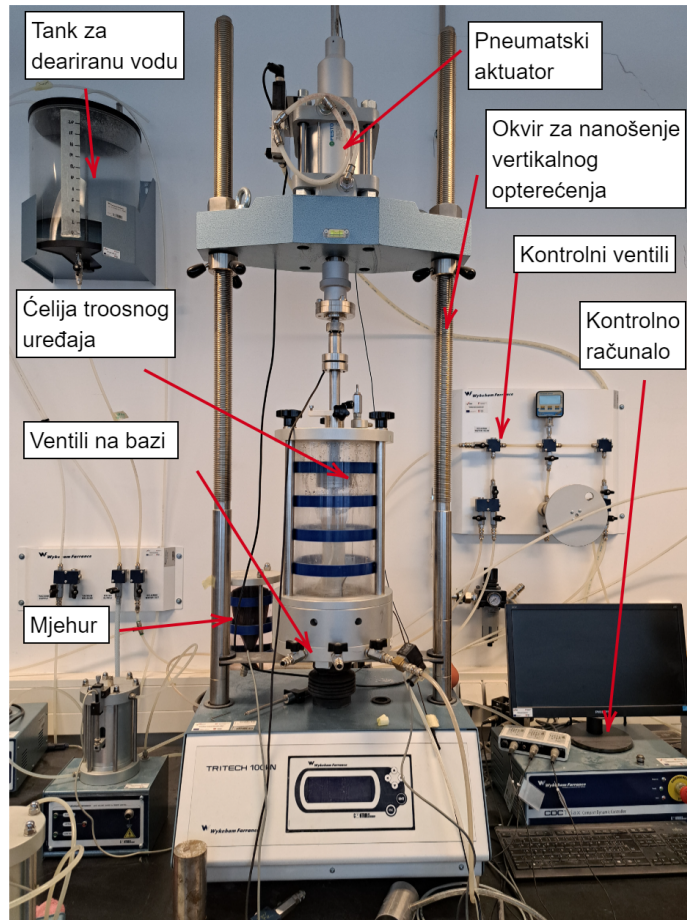
Kako bi lakše shvatili provođenje ispitivanja za ovaj diplomski rad na pjeskovitim i glinenim materijala u ovom poglavlju biti će detaljno opisan svaki korak u provođenja ispitivanja. Prvo ćemo opisati uređaj na kojem su se uzorci ispitivali, zatim ćemo detaljno opisati pripremu uzorka kao i princip izračuna željenih parametara. Postupak ugradnje uzorka je detaljnije opisan, nakon čega se pobliže opisuje postupak provođenja ispitivanja. Za kraj teme obrazlažu se vrste testova provedene na uzorcima.

### 4.1 Općenito o uređaju

Pokusi korišteni u ovom diplomskom radu izvedeni su na pneumatičkom uređaju za dinamička ciklička troosna ispitivanja koji je prikazan na Slici 4.1. Korišten je uređaju DYNATRIAX, proizvođača Controls koji se nalazi u sklopu Laboratorija za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci.

Ovakav uređaj koristi se za istraživanje karakteristika tla pri cikličkog opterećenja. Na ovom uređaju mogu se provoditi pokusi u statičkim i dinamičkim uvjetima te se uređaj kontrolira računalom. Željeni tlakovi unutar ćelije postižu se pomoću mjehura prikazanog na Slici 4.1. Za mjerenje pomaka tijekom ispitivanja služi nam aktuator, koji se može vidjeti na Slici 4.1 iznad čeličnog okvira aparata, koji je kontroliran računalom, a služi nam za praćenje pomaka i pozicije klipa uslijed ispitivanja.

Različiti promjeri uzorka se mogu ispitivati na ovom aparatu. U ovom slučaju svi ispitani uzorci bili su istog promjera od 50.0 mm. Maksimalni vertikalni pomak iznosi  $\pm 25.0$  mm, maksimalna jačina mjehura može biti 1000.0 kPa, dok maksimalno opterećenje iznosi  $\pm 5.0$  kN [24].



Slika 4.1: Prikaz triaksialnog aparata korištenog za izvedbu pokusa

## 4.2 Priprema uzorka

Laboratorijskim pokusima utvrđene su minimalne i maksimalne vrijednosti gustoća umjetne mješavine ( $e_{min} = 0.544$  i  $e_{max} = 1.430$ ). Koristeći izraz (2.7), određen je početni koeficijent pora  $e_0 = 0.7212$  za početnu relativnu zbijenost od 80%.

Prije same pripreme uzorka, potrebno je odrediti mase materijala za pripremu uzorak. Poznavajući polumjer materijala,  $r$ , koji iznosi  $r = 2.5\text{cm}$ , visinu uzorka,  $h = 10.0\text{cm}$  i gustoću  $\rho_T = 1.453\text{g/cm}^3$ , možemo odrediti totalnu masu materijala, koristeći sljedeću formulu (4.1).

$$M_{TOT} = r^2 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho_{TOT} \quad (4.1)$$

Nakon šta smo uvrstili sve poznate parametre, totalna masa materijala,  $m_{tot}$ , iznosi  $m_{tot} = 329.28\text{g}$ , od čega je suhi uzorak  $m_s = 304.61\text{g}$ , voda,  $m_w = 24.67\text{g}$ , od čega kaolin iznosi 15% mase suhog uzorka, odnosno masa kaolina,  $m_k$ , iznosi  $m_k = 45.69\text{g}$ , a pijeska  $m_p = 258.92\text{g}$ .

Plastičnost umjetne mješavine pijeska i kaolina (SK15) izračunate su u literaturi autora D.Marušića i V.Jagodnika [17], čiji rezultati se vide u sljedećoj tablici 4.1

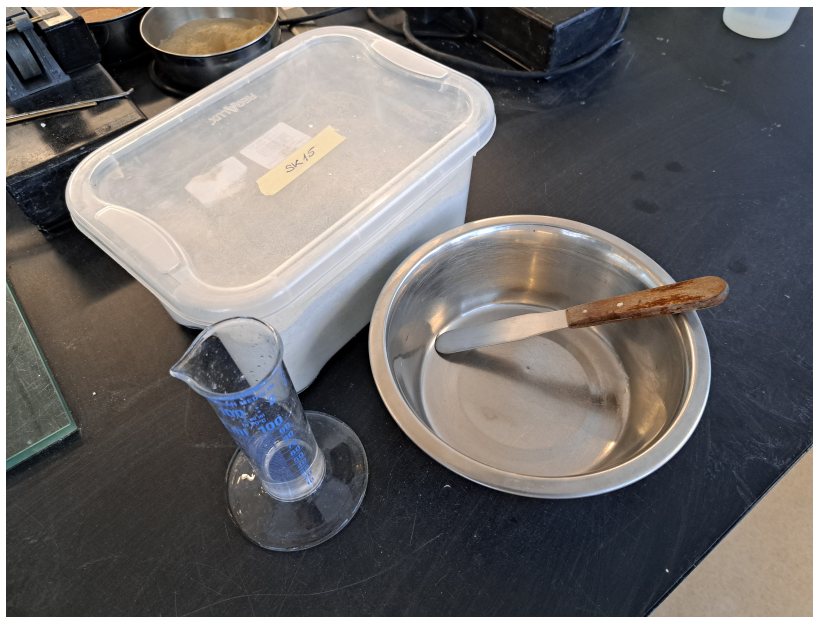
Gdje je limit tekućine,  $LL_{FC}$ , plastični limit prema Wood-u i Wrothu-u [32],  $PL_{ww}$ , plastični limit prema Feng-u,  $PL_f$  [33], indeks plastičnosti prema Wood-u i Wrothu-u [32],  $PI_{ww}$  te indeks plastičnosti prema Fengu [33]  $PI_f$ .

Tablica 4.1: Indeksi plastičnosti za ispitani materijal modificiran prema [17]

Vrsta mješavine	$LL_{FC}$	$PL_{ww}$	$PL_f$	$PI_{ww}$	$PI_f$
SK15	17.9	11.3	9.6	6.7	8.3

#### 4.2.1 Postupak ugradnje

Pomoću izračunatih masa uzorak, proračunate mase vode, pijeska i kaolina se važu te nježno miješaju kako ne bi došlo do usitnjavanja zrna. Masa se zamiješana sa nožićem posebnog oblika prikazanog na Slici 4.2, te pusti se minimalno jedan sat da odstoji prije nego šta se može ugraditi. Uzorak se mora poklopiti kako ne bi došlo do promjene u vlažnosti zbog isparavanja vode, kako je prikazano na Slici 4.3 .



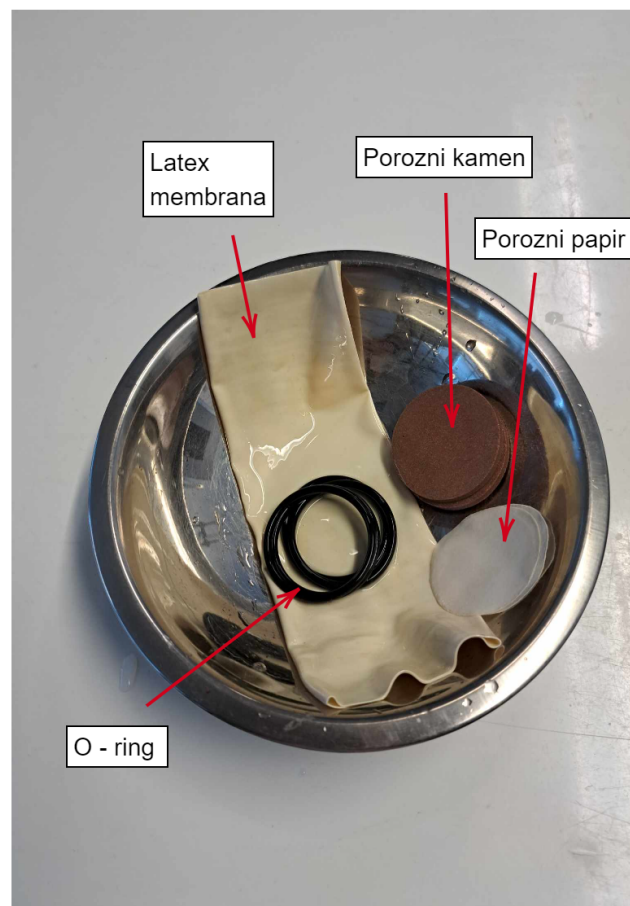
Slika 4.2: Prikaz laboratorijske posude, kaolina i menzure za mjerenje količine vode





Slika 4.3: Materijal nakon miješanja

Pripremamo uređaj za ugradnju materijala tako da na postolje uređaja prvo postavimo porozni kamen na kojeg se stavlja porozni papir koji služi kako ne bi došlo do pomicanja čestica uzorka do poroznog kamena. Latex membrana postavlja se preko postolja na kojem su porozni kamen i papir kako bi nakon ugradnje uzorka ona pridržavala materijal od raspadanja. Dvije gumice specifičnih karakteristika, nazivom O – ring ili brtvni prsten, postavljaju se na donju stranu latex membrane u doticaju sa postoljem. Kalup koji je prethodno očišćen, postavlja se na način da membrana prolazi kroz njega, a njegova svrha je davati stabilnost prilikom ugrađivanja i nabijanja materijala. Latex membrana, O – ringovi, porozni kamen i porozni papir su prikazani na Slici 4.4.



Slika 4.4: Latex membrana, O – ringovi, porozni kamen i porozni papir

Na kalupu postoje dvije rupe za usis koje se prekrivaju otpadnim materijalom poroznog papira kako bi smanjili utjecaj usisa na membranu i zaštitili je od pucanja. Nakon prekrivanja rupa usisa, membrana se navlači preko kalupa te se sa gornje strane te se ponovno postavljaju dva O – ringa. Kako bi se zabrtvio razmak između polovica kalupa, na njihov spoj postavlja se vruće ljepilo. Kalup je prikazan na Slici 4.5. Poslije hlađenja ljepila vakuumska pumpa se pokreće koja je pričvršćena na kalup. Nakon postavljanja zaštitne folije, preko kalupa i ostatka postolja, počinje se sa ugrađivanjem materijala.



Slika 4.5: Prikaz kalupa sa cijevima za usis, pored kojeg su metalni obroč za nemještanje O - ringova i kapa za ugradnju zadnjeg sloja materijala

Kako bi se materijal ugradio, potrebno je osigurati jednaku zbijenost u svim slojevima. Način na koji se nejednolika zbijenost izbjegava, a koja nastaje tako da svakom novom ugradnjom i zbijanjem sloja zbijaju i prethodno ugrađeni slojevi, jest korištenjem metode podzbijanja [34], prema izrazu.

$$u_n = u_{ni} - \left[ \frac{u_{ni} - u_{nt}}{n_t - 1} \cdot (n - 1) \right] \quad (4.2)$$

Gdje je  $U_{ni}$  vrijednost podzbijenosti prvog sloja,  $U_{nt}$  podzbijenost zadnjeg sloja,  $n$  označava ukupni broj slojeva, dok su  $n_i$  i  $n_t$  brojevi prvog i zadnjeg sloja. Svaki od deset slojeva ima određenu visinu, a visine svih slojeva napisane su u sljedećoj Tablici 4.2.

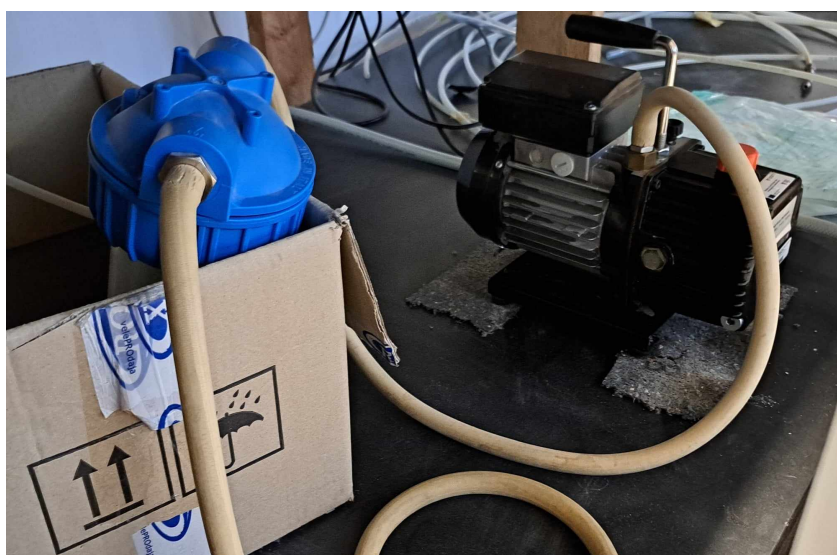
Zbijanje materijala započinje tako da se prva desetina materijala postavlja unutar latex membrane uz pomoć žličice, nakon čega se sa drvenim kružnim štapom materijal nabija. Koristeći pomično mjerilo, mjeri se dubina svakog novog sloja koja mora odgovarati visini prikazanoj u Tablici 4.2.

Neposredno poslije ugradnje uzorka, zaštitna folija se uklanja, a vakuumska pumpa,

Tablica 4.2: Visine slojeva za zbijanje

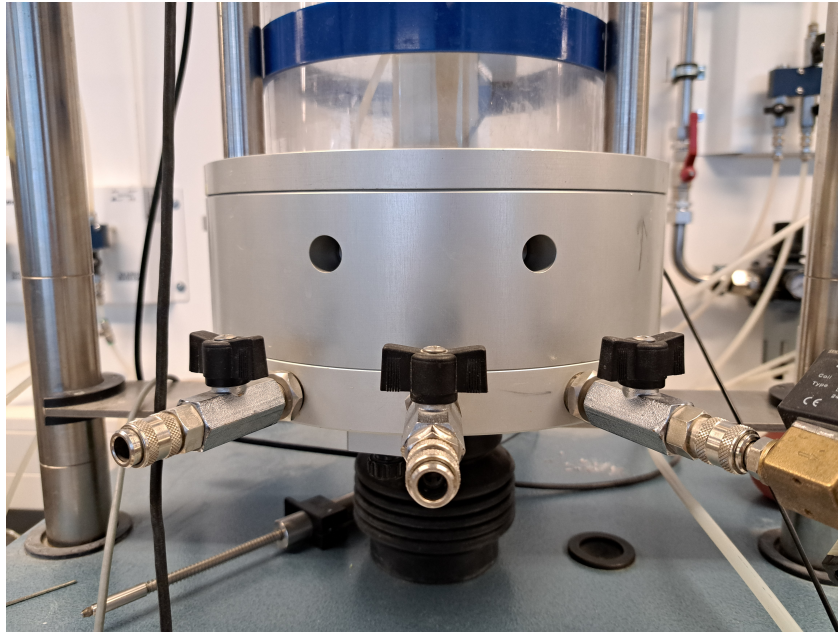
Broj slojeva	Visine zbijenih slojeva (mm)
1	10.50
2	20.44
3	30.39
4	40.33
5	50.28
6	60.22
7	70.17
8	80.11
9	90.06
10	100.00

prikazana na Slici 4.6, se zaustavlja te se na vrh uzorka postavlja porozni papir, porozni kamen kao i kapa za pozadinski pritisak. Prije samog postavljanja uzoraka na aparat, ljepilo se uklanja sa stranica kalupa, nakon kojeg će se i kalup pažljivo odvojiti od latex membrane.



Slika 4.6: Silika gel na lijevo i vakuumska pumpa na desno

Ćelija se postavlja na postolje, koja služi kako bi se mogla postaviti voda oko uzorka zbog izbacivanja zraka. Ćelija se učvrsti sa tri vijka, a središnja klip se spušta sve do kape za pozadinski pritisak. Ćelija se sa pričvršćenim postoljem postavlja na uređaj te počinje postupak ispitivanja. Slika postolja može se viditi na Slici 4.7.



Slika 4.7: Postolje na kojem je postavljena ćelija

## 4.2.2 Postupak ispitivanja

Prethodno pripremljeni uzorci se ispituju uz pomoć cikličkog smicanja u nedreniranim uvjetima. Uzorci su se opterećivali u devet faza, dok svaka faza ima različitu vrijednost cikličke deformacije. Cikličke deformacije korištene tijekom ispitivanja napisane su u Tablici 4.3 , u kojoj  $\gamma_{a,c}$  predstavlja posmičnu deformaciju, dok se relativna ciklična deformacija označava sa  $\varepsilon_{a,c}$ . Vrijednosti iz tablice dobivene su pomoću Formule (4.3).

$$\varepsilon_{a,c} = \frac{\gamma_{a,c}}{1.5} \quad (4.3)$$

Tablica 4.3: Amplitude cikličkog smicanja

Faze opterećenja	Relativna ciklička osna deformacija $\varepsilon_{a,c}$ (%)	Relativna ciklička posmična deformacija $\gamma_{a,c}$ (%)
1	0.003	0.005
2	0.005	0.0075
3	0.007	0.01
4	0.013	0.02
5	0.033	0.05
6	0.050	0.075
7	0.067	0.1
8	0.133	0.2
9	0.333	0.5

Rezultati provedenih ispitivanja zapisuju se direktno na računalo povezano sa troosnim uređajem. Prije početka ispitivanja potrebno je napraviti saturaciju te između svake od devet faza opterećivanja provesti postupak konsolidacije.

### 4.2.3 Saturacija

Saturacija podrazumijeva uklanjanje zaostalog zraka iz pora ugrađenog uzorka. Saturacija se provodi u više faza, a one su: perkolacija uzorka uz provođenje plina ugljičnog dioksida,  $CO_2$ , kroz materijal te dovođenje vode unutar uzorka. Plin  $CO_2$  se utiskuje kroz postolje uređaja, uz pomoć kojeg ugljični dioksid popunjava prostor unutar uzorka te na takav način smanjuje postotka zarobljenog zraka unutar smjese. Perkolacija uzorka traje minimalno dvadeset minuta, ovisno o vrsti materijala te brzinu prolaska plina  $CO_2$  [34]. Druga faza saturacije, dovođenje vode unutar uzorka, topi prethodno upušteni  $CO_2$ . Za kraj saturacije uzorak se opterećuje pozadinskim tlakom koji služi za dodatno osiguravanje topljenja plina. [34].

Stupanj saturiranosti kod uzorka dobiva se uz pomoć Skemptonovog parametra,  $B$ -koeficijent. On se proračunava kao omjer promjene pornog pritiska i promjene izotropnog ćelijskog pritiska koji je zapisan preko Formule (4.4) [24]

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3'} \quad (4.4)$$

Ukoliko je Skemptonov parametar  $B < 1$ , to označava kako uzorak nije u potpunosti saturiran, odnosno potrebno je uzorak ponovno saturirati. Kada je  $B > 1$  to nam govori da je unutar uzorka ušla tekućina te se ispitivanje mora ponoviti. Vrijednost Skemptonovog koeficijenta  $B = 1$  se dobiva kada je uzorak potpuno saturiran.



#### 4.2.4 Konsolidacija

Konsolidacijom se podrazumijeva smanjivanje volumena korištenjem opterećenja kod potpuno saturiranih tla, odnosno kada je  $B = 1$ . Konsolidacije će ovisiti o svrsi ispitivanja, a ona se može postići uz nanošenje opterećenja u vertikalnom smjeru, što se naziva jednodimenzionalna konsolidacija [24]. Razlikujemo dvije vrste konsolidacija, a to su izotropna i anizotropna. Izotropna je ona kod koje je uzorak opterećen sa svih strana jednoliko, te su naprezanja jednaka, odnosno  $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_c$ , a devijator naprezanja je jednak nuli.

#### 4.2.5 Pokusi kontroliranih naprezanja i deformacija

Test kontroliranog naprezanja, odnosno na eng. *strain controlled test*, služi nam za određivanje dinamičkih svojstava ispitanih uzorka. Kod njih je primijenjeno konstantno naprezanje tijekom ispitivanja te se pomoću takvog ispitivanja, kao rezultat, dobivaju sljedeći parametri: modul smicanja, krivulja degradacije modula smicanja, omjera priгуšenja uzorka, itd. [35].

S druge strane test kontrolirane deformacije, poznati po engleskom nazivu *stress controlled test* služi nam za dobivanje parametara vezanih za pojavu likvefakcije. U takvim pokusima pritisak unutar materijala se održava konstantnim. *Stress controlled stress* prikazuje nam vrijednosti poput broja ciklusa sa kojima će cikličkim opterećenjem doći do pojave likvefakcije unutar materijala pri određenom *Cyclic stress ratio*, (CSR), kojeg se detaljnije objašnjavalo u prošlim poglavljima [35].



# 5. REZULTATI LABORATORIJSKIH POKUSA

Unutar ovog poglavlja, rezultati ispitivanja troosnim cikličkim aparatom pretočeni su u grafove. Pokusi su se ispitivali na umjetnim mješavinama na različitim efektivnih naprezanja, 25.0, 50.0 i 100.0 kPa, a odnoos cikličkoog naprezanja varirao je vrijednostima od 0.01, 0.05 i 0.1. Ukupno se 10 uzoraka koristilo u evaluaciji te su oni ugrađeni sa relativnom zbijenosti 80%. Rezultate ispitivanja smo podijelili u dvije podgrupe, a to su pokusi pri kontroliranim naprezanjem, eng. *strain controlled stress* i pokusi pri kontroliranoj deformaciji, eng. *stress controlled stress*. Za svaku podgrupu izradilo se nekoliko grafova kako bi se lakše prikazala slika ponašanja tla prilikom nanošenja opterećenja. Poslije svakog prikaza ponašanja materijala napisan je kratki osvrt.

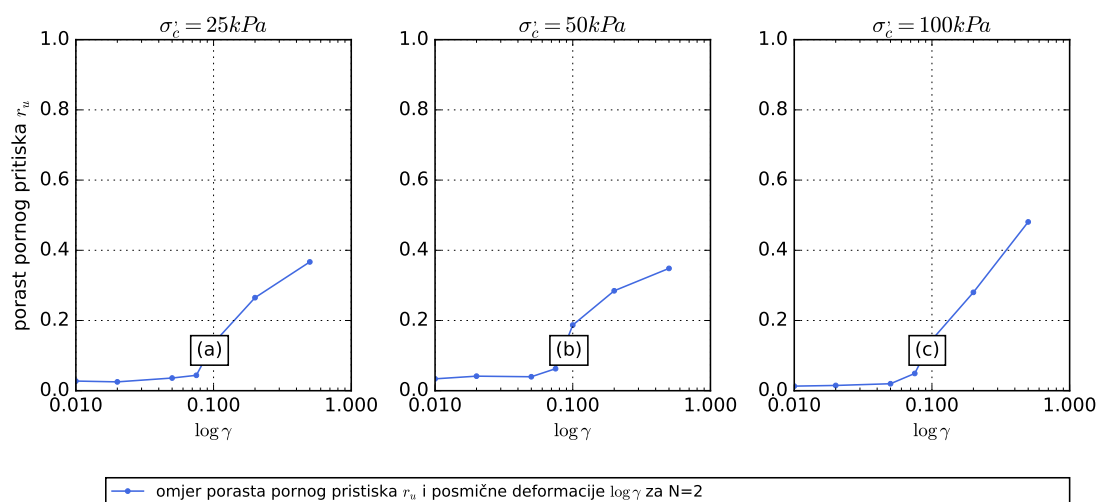
## 5.1 Ciklički troosni pokusi sa kontroliranom relativnom deformacijom

U nastavku su karakteristični rezultati cikličkih troosnih pokusa provedenih pri konstantnoj relativnoj deformaciji. Tijekom provedbe ispitivanja uz pomoć računalnog programa dobiveni su numerički zapisi odaziva materijala umjetnih mješavina koji je bio podvrgnut naprezanjima. Tijekom provedbe pokusa mjerili su se parametri za izradu dijagrama. Neki od parametara koji su se koristili za izradu dijagrama su sljedeći: deformacija  $\gamma$ , porasta pornog pritiska  $r_u$  i broja ciklusa  $N$ , posmična deformacija  $\gamma$  i indeks degradacije  $\delta$ .

### 5.1.1 Odnos relativne cikličke posmične deformacije $\gamma$ i porasta pornog pritiska $r_u$

U ovom podglavlju prikazani su grafovi koji dočaravaju utjecaj porasta pornog pritiska,  $r_u$  pri različitim posmičnim deformacijama. Porast pornog pritiska unaprijed smo opisali i objasnili uz pomoć Slike 2.11 te teksta iznad nje. Amplitude cikličkih deformacija koje su se koristile prilikom ovog pokusa prikazane su u Tablici 4.3.

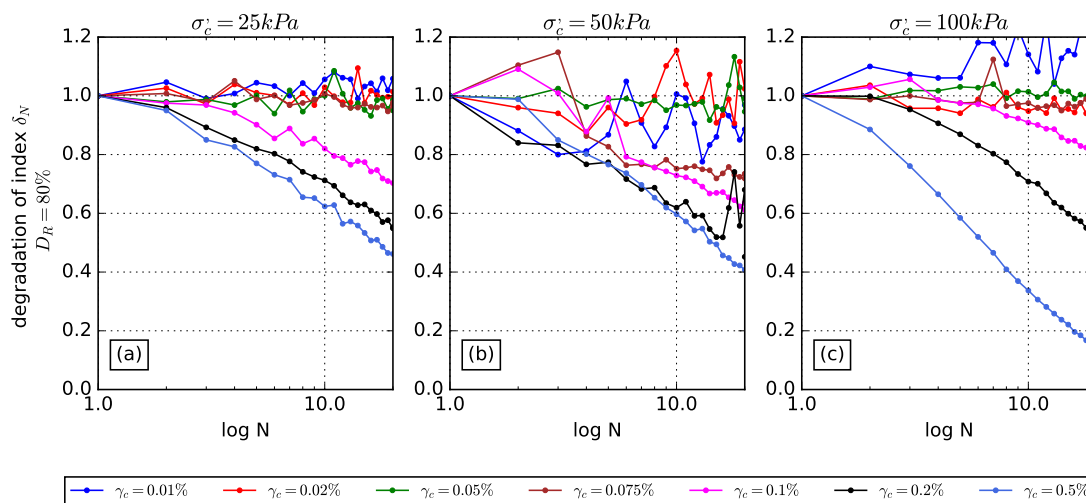
Na slikama su prikazana tri grafa, razlikujemo ih po efektivnom naprežanju,  $\sigma'_c$  sa kojim se pokus ispitivao. Efektivna naprežanja korištena pri ovom ispitivanju bila su od 25.0, 50.0 i 100.0 kPa. A omjer porasta pornog pritiska  $r_u$  i posmične deformacije  $\log \gamma$  za drugi ciklus,  $N = 2$  prikazani su plavom krivuljom.



Slika 5.1: Omjer deformacije i porasta pornog pritiska

## 5.1.2 Odnos indeksa degradacije $\delta$ i broja ciklusa $N$

Pomoću ispitanih uzorka sa relativnom zbijenošću od  $D_r = 80\%$  deriviran je graf u kojem su prikazani omjeri degradacijskog indeksa,  $\delta_N$ , i broja ciklusa,  $N$ . Ispitivanja su podijeljena na više grafova, a razlikuju se po nanesenom opterećenju. Korištena efektivna naprezanja su 25.0, 50.0 i 100.0 kPa, a svako ispitivanje razlikovala se po broj ciklusa,  $N$ .

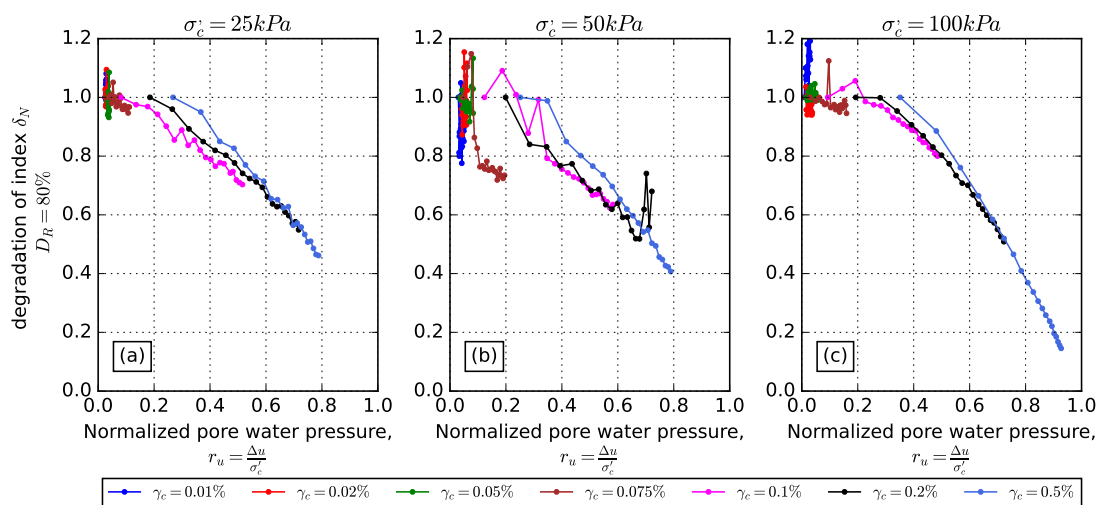


Slika 5.2: Odnos indeksa degradacije i ispitanih ciklusa

### 5.1.3 Odnos porasta pornog pritiska $r_u$ i degradacije $\delta$

U tri grafa prikazan je odnos pornog pritiska,  $r_u$  i degradacijskog indeksa  $\delta_N$ . Svaki od provedenih pokusa imao je relativnu zbijenost  $D_r = 80\%$ . Porast pornog pritiska unaprijed smo opisali i objasnili uz pomoć Slike 2.11 te teksta iznad nje.

Tri grafa razlikuju se po efektivnim naprezanjima,  $\sigma'_c$  koja su bila 25.0, 50.0 i 100.0 kPa. A deformacije,  $\gamma_c$  korištene tijekom svakog ciklusa razlikovale su se u rasponu od 0.10% do 0.5%. Svaka deformacija označena je svojom bojom, označeno prema legendi ispod grafova.



Slika 5.3: Odnos porasta pornog pritiska i degradacije

## 5.2 Ciklički troosni pokusi sa kontroliranim devijatorom naprezanja

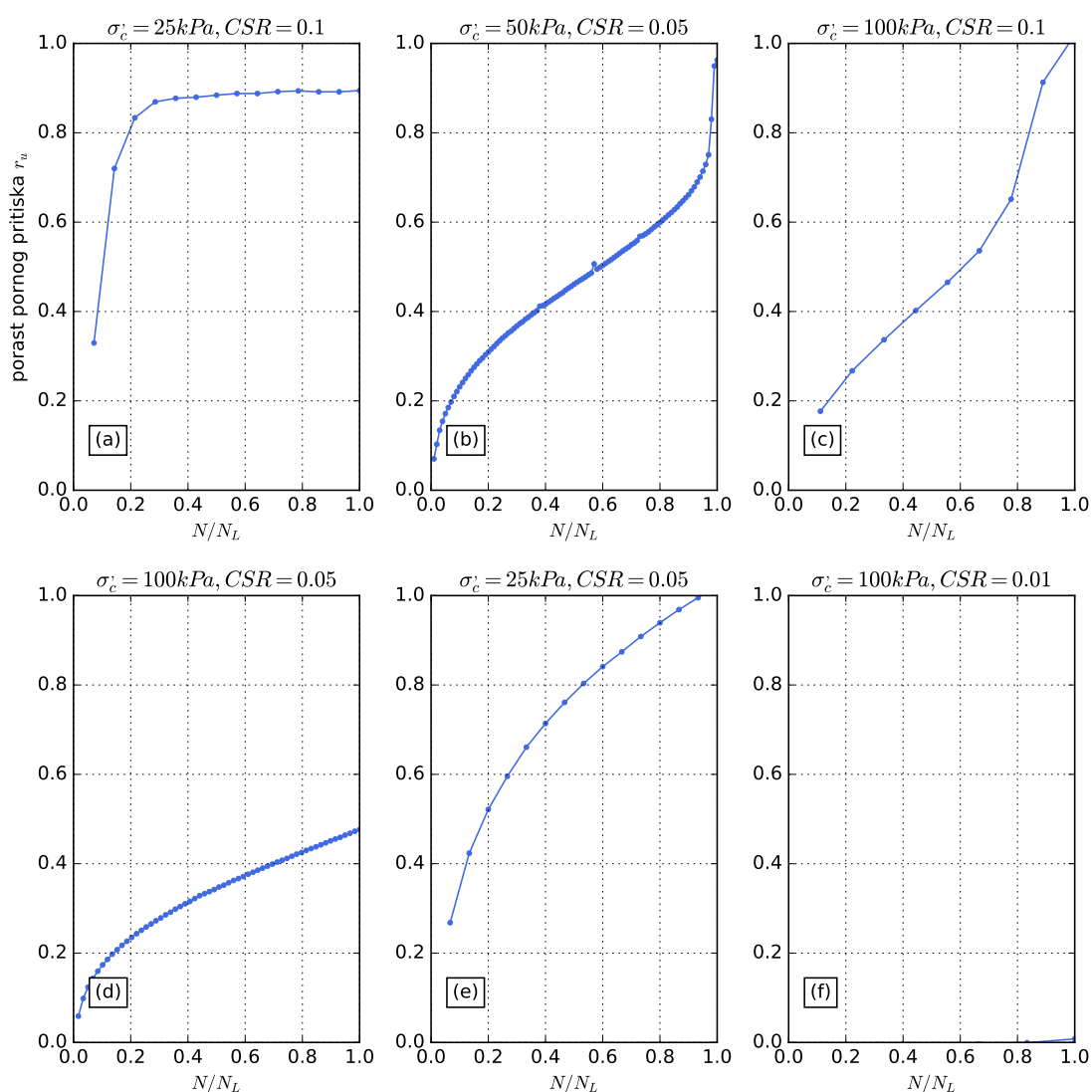
U ovom poglavlju nacrtani su dijagrami pomoću aplikacije naziva *Visual Studio Code*, VSC. Uz pomoć kodnih zapisa dobili smo željene dijagrame na Slici 5.4.

Dijagrami su se nacrtali koristeći prethodno dobivene parametra. Parametri su se tijekom ispitivanja umjetnih mješavina na troosnom uređaju zabilježavali na računalni program. Parametari koji su se koristili za izradu sljedećeg dijagrama su: deformacija broja ciklusa  $N$ , porast pornog pritiska  $r_u$  i ciklus likvefakcije,  $N_L$ .

## 5.2.1 Odnos omjera trenutnog ciklusa sa ciklusom likvefakcije $N/N_L$ i porasta pornog pritiska $r_u$

Na sljedećim slikama prikazani su grafovi dobiveni pomoću uzorka relativne zbijenosti  $D_r = 80\%$ . Na apscisi grafova nalazi se omjer broja ciklusa,  $N$  sa brojem ciklusa kada je uzorak likvefirao,  $N_L$ , dok je na ordinati prikazan porni pritiska,  $r_u$ .

Ispitivanja smo podijelili po količini efektivnog naprežanja,  $\sigma_c$  koje se dijelilo na 25.0, 50.0 i 100.0 kPa.



Slika 5.4: Odnos omjera trenutnog ciklusa sa ciklusom likvefakcije i porasta pornog pritiska

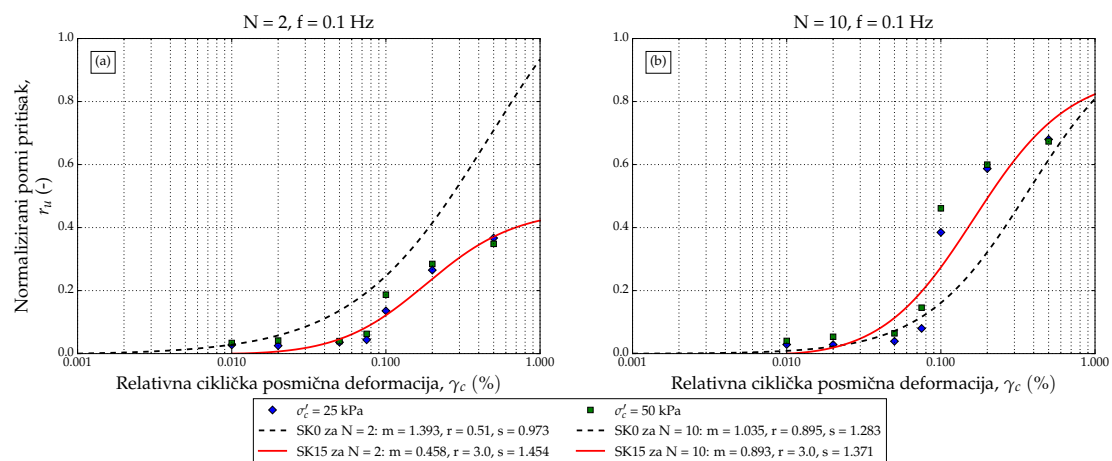
## 5.3 Analitički modeli prirasta pornog pritiska

Rezultati laboratorijskih pokusa pri konstantnoj deformaciji prikazani na Slici 5.5 korišteni su kao ulazni podatci za aproksimaciju prirasta pornog pritiska analitičkim modelom za normalizirani porni pritisak predložen od strane Vučetića i Dobryja [36], izraz (5.1).

$$r_u = \frac{m \cdot d \cdot N_{cyc} \cdot r \cdot (\gamma_c - \gamma_{tv})^s}{1 + d \cdot N_{cyc} \cdot r \cdot (\gamma_c - \gamma_{tv})^s} \quad (5.1)$$

gdje je  $d$  koeficijent smjera opterećenja ("1" ukoliko je opterećenje u jednom smjeru, "2" ukoliko je opterećenje u dva smjera),  $N_{cyc}$  broj ciklusa opterećenja,  $\gamma_{tv}$  pretpostavljena vrijednost cikličkog praga  $m$ ,  $r$  i  $s$  su parametri aproksimacije.

Slikom 5.5 prikazani su rezultati aproksimacije dobivene za istraženi materijal (SK15) te su rezultati ujedno uspoređeni sa rezultatima istraživanja dobivenih na čistom pijesku (SK0) pri malim efektivnim naprezanjima [24, 27]. Vrijednosti fit-parametara prikazani su tablicom 5.1.



Slika 5.5: Rezultati laboratorijskih pokusa pri konstantnoj deformaciji

Tablica 5.1: Aproksimacijski parametri analitičkog modela prirasta pornog pritiska

Oznaka materijala i broj ciklusa	Fit parametri		
	m	r	s
SK0, N = 2 [24, 27]	1.393	0.510	0.973
SK0, N = 10 [24, 27]	1.035	0.835	1.283
SK15, N = 2	0.458	3.000	1.454
SK15, N = 2	0.893	3.000	1.371





## 6. DISKUSIJA

Uspoređujući Sliku 5.1, na kojoj je prikazan omjer deformacije i porasta pornog pritiska, sa grafovima koje su dobili Sulovsky [11] i Vučetić [9] možemo zaključiti kako se podudaraju rezultati ispitivanja provedena za ovaj rad. U grafovima na Slici 5.1, vidljivo je za sva tri slučaja kako sa porastom deformacije raste porni pritisak.

Slikom 5.2 prikazani su grafovi odnosa degradacijskog indeksa,  $\delta_N$  i broja ciklusa,  $N$ . Svi pokusi ispitivali su se u nedreniranim uvjetima. Uslijed malih deformacija, krivulja degradacije je u nekim slučajevima, kao šta su to na Slici 5.2 u grafovima a) i c), u laganom padu pri deformaciji od  $\gamma_c = 0.02\%$  i  $\gamma_c = 0.075\%$ . Iako u većini slučajeva deformacijska krivulja je u blagom rastu šta se može vidjeti kod deformacija od  $\gamma_c = 0.01\%$  i  $\gamma_c = 0.05\%$ . Isto ponašanje pijeska utvrdili Turković [24] i Vučetić [36]. Kod većih deformacija, krivulje degradacije opadaju kako su i drugi autori ustanovili.

Na Slici 5.3, uz pomoć grafova vidljiv je odnos indeksa degradacije,  $\delta_N$  i pornog pritiska,  $r_u$ . Uzorci su ispitivani na različitim deformacijama,  $\gamma_c$  koje variraju od  $\gamma_c = 0.01\%$  do  $\gamma_c = 0.5\%$ . U sva tri grafa vidljiva su odstupanja koja su nastala uslijed ispitivanja na malim efektivnim naprezanjima. Očite greške u ispitivanju su vidljive prilikom korištenja deformacija  $\gamma_c = 0.01\%$ ,  $\gamma_c = 0.02\%$ ,  $\gamma_c = 0.05\%$  i  $\gamma_c = 0.075\%$ . Vidljiva su odstupanja u krivuljama kod većih deformacija  $\gamma_c = 0.1\%$ ,  $\gamma_c = 0.2\%$  i  $\gamma_c = 0.5\%$ . Sa porastom pornog pritiska dolazi do opadanja degradacije, šta se podudara sa grafovima iz literature autora Vučića [36].

Promatrajući šest grafova na Slici 5.4 možemo primijetiti kako efektivno naprezanje,  $\sigma_c$  i Cyclic Stress Ratio, CSR utječu na odnos omjera trenutnog ciklusa,  $N$  sa ciklusom likvefakcije,  $N_L$  i porasta pornog pritiska  $r_u$ . CSR-i koji su se koristili u pokusu bili su 0.01, 0.05 i 0.1, a naprezanje se dijelilo na 25.0, 50.0 i 100.0 kPa. Na grafu f) odnos parametra je jedva vidljiv u donjem desnom kutu, što nam govori o brzjoj likvefakciji uzorka, dok u ostalih pet grafova linije su vidljivije. Broj linija na grafu ovisi o broju ciklusa, a dobiveni rezultati podudaraju se sa očekivanim.



## 7. ZAKLJUČAK

Svrha ovog diplomskog rada bila je utvrđivanje cikličkih ponašanja umjetnih mješavina tla u troosnom smicanju. Provedena su ispitivanja u nedreniranim uvjetima pri različitim efektivnim naprežanjima, a efektivna naprežanja dijelila su se na:  $\sigma'_c = 25.0$  kPa,  $\sigma'_c = 50.0$  kPa i  $\sigma'_c = 100.0$  kPa. Umjetne mješavine imale su zbijenost od 80%. Kod nedreniranih uvjeta voda iz uzorka ne može izaći, s toga su porni pritisci veći, što označava da je kod nedreniranih uvjeta proces likvefakcije brži nego kod dreniranih uvjeta. U uzorcima dolazi do pojave likvefakcije kada u materijalu porni pritisak dosegne vrijednost "1", što se podudara sa prethodnim ispitivanjima. Prilikom ispitivanja na uzorcima su provedene dvije vrste testova, a to su bili testovi kontroliranih naprežanja i testovi kontroliranih deformacije. Ukupno je izrađeno dvanaest uzoraka, od kojih dva pokusa nisu uspjela stoga se koristilo samo deset pokusa za evaluaciju.

Analiziranjem dobivenih rezultata utvrđeno je kako troosni uređaj korišten pri ispitivanju nije pouzdan za ispitivanje pri malim deformacijama. Na grafovima dolazi do neželjenih odstupanja zbog nedovoljne preciznosti uređaja, prilikom korištenja malih deformacija poput  $\gamma_c = 0.01\%$ ,  $\gamma_c = 0.02\%$ ,  $\gamma_c = 0.05\%$  i  $\gamma_c = 0.075\%$ , s toga kako bi uređaj pokazivao ispravnije vrijednosti isti bi se trebalo kalibrirati prilikom novih istraživanja. Grafovi prikazani u ovom diplomskom radu podudaraju se sa grafovima iz literature. Zaključeno je kako se ispitani materijal umjetnih mješavina ponašao u skladu sa prethodnim saznanjima.



# LITERATURA

- [1] Andreić, M. *Ocjena postojećeg stanja nosive konstrukcije uz provedbu detaljnog pregleda stambene zgrade*. PhD thesis, University North. University centre Varaždin. Department of Civil Engineering, 2020.
- [2] Leon, L. The importance of site class determination in seismic design, 2019. URL [https://stgec.org/presentations/STGEC\\_2019/Talk%208.pdf](https://stgec.org/presentations/STGEC_2019/Talk%208.pdf). Last accessed 7 June 2023.
- [3] Ostroški, T. *Potresi i utjecaj na okoliš*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Geotechnical Engineering, 2019.
- [4] Mance, M, Cvetković, M., and Jurić Kaćunić, D. Laboratorijsko i terensko određivanje koeficijenta propusnosti. *Laboratorijsko i terensko određivanje koeficijenta propusnosti*, 2022.
- [5] Pokrajac, D. *Korelacijska analiza zavisnosti dreniranog kuta unutrašnjeg trenja o indeksu plastičnosti*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Geotechnical Engineering, 2018.
- [6] Rihtarić, R. *Inženjerskogeološki opis i klasifikacija tla na lokaciji Srebrnjak (Zagreb)*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, 2021.
- [7] Svojstva tla i klasifikacija prema česticama, 2022. URL <https://m-kvadrat.ba/svojstva-tla-i-klasifikacija-prema-cesticama/>. Last accessed 7 June 2023.
- [8] Kahlström, M. Plaxis 2d comparison of mohr-coulomb and soft soil material models, 2013.
- [9] Vucetic, M. Soil properties and seismic response. In *Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering*, pages 1199–1204, 1992.
- [10] Kramer, S. L. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India, 1996.

- [11] Sulovsky, T. *Cikličko ponašanje dravskog pijeska u nedreniranim uvjetima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering in Rijeka, 2018.
- [12] Drenevich, V.P. Effects of amplitude of vibration on the shear modulus of sand. *Proc. Int. sympo. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials*, pages 189–199, 1967.
- [13] Silver, M. L. and Park, T. K. Liquefaction potential evaluated from cyclic strain-controlled properties tests on sands. *Soils and Foundations*, 16(3):51–65, 1976.
- [14] Kumar, S. S., Krishna, A. M., and Dey, A. Evaluation of dynamic properties of sandy soil at high cyclic strains. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 99: 157–167, 2017.
- [15] Metalna sita za izraču granulometrijske krivulje, 2023. URL <https://russian.alibaba.com/product-detail/Stainless-Laboratory-garden-soil-sieve-riddle-1600312463867.html>. Last accessed 13 July 2023.
- [16] Areometar za mjerenje frakcija sitnozrnastih materijala, 2023. URL <https://hr.wikipedia.org/wiki/Areometar#/media/Datoteka:Hydrometer6455.png>. Last accessed 13 July 2023.
- [17] Jagodnik, V. and Marušić, D. Determination of the atterberg limits using a fall cone device on low plasticity silty sands. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 38 (3):133–145, 2023.
- [18] Gallagher, P. M. *Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk*. PhD thesis, Virginia Tech, 2000.
- [19] Bolt, B. A. *Earthquakes: a primer*. *arthquakes: a primer*, 1978.
- [20] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., and Sarhosis, V. Destructive m6.2 petrinja earthquake (croatia) in 2020—preliminary multidisciplinary research. *Remote Sensing*, 13(6), 2021. ISSN 2072-4292. doi: 10.3390/rs13061095. URL <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/6/1095>.
- [21] Jagodnik, P. *Potresi i klizišta*. *Potresi i klizišta*, 2018.
- [22] Markušić, S., Stanko, D., Penava, D., Ivančić, I., Bjelotomić Oršulić, O., Korbar, T., and Sarhosis, V. Destructive m6. 2 petrinja earthquake (croatia) in 2020—preliminary multidisciplinary research. *Remote Sensing*, 13(6):1095, 2021.

- [23] Mikulić, G. *Metode određivanja strukture tla*. PhD thesis, University of Zagreb. Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering . . . , 2020.
- [24] Turković, M. *Cikličko ponašanje uniformnog pijeska u dreniranim i nedreniranim uvjetima pri malim efektivnim naprezanjima*. PhD thesis, University of Rijeka. Faculty of Civil Engineering, 2021.
- [25] Klibbe, P.R. The determination of factor of safety against liquefaction and post-liquefaction settlement. *The Determination of Factor of Safety against Liquefaction and Post-Liquefaction Settlement*, 2016.
- [26] Nguyen, T. T., Indraratna, B., and Singh, M. Dynamic parameters of subgrade soils prone to mud pumping considering the influence of kaolin content and the cyclic stress ratio. *Transportation Geotechnics*, 29:100581, 2021.
- [27] Jagodnik, V. and Arbanas, Ž. Cyclic behaviour of uniform sand in drained and undrained conditions at low confining stress in small-scale landslide model. *Sustainability*, 14(19):12797, 2022.
- [28] Hyodo, M., Hyde, A., Aramaki, N., and Nakata, Y. Undrained monotonic and cyclic shear behaviour of sand under low and high confining stresses. *Soils and Foundations*, 42(3):63–76, 2002.
- [29] Koseki, J., Yoshida, T., and Sato, T. Liquefaction properties of toyoura sand in cyclic torsional shear tests under low confining stress. *Soils and Foundations*, 45 (5):103–113, 2005.
- [30] Thevanayagam, S. Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 124(6): 479–491, 1998.
- [31] Chakraborty, T. and Salgado, R. Dilatancy and shear strength of sand at low confining pressures. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 136(3):527–532, 2010.
- [32] Wood, M. Robert worth bingham, american ambassador to the court of st. james, 1933-1934: The productive years. 1978.
- [33] Feng, T.-W. A linear log d log w model for the determination of consistency limits of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(6):1335–1342, 2001.
- [34] Ladd, R.S. Preparing test specimens using undercompaction. *Geotechnical testing journal*, 1(1):16–23, 1978.

- [35] Kumar, S. S., Murali Krishna, A., and Dey, A. Assessment of dynamic response of cohesionless soil using strain-controlled and stress-controlled cyclic triaxial tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38:1431–1450, 2020.
- [36] Vucetic, M. *Pore pressure buildup and liquefaction at level sandy sites during earthquakes (California, Japan)*. Rensselaer Polytechnic Institute, 1986.