



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DOMAGOJ GOLENJA

KONSOLIDACIJA TLA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

KONSOLIDACIJA TLA

KANDIDAT:

DOMAGOJ GOLENJA

MENTOR:

IZV.PROF.DR.SC. IGOR PETROVIĆ

VARAŽDIN, 2019.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

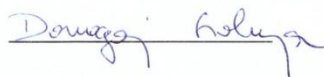
KONSOLIDACIJA TLA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv. prof. 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 iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 5.9.2019.

DOMAGOJ GOLENJA



SAŽETAK:

Tema ove završne radnje je konsolidacija tla. U uvodu se opisuje potreba za mehanikom tla kao znanstvenom disciplinom. Mehanika tla je znanost koja proučava i opisuje mehaničke osobine temeljnog tla bilo da je ono prirodni oslonac građevini čiju težinu mora preuzeti bez štetnih slijeganja i deformacija, bilo da služi kao materijal pri građenju. U ovom radu pažnja je stavljena na konsolidaciju tla.

Konsolidacija tla je zapravo slijeganje koje se dešava zbog opadanja poreznog tlaka te porasta efektivnih naprezanja. Tijekom pripreme završnog rada urađen je pokus u hidrauličkom edometru. Hidraulički edometar je laboratorijski uređaj kod kojeg su spriječene bočne deformacije uzorka tla, te mjeri deformabilnost tla. Tijekom pokusa provedene su faze zasićenja, provjere zasićenja i konsolidacije tla.

Ključne riječi: tlo, slijeganje, konsolidacija, hidraulički edometar

Tablica sadržaja

1. UVOD	1
1.1. GEOLOŠKI POSTANAK TLA	2
2. KONSOLIDACIJA TLA.....	3
2.1. SLIJEGANJE	3
2.2. IZBOR PARAMETARA TLA ZA PROCJENU SLIJEGANJA	5
2.3. OPĆENITO O KONSOLIDACIJI	7
2.4. TERZAGHIJEVA JEDNODIMENZIONALNA TEORIJA KONSOLIDACIJE.....	9
2.4.1. OPĆENITO O TEORIJI.....	9
2.4.2. RJEŠENJE TERZAGHIJEVE JEDNODIMENZIONALNE KONSOLIDACIJE.....	10
2.5. KRIVULJA VREMENSKOG TOKA SLIJEGANJA.....	15
2.6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA KONSOLIDACIJE	16
3. EDOMETARSKI POKUS	20
3.1. PRIPREMA UZORKA	20
3.2. HIDRAULIČKI EDOMETAR.....	22
3.3. UGRADNJA UZORKA U HIDRAULIČKI EDOMETAR.....	24
4. REZULTATI.....	26
5. ZAKLJUČAK	29
6. LITERATURA.....	30
7. POPIS SLIKA	31

1. UVOD

Mehanika tla izučava i opisuje mehanička svojstva tla. Tlo je prirodni oslonac svakoj umjetnoj građevini čiju težinu mora preuzeti bez štetnih slijeganja i deformacija, te služi kao materijal pri građenju npr. nasipa za ceste, željeznice ili brane.[1]

Zadaća mehanike tla je da proučava mehanička svojstva tla te uočava zakonitosti i odnose među tim svojstvima. Za pravilno i uspješno projektiranje neke građevinske konstrukcije na određenoj lokaciji bitno je poznavanje mehaničkih svojstva tla te njihovu razdiobu u okolini tog zahvata. Potrebno je odrediti i definirati postupke primjenom kojih će se nepoznata mehanička svojstva tla sigurno i ekonomično odrediti. Svaka lokacija na kojoj se izvodi neki građevinski zahvat je jedinstvena.

Počeci intenzivnijeg razvoja inženjerskih znanosti o tlu datiraju iz sedamnaestog stoljeća, a dva su stoljeća rada, eksperimenata i teorije bila potrebna za formiranje moderne znanstvene discipline – geotehnike .

Formirana je nova grana znanosti nazvana „Mehanika tla“ pojavom knjige Karla Terzaghija. U knjizi je autor sistematizirao spoznaje i rezultate revolucionarnog eksperimentalnog rada u u jedan kompletiran proces. Tada je počeo nagli razvoj znanosti o tlu, jer je omogućeno racionalnije rješavanje problema uzrokovanih ubrzanom gradnjom.

Težina svake građevine mora se prenijeti na tlo s kojim je ona čvrsto i trajno vezana. Ona se rasprostire na definiran volumen tla, te u njemu izaziva promjene naprezanja i deformacije. Tako nastale deformacije moraju biti kompatibilne s konstrukcijskim i funkcionalnim karakteristikama objekta. Povećana naprezanja u tlu ne smiju premašiti određene granice da ne uzrokuju slom strukture tla, urušavanje ili prevrtanje građevine. [1]

Zato je građevno tlo sastavni dio svake građevine. Mehanika tla je znanost u fazi razvoja i usavršavanja mnogih teorija i metoda na temelju razrade velikog broja opažanja i iskustva što se stječu promatranjem mnogih objekata.

1.1. GEOLOŠKI POSTANAK TLA

Tlo je nakupina sedimentnih ili drugih nekonsolidiranih krutih čestica nastalih fizičkom i kemijskom razgradnjom stijena koje mogu sadržavati organske tvari.[2]

Jedan je od najvažnijih građevinskih materijala što se koriste u prirodnom stanju za temeljenje ili iskope ili se zbija za izgradnju nasipa i brana. Tlo je materijal koji je priroda stvorila u toku neizmjereno dugih vremenskih razdoblja. Sastav tla rezultat je stalnih, neprestanih promjena prilika u okolišu, učinaka erozije vode i vjetra, degradacije i mnogih utjecaja i procesa. Od postanka Zemlje na materijal u njezinoj kori djeluju faktori koji izazivaju rastrošbu i dezintegraciju prvobitnih stijena. Također izazivaju transport nastalih proizvoda te sedimentaciju transportiranih čestica.

Rastrošba započinje utjecajem tektonskih sila koje svojim djelovanjem deformiraju osnovnu stijensku masu te u njoj dolazi do prekoračenja čvrstoće i stvaranja pukotina. Proces je najčešći duž rasjeda, jer se dalje stijena lomi u manje blokove, a pomicanjem blokova dolazi do pukotina. U pukotine ulazi voda koja se smrzava te ih na taj način širi te djeluje hidrostatskim tlakom. Tektonske sile deformiraju čvrste stijene pojavom bora, rasjeda, navlačenja. Led je važan čimbenik u razaranju kamena jer je njegov volumen za 11% veći od volumena vode. Time izaziva velike sile prilikom smrzavanja vode u stijeni koje proširuju i produbljuju pukotine te se brže razara masiv. Abrazija je proces daljnjeg usitnjavanja i trošenja stijena. Komadići stijena se sudaraju, lome bez obzira koji čimbenik prijenosa djeluje. U čimbenike prijenosa ubrajaju se gravitacija, voda, vjetar i led. Vegetacija je faktor koji ubrzava razaranja stijena, sile koje utječu nastale su rastom korijenja drveća i biljaka u manjim pukotinama.

Kemijski čimbenici rastrošbe su oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija te otapanje. Oksidacija nastaje djelovanjem kisika i ozona iz zraka na stijene koje imaju veći udio željeznih spojeva. Karbonizacija je utjecaj ugljične kiseline otopljene u vodi, koja otapa soli i minerale, osobito područja od vapnenca. Otapanjem se šire postojeće tektonske pukotine te se formiraju kanali i kaverne, a površina dobiva oštre oblike. Takav krajolik nazivamo krš. Hidratacija je upijanje vode preko površine stijena. Desilikacija je otapanje i ispiranje silicijeva dioksida iz stijena tijekom sporih hidrotermalnih procesa. Od bioloških procesa trošenja najvažniji je proces raspadanja uginulih biljaka i životinja. Trošenjem ostataka biljaka uz prisutnost vode nastaje vrsta tla vlaknaste strukture koja se naziva treset.

2. KONSOLIDACIJA TLA

2.1. SLIJEGANJE

Vertikalni pomak tla, koji nastaje djelovanjem nekog opterećenja naziva se slijeganje tla. Slijeganje je najčešće uzrokovano opterećenjem, no može se javiti i zbog drugih pojava kao što su sniženje razine podzemne vode, puzanje te dinamički efekti. Vrlo je teško procijeniti iznos slijeganja tla zbog nehomogenosti tla, složenih odnosa naprezanja i deformacija u tlu, te složenog postupka određivanja parametara deformabilnosti tla. U koherentnom tlu slijeganje je dugotrajan vremenski proces. Ukupno (s_u) slijeganje (izraz 1) može se podijeliti na: trenutno (s_t), primarno konsolidacijsko (s_k) i sekundarno konsolidacijsko (s_s).[3]

$$S_{ukup} = s_{tren} + s_{kon} + s_{sek} \quad (1)$$

Trenutno slijeganje nastaje neposredno nakon promjene opterećenja. Kod krupnozrnatih tala je to najizraženija komponenta slijeganja. Kod slabopropusnih, potpuno zasićenih tala izazvano je samo promjenom oblika tla, a bez promjene volumena. Stanje ili proces prilikom kojeg ne dolazi do istjecanja vode, tj. promjene volumena nazivano nedreniranim stanjem.[3]

Konsolidacijsko slijeganje (primarno) je posljedica promjene i oblika i volumena uslijed istjecanja viška vode iz pora, a izrazito je sporo kod zasićenih slabopropusnih tala (glina, prah, zaglinjeni pijesak ili šljunak). Stanje ili proces prilikom kojeg dolazi do istjecanja vode, tj. promjene volumena nazivamo dreniranim stanjem.[3]

Konsolidacijsko slijeganje (sekundarno) izazvano je puzanjem tla, a izraženo je kod koherentnih tala. Puzanje je posljedica deformacije samih čestica, a ne istjecanja vode, obično je izraženo kod visokoplastičnih glina i treseta.[3]

Kod proračuna tj. procjene slijeganja koristi se teorija elastičnosti koja tlo tretira kao homogen linearno elastičan materijal. Tlo je porozno, u porama se nalazi voda ili zrak, pa je važno uzeti i utjecaj istjecanja vode na proračun deformacija.

Slijeganje kod građevina ovisno je od vrste konstrukcije i sastava temeljnog tla. Kod građevina mogu se pojaviti: jednolika slijeganja, naginjanja, savijanja te slijeganja građevina zbog vlastite težine i procesa konsolidacije. Naginjanje i jednoliko slijeganje veoma su tipični slučajevi kod krutih konstrukcija. Zbog razlike u slijeganju dvaju dodirnih točaka ona se nagine. Nejednolika slijeganja i naginjanja mogu se zvati i diferencijalna slijeganja. To je karakteristika kada dvije točke na temeljnoj plohi iste građevine imaju različite veličine slijeganja. Diferencijalno slijeganje zapravo predstavlja razliku ukupnog slijeganja između dvije točke na nekoj udaljenosti, a dovodi do umanjavanja funkcionalnosti građevine i dodatnih naprezanja u konstrukciji.

Savijanje se javlja kada je neravnomjerno raspoređeno opterećenje te nehomogeno ili nejednoliko uslojeno tlo ispod građevine. Slijeganje uslijed vlastite težine javlja se kod svih zemljanih građevina. Najizraženije je kod velikih nasutih brana gdje se to slijeganje mora i može predvidjeti i provjeravati prilikom korištenja. Najčešće se javlja kod brzo izgrađenih nasipa koji nisu dovoljno zbijeni prilikom građenja i kod nepravilno zatrpanih kanala za infrastrukturu. [3]

Analiza slijeganja provodi se kako se ne bi pojavila oštećenja koja bi ugrozila: stabilnost građevine, izgled građevine, upotrebljivost građevine te kvarovi na građevini. Diferencijalno slijeganje (Δs) mnogo je važnije od ukupnih slijeganja, ono uzrokuje zakretanje građevine koje se može izraziti kao kutna distorzija.[3]

Kutna distorzija izražava se kao kvocijent diferencijalnog slijeganja te veličine građevine. Veličina slijeganja koju neka građevina može podnijeti bez posljedica naziva se dopušteno slijeganje. Ovisi o: tipu građevine, dimenziji građevine, položaju i namjeni građevine, vrsti podtemelnog tla te uzroku, procjeni, porijeklu i izvoru slijeganja.[3]

Dopušteno slijeganje određeno je namjenom građevine. Neke konstrukcije kao što su temelji nekih strojeva, kranske staze, uređaj za pročišćavanje voda ne podnose nikakvo slijeganje, a osobito ne diferencijalno. Potrebno je uskladiti moguće dopušteno slijeganje i cijenu izgradnje građevine.[3]

2.2. IZBOR PARAMETARA TLA ZA PROCJENU SLIJEGANJA

Temeljem teorije elastičnosti zasniva se većina metoda za proračun procjene slijeganja te se koristi izraz za slijeganje dijela sloja konačne debljine Δz (izraz 2):

$$\Delta s = \frac{\Delta \sigma_v \cdot \Delta z}{E} \quad (2)$$

E - modul elastičnosti

Δz - konačna debljina sloja

Δs - diferencijalno slijeganje

$\Delta \sigma_v$ – vodoravno naprezanje

Kod linearnih veza relativna vertikalna deformacija dobije se prema izrazu 3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E}, \text{ u ovom slučaju } E \text{ je Youngov modul elastičnosti (3)}$$

Prema teoriji elastičnosti vertikalna deformacija izražava se kao funkcija vertikalnih i horizontalnih naprezanja (izraz 4).

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4)$$

Kod deformacija u ostala dva smjera mogu se analogno pisati odgovarajući izrazi. Kod edometarskog pokusa spriječene su bočne deformacije pa ih možemo uzeti kao 0.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] = 0 \quad (5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] = 0 \quad (6)$$

Iz toga slijedi odnos između naprezanja i deformacija, važno je pripaziti da prilikom odnosa su bočne deformacije jednake nuli.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left[\sigma_z - 2\mu * \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z \right] = \frac{\sigma_z}{E} * \frac{1-\mu-2\mu^2}{1-\mu} \quad (7)$$

Odnos između M_v te E možemo pisati:

$$M_v = E * \frac{1-\mu}{(1+\mu)*(1-2\mu)} \quad (8)$$

M_v - modul stišljivosti

Metoda proračuna slijeganja po teoriji elastičnosti je danas u upotrebi vrlo često s obzirom na mogućnost detaljnih proračuna na računalima. U takve se proračune mogu ugraditi konstitutivne jednačbe prema modelima tla koji su najbliži njegovom stvarnom ponašanju. Za jednostavnije slučajeve i danas se najčešće računa sa podatkom o modulu stišljivosti dobivenim pokusom u edometru.

Kod propusnih, nekoherentnih materijala javlja se zanemarivo malo konsolidacijsko slijeganje. Vodopropusnost tih materijala je tolika da prilikom nanošenja opterećenja ne dolazi do pojave porasta pornog tlaka. Istjecanje vode iz pora prati porast naprezanja. Slijeganje prati porast opterećenja.[1]

Za slabo propusne, koherentne materijale izvađeni neporemećeni uzorci mogu se dosta precizno laboratorijski ispitati. Žitke materijale nije moguće ispitati jer ispadaju iz cilindra za vađenje uzoraka.

2.3. OPĆENITO O KONSOLIDACIJI

Konsolidacija je proces promjenjivih volumnih deformacija tla u vremenu, koje nastaju kao posljedica postupnog istjecanja vode iz tla nakon pojave viška tlaka vode u nedreniranom stanju. To je prijelazna faza između nedreniranog i dreniranog stanja tla. Tijekom konsolidacije, dok voda istječe iz tla vanjsko se opterećenje postepeno prenosi s vode u porama tla na skelet tla te efektivna naprezanja u svakom trenutku narastu upravo za vrijednost pada viška tlaka vode.[4]

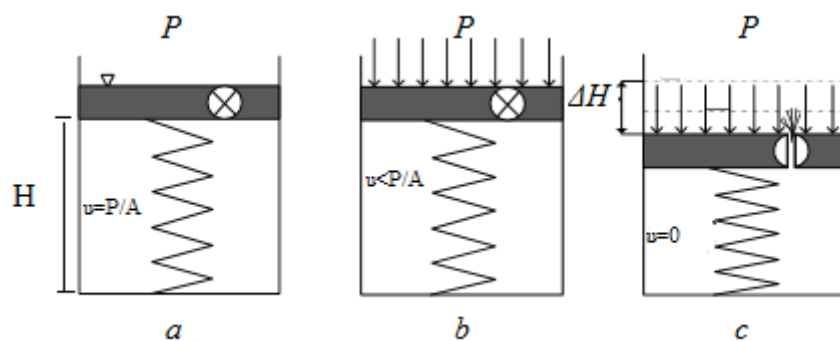
Kako rastu efektivna naprezanja, tako se realizira i volumna deformacija tla. Konsolidacija je od praktičnog značenja u sitnozrnatim tlima, glinama i prahovima u kojima je uopće moguća pojava nedreniranog stanja. Konsolidacija u dobro propusnim tlima, pijesku i šljunku toliko je brza za uobičajene promjene opterećenja koje se susreću u geotehnici da ju niti ne primjećujemo.[3]

Općenito se može zaključiti da je konsolidacija tla jedan složen vremenski proces kod kojeg se istiskuje voda iz pora tla. Nadalje opada porni tlak te se smanjuje volumen pora. Na kraju procesa dolazi do slijeganja tla.

Mehanički model konsolidacije (slika 1.) sastoji se od elastične opruge koja je potopljena u cilindričnu posudu s vodom. Posuda ima čep s ventilom koju opteretimo dok je ventil zatvoren(slika 1.a.).

Voda u posudi u tom položaju se ne pomiče. Nakon otvaranja ventila voda izlazi iz posude, ako je ventil jače otvoren ide brže, ako je slabije otvoren sporije. Ventil služi kao koncept propusnosti tla. Kod istjecanja vode klip ide prema dolje, te se opruga skraćuje te pritom prima veći dio nanesenog opterećenja, a pritisak u vodi opada(slika 1.b.).

Povećanje sile u opruzi analogno je povećanju efektivnih naprezanja u tlu, a smanjenje pritiska u vodi odgovara opadanju pornog tlaka. Prilikom procesa pritisak vode u posudi se smanjuje sve dok voda ne prestane istjecati iz posude. Tada više u njoj nema viška tlaka vode i opruga preuzima vanjsko opterećenje te se više ne deformira (slika 1.c.). Kada voda iscure iz pora tla, opterećenje se postupno premješta iz vode u čestice tla. Za potpuno zasićena tla prijenos opterećenja popraćen je promjenom volumena jednakom volumenu ispuštene vode. Taj proces naziva se konsolidacija.



Slika 1. Mehanički model konsolidacije

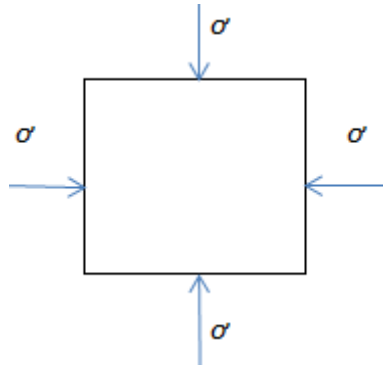
Čestice mineralnog skeleta tla su nestišljive. Stišljivost mase tla ovisi o međusobnom utjecaju među čvrstim česticama, posebno o klizanju među česticama.[5]

Princip je prvi definirao K. Terzaghi te je definirao i svojstvo efektivnog naprezanja σ' . Svi mjerljivi učinci promjene naprezanja kao što su zbijanje, distorzija, čvrstoća uzrokovani su samo promjenom efektivnih naprezanja.

Efektivno naprezanje je onaj dio ukupnog naprezanja kojeg prenosi skelet tla. Pojam efektivnog naprezanja definira se kao razlika između totalnog naprezanja σ i pornog tlaka u (izraz 9).

$$\sigma' = \sigma - u \quad (9)$$

Mjeriti se mogu samo totalna naprezanja i pritisci u pornoj vodi, dok je efektivno naprezanje izvedena veličina i nije izravno mjerljiva. Terzaghi je efektivnim naprezanjima dao fizikalno značenje kao korijen u čvrstim česticama tla. Na slici 2. uzorak zasićenog tla obavijen nepropusnom membranom neće se deformirati pri opterećenju jednolikim pritiskom, jer će zbog nestišljivosti vode porni pritisak u narasti za istu veličinu. Efektivno naprezanje ostat će nepromijenjeno.[3]



Slika 2. Promjena totalnih naprezanja bez utjecaja na tlo

2.4. TERZAGHIJEVA JEDNODIMENZIONALNA TEORIJA KONSOLIDACIJE

2.4.1. OPĆENITO O TEORIJI

Pretpostavka teorije je linearan odnos između koeficijenta pora i efektivnih naprezanja, što može aproksimativno vrijediti samo za vrlo male deformacije zbog toga što ovaj odnos nije linearan.

Važno je uočiti da se Terzaghijevom teorijom može obuhvatiti samo primarna konsolidacija jer slijeganje asimptotski teži nuli nakon što disipira sav višak tlaka vode. Kasnije su znanstvenici dokazali da ima i naknadnog slijeganja tla nakon disipacije viška tlaka vode što je uočeno na laboratorijskim pokusima i in situ. Zbog toga je došlo do podjele na primarnu i sekundarnu konsolidaciju.

Onaj dio konsolidacije koji se može obuhvatiti Terzaghijevom teorijom naziva se primarnom konsolidacijom, a za sekundarnu konsolidaciju je Buisman (1936) predložio izraz u kojem se slijeganje linearno povećava s logaritmom vremena.

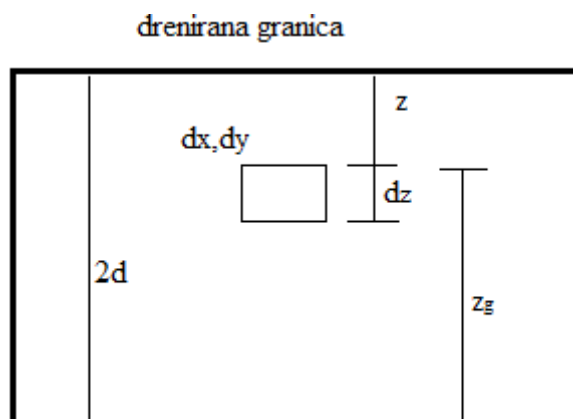
Pretpostavke Terzaghijeve teorije su:

- Tlo je homogeno.
- Tlo je potpuno saturirano.
- Voda i čestice tla nisu stišljive.
- Deformacije i strujanje vode su jednodimenzionalni (samo u vertikalnom smjeru).
- Deformacije su male.
- Vrijedi Darcyev zakon za sve hidrauličke gradijente.
- Koeficijent propusnosti i modul promjene volumena ostaju konstantnim tijekom procesa konsolidacije.
- Postoji jedinstven odnos između koeficijenta pora i efektivnog naprezanja.

Pri pretpostavci o valjanosti Darcyeva zakona postoje dokazi koji govore o odstupanjima koja se javljaju kod malih hidrauličkih gradijenata. [6]

2.4.2. RJEŠENJE TERZAGHIJEVE JEDNODIMENZIONALNE KONSOLIDACIJE

Kod izvoda Terzaghijeve teorije promatra se element tla dimenzija dx , dy i dz na nekoj dubini z u sloju tla debljine $2d$ (slika 3). Slovo d označava najdulji put koji voda mora proći da bi istekla iz tla. Ako su horizontalne granice tla propusne tj. drenirane tada je d jednak polovini debljine sloja tla. Ako je donja granica nepropusna tada je d jednak debljini sloja tla.



Slika 3. Element tla u sloju debljine $2d$

Pošto Terzaghijeva teorija vrijedi za više oblika početne raspodjele viška tlaka vode, pa se početna raspodjela viška tlaka vode označava s u_i . U slučaju jednolikog opterećenja veće površine ta označavamo s $\Delta\sigma$, $u_i = \Delta\sigma$. Obično je:

$$u_e(z, 0) = u_i(z)$$

u_e = višak poreznog tlaka

u_i = početni porezni tlak

Pri izvođenju jednadžbe konsolidacije potrebno je imati neke pretpostavke. Mineralni skelet tla linearno elastični je medij te se zanemaruje promjena modula stišljivosti sa promjenom efektivnog naprezanja. Ukupne deformacije su male te se zanemaruje promjena debljine sloja zbog slijeganja. Bez obzira na promjene poroznosti koeficijent propusnosti je konstantan.

Pošto vrijedi Darcyev zakon, hidraulički gradijent i je $-dh/dz$, tj. negativna vrijednost derivacije hidrauličkog potencijala h , u smjeru gibanja vode z , specifični protok je proporcionalan hidrauličkom gradijentu i . [6]

$$v = ki \Rightarrow -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad (10)$$

v = prividna brzina

k = koeficijent propusnosti

i = hidraulički gradijent

Za hidrostatski tlak vode : $u_o = \gamma_w z$ (11)

Ako je referentna ravnina postavljena na donjoj horizontalnoj granici sloja tla, zbroj $z + z_g = 2d$ daje debljinu sloja tla, pa je jedina promjena ukupnog potencijala zapravo je posljedica promjene tlaka vode u porama:

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial z} \quad (12)$$

Pa iz toga slijedi:

$$v = ki = -k \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial z} \quad (13)$$

Uz uvjet kontinuiteta da promjena volumena pora uvjetovana je isključivo količinom istisnute vode, izraz se može iskazati dalje:

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} dx dy dz = \frac{dV}{dt} \quad (14)$$

Koeficijent promjene volumena može se izraziti i preko gradijenta efektivnog naprezanja, koji mora biti jednak negativnoj vrijednosti pornog tlaka, jer je smanjenje viška tlaka vode u vremenu jednako povećanju efektivnih naprezanja:

$$\frac{dV}{dt} = m_v \frac{\partial \sigma'}{\partial t} dx dy dz = -m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} dx dy dz \quad (15)$$

Izjednačavanjem prethodnih izraza dobiva se:

$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} \frac{k}{\gamma_w} = m_v \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (16)$$

Koeficijenta promjene volumena može se izraziti i kao recipročna vrijednost modula stišljivosti.

$$m_v = \frac{1}{M_v} \quad (17)$$

m_v = koeficijent zapremninske stišljivosti

Kombinacijom izraza 14 i 15 dobiva se diferencijalna Terzaghijeva jednačba jednodimenzionalne konsolidacije:

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad (18)$$

Oznakom c_v definiran je koeficijent konsolidacije, koji je tijekom konsolidacije konstantan.

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (m^2/s) \quad (19)$$

Terzaghijeva jednadžba jednodimenzionalne konsolidacije ima eksplicitno analitičko rješenje, za koje treba postaviti početne i rubne uvjete. Pretpostavka je da dolazi do trenutnog povećanja ukupnog naprežanja. U nultom vremenu se pretpostavlja potpuno ispunjenje porom vodom, tj. početna vrijednost viška tlaka porne vode (u_i) jednaka je ukupnom naprežanju. Početni uvjeti glase:

$$u_e(z) = u_i(z) \text{ za } 0 \leq z \leq 2d, \quad t = 0$$

kako su obje horizontalne granice drenirane na njima je ukupan tlak vode nula, pa je i višak tlaka vode nula, pa su rubni uvjeti:

$$u_e(0, t) = 0 \text{ i } u_e(2d, t) = 0, \quad t > 0$$

Riješiti diferencijalnu jednadžbu jednodimenzionalne konsolidacije znači pronaći:

$$u_e = u_e(z, t)$$

Rješenje za višak tlaka porne vode pri dubini z poslije nekog vremena t je:

$$u_e = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{d} \int_0^{2d} u_i \sin \frac{n\pi z}{2d} dz \right) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)} \quad (20)$$

gdje je d -duljina najduljeg dreniranog puta, a u_i je početni višak tlaka porne vode.

Za određeni slučaj u kojem je porni tlak u_i konstantan tijekom cijelog sloja:

$$u_e = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2u_i}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)} \quad (21)$$

$$n = 2m + 1, \quad (22)$$

$$M = \frac{\pi}{2} (2m + 1) \quad (23)$$

uz bezdimenzionalni vremenski faktor T_v koji se definira kao:

$$T_v = \frac{c_v t}{d^2} \quad (24)$$

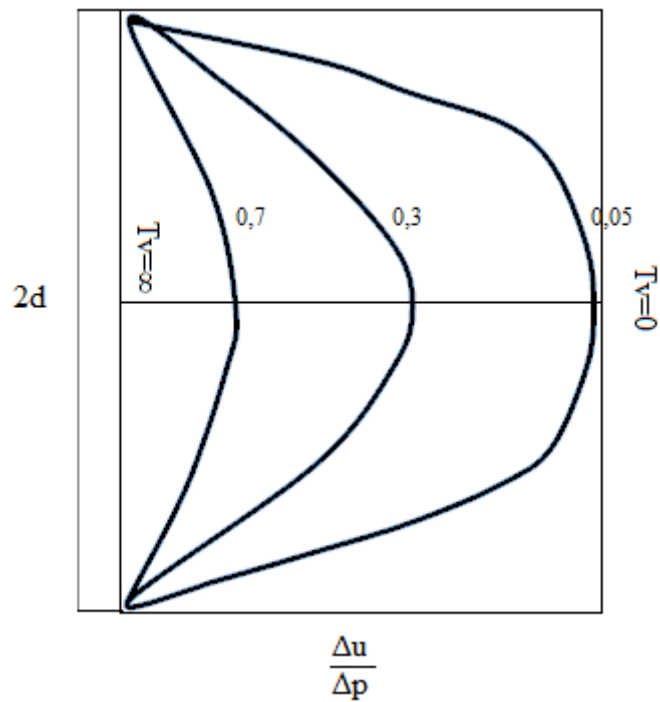
Dobiva se rješenje jednadžbe:

$$u_e = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_i}{M} \left(\sin \frac{M^* z}{d} \right) e^{-M^2 T_v} \quad (25)$$

gdje je u_i - je početna veličina pornog pritiska i konstanta.[6]

Rješenje Terzaghijeve jednadžbe grafički se može prikazati izokronama. Izokrona je krivulja koja za dano vrijeme t prikazuje raspodjelu viška tlaka vode $u_e(z, t)$ po visini sloja tla. Kada se $u_e(z, t)$ podijeli s konstantnim početnim viškom tlaka vode u_i , a koordinata z s početnom visinom $2d$ dobije se normalizirana izokrona. Oblik izokrona ovisi o početnoj raspodjeli viška tlaka porne vode te uvjetima odvodnje na granicama horizontalnih slojeva. Na slici 4 vidi se da je početna raspodjela u_i konstantna, te za otvoreni sloj debljine $2d$ izokrone su simetrične obzirom na centralnu liniju. Nagib izokrona na bilo kojoj dubini daje hidraulički gradijent te pokazuje i smjer protoka.

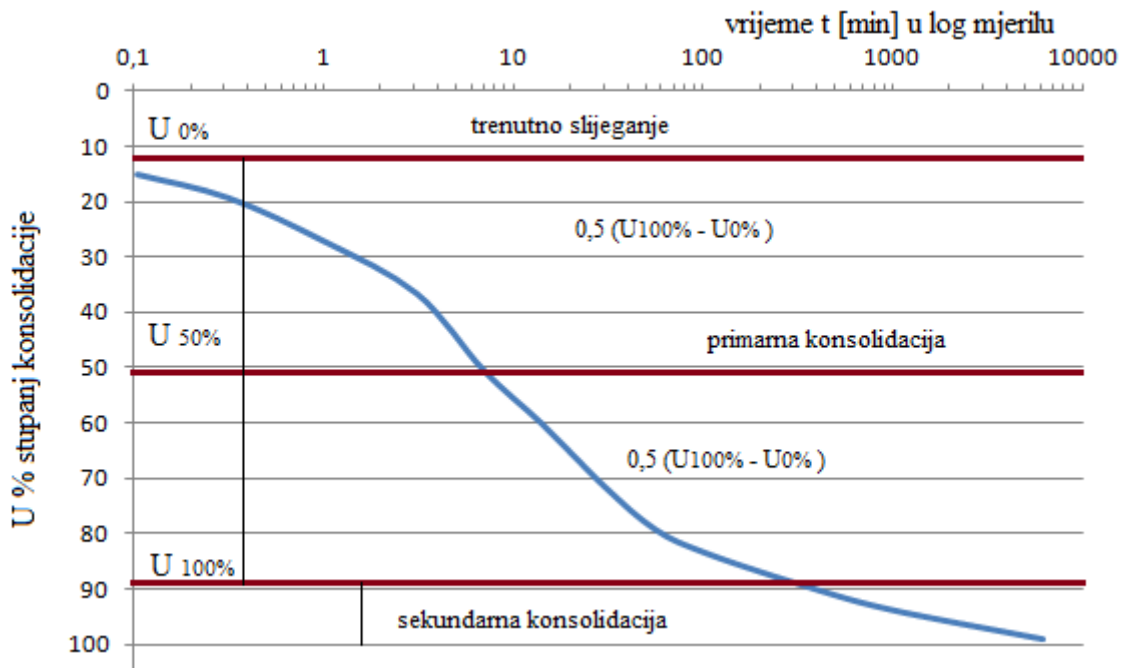
Ako su obje granice promatranog sloja drenirane, cijele su izokrone relevantne za odgovarajuću raspodjelu tlaka vode. Ako je donja granica sloja nepropusna samo je gornja polovina izokrona relevantna za raspodjelu tlaka vode.



Slika 4 Grafička interpretacija Terzaghijeve konsolidacije

2.5. KRIVULJA VREMENSKOG TOKA SLIJEGANJA

Proces konsolidacije izučava se u edometru, te se pod jednim stupnjem opterećenja prati tok deformacije u vremenu. Na slici 5 prikazana je krivulja vremenskog toka slijezanja.



Slika 5. Krivulja vremenskog toka slijeganja

Iz slike 5 primjećujemo je da je početna točka niža od računske vrijednosti od svih nanesenih podataka. U uzorku osim konsolidacijskog slijeganja postoji i mali dio deformacije što se odvija u trenutku nanošenja opterećenja te ne ovisi o procesu konsolidacije. To je trenutno slijeganje. Kraj krivulje asimptotski se približava vodoravnoj crti te pokazuje prisutnost još nekog procesa deformacije u duljem vremenskom razdoblju. Taj proces je sekundarna konsolidacija. Zbog disipacije pornog tlaka potrebno je odrediti točku prijelaza primarne u sekundarnu konsolidaciju, gdje je završen proces slijeganja. Kvadratom debljine sloja raste vrijeme konsolidacije. Ukoliko se želi proces konsolidacije ubrzati, mora se smanjiti debljina sloja, tj. skratiti put vode. Često je to moguće ugradnjom uspravnih pješčanih drenova, koji uspravnu konsolidaciju pretvaraju u radijalnu, sa mnogo kraćim putem vode.

2.6. ODREĐIVANJE KOEFICIJENTA KONSOLIDACIJE

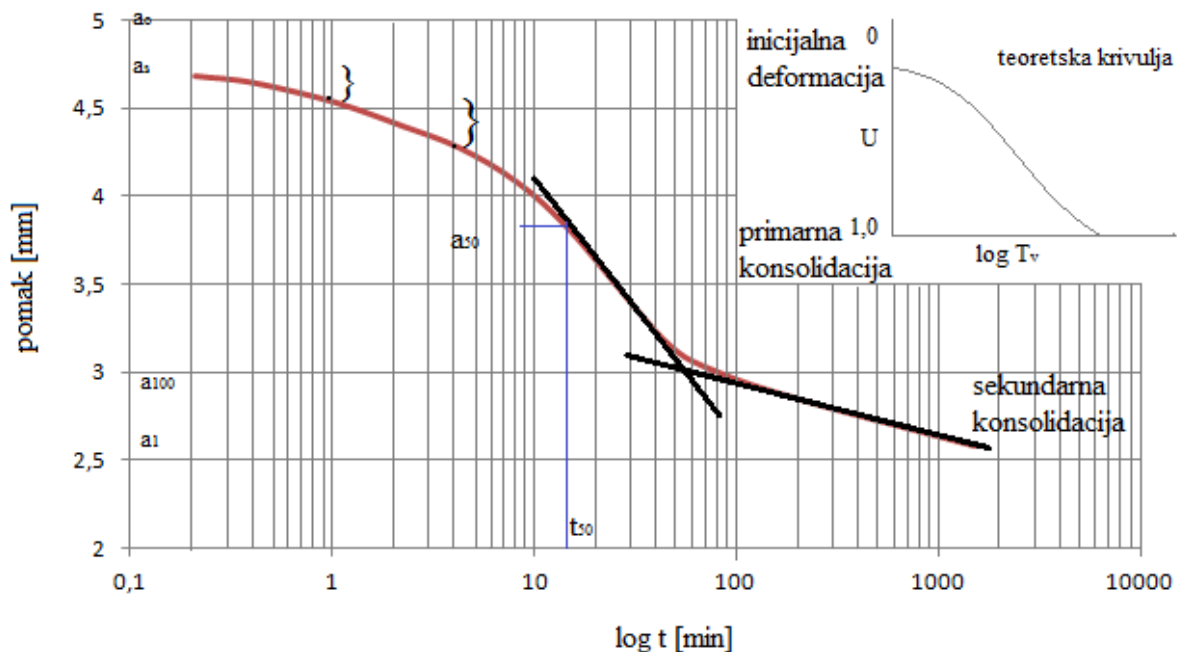
Koeficijent konsolidacije c_v je svojstvo materijala velike važnosti za račun konsolidacijskog toka. Prema tome treba se odrediti ispitivanjem uzoraka u laboratoriju. Može se dobiti pomoću izraza 26. ako su poznati koeficijent propusnosti k te edometarski modul E_{oed} , tj. modul stišljivosti M_v

$$c_v = \frac{k * E_{oed}}{\gamma_w} \quad (26)$$

Kod izravnog određivanja c_v najučestalija su dva načina određivanja, prema Casagrandeu te Tayloru, na temelju pokusa u edometru. Pretpostavlja se da se konsolidacija sloja tla i uzorka u edometru odvija prema istom zakonu. Razlika je jedino u visini sloja koji se konsolidira. Pošto je uzorak u edometru mnogo tanji od sloja tla, u njemu će se primarna konsolidacija odvijati mnogo brže, jer ovisi o kvadratu puta dreniranja.[5]

Kod metode logaritma vremena za koju je zaslužan Casagrande imamo završetak primarne konsolidacije koji se određuje povlačenjem tangenti u točki infleksije i na asimptotu za velike vrijednosti na krivulju (slika 6). Pošto je logaritam za $t=0$ beskonačno velik, početak krivulje određuje se aproksimacijom logaritamske krivulje parabolom. Uzmemo se po dvije vrijednosti vremena na apscisi od kojih se veća dobije množenjem manje s brojem 4. Početak se odredi tako da se odsječak na ordinati za te dvije vrijednosti prenese od manje vrijednosti prema gore. Tako odredimo početak i kraj primarne konsolidacije. Budući da su krajnje vrijednosti dobivene rekonstrukcijom, smatra se da je krivulja najtočnija negdje oko sredine. Za reprezentativnu točku uzima se prosječni stupanj konsolidacije U_{50} . Odgovarajući $T_v = 0,197$, te se očita vrijeme konsolidacije t_{50} . Put dreniranja u edometru je pola visine uzorka, uzorak je dvostruko dreniran te iznosi približno 1 cm. Koeficijent konsolidacije se tada odredi izrazom 27.[4]

$$c_v = \frac{0,197 * d^2}{t_{50}} \quad (27)$$



Slika 6. Logaritamska metoda

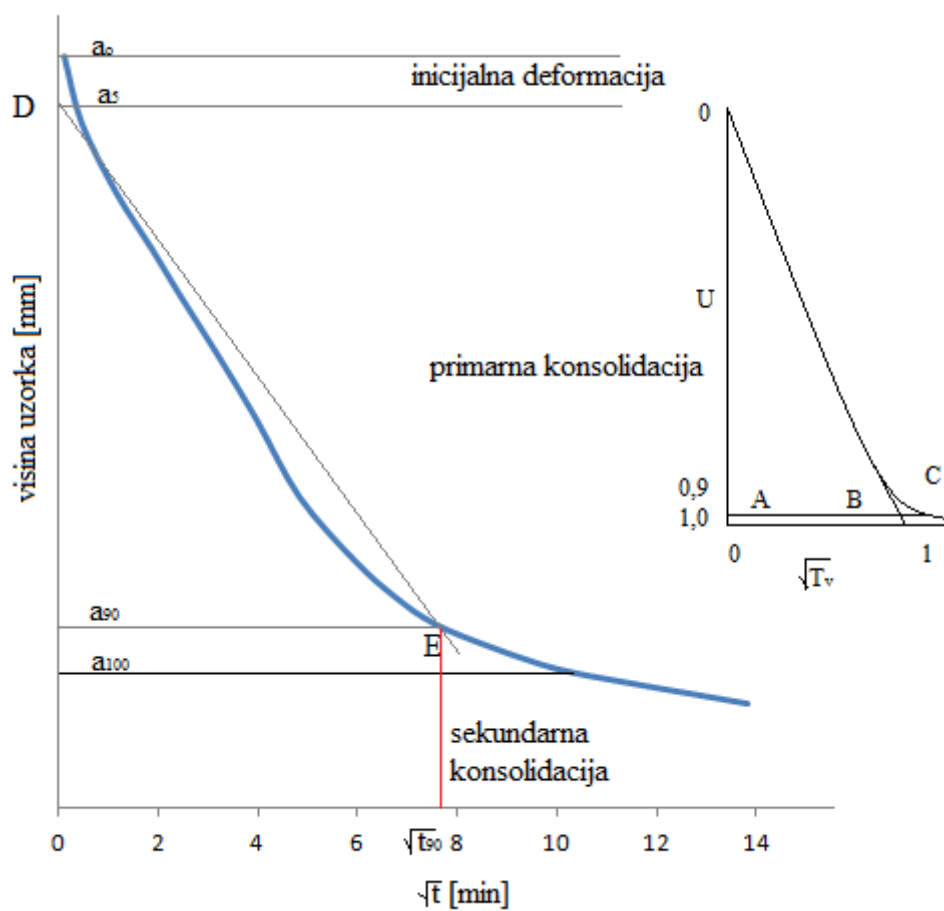
Metoda drugog korijena iz vremena (Taylor) Postupak predložio Taylor, a temelji se na činjenici da je odnos između deformacije i vremena za neizmjenno deo sloj linearan u koordinatnom sustavu $s, \sqrt{t}$, što proizlazi iz izraza 28. Ovaj linearan odnos vrijedi za tanje slojeve do prosječnog stupnja konsolidacije $U \geq 0,7$.

$$U = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad (28)$$

Taylor je utvrdio da je apscisa krivulje $U : \sqrt{T_v}$ za 90% konsolidacije jednaka apscisi produljenja početnog pravca pomnoženog s 1,15. Ako konsolidacijska krivulja uzorka iz edometra nacrtamo obzirom na $\sqrt{t}$ dobit će se krivulja koja je u većem dijelu pravac (slika 7). Na gornjem kraju malo je zakrivljena pa se sjecište pravca sa osi ordinata ne poklapa sa početnom visinom uzorka a_0 , nego sa manjom visinom a_s . Na tom dijagramu nacrtan je drugi pravac sa 1,15 puta povećanim apscisama, pa tamo gdje siječe krivulju je apscisa vremena t_{90} koje odgovara konsolidaciji od 90%. Rješavanjem diferencijalne jednadžbe konsolidacije za granične uvjete uzorka u edometru vremenski faktor za $U = 0,9$, a $T_{90} = 0,848$. [1]

$$c_v = \frac{d^2 \cdot 0,848}{t_{90}} \quad (29)$$

U izrazu 29 d je jednak polovini prosječne visine uzorka a na početku i na kraju određenog inkrementa opterećenja.



Slika 7. Metoda kvadratnog korijena

3. EDMETARSKI POKUS

3.1. PRIPREMA UZORKA

Kod pripreme edometarskog pokusa koristio se poremećeni uzorak humusa (slika 8.a.) Humus je prosijan kroz sito veličine otvora 4 mm (slika 8.b.) te je za takav prosijani uzorak tla utvrđena gustoća čestica tla koja iznosi $\rho_s = 1,94\text{g/cm}^3$.



Slika 8. Uzorak humusa te sita veličine 4mm

Razlikom u masi hidrauličkog edometra s ugrađenim uzorkom te bez uzorka utvrđeno je da masa ugrađenog uzorka iznosi 31g. Izmjerom edometarskog prstena u koji je uzorak bio ugrađen utvrđen je volumen uzorka (slika 9).



Slika 9. Edometarski prsten

Srednja visina uzorka iznosila je : $h = 18,97$ mm, srednji promjer $d = 63,40$ mm, a polumjer $r = 31,70$ mm iz čega slijedi da volumen uzorka iznosi : $V = 5,99 \times 10^{-5} \text{ m}^3$.

Na osnovu mase i volumena mogli smo dobiti gustoću ugrađenog uzorka.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (30)$$

Ona je iznosila $0,517 \text{ g/cm}^3$.

Vlažnost ugrađenog uzorka iznosila je $w = 42,8\%$.

Tada smo odredili gustoću suhog tla uz izraz 31. Ona je iznosila $0,362 \text{ g/cm}^3$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w} \quad (31)$$

Nakon toga izračunali smo koeficijent pora na osnovu izraza 32, te on iznosi 4,36.

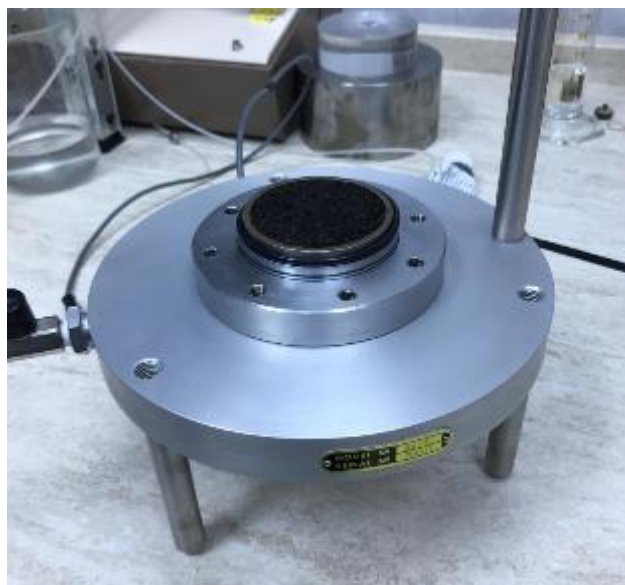
$$\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e} \rightarrow e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (32)$$

Na temelju utvrđene gustoće i početnog koeficijenta pora ugrađenog uzorka može se zaključiti da je uzorak u vrlo rahom stanju.

Izračunali smo i početni stupanj zasićenosti uzorka prema izrazu 33, a on je iznosio 19%.

$$Se = w \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (33)$$

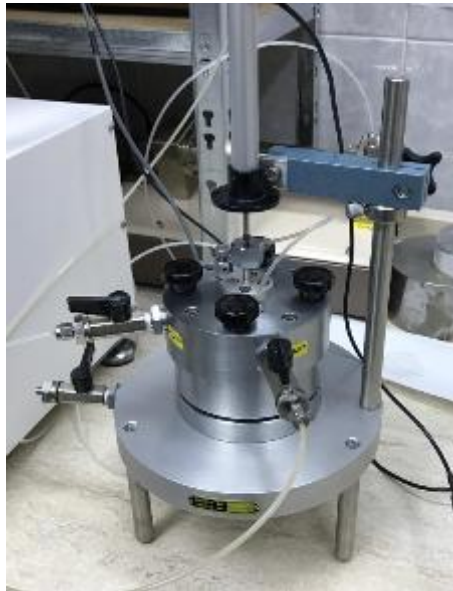
Nakon pripreme uzorak smo ugradili u hidraulički edometar (slika 10) na daljnja ispitivanja.



Slika 10 Uzorak humusa na postolju hidrauličkog edometra.

3.2. HIDRAULIČKI EDMETAR

Edometar (slika 11) je uređaj kod kojeg su spriječene bočne tj. horizontalne deformacije uzorka tla, a koristi se kod ispitivanja stišljivosti tla. U njega se ugrađuje uzorak tla valjkastog oblika kod kojeg se ispituje sklonost pojavi deformacija po određenim inkrementima vertikalnih napreznja. Tijekom pokusa opterećenja se mijenjaju na način da svako opterećenje bude dvostruko veće od prethodnog. Kod nanošenja opterećenja u hidrauličkom edometru koriste se specijalne hidrauličke pumpe koje kontroliraju hidraulički tlak. Hidrauličkim edometrom može se upravljati ručno ili uz pomoć posebnih programskih paketa. Na Geotehničkom fakultetu može se koristiti hidraulički edometar tipa Rowe i Barden (Rowe i Barden, 1966.). Uz edometar koriste se i pumpa za nanošenje ćelijskog tlaka te pumpa za nanošenje povratnog tlaka (slika 12). Pumpe su tipa GDS standard controller te su to hidrauličke pumpe za preciznu regulaciju mjerenja tlaka i tekućine. Njima se može upravljati uz pomoć softverskog programa ili kao samostalni uređaj. Kao tekućina u pumpama se koristi deaerirana voda. Pumpe imaju višenamjensku funkcionalnost, mogu se koristiti kao izvor konstantnog tlaka, zamjenjuju stupac žive, komprimirani zrak, mjere volumen, pomažu tlak... Kod računalnog načina rada omogućuju potpuno automatiziran sustav za automatska testiranja.



Slika 11 Hidraulički edometar



Slika 12 Hidraulička pumpa

Hidraulički edometar se sastoji od ovih osnovnih dijelova (slika 13):

- a. postolje hidrauličkog edometra
- b. metalni cilindar
- c. porozne pločice

- d. gumena membrana sa vijkom
- e. metalni i gumeni prstenovi
- f. cjevčice preko kojih su spojene pumpe sa edometrom
- g. kapa edometra

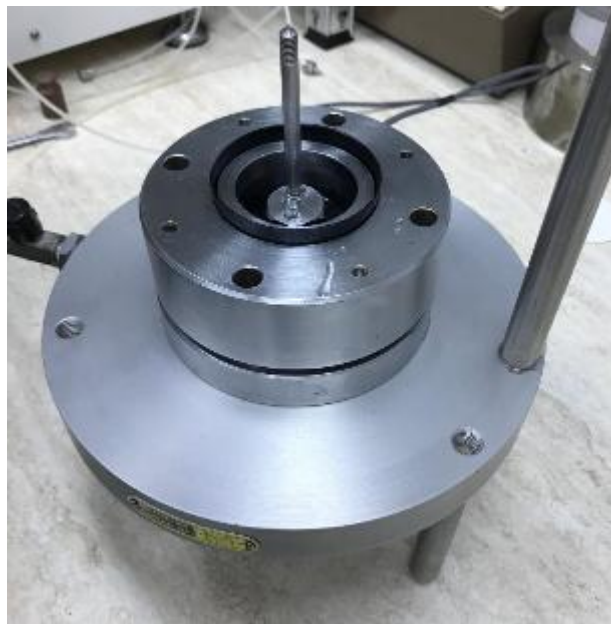


Slika 13 Dijelovi hidrauličkog edometra

3.3. UGRADNJA UZORKA U HIDRAULIČKI EDOMETAR

Kod ugradnje uzorka ćelija se mora pažljivo sastavljati kako bi količina zraka u sustavu, bila što manja. Zbog smanjenja sile trenja između uzorka i prstena mjesto dodira uzorka i metalnog prstena maže se silikonom. Radi što manje sile trenja silikonom se premazuju i svi gumeni dijelovi koji dolaze u dodir sa metalnim dijelovima. Na postolje hidrauličkog edometra najprije se postavlja porozna pločica na koju dolazi filter papir, a

zatim metalni prsten s uzorkom. Preko uzorka se fiksira metalni cilindar u koji se umeće gornja porozna pločica sa filter papirom te gumena membrana. Gumena membrana osigurava prijenos opterećenja, na nju se postavlja metalni prsten koji drži gumu učvršćenu na unutarnje stijenke metalnog cilindra. Sa donje strane u centru membrane nalazi se metalna pločica koja je na gornjoj strani uzorka te registrira pomake uzorka po visini (slika 14). Pomaci se prenose pomičnim klipom što je u kontaktu s mjerenim pretvornikom. Nakon stavljanja kape edometra uređaj se učvrsti vijcima. Tada se u sustav pušta deaerirana voda te započinje punjenje ćelije vodom. Opterećenja se nanose hidrauličkim pumpama.



Slika 14 Postavljanje uzorka u hidraulički edometar

4. REZULTATI

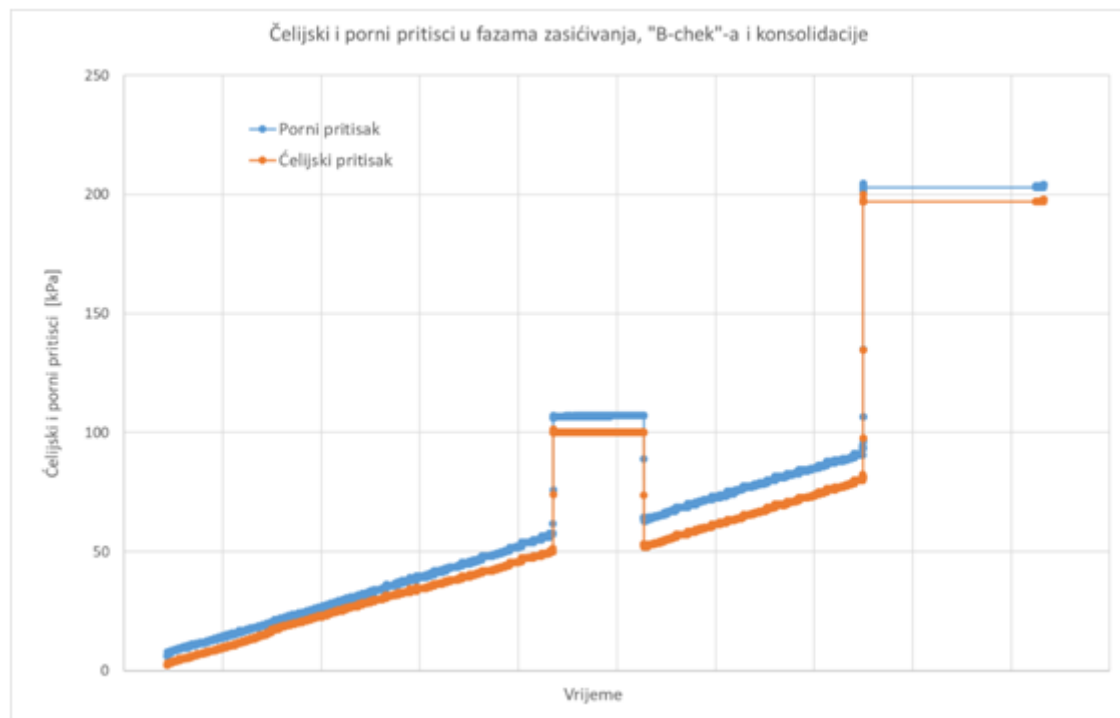
U pokusu se mogu uočiti tri faze : zasićivanje uzorka, provjera zasićenosti(tzv. B-check) i konsolidacija. Zasićenost mjerimo Skemptonovim parametrom B koji se prikazuje u nedreniranim uvjetima kao omjer pornog tlaka te naprezanja. Skemptonov parametar B nazivamo još i parametrom pornog pritiska.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (\text{izraz 34})$$

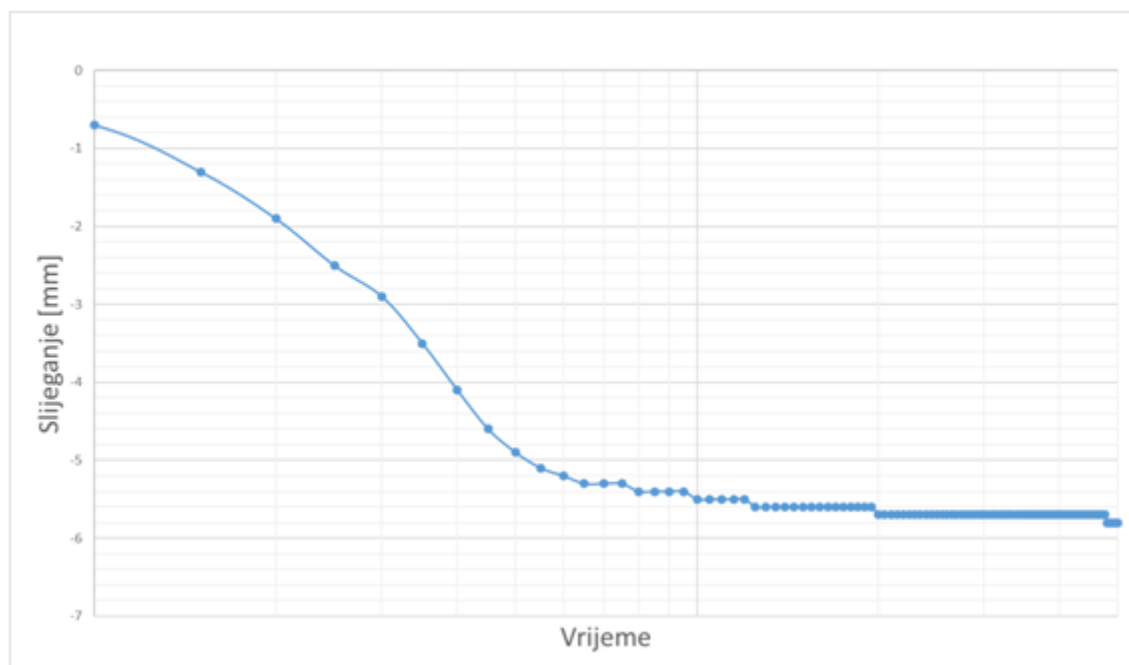
U prvoj fazi zasićivanja pritisak i povratni tlak povećani su na 50 kPa dok je B-check proveden na 100 kPa. Budući da je utvrđeno da stupanj zasićenosti nije zadovoljavajući, pokrenula se druga faza zasićenja te su ćelijski i povratni pritisak povećani s 5 na 80 kPa. Sada je B-check proveden na 200 kPa te je utvrđen stupanj zasićenosti uzorka od 96%. Nakon što je utvrđen zadovoljavajući stupanj zasićenosti pokrenuta je faza konsolidacije. Dozvoljeno je istjecanje vode iz uzorka otvaranjem ventila za drenažu. Budući da na tom ventilu nije bila spojena pumpa za kontrolu pornih pritisaka, porni pritisak je na donjoj strani uorka trenutno pao na atmosfersku vrijednost, dok je pad pornih pritisaka mjeren s gornje strane uzorka pomoću hidrauličke pumpe.

Tijekom faze konsolidacije zabilježeno je slijeganje uzorka od 6,4 mm. Vertikalni pomak zabilježen je digitalnim mjerilom pomaka. Provjera rezultata provedena je pomičnom mjerkom po rastavljanju ćelije. Pomičnom mjerkom utvrđeno je slijeganje uzorka od 5,5 mm. Odstupanje u utvrđenim iznosima slijeganja vjerojatno je posljedica remećenja uzorka tijekom rastavljanja ćelije.

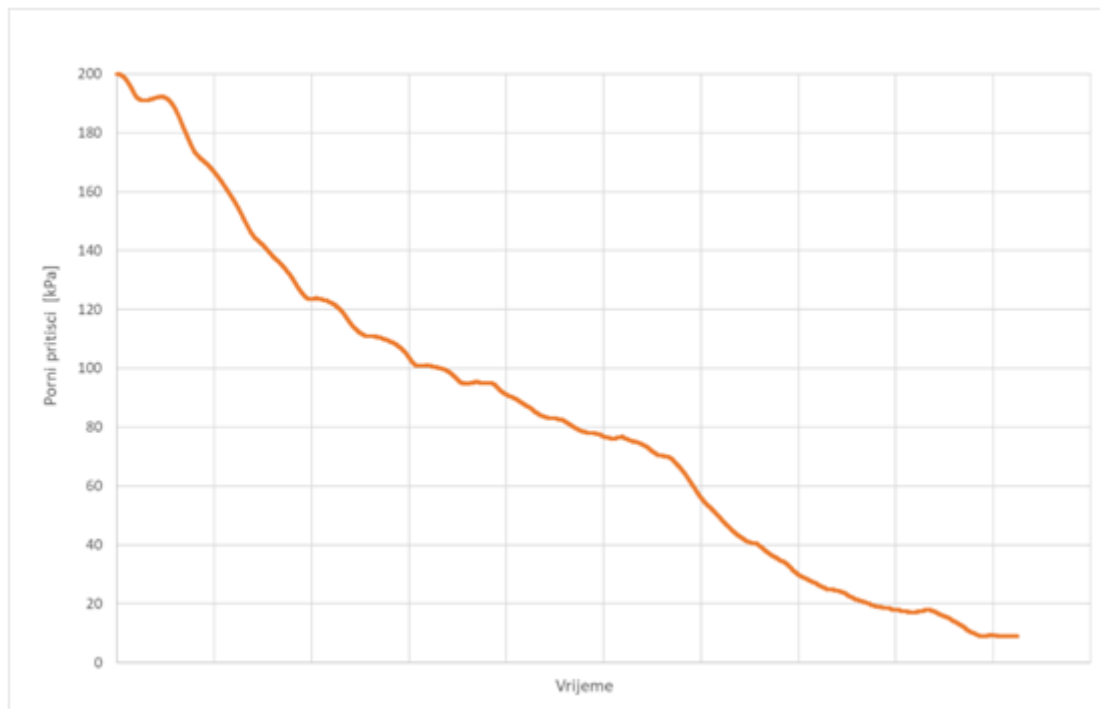
Krajnji rezultati pokusa prikazani su na dijagramima 1,2 i 3. Na dijagramu 1 prikazane su obje faze zasićenja, kao i provjere zasićenosti B-check metodom. Na dijagramu 2 prikazano je slijeganje uzorka u fazi konsolidacije, a na dijagramu 3 promjena pornih pritisaka tijekom konsolidacije uzoraka. Na slici 15 prikazan je uzorak po završetku pokusa u edometarskom prstenu. Sa slike 15 je lako uočljiva deformacija uzorka.



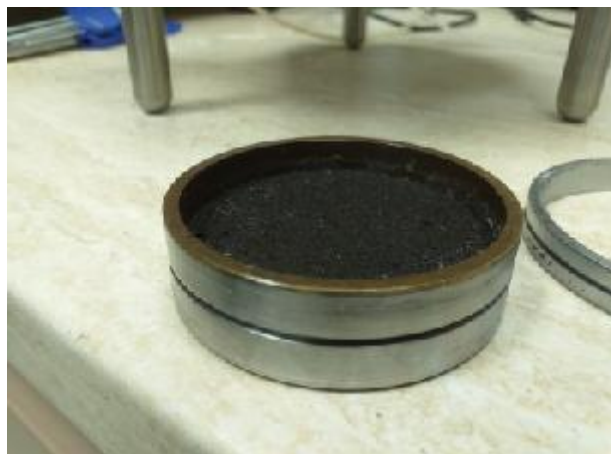
Dijagram 1. Faze zasićivanja i provjere zasićenosti B-check metodom



Dijagram 2. Slijezanje



Dijagram 3. Disipacija pornog tlaka



Slika 15. Konsolidirani uzorak

5. ZAKLJUČAK

Za projektiranje i izvedbu objekata neophodno je poznavati naprezanja u tlu te deformacije koje nastaju kao reakcija tla na promjenu stanja naprezanja uzrokovanih zahvatima na tlu ili u tlu.

Deformacijska svojstva tla određuju se u edometarskom pokusu. Na početku pokusa utvrđuje se početna visina uzorka dok se tijekom pokusa prati promjena te visine uzorkovana vanjskim opterećenjem poznatog iznosa.

Suštinska razlika između hidrauličkog i konvencionalnog edometra jest da je hidrauličkom edometru omogućeno mjerenje i upravljanje pornim pritiscima u uzorku čime je dokazivanje i razumijevanje Terzaghijeve jednodimenzionalne teorije konsolidacije tla znatno olakšano što je provedenim pokusom i dobivenim rezultatima u ovom radu i demonstrirano.

6. LITERATURA

1. Nonveiller, E. : Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga Zagreb 1979.
2. <http://struna.ihjj.hr/naziv/tlo/17668/#naziv>
3. Roje – Bonacci, T.: Mehanika tla, Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu, Split, 2003.
4. Kvasnička, P.; Domitrović, D; Mehanika tla, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko – geološko- naftni fakultet
5. Szavits-Nossan, V., Procesi tečenja u tlu i stijeni
6. Craig, R. F.: Craig's soil mechanics
7. https://www.grad.unizg.hr/download/repository/6. Predavanje_MT.pdf
8. www.gdsinstruments.com

7. POPIS SLIKA

Slika 1. Mehanički model konsolidacije

Slika 2. Promjena totalnih naprezanja bez utjecaja na tlo

Slika 3. Element tla u sloju debljine $2d$

Slika 4. Grafička interpretacija Terzaghijeve konsolidacije

Slika 5. Krivulja vremenskog toka slijeganja

Slika 6. Logaritamska metoda

Slika 7. Metoda kvadratnog korijena

Slika 8. Uzorak humusa te sita veličine 4mm

Slika 9. Edometarski prsten

Slika 10. Uzorak humusa na postolju hidrauličkog edometra

Slika 11. Hidraulički edometar

Slika 12. Hidraulička pumpa

Slika 13. Dijelovi hidrauličkog edometra

Slika 14. Postavljanje uzorka u hidraulički edometar

Slika 15. Konsolidirani uzrak