Hidraulički edometar

Lisičak, Aleksandra

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:999913

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Hidraulički edometar

Lisičak, Aleksandra

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:999913

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-09**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ALEKSANDRA LISIČAK

HIDRAULIČKI EDOMETAR

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

HIDRAULIČKI EDOMETAR

KANDIDAT: MENTOR:

ALEKSANDRA LISIČAK doc. dr. sc. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2016.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

HIDRAULIČKI EDOMETAR

Rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc.dr.sc. Igora Petrovića.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije korišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 01.09. 2016.

Aleksandra Lisičak

Lisičak Aleksandra

SAŽETAK

Aleksandra Lisičak, Hidraulički edometar

Edometar je uređaj kojim se ispituje stišljivost tla, a u njega se ugrađuje neporemećeni uzorak tla kružnog presjeka. Opterećenje se nanosi postepeno tako da je slijedeće uvijek dvostruko veće od ranijeg. Hidraulički edometar razlikuje se od konvencionalnih po tome što se konsolidacijski tlak primjenjuje hidraulički i do gornje površine uzorka prenosi preko savitljive gumene membrane, što se može koristiti za mjerenje promjene volumena uzorka. Mjerenje se može vršiti ručno ili automatizirano pomoću specijaliziranih programskih paketa. Za potrebe ovog rada proveden je edometarski pokus na uzorku kvarcnog pijeska.

Usporedno s ispitivanjem uzorka u hidrauličkom edometru rađeno je ispitivanje na uzorku istog kvarcnog pijeska u Velikom edometru Geotehničkog fakulteta. Cilj usporednog ispitivanja bio je prikupljanje podataka koji bi se naknadno mogli iskoristiti za usporedbu rezultata dobivenih na hidrauličkom edometru i na velikom edometru Geotehničkog fakulteta.

Ključne riječi : koeficijent pora, stišljivost, slijeganje, edometar

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OSOBINE ČESTICA TLA 2
   2.1. TROFAZNI KARAKTER TLA 2
      2.1.1. VLAŽNOST TLA 3
      2.1.2. GUSTOĆA 3
      2.1.3. POROZITET 4
      2.1.4. ODNOS GUSTOĆE TLA I POROZNOSTI 5
      2.1.5. STUPANJ ZASIĆENOSTI 6
   2.2. KLASIFIKACIJA TLA 7
      2.2.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV 8
      2.2.2. GRANICE KONZISTENCIJE 10
3. DEFORMACIJSKA SVOJSTVA TLA 11
      3.1.1. STIŠLJIVOST I KONSOLIDACIJA TLA 12
      3.1.2. KLASIČNI EDOMETAR 13
4. HIDRAULIČKI EDOMETAR 15
   4.1. UGRAĐIVANJE UZORKA U HIDRAULIČKI EDOMETAR 17
   4.2. REZULTATI EDOMETARSKOG ISPITIVANJA 21
5. ZAKLJUČAK 24
6. POPIS LITERATURE 25
7. POPIS SLIKA 26
8. POPIS TABLICA 27

1. UVOD

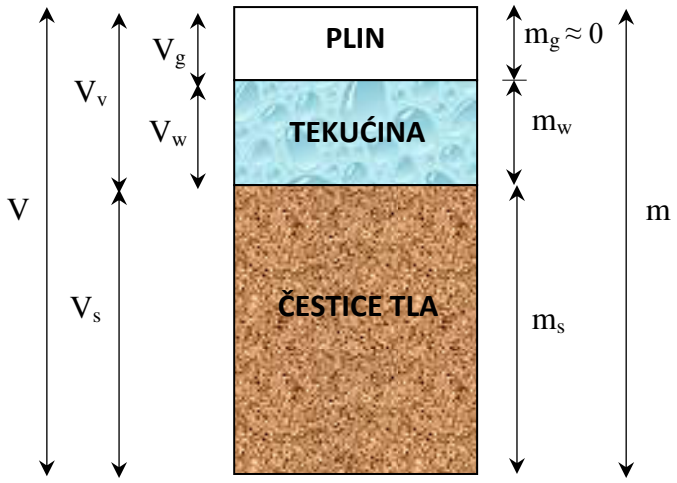
Tlo je nakupina zrnaca različite veličine i oblika koji su poredani gušće ili rahlije tako da je samo dio ukupnog volumena ispunjen. Današnji je sastav tla rezultat zbroja neprestanih promjena prilika, učinaka erozije vode i vjetra, rastrošivanja i raznih drugih činilaca, procesa i utjecaja.

Rastrožba stijena, transport sitnijih fragmenata i taloženje transportiranih fragmenata i čestica, procesi su nastanka tla. Raspadanje ili rastrožba stijena uvjetovana je mehaničkim i kemijskim faktorima. Stezanje i rastezanje Zemljine kore, tektonske sile koje deformiraju čvrste stijene (boranje, rasjedanje i navlačenje), temperaturne promjene, led, abrazija i vegetacija neki su od mehaničkih faktora raspadanja prvobitnih stijena nastalih na Zemljinoj površini. Kemijski faktori rastrožbe su oksidacija, karbonacija, hidratacija, desilikacija i otapanje u vodi. Faktori transporta čestica tla pridružuju se činiocima rastrožbe te djeluju prenoseći proizvode primarne rastrožbe, a u glavne faktore transporta ubrajaju se gravitacijske sile, voda, vjetar i ledenjaci. Nakon rastrožbe te transporta čestica posljednja karika pretvorbe čvrstih stijena u nevezane sedimente su faktori sedimentacije.

2. OSOBINE ČESTICA TLA

2.1 TROFAZNI KARAKTER TLA

Fizikalna svojstva tla presudni su kriterij kod donošenja odluka prije provođenja raznih zahvata u tlu i tehničkom korištenju tla, a ponašanje tla u različitim uvjetima ovisi upravo o fizikalnim svojstvima. Tlo je trokomponentni medij jer se sastoji od tri homogeno izmiješane komponente; čvrste, tekuće i plinovite (slika 1.). Prostore između čvrstih čestica nazivamo pore koje mogu biti ispunjene vodom, zrakom te vodom i zrakom, dakle tlo je porozna materija. U slučaju kada su pore ispunjene vodom tlo je zasićeno, a kada su ispunjene zrakom tlo je suho.



Slika 1. Model tla

V → ukupni volumen [m^3]

V_v → volumen pora [m^3]

V_s → volumen čvrstih čestica [m^3]

V_g → volumen plina [m^3]

V_w → volumen vode [m^3]

m → ukupna masa uzorka [g]

m_g → masa plina [g]

m_w → masa vode [g]

m_s → masa suhih čestica [g]

2.1.1. VLAŽNOST TLA

Svako tlo u prirodi sadrži veće ili manje količine vode u svojim porama. Potpuno suhog tla u prirodi praktički i nema. Vlažnost tla w (%) je odnos između mase vode u uzorku (m_w) i mase suhog uzorka (m_s), odnosno težine vode u porama uzorka W_w i težine čvrstih čestica W_s [1] .

$$w = \frac{m_W}{m_S} \, x \, 100 \, [\,\%\,] \qquad (\text{ izraz 1. })$$

Vlažnost tla mijenja se i pri stalnom volumenu, a ovisi o stupnju zasićenja S_r. Prirodna vlažnost (w_0) je vlažnost koju tlo ima u svom prirodnom stanju. Prirodna vlažnost određuje se u laboratoriju na uzorcima tla koji moraju biti dobro zapakirani da se do dolaska u laboratorij nimalo ne osuše. [2]

U laboratoriju se vlažnost određuje tako da se najprije vagne prirodno vlažan uzorak, zatim se taj uzorak suši u sušioniku na 105 °C u vremenskom razdoblju od 24 sata. Nakon što se uzorak izvadi iz sušionika on se vagne, a razlika u masi prije i poslije sušenja je masa vode [3] .

2.1.2. GUSTOĆA

Svaka tvar ima neku gustoću [ρ]. Gustoća je omjer mase [m] i volumena [V] . Izražava se u [$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$] ili u [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]. Porijeklo i vrsta čvrstih čestica tla, odnosi između čvrstih čestica i pora i između pora i vode u njima parametri su o kojima ovisi gustoća .

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (\text{ izraz 2. })$$

Gustoća čvrstih čestica u laboratoriju se određuje pomoću piknometra, na način da se odredi masa i volumen suhog tla. Volumen se odredi pomoću količine vode koju čvrste čestice istisnu iz piknometra punog vode [2] .

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \qquad (\text{ izraz 3. })$$

2.1.3. POROZITET

Pore su međuprostori između pojedinih čestica tla i ne postoji prirodno tlo bez pora. Veličina pora u tlu nije konstantna nego ovisi o pritisku pod kojim se tlo nalazi i o trajanju tog pritiska. Imamo li veći pritisak na tlo, čestice tla se više stisnu, a volumen pora smanji. Smanji li se pritisak na tlo, tlo se do određene mjere elastično rasteže ili bubri, pore se povećavaju, ali nikad više ne mogu dosegnuti opseg i volumen koji su imale prije nanošenja pritiska. Porozitet uvelike utječe na mehanička svojstva tla, a naročito na stišljivost tla, te je tako jedna od najvažnijih geomehaničkih karakteristika [4] .

Apsolutni porozitet ili volumen pora (n) je odnos između volumena pora i ukupnog volumena tla. Izražava se u postocima, a koristi se za proračun gustoće tla.

$$n = \frac{V_V}{V} \, x \, 100 \, [\,\%\,] \qquad \text{(izraz 4.)}$$

Relativni porozitet ili koeficijent pora (e) je odnos između volumena pora i volumena čvrstih čestica. Upotrebljava se kod analiza slijeganja zato što se deformacija upravo događa na tom dijelu tla. Orijentalno se može reći da je tlo pogodno za temeljenje ako ima relativni koeficijent pora e $\leq$ 0,5, a nepovoljno ako je e > 1,0 . U tablici 1. prikazane su približne granice koeficijenta pora (e) i volumena pora (n) za neke materijale [4] .

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad \text{(izraz 5.)}$$

Odnos apsolutnog i relativnog poroziteta:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{(izraz 6.)} \qquad e = \frac{n}{1-n} \quad \text{(izraz 7.)}$$

Tablica 1. približne granice e i n nekih materijala

VRSTA TLA	pijesak	pjeskovita glina	prašinasta glina	masna glina	betonit
n [%]	25 - 38	36 - 44	40 - 48	45 - 55	65
e	0,33 - 0,61	0,56 - 0, 92	0,67 - 0,92	0,85 - 1,22	1,86

2.1.4. ODNOS GUSTOĆE TLA I POROZNOSTI

Gustoća je inverzna pojmu porozitet, što je gustoća uzorka veća to je porozitet manji i obrnuto. Svako tlo može imati očekivanu maksimalnu i minimalnu gustoću i samim time minimalni i maksimalni porozitet. Sipamo li slobodno npr. pijesak ili neko drugo sipko tlo u suhom i rahlom stanju na neku podlogu ili u posudu (npr. u edometarski prsten) dobit ćemo tlo sa minimalnom gustoćom i maksimalnim mogućim porozitetom . Ako se to isto tlo nabije u vlažnom stanju dobijemo maksimalnu gustoću i minimalni porozitet. Takva maksimalna gustoća kod nekoherentnih materijala najbolje se postiže vibracijom. Ako je manja razlika između prirodne i maksimalno moguće gustoće tlo je bolje konsolidirano, njegova nosivost je veća, a slijeganje pod opterećenjem je manje [4].

Ako je tlo bolje konsolidirano njegova nosivost je veća i tlo je pogodnije za građevne tehničke zahvate. Stupanj konsolidiranosti tla najbolje dolazi do izražaja u tzv. indeksu zbijenosti. Indeks zbijenosti ili indeks relativne gustoće određuje se ispitivanjem nekoherentnog tla u najgušćem i najrahlijem stanju punjenjem u posudu normirane veličine. Najgušće stanje određuje se sipanjem suhog uzorka u posudu uz istodobno udaranje posude viljuškom normiranih dimenzija, najrahlije stanje odredi se punjenjem posude suhim materijalom kroz lijevak. Na taj se način odredi porozitet za najgušće stanje e_{min} i za najrahlije e_{max} [4] .

$$I_D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}} \quad \text{(izraz 8.)} \qquad \text{ili} \qquad I_D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} \quad \text{(izraz 9.)}$$

e_0 → stvarni koeficijent pora koji uzorak ima u prirodnom stanju

Kada je tlo potpuno nekonsolidirano $e_0 = e_{max}$ izraz za indeks zbijenosti dobiva oblik:

$$I_D = \frac{0}{e_{max} - e_{min}} = 0 \qquad \text{(izraz 10.)}$$

U slučaju potpuno konsolidiranog tla $e_0 = e_{min}$, kada tlo ima najveću moguću gustoću i kod opterećenja se mogu očekivati razmjerno mala slijeganja, najčešći primjer toga je sitnozrnati pijesak taložen u mirnoj vodi, izraz poprima oblik:

$$I_D = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} - e_{min}} = 1 \quad \text{(izraz 11.)}$$

Indeks zbijenosti ili relativna gustoća je važna geomehanička karakteristika za nekoherentna tla, dok kod koherentnih nema skoro nikakve važnosti, a tamo ga zamjenjuje indeks konzistencije. [4]

Pomoću indeksa relativne gustoće/indeksa zbijenosti definiramo stanje materijala kao:

a) Rahlo stanje za $I_D = 0 – 0,33$
b) Srednje gusto stanje za $I_D = 0,33 – 0,66$
c) Gusto stanje za $I_D = 0,66 – 1,0$

2.1.5. STUPANJ ZASIĆENOSTI

Stupanj zasićenosti je odnos između volumena vode i volumena pora, a taj naziv nazivamo još i stupanj saturacije. [4]

$$S_r = \frac{V_w}{V_p} = \frac{m - m_s}{V - \frac{m_s}{\gamma_s}} \quad \text{(izraz 12.)}$$

Gdje je:

γ_s → specifična gustoća mase materijala tla, a specifična gustoća je omjer mase suhog uzorka tla u odnosu na masu istisnute vode, pomnoženo s gustoćom vode [3] .

Teoretski se stupanj zasićenja može kretati u rasponu od 0 do 1 tj. od 0 do 100 %.

Kada je:

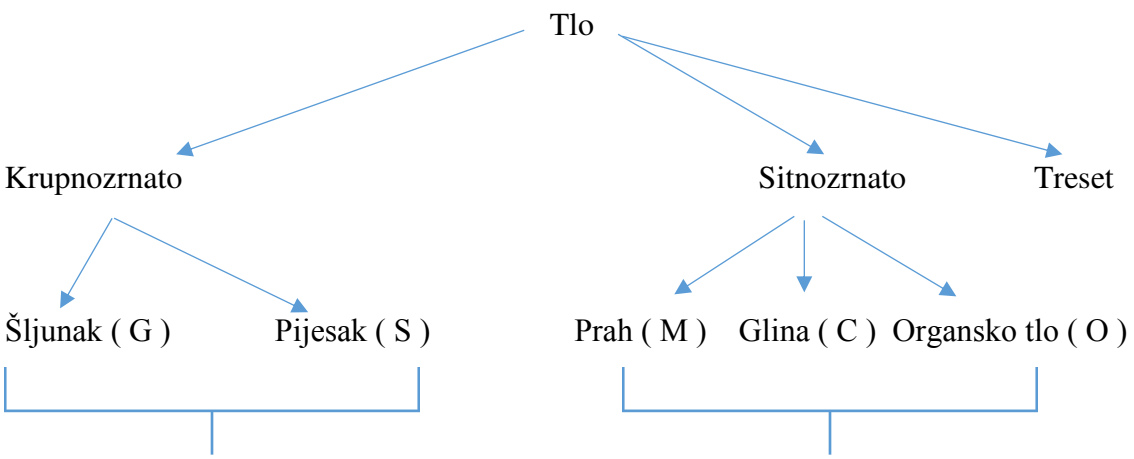
Sr = 0 → tlo je suho

Sr = 100 % → tlo je potpuno zasićeno (saturirano) tj. sve pore su ispunjene vodom

$0 \leq Sr \leq 100\ \%$ → tlo je djelomično zasićeno vodom

2.2 KLASIFIKACIJA TLA

U strukturi od koje se tlo sastoji nalaze se čestice koje su različite krupnoće. Osobine samog tla ovise količini pojedinih krupnoća čestica tla u ukupnom volumenu tla. Krupnoće čestica bitno uvjetuju fizičko – mehaničkim svojstvima tla, a samim time i na ponašanje tla prilikom promjene stanja naprezanja. Tla se svrstavaju u određene grupe na temelju nekih osobina. Klasifikacija tla služi prvenstveno za lakše sporazumijevanje između stručnjaka iz područja mehanike tla, kao i za grafičko prikazivanje rezultata terenskih istražnih radova [4]. Danas se kod nas najviše koristi AC klasifikacija (slika 2.) koju je razradio Artur Casagrande, a na kojoj se temelji USCS klasifikacija [2] .



W → dobro graduirano

P → slabo graduirano

<

U → jednoliko graduirano

C → dobro graduirano s glinom

F_s → slabo graduirano s mnogo prašinastih čestica

F_c → slabo graduirano s mnogo glinovitih čestica

L → nisko plastično, $W_L < 35\ \%$

I → srednje plastično, $35\ \% < W_L$

50 %

H → visoko plastične, $W_L > 50\ \%$

Slika 2. AC klasifikacija tla

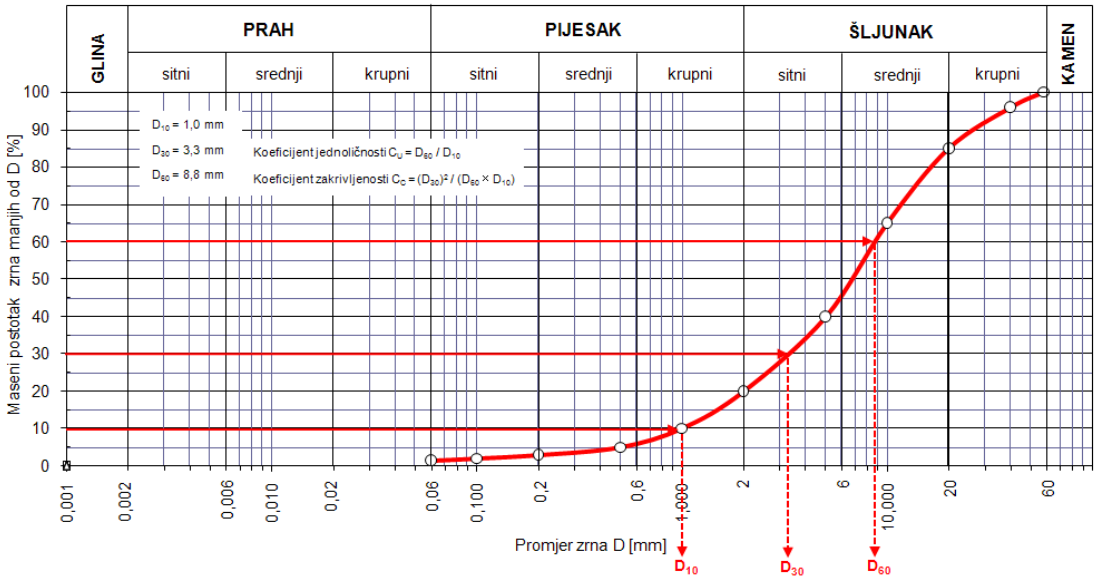
2.2.1. GRANULOMETRIJSKI SASTAV

Granulometrijski sastav tla je za neki uzorak tla, veza svih razreda promjera zrna i njihovih postotaka masa. Već se samo na temelju granulometrijskog sastava tla mogu odrediti neke fizikalne karakteristike tla. Na temelju krupnoće zrna, tlo se dijeli u razredbene kategorije prema dominantnoj veličini zrna te ih klasificiramo kao krupnozrnate (pijesak i šljunak) i sitnozrnate (glina i prah). Granulometrijski sastav određuje se sijanjem ukoliko je tlo sastavljeno isključivo od krupnozrnatih materijala, prosijavanjem kroz sita svrstana u standardni niz graničnih veličina koje su prikazane u tablici 2. Sita većih otvora izrađena su od perforiranog lima, dok su sita manjeg otvora izrađena od metalne mreže s kvadratnim otvorima [3] . Tlo sastavljeno od sitnozrnatog materijala nije moguće sijati da bi se odredila krupnoća čestica već se ona određuje temeljem određivanja promjene gustoće suspenzije, a postupak se naziva hidrometrijska analiza ili areometriranje [2]. Kod nas su prihvaćene granice koje su dane po MIT-u (Massachusetts Institute od Tehnology, SAD) koja je internacionalno prihvaćena (tablica 2.) .

Tablica 2. Vrste materijala tla prema promjeru zrna

Drobina	**Šljunak**			**Pijesak**			**Prah**			**Glina**
promjer zrna	krupan	srednji	sitan	krupan	srednji	sitan	krupan	srednji	sitan	
mm:	**60**	**20**	**6**	**2**	**0,6**	**0,2**	**0,06**	**0,02**	**0,006**	**0,002**

Granulometrijski sastav prikazuje se dijagramom (slika 3.) u kojemu se na osi ordinata nanosi odnos ili postotak N količine uzorka koji je prošao kroz sito u linearnom mjerilu, a na apscisi promjer zrna D u logaritamskom mjerilu [1].



Slika 3. Primjer granulometrijskog dijagrama [3]

Bitne osobine granulometrijske krivulje mogu se izraziti pomoću efektivnog promjera zrna (D_{10}), koeficijenta jednolikosti (C_u) i koeficijenta zakrivljenosti (C_c), koji se računaju iz promjera zrna [4] .

D_{10} → efektivni promjer zrna, promjer sita kroz kojeg prolazi posljednjih 10 % ispitanog uzorka

$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ → koeficijent jednolikosti, D_{60} je promjer sita kroz koji prolazi 60 % ukupne količine uzorka

$C_u = 1$ odgovara materijalu kojemu su sva zrna jednakog promjera [5]

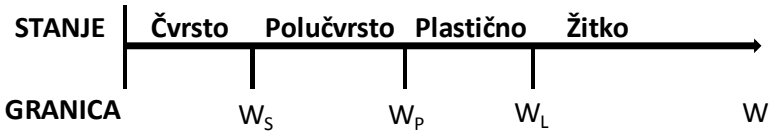
$C_u > 4$ → dobro graduiran šljunak

$C_u > 6$ → dobro graduiran pijesak

$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}$ → koeficijent zakrivljenosti, D_{30} je promjer sita kroz koji prolazi 30 % ukupne količine uzorka

2.2.2. GRANICE KONZISTENCIJE

Pod konzistencijom tla podrazumijeva se agregatno stanje tla u ovisnosti od sadržane vode. Postoji bitna razlika između konzistencije koherentnih i nekoherentnih tla, konzistencija šljunka i pijeska praktički ne ovisi o sadržaju vode, dok konzistencija koherentnih tla npr. gline ovisi o količini vode koju tlo sadrži [4]. Suho glinovito tlo može biti potpuno kruto i čvrsto dok s porastom vode ono najprije postaje plastično, a zatim meko i prelazi u žitko tekuće stanje [5]. Atterberg je na temelju rezultata dugotrajnih opažanja i empirijskih pokusa definirao stanje plastičnosti glinovitih materijala i granice između tih stanja koje su određene količinom vlage u trenutku kad materijal ima granična svojstva (slika 4.) [5].



Slika 4. Stanja plastičnosti i granice između njih

W_S → granica stezanja

W_P → granica plastičnosti

W_L → granica tečenja

Može se definirati:

Indeks plastičnosti I_P → razlika sadržaja vlage između granice tečenja i granice plastičnosti, $I_P = W_L - W_P$ (izraz 13.)

Indeks konzistencije I_C → odnos razlike granice tečenja i prirodne vlažnosti prema indeksu plastičnosti, $I_C = \frac{W_L - W_0}{I_P}$ (izraz 14.)

3. DEFORMACIJSKA SVOJSTVA TLA

Dosadašnje izlaganje odnosilo se na osobine čestica tla koje su vrlo bitne za heterogenu materiju kao što je prirodno tlo, ali to nije dovoljno da se riješe najveći zadaci mehanike tla koji obuhvaćaju proračun deformacija koje nastaju zbog opterećenja tla i utječu na sigurnost i pravilno funkcioniranje kako to navodi Nonveiller [5] . Brojni su primjeri neuspjelih građevina, čije ponašanje ne odgovara predviđenome upravo zato što nisu ispravno proračunati utjecaji opterećenja na tlo, a mogući događaji su pretjerane deformacije i time uvjetovana mehanička oštećenja kao npr. pukotine i potpuni slomovi nekih dijelova objekta. Zbog velikog poroziteta materijala i time uvjetovane pokretljivosti pojedinih čvrstih čestica tla, dovoljan je relativno mali intenzitet naprezanja da se izazovu osjetno velike deformacije [5] .

Deformacije stvarnog tla ne ovise linearno o promjeni naprezanja, one nisu elastične pa nakon rasterećenja ostaju znatne deformacije. Pokusi koji su izvedeni na pijesku i šljunku pokazuju da se oni ponašaju elastično za hidrostatska naprezanja, ali zbog promjene površine i broja kontakata među zrnima pri povećanom naprezanju odnosi između naprezanja i deformacija nisu linearni. Glinoviti materijali ne ponašaju se ni linearno ni elastično ni za hidrostatska naprezanja pri smicanju. Kako bi se svladale velike teškoće pri proračunu interakcije između elastičnih konstrukcija i tla koristimo se modelima tla koji približno predočuju stvarno ponašanje tla pod opterećenjem [5] .

Kao što je ranije navedeno tlo se sastoji od tri faze; čvrste, tekuće i plinovite koje imaju različite elastične karakteristike, pa u promjeni naprezanja svaka preuzima različit dio opterećenja. U potpuno zasićenom tlu višefazni sustav pod opterećenjem, preuzima teret dijelom preko tereta, a dijelom preko fluida u porama [2]. Efektivno naprezanje (σ') je onaj dio ukupnog naprezanja kojeg prenosi skelet tla, a možemo mjeriti samo totalna naprezanja (σ) i porni tlak (u) dok efektivno naprezanje izračunamo preko jednadžbe:

$$\sigma' = \sigma - u \text{ (izraz 15.)}$$

3.1.1. STIŠLJIVOST I KONSOLIDACIJA TLA

Promjene efektivnih naprezanja, a time i promjene deformacije, mogu nastati tek nakon smanjenja pornog tlaka. Kad se porni tlak zbog promjene stanja naprezanja izjednači sa stacionarnim hidrauličkim poljem u podzemnoj vodi završava proces slijeganja. Pod pojmom slijeganja tla podrazumijeva se uspravni pomak temeljne konstrukcije odnosno tla, izazvan opterećenjem konstrukcijom, promjenom razine podzemne vode itd. [2] . Postepeno smanjivanje pornog pretlaka i porast slijeganja do njegove konačne veličine naziva se proces konsolidacije tla. Vrijeme trajanja konsolidacije, a time i slijeganja ovisi o intenzitetu i raspodjeli pornog pretlaka, o dimenzijama polja u kojemu su nastale promjene pornog tlaka i o propusnosti tla [5] .

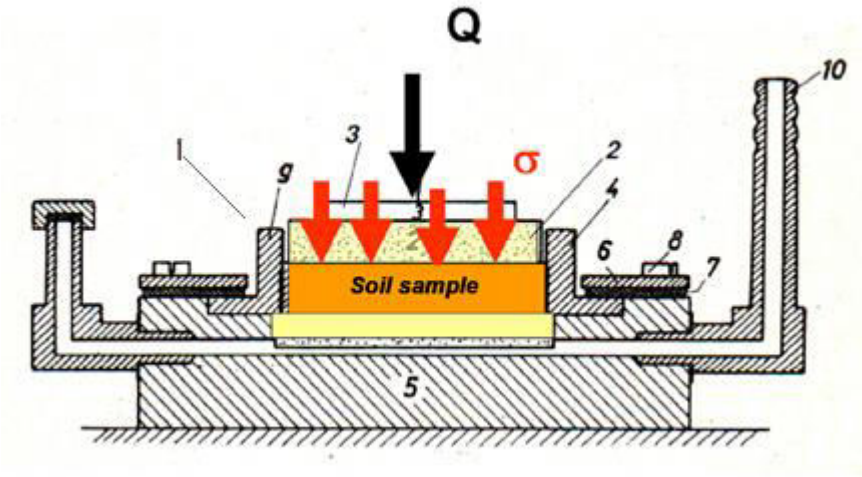
Ukupno slijeganje može se rastaviti na tri dijela; trenutno slijeganje koje vremenski prati promjene opterećenja, konsolidacijsko slijeganje koje nastaje zapreminskom deformacijom tla i vremenski je usporen zbog ograničene brzine istjecanja vode i zraka iz pora tla (kod nekoherentnih tala je taj proces vrlo kratkotrajan) i sekundarno konsolidacijsko slijeganje koje je izazvano puzanjem (javlja samo u koherentnim tlima) [2] .

Želimo li odrediti deformaciju temeljnog tla pod raznim objektima i konstrukcijama moramo znati promjene u toku opterećenja koje one izazivaju. Deformacija ili stišljivost tla određuje se na neporemećenim uzorcima tla u laboratorijskom uređaju edometru [4] . Kad se na tlo prenosi opterećenje neke relativno velike plohe, u velikom dijelu područja nastaju pretežno vertikalne deformacije, a deformacije u bočnom smjeru nemaju veće značenje, osim na rubovima te se zbog toga upotrebljavaju konstante dobivene u laboratoriju ispitivanjem uzoraka sa spriječenim bočnim deformacijama u edometrima [5] . Čista kompresija tla sastoji se od istiskivanja vode iz pora tla kao i čestica tla u susjedne pore, a time dolazi do pomicanja i pregrupiranja čestica čime se postiže veća gustoća, a manji dio čini elastična kompresija samih čestica tla. Skine li se

opterećenje koje je dovelo do kompresije, elastični dio totalne deformacije vraća se u prvobitno stanje dok plastični dio deformacije ostaje nepovratan [4] .

3.1.2. KLASIČNI EDOMETAR

Edometar (slika 5.) je uređaj za ispitivanje stišljivosti tla. U edometru se mjeri promjena visine h niskoga cilindričnog uzorka tla promjera B uz porast opterećenja Q. Sastoji se od metalnog prstena u koji se uzorak ugrađuje. Uzorak se nalazi na poroznome keramičkom kamenu velike propusnosti u udubljenju metalne podloge aparata. Iznad uzorka također je porozni kamen i na njemu metalna ploča koja prenosi i raspodjeljuje opterećenje. Donji porozni kamen i prostor u kojemu on leži spojen je provrtom u podlozi s prozirnom staklenom cijevi u kojoj je voda. Iznad gornje porozne ploče također se nalije voda koja se može prelijevati preko kratke cijevi. Kad je razina u staklenoj cijevi na visini vode iznad gornje porozne ploče, u uzorku nema hidrauličkog gradijenta pa voda ne protječe kroz uzorak. Opterećenje se prenosi na gornju metalnu ploču točno centrično preko čelične kugle i uređaja za prijenos sile [5] .



Slika 5. Presjek edometra s ugrađenim uzorkom tla [6]

(1) – edometarska ćelija, (2) – porozne pločice za dreniranje uzorka, (3) – ploča za raspodjelu opterećenja, (4) i (9) – prsten edometra s ugrađenim uzorkom, (5) – donja

ploča, (6) - brtvena ploča, (7) – stezaljka, (8) – vijci, (10) – cijev za dovod i odvod vode, soil sample – uzorak tla

U edometrima malog promjera ispituju se svi sitnozrnati uzorci (pijesak, prah i glina), a kad treba ispitati uzorke krupnozrnatog materijala edometri moraju biti znatno veći. Uzorci sitnozrnatog materijala opterećuju se u edometru postepeno povećanim opterećenjima. Obično se opterećenje podvostručuje u svakom idućem stupnju. U stanovitim vremenskim intervalima registrira se deformacija. Način opterećivanja u laboratoriju treba prilagoditi karakteru uzorka i problemu koji proučavamo [5] .

Pokus se izvodi tako da se nakon ugradnje uzorka u edometar registrira početna visina ploče na koju se prenosi teret, pa se uzorak potopi vodom i čeka dok se smiri eventualna deformacija uzrokovana bujanjem. Zatim se u stupnjevima povećava opterećenje do željenog intenziteta, bilježi se deformacija dok se ona nakon svakog prirasta sile smiri. Zatim se uzorak rasterećuje u inkrementima koji su obično dvostruko veći od onih u opterećenju [5] .

Za svaki odsječak opterećenja odredi se veličina ukupne deformacije ΔH i relativne deformacije ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \qquad \text{(izraz 16.)}$$

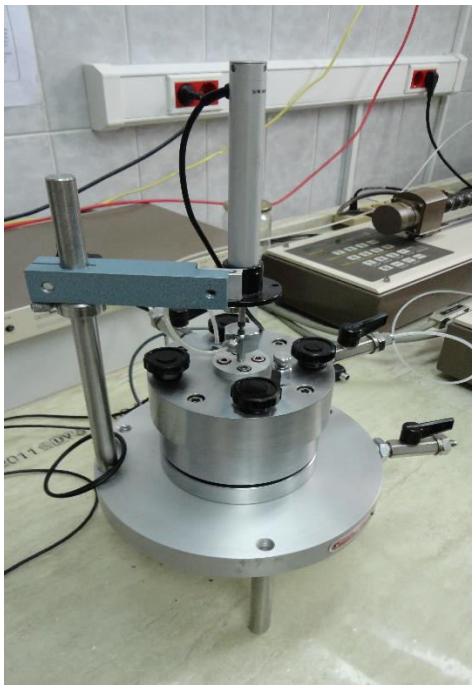
Iz definicije koeficijenta pora e i činjenice da se deformacija događa jedino na račun promjene zapremnine pora, može se izračunati i pripadna promjena koeficijenta pora [2].

$$\Delta e = (\,1 + \, e_0) \times \varepsilon \qquad \text{(izraz 17.)}$$

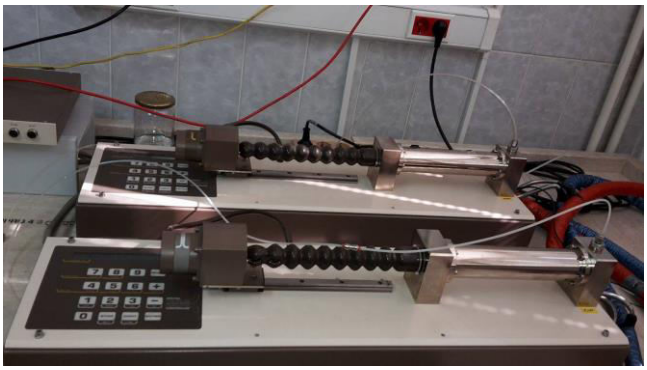
Rezultate pokusa prikazujemo u edometarskom dijagramu. Krivulja kojom se prikazuje ovisnost koeficijenta pora o opterećenju naziva se edometarska krivulja. Dijagram se obično prikazuje u polulogaritamskom mjerilu na osi opterećenja i obrnuto usmjerenom osi za porozitet [2] .

4. HIDRAULIČKI EDOMETAR

Hidraulički edometar (slika 6.) razlikuje se od konvencionalnih po tome što se konsolidacijski tlak primjenjuje hidraulički i do gornje površine uzorka prenosi preko savitljive gumene membrane. Mjerenje se može vršiti ručno ili automatizirano u specijaliziranim programskim paketima .



6a.

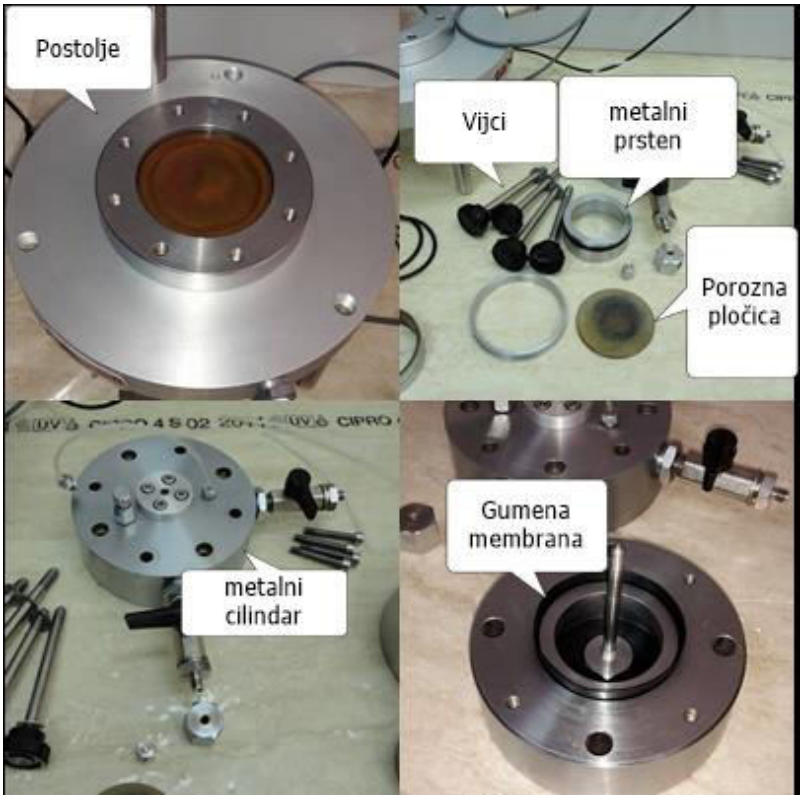


6b.

Slika 6. Hidraulički edometar: 6a. hidraulička ćelija i 6b. hidrauličke pumpe

Hidraulička ćelija edometra sastoji se od (slika 7.) :

1. Postolja koje je pričvršćeno na metalni stolić koji ima tri nožice. Kroz sredinu metalnog stolića i postolja dolazi voda iz uređaja za nametanje protoka, a sa strane se nalazi cijev koja omogućava regulaciju pornog pritiska.
2. Gumene membrane koja se postavlja na metalni prsten i osigurava prijenos opterećenja
3. Metalni cilindar gornja je strana metalnog cilindra s umetnutom membranom
4. Dvije porozne pločice jedna ispod i jedna iznad uzorka koja priliježe na gornju stranu uzorka i slijedi pomake zajedno s uzorkom po visini
5. Vijci koji se postavljaju dijagonalno uz što manje opterećenje uzorka
6. Metalni prsten u koji ugrađujemo uzorak
7. Mjerilo pomaka koje se stisne na uzorak, a reguliramo ga graničnikom
8. Metalni klip koji je u osnovi cjevčica kroz koju se odvija tečenje vode prema gore tijekom pokusa



Slika 7. Dijelovi hidrauličke ćelije

4.1. UGRAĐIVANJE UZORKA U HIDRAULIČKI EDOMETAR

Kao uzorak za ispitivanje uzet je pijesak iz Jerovca, koji smo najprije prosušili u sušioniku na 110 ˚C u vremenu od 24 h (slika 8.). Usporedno s ispitivanjem uzorka u hidrauličkom edometru rađeno je ispitivanje istog uzorka u Velikom edometru Geotehničkog fakulteta. Cilj usporednog ispitivanja bio je prikupljanje podataka koji bi se naknadno mogli iskoristiti za usporedbu rezultata dobivenih na hidrauličkom edometru i na velikom edometru Geotehničkog fakulteta.

Slika 8. Sušenje pijeska u sušioniku

Odlučili smo se koristiti rahli materijal (u našem slučaju kvarcni pijesak) čije su karakteristike navedene u tablici 3.

Tablica 3. Karakteristike pijeska korištenog za ispitivanje

Veličina frakcije	D/d	0/1mm
Tipični granulometrijski sastav	Prolaz kroz sito 2,0 mm	100
	Prolaz kroz sito 1,0 mm	100
	Prolaz kroz sito 0,50 mm	97
	Prolaz kroz sito 0,25 mm	47
	Prolaz kroz sito 0,125 mm	8
	Prolaz kroz sito 0,063 mm	2,2
Gustoća	Stvarna gustoća čestica	ρ_a=2,63 Mg/m3
	Gustoća čestica u suhom stanju	ρ_{rd}=2,59 Mg/m3
	Gustoća čestica u zasićenom suhom stanju	ρ_{ssd}=2,60 Mg/m3
Petrografski opis	Opis	Kvarcni pijesak

Kao početni uvjet postavili smo da gustoća pijeska (kao i koeficijent pora) budu jednaki u oba ispitivanja. Da bi zadovoljili početne uvjete na temelju dobivene gustoće uzorka ugrađenog u Veliki edometar koja je iznosila 1,36 g/cm (e_0 = 0,9), izračunata je potrebna masa pijeska koju smo ugradili u hidraulički edometar kako bi dobili približno istu gustoću, koeficijent pora odnosno istu zbijenost pijeska. Najprije smo morali izračunati volumen prstena hidrauličkog edometra iz podataka koje smo izmjerili, a koji su prikazani u tablici 4.

Tablica 4. Izmjerene dimenzije prstena hidrauličkog edometra

Promjer prstena d [mm]		
	d_1	63,17
	d_2	63,25
	d_3	63,45
	d_4	63,42
	d_5	63,34
	d_6	63,47
	D	63,35
Visina prstena h [mm]		
	h_1	19,12
	h_2	19,13
	h_3	19,11
	h_4	19,18
	h_5	19,14

	h_6	19,22
	h_7	19,19
	H	19,16

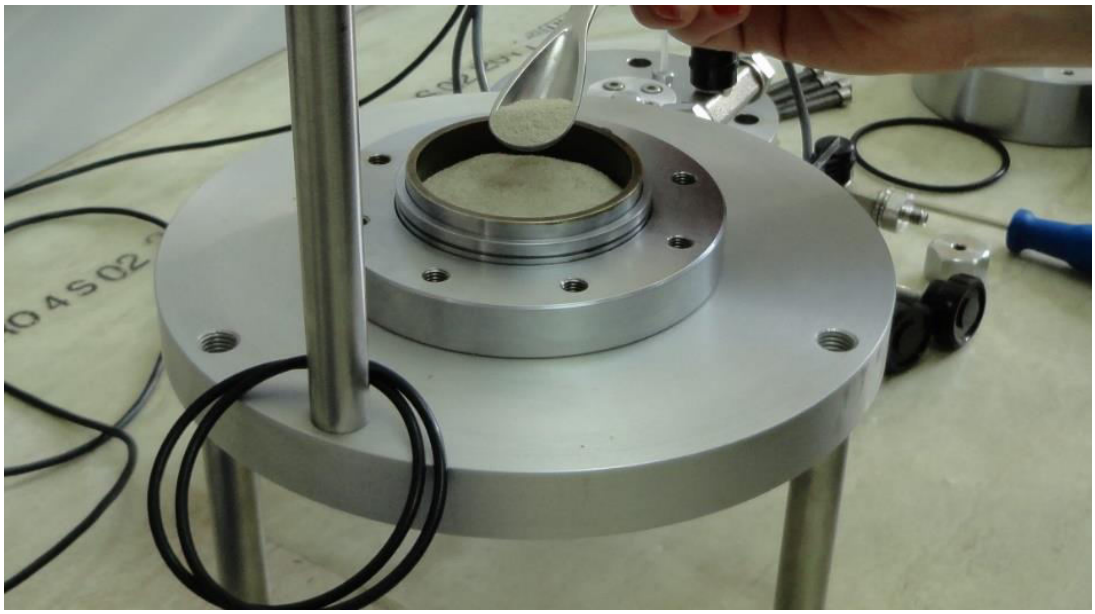
Iz izmjerenih dimenzija dobili smo da je volumen prstena jednak:

$$V = \frac{(63{,}35)^2 \times \pi}{4} \times 19{,}16 = 60{,}39\ cm^3$$

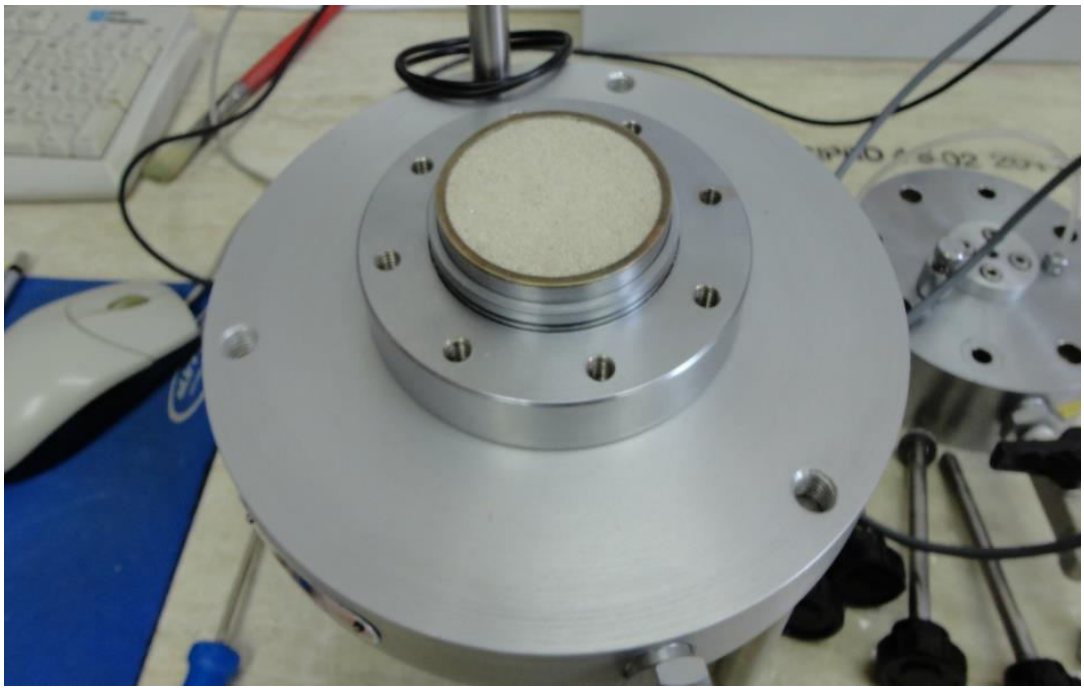
Iz toga slijedi da masa uzorka koja je potrebna da bi se uzorak ugradio u hidraulički edometar sa istom gustoćom i istim koeficijentom pora iznosi :

$$m_d = \rho_d \times V = 1{,}36\ \frac{g}{cm^3} \times 60{,}39\ cm^3 = 82{,}13\ g$$

Masu od 82,13 g trebalo je čim rahlije ugraditi u prsten hidrauličkog edometra (slika 9.) . Nakon što je masa od 82,13 g uspješno ugrađena u hidraulički edometar (slika 10.) trebalo je oprezno sastaviti hidrauličku ćeliju i mogli smo započeti s ispitivanjem.



Slika 9. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar



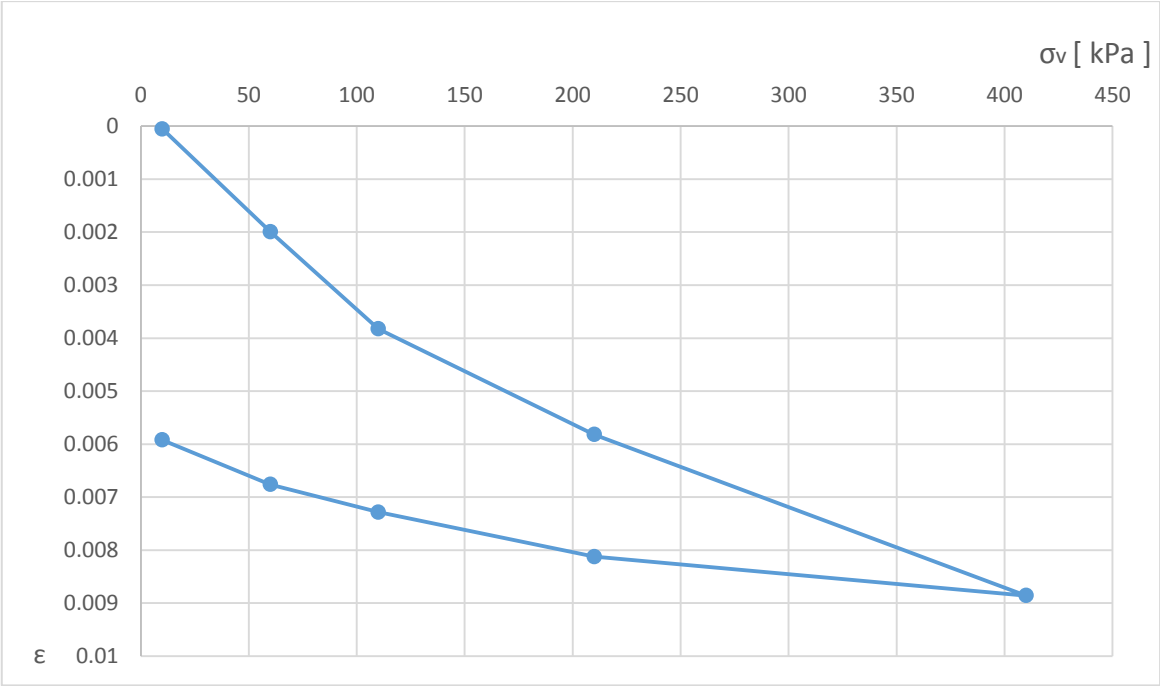
Slika 10. Ugrađeni uzorak pijeska

4.2. REZULTATI EDOMETARSKOG ISPITIVANJA

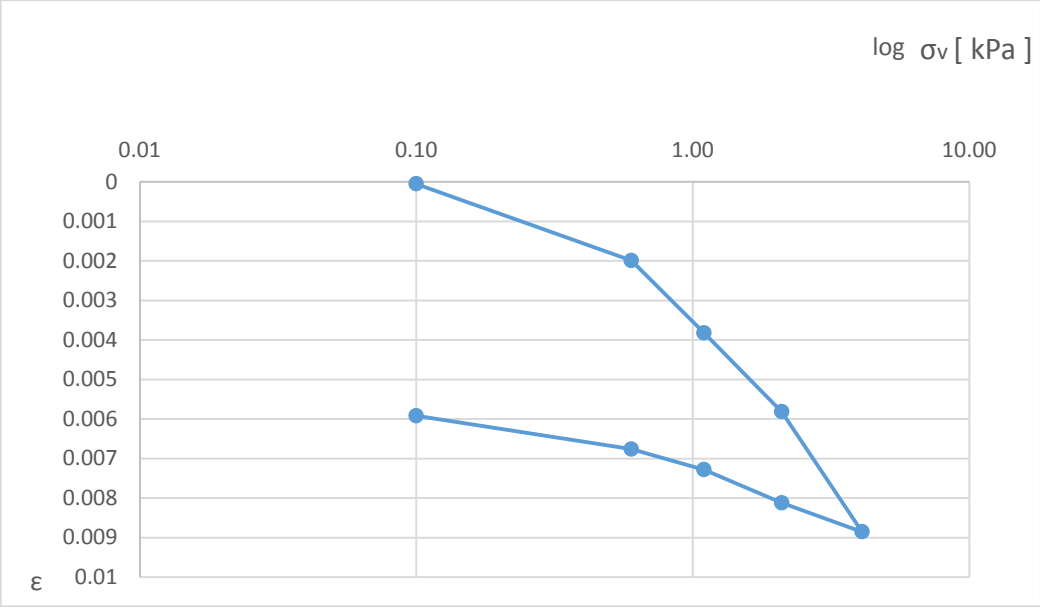
U prvom inkrementu uzorak smo opteretili sa opterećenjem od 10 kPa, a svako slijedeće opterećenje povećavalo se tako da je bilo dvostruko veće od ranijeg. U tablici 5. prikazane su vrijednosti dobivene za svaki inkrement te iznosi modula stišljivosti za svako opterećenje. Promjena relativne deformacije ε u zavisnosti od vertikalnog naprezanja σ_v prikazano je na slici 11. te u logaritamskom mjerilu na slici 12.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja

σ_v [kPa]	$\Delta\sigma_v$	Δh	ε	e	Δe	M_v [MPa]	M_v [MPa]
	[kPa]	**[mm]**		$\mathbf{e = e_0 + \Delta e}$	$\mathbf{\Delta e = (1 + e_0) * \varepsilon}$	$\mathbf{M_v = \frac{\Delta\sigma'_v}{\varepsilon}}$	$\mathbf{M_v = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta e}(1 + e_0)}$
Opterećenje							
0 - 10	10	0,001	0,000052	0,900099	0,0000988	192,3076923	192,3077
10 - 60	50	0,038	0,001992	0,903785	0,0037848	25,10040161	25,1004
60 - 110	50	0,073	0,003826	0,907269	0,0072694	13,06847883	13,06848
110 - 210	100	0,111	0,005818	0,911054	0,0110542	17,18803713	17,18804
210 - 410	200	0,169	0,008857	0,916828	0,0168283	22,58100937	22,58101
Rasterećenje							
410 - 210	200	0,155	0,008124	0,915436	0,0154356	24,61841457	24,61841
210 - 110	100	0,139	0,007285	0,913842	0,0138415	13,72683596	13,72684
110 - 60	50	0,129	0,006761	0,912846	0,0128459	7,395355717	7,395356
60 - 10	50	0,113	0,005922	0,911252	0,0112518	8,443093549	8,443094



Slika 11. Promjena deformacije ε u zavisnosti od vertikalnog naprezanja σ_v



Slika 12. Promjena deformacije ε u zavisnosti od vertikalnog naprezanja σ_v u logaritamskom mjerilu

Dobiveni rezultati približno odgovaraju orijentacijskim vrijednostima modula stišljivosti M_v koje su prikazane u tablici 6.

Tablica orijentacijskih vrijednosti modula stišljivosti [6] .

Vrsta tla	**Modul stišljivosti M_v [MPa]**
drobina, šljunak	50 - 100
grubi pijesak	33 - 46
sitni pijesak	24 - 37
prašinasti pijesak	10 - 14

Velika vrijednost modula stišljivosti prilikom opterećenja u prvom inkrementu, pokazatelj je da smo prilikom sastavljanja edometarske ćelije poremetili uzorak.

5. ZAKLJUČAK

U mehaničkom smislu tlo je konačno uporište svake građevine. Za projektiranje i izvedbu objekata neophodno je poznavati naprezanja u tlu te deformacije koje nastaju kao reakcije tla na promjenu stanja naprezanja uzrokovanih zahvatima na ili u tlu.

Deformacija ili stišljivost tla određuje se u edometru. U edometru se mjeri početna visina uzorka te promjena te visine tijekom opterećivanja. Glavne značajke hidrauličkog edometra u odnosu na konvencionalni su te da nisu potrebni utezi za nanošenje opterećenja, zauzima manje prostora te je kompaktniji. Hidrauličkim edometrom moguće je mjerenje i regulacija pornog tlaka (tzv. Back pressure), volumne deformacije, aksijalne deformacije, aksijalnog naprezanja.

Dobiveni rezultati na hidrauličkom edometru za naš uzorak rahlog pijeska odgovaraju ranije dobivenim orijentacijskim vrijednostima za različite vrste tla.

6. POPIS LITERATURE

1. Ivanković T. Geotehnički istražni radovi. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet; 2010. (3)
2. Roje - Bonacci, T.: Mehanika tla, Split, 2003. (4)
3. Strelec S., Štuhec D. Geotehnički laboratorij i primjena u inženjerskoj praksi, Interna skripta, Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2011 (5)
4. Percel B. Osnovna mehanika tla I. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 1982
5. Nonveiller, E.: Mehanika tla i temeljenje građevina, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Školska knjiga, Zagreb 1979.
6. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033_SCORM_MFKHT6504SI-EN/sco_01_05.scorm (datum pristupa 15.06.2016.)

7. POPIS SLIKA

Slika 1. Model tla

Slika 2. AC klasifikacija tla

Slika 3. Primjer granulometrijskog dijagrama

Slika 4. Stanja plastičnosti i granice između njih

Slika 5. Presjek edometra s ugrađenim uzorkom tla

Slika 6. Hidraulički edometar: 6a. hidraulička ćelija i 6b. hidrauličke pumpe

Slika 7. Dijelovi hidrauličke ćelije

Slika 8. Sušenje pijeska u sušioniku

Slika 9. Ugrađivanje uzorka u hidraulički edometar

Slika 10. Ugrađeni uzorak pijeska

Slika 11. Promjena deformacije ε u zavisnosti od vertikalnog naprezanja σ_v

8. POPIS TABLICA

Tablica 1. približne granice e i n nekih materijala

Tablica 2. vrste materijala tla prema promjeru zrna

Tablica 3. Karakteristike pijeska korištenog za ispitivanje

Tablica 4. Izmjerene dimenzije prstena hidrauličkog edometra

Tablica 5. Rezultati ispitivanja