

7 Deformabilnost i čvrstoća tla.

7.1 Naprezanja i deformacije. Modeli ponašanja elementa tla.

Da bismo predvidjeli ponašanje građevine i temeljnog tla, odnosno oblikovali/projektirali građevinu tako da budu ispunjeni svi zahtjevi naručitelja ili korisnika, kao i zahtjevi struke, trebamo jasno odrediti

- dopustive deformacije i ostale uvjete koje nameće korištenje građevine,
- opterećenja koja nameće lokacija,.. ali opet konstrukcija, građevina i njeno korištenje,
- uvjete koje omogućava tlo.

Pri tome vrijedi imati na umu da se može računati i na interakciju temeljnog tla i građevine, tj. da je – posebnim postupcima – moguće uračunati djelovanje deformacija tla na građevinu i obratno.

U ovom poglavlju naizmjence dani su

- ❖ opisi jednostavnih i najčešćih laboratorijskih uređaja i odgovarajućih ispitivanja u mehanici tla tj. geotehničkom inženjerstvu – s naglaskom na oblik deformiranja/opterećivanja koji se nameće uzorku tla i, odatle, uporabljivosti rezultata mjerena,
- ❖ objašnjenja ponašanja tla u određenim uvjetima – temeljena na opažanjima, mjerenjima i provjerama,
- ❖ najjednostavniji modeli ponašanja kao podloga za proračun/procjenu – temeljeni na objašnjenjima, teorijama, idejama.

Prikazuju se stišljivost tla i čvrstoća tla: kako se tlo ponaša, u kojim uvjetima tlo uobičajeno ispitujemo, te kojim svojstvima tlo opisujemo.

7.2 Stišljivost tla, kratki uvod

Tijekom građenja na tlo se nanosi opterećenje, u nekim fazama tlo se rasterećuje, što izaziva deformiranje tla. Raznovrsnost opterećenja i raznorodnost tla uvjetuju i različitost deformacija. Da bismo izbjegli moguće raznorodne štete pri gradnji ili tijekom uporabe građevine, pokušavamo predvidjeti deformacije i – ako se pokažu neodgovarajućima – prilagoditi širinu temelja, brzinu nanošenja opterećenja, svojstva tla. Najčešće je, za uobičajene građevine, a za sitnozrna tla za koja možemo pribaviti neporemećene uzorce, dovoljno stišljivost tla ispitati u **edometru**. U ostalim situacijama trebamo ispitivanja **in situ**, a najbolje je kombinirati podatke različitih mjerena. O ograničenjima primjene uporabe rezultata ovih ispitivanja više u geotehničkim poglavljima.



Slika 7-1. Pukotine u staroj kući u Zagrebu zbog kojih su stanari preseljeni u hotel na trošak izvođača. Pukotine su primijećene nakon izvedbe duboke građevne jame u neposrednom susjedstvu, izvedene da bi se produbio podrum tj. proširio korisni prostor ugostiteljske radnje. Fotografirao ing. Zvonko Čikeš.

7.3 Edometar.

Edometar (*oedometer*) je vrlo često korišteni laboratorijski uredaj kojim se ponavlja spriječenost horizontalnih deformacija u tlu i u tim se uvjetima ispituje stišljivost tla (*confined compression test, one-dimensional compression test, oedometer test*). Ugrađuje se neporemećeni uzorak, mjeri se početna visina uzorka, te promjena visine tijekom opterećivanja. Rezultati se koriste kod procjene slijeganja (v. 7.6) i vremenskog tijeka slijeganja (v. 7.7) za uobičajene građevine, geotehničke kategorije 2 (*geotechnical category 2*).

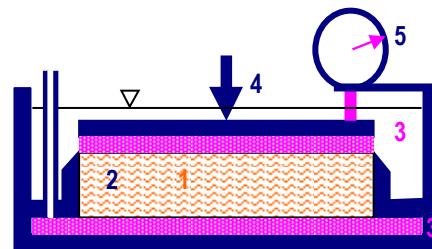
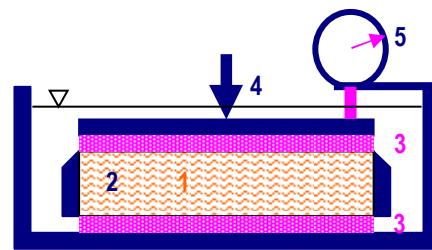
Osnovni dijelovi edometra su:

- ◆ okrugli čelični prsten (2) u koji se ugradi ispitni uzorak (1): unutrašnjost prstena je glatka, a rub prstena zaoštren je s vanjske strane, tako da se ugradnja vrši pažljivim utiskivanjem prstena u uzorak i odrezivanjem suvišnog materijala. (Uzorku je već pripremljena jedna horizontalna površina, utiskivanje se vrši okomito na tu površinu i posve nježno – bez zakretanja i nepotrebnog poremećivanja; druga stranica uzorka odreže se nježno posebnim nožem, opet bez nepotrebnog poremećivanja.) Ugrađivanjem u kruti prsten sprječavaju se horizontalne deformacije uzorka tijekom ispitivanja. Visina prstena bira se da bude što manja (npr. 2 cm) da bi utjecaji trenja na prstenu bili što manji; širina prstena određena je širinom uzorka, dakle dostupnom/korištenom garniturom za vađenje uzorka;
- ◆ dvije porozne pločice s filter papirom (3) koje se postave ispod i iznad uzorka ugrađenog u prsten tako da dreniranje (tj. istjecanje vode iz uzorka) bude nesmetano tijekom ispitivanja; ploče pri opterećivanju tjesno (često sa zazorom od 0,5 mm) klize u prsten;
- ◆ posuda koja osigurava – kad je to potrebno – potopljenost i zasićenost uzorka;
- ◆ kruta kapa postavljena na gornju poroznu pločicu tako da prenosi opterećenje po cijeloj horizontalnoj površini uzorka jednoliko; udubljenje na vrhu i kuglica u njoj omogućavaju da se opterećenje na uzorak prenosi jednoliko tj. da deformacija bude jednolika (4);
- ◆ sustav za opterećivanje: najčešće je to – preko kuglice na krutoj kapi koja poklapa uzorak – poluga koja povećava djelovanje utega; opterećenje se može nanositi i hidraulički;
- ◆ osjetilo za mjerjenje pomaka krute kape odnosno deformacije uzorka – to je najčešće mjerna urica pričvršćena na okvir uredaja koja je pomičnim ticalom oslonjena na ploču (5).
- ◆ Edometar može imati osjetila za mjerjenje horizontalnih naprezanja ugrađena u prsten što je veoma korisno kad nas zanimaju horizontalna naprezanja u tlu i njihov razvoj.

Uvjeti odvijanja uobičajenog ispitivanja:

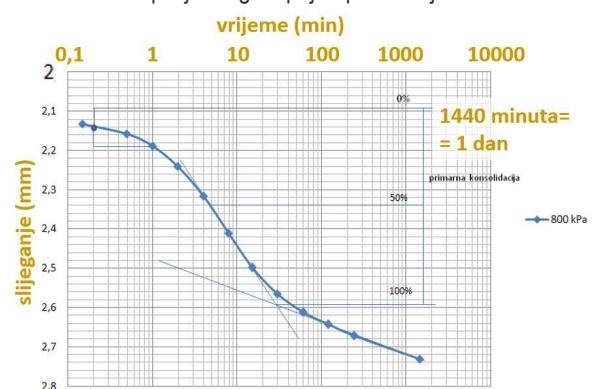
- ◆ ispitni uzorak se ugradi, omogući se zasićivanje vodom,
- ◆ očita se položaj kape koja pokriva uzorak,
- ◆ nanese se prvi stupanj opterećenja: najčešće pomoću utega koji se objesi na polugu i time jednolikoptereti cijeli uzorak
- ◆ očita se položaj kape koja pokriva uzorak
 - ❖ prisustnost vode u porama tla usporava odvijanje deformacije. Zato se, za svaki stupanj opterećenja, više puta očitava visina ploče. Najbrže promjene dogadaju se tik po nanošenju opterećenja, a potom se kontinuirano usporavaju. Zato i očitavati treba češće na početku: vremena očitavanja mogu biti: 4 s, 8 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 15 min,

Slika 7-2. Skica edometra.



- | |
|---|
| 1. neporemećeni uzorak |
| 2. čelični prsten koji sprječava horizontalnu deformaciju |
| 3. porozne ploče za dreniranje uzorka |
| 4. čelična ploča i uređaj za jednoliku raspodjelu vertikalnog opterećenja |
| 5. mjerna urica za praćenje vertikalne deformacije uzorka |

Slika 7-3. Zapis jednog stupnja opterećenja.



45 min, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h, 2 dana, 3 dana, 4 dana, 6 dana... sve dok se deformacija ne umiri. Niski (2 cm) uzorci najčešće za 1h do 24 h dožive umirenje deformacije tako da se može – npr. svakoga dana u isto jutarnje vrijeme – započeti sa novim stupnjem opterećenja.

- ♦ nakon što se deformacija umiri, nanese se slijedeći stupanj opterećenja: najčešće dva puta veći od prethodnog tijekom opterećivanja, ili četiri puta manji od prethodnog tijekom rasterećivanja.

Mjerenja koja se u uređaju vrše su:

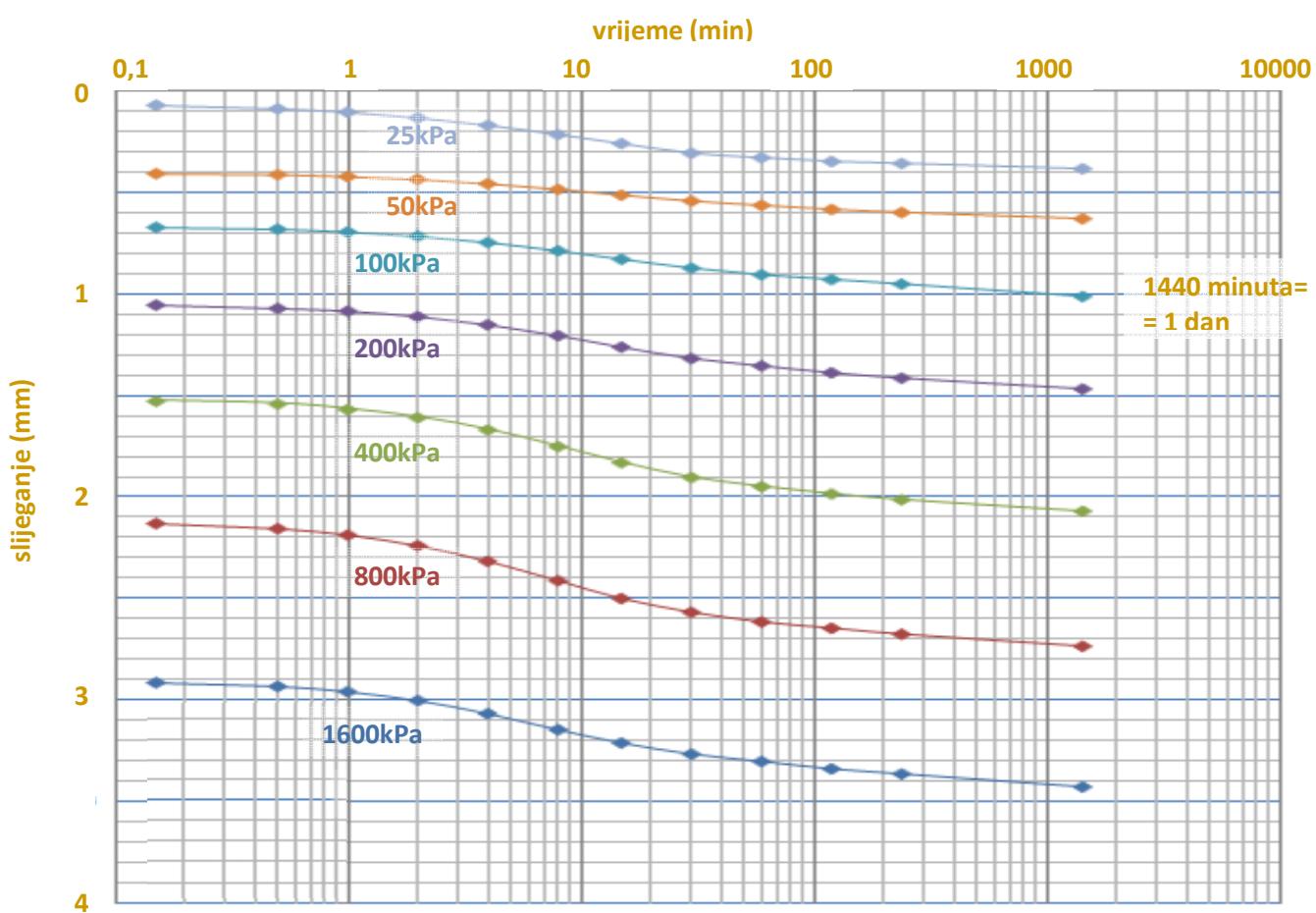
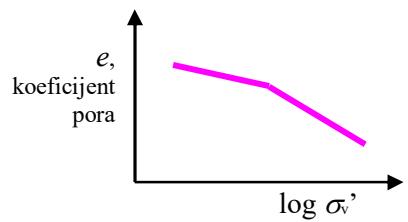
- ♦ mjerenje položaja krute kape koja pokriva uzorak u određenim trenucima u vremenu;
- ♦ ako je ugrađeno osjetilo: horizontalna naprezanja;
- ♦ vertikalna naprezanja dobiju se dijeljenjem sile na uzorak sa horizontalnom površinom uzorka;
- ♦ ako uređaj to omogućava: protoka tj. propusnost uzorka.

Prikazuju se rezultati ispitivanja:

- ♦ za svaki stupanj opterećenja: tijek deformacije ili relativne deformacije u vremenu: na horizontalnoj osi prikaže se vrijeme, na vertikalnoj, prema dolje: deformacija;
- ♦ ukupna deformacija nakon svakog stupnja prikazuje se u ovisnosti o opterećenju: na horizontalnoj osi prikazuje se naprezanje, na vertikalnoj relativna deformacija ili koeficijent pora.

♦ Slika 7-4. Edometarski dijagram: zapis razvoja koeficijenta pora sa porastom opterećenja u stupnjevima.

Slika 7-5. Zapis jednog edometarskog ispitivanja: pratite smanjivanje koeficijenta pora s povećanjem vertikalnog opterećenja.
Ispitivanje je, kao student, u Institutu IGH provela Tatjana Bošnjak, struč.spec.ing.građ..



7.4 Jednodimenzionalno deformiranje tla. Naprezanje prekonsolidacije.

Dio deformacije tla dogodi se trenutno. Drugi dio čini prije svega promjena volumena tla uslijed promjene volumena pora. Ako je tlo zasićeno, a slabo propusno, govorimo **vremenskom tijeku slijeganja**, u sitnozrnim tlima dugotrajnom procesu. Treći dio deformacije odnosi se na puzanje čvrstih čestica i, iako se u europskim tlima na kojima je mehanika tla razvijena uglavnom može zanemariti ili procijeniti otprilike, svakako je nezanemariv u tropskim ili organskim tlima.

Edometarski dijagram (kako za različite situacije prikazuje Slika 7-6) povezuje – za svaki pojedini stupanj opterećenja – konačnu relativnu deformaciju ili koeficijent pora i nametnuto vertikalno naprezanje.

Definiraju se veličine kojima se opisuje stišljivost tla – ovisno o stupnju opterećenja tj. σ' :

- ◆ **koeficijent stišljivosti (coefficient of compressibility)** u i -tom koraku opterećenja: $a_{vi} = \Delta e_i / \Delta \sigma_i$
- ◆ **edometarski modul, modul stišljivosti ili modul linearne kompresije (oedometer modulus, constrained modulus)** u i -tom koraku opterećenja: $E_{od} = M_{vi} = \Delta \sigma_i / e_i = (1+e_{i-1})/a_{vi}$
- ◆ **koeficijent promjene volumena (coefficient of volume change)** u i -tom koraku opterećenja: $m_{vi} = a_{vi} / (1+e_{i-1})$

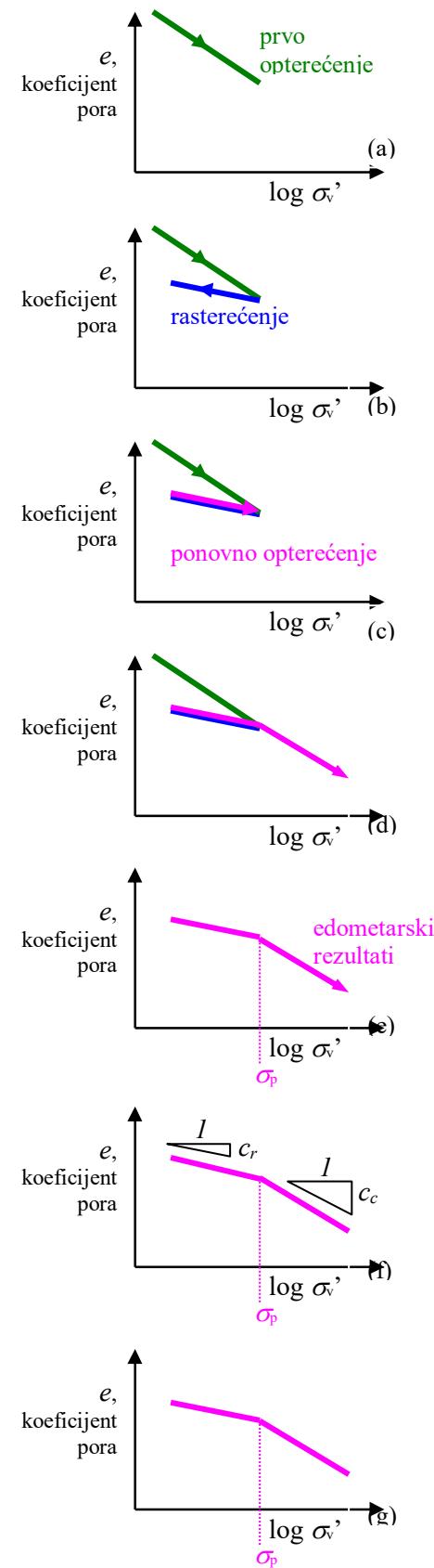
Napomena: Modul stišljivosti često se dobije iz ispitivanja *in situ* iako neizravno mjerjen. Jako se često koristi pri procjeni slijeganja u tlu.

Pažljivo vađeni uzorci u pažljivo vođenim ispitivanjima pokazuju bitnu promjenu stišljivosti tla pri naprezanju otprilike jednakom najvećemu kojemu je tlo u prošlosti bilo izloženo, a koje zovemo **naprezanje prekonsolidacije (preconsolidation pressure)** i označavamo σ_p . Zbog promjene stišljivosti, ali i povezanosti s nekim drugim svojstvima tla, važno je što bolje procijeniti veličinu σ_p . Zato se u edometarskim ispitivanjima često smanji korak promjene opterećenja u okolini očekivane razine σ_p .

Prikaže li se σ' u logaritamskom mjerilu, pokazuje se gotovo linearna ovisnost $\log \sigma' \sim e$ u dva područja čiju granicu čini σ_p . Nagib krivulje $\log \sigma' \sim e$ za $\sigma' > \sigma_p$ zovemo **indeks kompresije (recompression index)** i označavamo C_c . Nagib krivulje $\log \sigma' \sim e$ za $\sigma' < \sigma_p$ zovemo **indeks rekompresije (compression index)** i označavamo C_r . Iako obje veličine treba odrediti za razinu naprezanja koja se očekuje u promatranom problemu, C_c je otprilike jednake vrijednosti za svaki slučaj u kome σ' raste iznad do tada najvećeg opterećenja, C_r je otprilike jednake vrijednosti za svaki slučaj u kome σ' je manje od do tada najvećeg opterećenja, pri rasterećenju kao i pri ponovnom opterećenju.

$$(C_c = \Delta e / \Delta (\log \sigma') \text{ u nekom stupnju opterećenja})$$

Mjerenja pokazuju da se samo vrlo mali dio deformacije tla odnosi na elastičnu deformaciju čvrstih čestica ili vode. Veliki dio deformacije nastaje premještanjem čvrstih čestica, pa njihovim odlamanjem i sl., što je nepovratni, ireverzibilni proces. Pri rasterećenju je tlo zato bitno kruće nego pri prvom opterećenju. Pri ponovnom opterećenju slične je krutosti – jer je raspored čvrstih čestica već prilagođen prethodno dogođenom opterećenju, sve do razine najvećeg prethodnog opterećenja. Često se govori o **pamćenju** tla koje kao da „prepozna“ najveće prethodno opterećenje. Sa ovim je procesima povezano i **starenje (ageing)** tla i slično.



Slika 7-6. Skica razvoja edometarske krivulje: (a) u tlu, (b) tijekom vađenja, (c-g) u edometru.

7.5 OCR. Normalno konsolidirana, prekonsolidirana i nekonsolidirana tla.

Stupanj prekonsolidacije, OCR (overconsolidation ratio), je omjer najvećeg vertikalnog naprezanja u prošlosti, σ_p , i onoga kome je tlo izloženo u sadašnjem trenutku, σ_v' :

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_v'}$$

Normalno konsolidirana, NC (normally consolidated), su ona tla u kojima je **OCR** jednak 1. To su tla u kojima je proces konsolidacije dovršen, a prethodno nisu bila izložena većim opterećenjima.

Prekonsolidirana, OC (overconsolidated), su ona tla u kojima je **OCR** veći od 1, dakle su uglavnom prethodno bila izložena većim opterećenjima.

Različiti uzroci prekonsolidacije određuju različitu promjenu vrijednosti **OCR** po dubini:

- ◆ erozija – odnošenje površinskog sloja tla – predstavlja rasterećenje za donje slojeve, i to za vrijednost koja se ne mijenja sa dubinom; promjena σ_p sa dubinom zato je paralelna onoj σ_v' ,
- ◆ starenje tla izaziva povećanje σ_p proporcionalno σ_v' ,
- ◆ isušivanje površinskih slojeva uslijed stalnih promjena razine podzemne vode i slično, uglavnom povećava σ_p u gornjim slojevima,
- ◆ kemijski i slični utjecaji izazivaju različite druge oblike promjena.

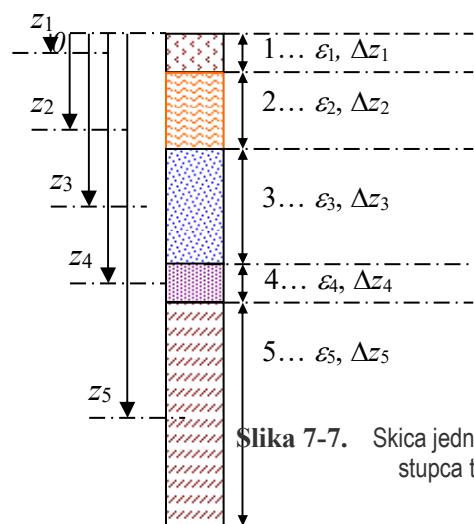
Nekonsolidirana su tla u kojima nije dovršen proces promjene pornog tlaka i u kojima se mogu očekivati znatna slijeganja i bez dodatnih opterećenja.

7.6 Slijeganje horizontalno uslojenog tla uslijed jednolikog opterećenja.

Izgradnja širokog nasipa na površini terena predstavlja jednoliko opterećenje na površini i izaziva dodatna naprezanja u tlu jednake veličine na svim dubinama. Slično je pri promjeni položaja razine podzemne vode. U tim slučajevima, kao i tijekom sedimentacije, spriječene su horizontalne deformacije u tlu i proces slijeganja odgovara stanju mirovanja odnosno edometarskim uvjetima.

Slijeganje, kao ukupna deformacija cijelog tla na promatranom mjestu, može se odrediti kao zbroj deformacija pojedinih slojeva. Da bismo procijenili deformaciju pojedinog sloja, trebamo podatke o promjeni naprezanja i o stišljivosti sloja. Prije svega, dakle, stupac tla dijelimo na slojeve za koje se stišljivost može smatrati jednakom.

Debljina pojedinog, i -tog sloja neka je Δz_i , dubina neka je prikazana na primjer dubinom sredine sloja, z_i . Dodatno naprezanje u tom sloju – jednako po dubini ako je opterećenje široko rasprostrtro – neka je označeno $\Delta\sigma$. Relativnu deformaciju možemo procijeniti prema parametrima iz edometra – za što treba znati početna naprezanja u tlu, $\sigma_{v0}(z_i)$,



Slika 7-7. Skica jednog stupca tla.

naprezanja prekonsolidacije, σ_p , i parametri C_c i C_r , ili na primjer iz edometarskog modula, E_{oed} , pri čemu također ne treba zaboraviti da se stišljivost mijenja s razinom naprezanja i dodatnog naprezanja tj.

$$E_{oed} = E_{oed}(\sigma_v(z_i), \Delta\sigma_i \dots).$$

Ako radimo sa modulom stišljivosti, relativnu deformaciju i -tog sloja jednostavno dobijemo kao

$$\varepsilon(z_i) = \Delta\sigma / E_{oed},$$

iz čega ukupna deformacija toga sloja jednaka je

$$\Delta s_i = \varepsilon(z_i) \Delta z,$$

te zbrajanjem deformacija svih slojeva dobijemo procjenu ukupnog slijeganja

$$s = \sum \Delta s_i = \sum \varepsilon(z_i) \Delta z_i = \sum \Delta\sigma / E_{oed}, \Delta z_i$$

Postavlja se pitanje dubine potrebne procjene deformacija tj. stišljivosti tla. Ako je opterećenje široko rasprostrnuto, deformacije u tlu mogu biti značajne sve do posve krutih slojeva.

U slučaju pak da opterećenje nije široko rasprostrnuto, da se radi o uobičajenom temelju, onda se širina rasprostiranja opterećenja povećava sa dubinom, tj. dodatna naprezanja koje tlo prenosi smanjuju se sa dubinom. Uobičajeno je ispitivati tlo tj. računati deformaciju barem do dubine na kojoj vertikalna dodatna naprezanja postaju manji od oko 10% početnih efektivnih naprezanja, tj. $\Delta\sigma_v = 10\% \sigma_v$. O tome više u poglavljima o temeljima.

7.7 Trenutno slijeganje, primarna konsolidacija, sekundarna konsolidacija.

Dio deformacije tla – koji se odnosi na deformaciju čvrstica i slično – događa se istovremeno sa nanošenjem opterećenja. Odgovarajući dio slijeganja zovemo **trenutno slijeganje**.

Zbog posve malene stišljivosti kako vode tako i čvrstih čestica, najveći dio deformacije zasićenog tla događa se uslijed premještanja čvrstih čestica i promjene volumena pora. U zasićenom tlu promjena volumena pora znači i promjenu količine vode u porama. U dobro propusnim tlima kao što su šljunak i pijesak, ako je migracija vode moguća, deformacija se odvija veoma brzo, paralelno sa izvedbom građevine, građevne Jame i slično. U slučaju slabije propusnih tala predviđamo **vremenski tijek slijeganja** procjenjujući koji će dio slijeganja biti ostvaren u nekom vremenu od početka građenja, ili koliko je vremena potrebno za određeni stupanj slijeganja i sl. Vremenski tijek slijeganja zovemo i **primarna konsolidacija**.

U našim krajevima često se može zanemariti puzanje čvrstih čestica i slične procese deformiranja nevezane za promjenu stanja naprezanja, što zovemo **sekundarna konsolidacija**. U novije doba, posebno u tropskim krajevima, nailazi se na tla u kojima je sekundarna konsolidacija nezanemariva i traži pažljivije analize.

7.7.1 Terzaghi-evo rješenje za jednodimenzionalnu konsolidaciju

Razvijen je niz modela koji omogućavaju predviđanje vremenskog tijeka slijeganja. Najjednostavnije je rješenje koje je izveo Terzaghi za jednodimenzionalno dreniranje u sloju horizontalnih granica uslijed dodatnih naprezanja koja se linearno mijenjaju sa dubinom. U literaturi se također mogu naći rješenja za radikalno dreniranje za slučaj postojanja drenažnih bunara i slično, te druga. Sve brža računala i sve moćniji računalni programi omogućavaju i brza i jednostavna rješenja i za složene situacije. Ovdje se samo kratko prikazuje samo najjednostavnije rješenje radi ilustracije tj. da bi se olakšalo razumijevanja problema.

Terzaghiovo rješenje zasniva se na usporedbi ravnoteže u horizontalno uslojenom tlu, odnosa naprezanja i deformacije preko koeficijenta stišljivosti i promjene koeficijenta pora, te jednadžbe kontinuiteta. Definira se

koeficijent konsolidacije, c_v , kao

$$c_v = k(1+e)/\gamma_w a_v$$

gdje k je koeficijent propusnosti iz Darcy-evog zakona, e je koeficijent pora, γ_w je jedinična težina vode, a a_v je koeficijent stišljivosti

Rezultat je najčešće prikazan u obliku relacije između normaliziranog slijeganja, U , i odgovarajućeg normaliziranog vremena, T_v ,

- ♦ *stupanj slijeganja (degree of consolidation)* definira se kao

$$U(T_v) = s(t)/s$$

gdje $s(t)$ je slijeganje u trenutku t , a s je konačno slijeganje,

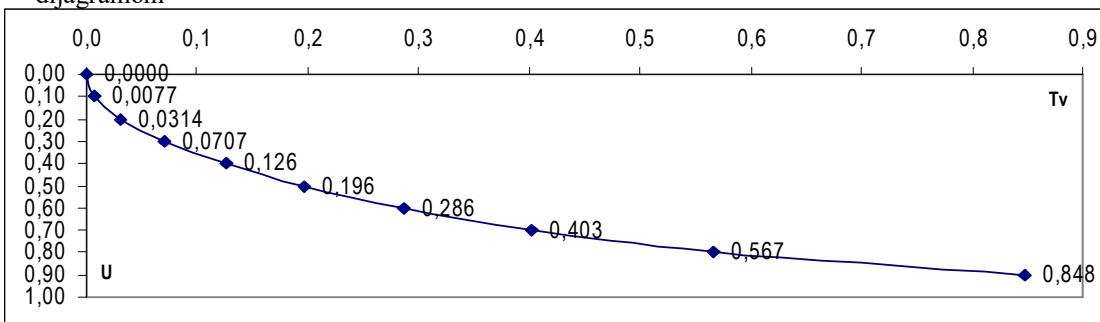
- ♦ *vremenski faktor (time factor)* definira se kao

$$T_v = t c_v / H^2$$

gdje t je vrijeme, a H je debljina onog dijela sloja koji se drenira u jednom smjeru, dakle

- H je debljina sloja ako je jedna granica sloja nepropusna, ili
- H je polovica debljine sloja ako su obje granice propusne.

Za slučaj da se dodatno vertikalno naprezanje linearno mijenja sa dubinom, relacija između U i T_v prikazana je dijagramom



Slika 7-8. Odnos vremenskog faktora, T_v , i stupnja konsolidacije, U , za jednodimenzionalno strujanje uslijed povećanja vertikalnih naprezanja konstantnog s dubinom.

Ako nas zanima vrijeme određenog dijela slijeganja, računat ćemo

$$t = T_v \cdot H^2 / c_v$$

$$s(t) = s \cdot U(T_v)$$

7.8 Zadatak

Promatrajmo horizontalno uslojeno tlo

Pjesak do dubine od

$$4 \text{ m}$$

jedinične težine

$$18 \text{ kN/m}^3$$

glinu do dubine od

$$10 \text{ m}$$

jedinične težine

$$19 \text{ kN/m}^3$$

šljunak do dubine od

$$20 \text{ m,}$$

jedinične težine

$$20 \text{ kN/m}^3$$

ispod je nestišljiva podloga

$$2 \text{ m}$$

Razina podzemne vode je na dubini

$$2 \text{ m}$$

Gradi se široki nasip koji će činiti opterećenje od

$$20 \text{ kPa}$$

$$p =$$

Treba procijeniti

slijeganje

vremenski tijek slijeganja.

Jednoliko rasprostrato opterećenje čini dodatno naprezanje

$$20 \text{ kPa}$$

po cijeloj dubini

$$\gamma_w =$$

$$10 \text{ kN/m}^3$$

Pijesak

debljina	$\Delta z =$	4 m
modul stišljivosti	$M_v =$	4000 kPa
dodatno naprezanje	$\Delta \sigma_v =$	20 kPa
srednja relativna deformacija	$\varepsilon_v = \Delta \sigma_v / M_v =$	
	=	0,005
		0,5%
deformacija sloja	$\Delta s = \varepsilon_v \Delta z =$	
	=	0,005 * 4 m
	*	4 m
	=	0,02 m
	=	2 cm

Glina

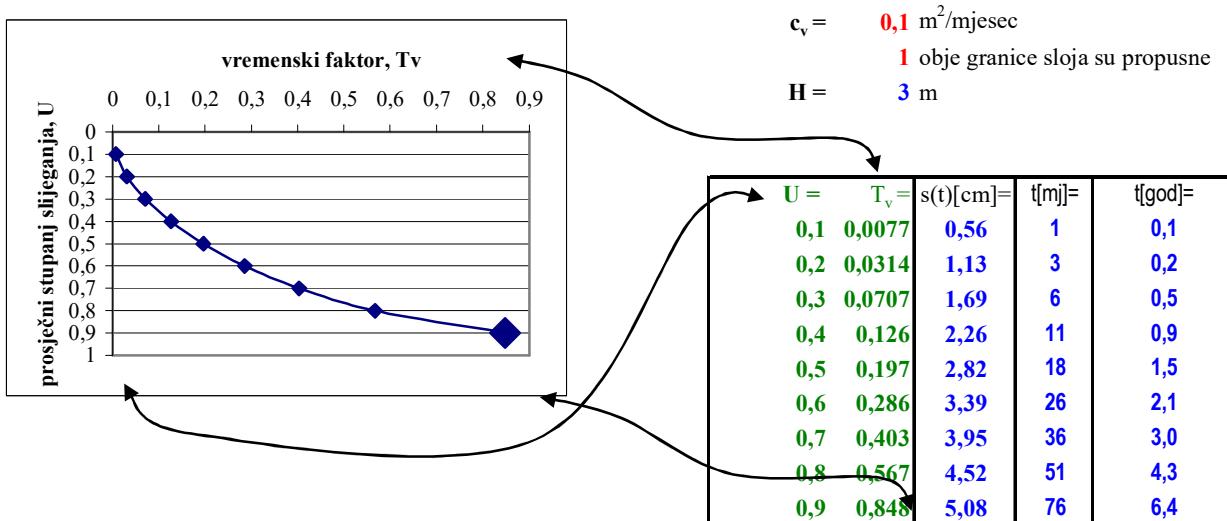
debljina sloja	$\Delta z =$	6 m
dubina sredine sloja		7 m
početno naprezanje u sredini sloja	$\sigma'_{v0} =$	79 kPa
koeficijent konsolidacije	$C_c =$	0,3
koeficijent rekonsolidacije	$C_r =$	0,03
naprezanj prekonsolidacije	$\sigma_p =$	90 kPa
početni koeficijent pora	$e_0 =$	0,5
dodatno naprezanje	$\Delta \sigma_v =$	20 kPa
promjena koeficijenta pora	$\Delta e =$	0,014
relativna deformacija	$\varepsilon_v =$	0,009
deformacija sloja	$\Delta s =$	5,6 cm

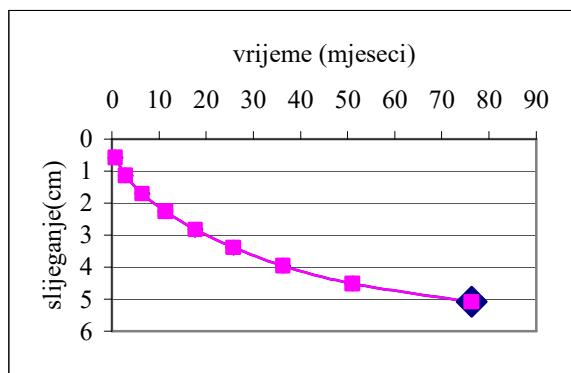
Šljunak

debljina sloja	$\Delta z =$	10 m
modul stišljivosti	$M_v =$	20000 kPa
	$\Delta \sigma_v =$	20 kPa
srednja deformacija	$\varepsilon_v =$	0,0010
deformacija sloja	$\Delta s =$	1,0 cm

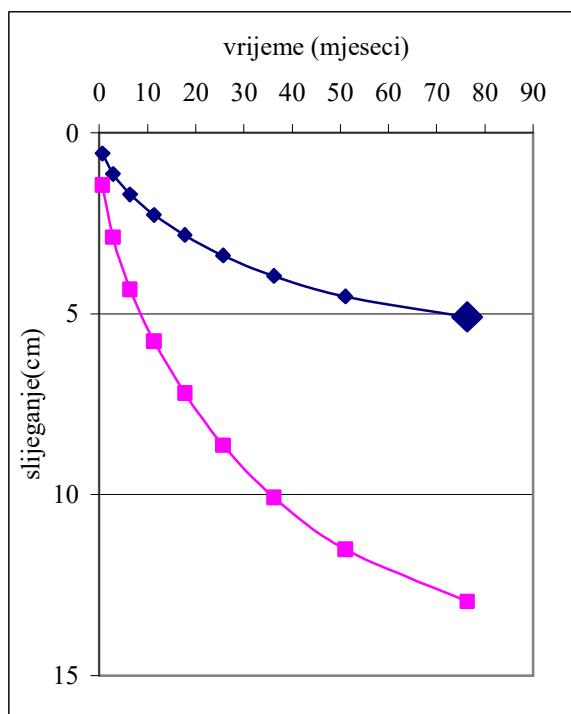
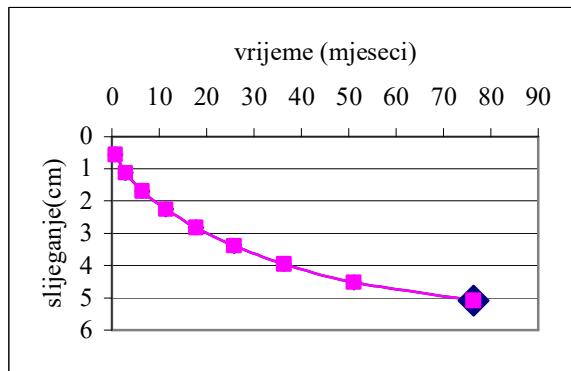
Ukupno slijeganje

$$s = \Sigma \Delta s = \\ = 9 \text{ cm}$$

Vremenski tijek slijeganja



ubrzavanje slijeganja



kako učiniti da se

$$\begin{aligned} \text{90\% slijeganje dogodi za} \\ \text{9 mjeseci?} \\ t = & 9 \text{ mjeseci} \\ T_v = t^* c_v H^2 = & 9 \text{ mjeseci}^* \\ * & 0,1 \text{ m}^2/\text{mjesec}^* \\ * (& 3 \text{ m})^2 = \\ = & 0,1 \end{aligned}$$

odatle

$$\begin{aligned} U = & 0,35 \\ s(t) = & 5,1 \text{ cm} \\ s = & 14,4 \text{ cm} \\ \epsilon_v = & 0,024 \\ \Delta \epsilon = & 0,036 \end{aligned}$$

zadanim opterećenjem ostvari se

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon = & 0,014 \\ \text{preostaje ostvariti} \\ \Delta \Delta \epsilon = & 0,022 \\ \text{budući da je dodatnim opterećenjem već premašeno } \sigma'_p, \\ \sigma_{\text{konačno}} = & 117 \text{ kPa} \\ \text{potrebito predopterećenje je} \\ \Delta \Delta \sigma_v = & 18 \text{ kPa} \end{aligned}$$

U =	T _v =	s(t)[cm] =	t[mj] =	t[god] =
0,1	0,0077	1,44	1	0,1
0,2	0,0314	2,88	3	0,2
0,3	0,0707	4,32	6	0,5
0,4	0,126	5,76	11	0,9
0,5	0,197	7,20	18	1,5
0,6	0,286	8,64	26	2,1
0,7	0,403	10,08	36	3,0
0,8	0,567	11,52	51	4,3
0,9	0,848	12,96	76	6,4

7.9 Posmična čvrstoća, kratki uvod.

Današnje mogućnosti mjerjenja i proračuna daju zamamnu slobodu pri ispitivanju tla i predviđanju ponašanja tla, međutim rokovi i ograničenost sredstava često nas nukaju na jednostavne modele i brze postupke. Ovaj se tekst bavi samo jednostavnim ispitivanjima – i zato što su vrlo instruktivni. Ipak, ni pri jednostavnom ispitivanju ne treba zaboraviti da su rezultati ispitivanja dobri samo koliko je dobro vođeno, i koliko je dobar ispitni uzorak.

U mnogim problemima geotehnike pri deformiranju tla dolazi do formiranja klizne plohe i klizanja jednog dijela tla.

Da bismo se osigurali od takvih nepovoljnih događanja, provodimo provjere **stabilnosti** u kojima proračunata naprezanja u tlu uspoređujemo sa mogućim **graničnim vrijednostima** naprezanja. U slučaju klizanja, uspoređujemo prije svega posmična naprezanja, iako u odnosu prema normalnim naprezanjima. Jednostavni i ilustrativni laboratorijski uređaj za ispitivanje posmične čvrstoće je **uredaj za izravni posmik** (ili direktno smicanje).

Troosni uređaj – u mnogo raznih izvedbi – omogućava i mnogo detaljnija mjerjenja sa mijenjanjem bitno više elemenata opterećenja ili deformacija. Kvalitetno izgrađeni troosni uređaji omogućavaju puno više nego što je procjena posmične čvrstoće – npr. mjerjenje deformacija tla i ispitivanje deformabilnosti pri praćenju traga naprezanja spomenutog u dodatku o Mohrovim kružnicama – čime se bavi specijalizirana literatura. Ovdje su prikazani osnovni elementi troosnog uređaja i **najčešćih ispitivanja**, te je ukazano na mogućnosti **dreniranja** tijekom ispitivanja i vezanost ponašanja tla na **uvjete deformiranja**.

Cijela serija drugih laboratorijskih uređaja omogućava ispitivanje tla u različitim uvjetima opterećivanja tj. deformiranja. Laboratorijska ispitivanja je nužno uspoređivati i nadopunjavati mjerjenjima **in situ**.

7.10 Uređaj za izravni posmik.

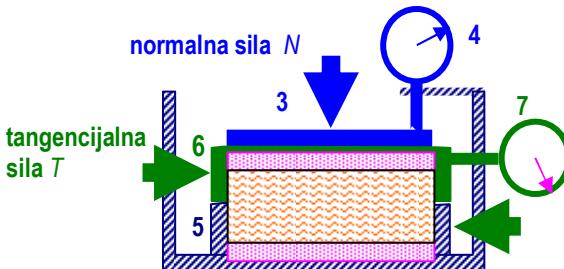
Uređaj za izravni posmik (*direct shear apparatus*) jednostavni je i često korišteni laboratorijski uređaj. Sastoji se od dvodijelne čelične kutije (5, 6) – razdijeljene horizontalno – u koju se ugradi **neporemećeni uzorak** (1) između **dviju poroznih ploča** (2). Kapa (3) tjesno klizi u **gornji dio kutije** (6) kako se nanosi vertikalno opterećenje i uzorak se konsolidira. Nakon smirivanja vertikalne deformacije, koja se prati slično kao u edometarskom ispitivanju, izaziva se smicanje: **gornji** (6) i **donji dio kutije** (5) pomiču se u horizontalnom smjeru jedan u odnosu na drugi. Deformacija uzorka koncentrirana je na usko područje oko horizontalne ravnine spoja dijelova kutija. Niti stanje naprezanja niti deformiranje uzorka nisu homogeni, ali tijekom smicanja razvija se klizna ploha slično kao u nekim procesima u tlu.

Rezultati mjerena – **za svako vertikalno opterećenje** – prikazuju se kao relacija između ostvarenog tangencijalnog naprezanja i odgovarajućeg pomaka između dviju kutija. Tangencijalno i normalno naprezanje u plohi na spoju dviju kutija su

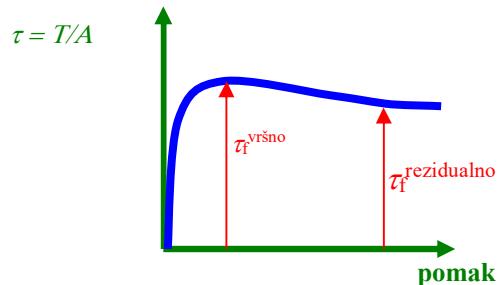
$$\tau = T/A,$$

$$\sigma = N/A$$

gdje A je površina uzorka u ravnini dodira dviju kutija uređaja. U jednom je ispitivanju σ stalno, a τ raste od nule, ali se tijekom ispitivanja smanjuje prirast τ do maksimalne vrijednosti, nakon koje τ ostaje konstantan ili se smanjuje.



Slika 7-9. Skica uređaja za izravni posmik.



Slika 7-10. Mjerenje (pomak, τ) tijekom jednog mjerena (za jedno normalno naprezanje) u uređaju za izravni posmik.

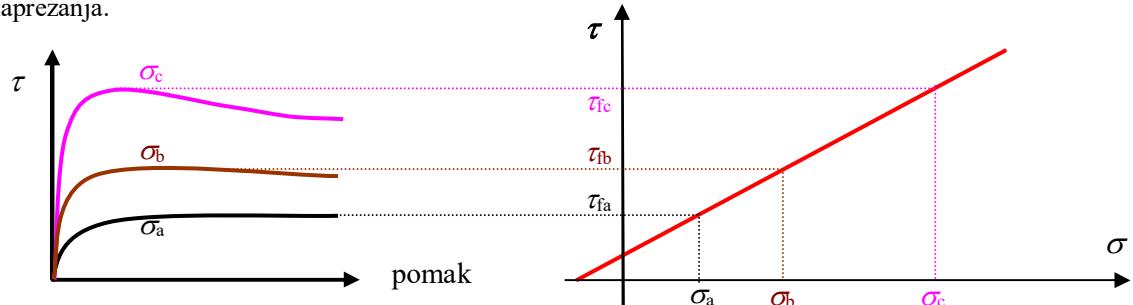
Najzanimljivije su granične vrijednosti posmičnog naprezanja:

- ◆ vršna čvrstoća kao najveća vrijednost tangencijalnog naprezanja – kad nas zanimaju relativno male deformacije i

- ♦ rezidualna čvrstoća kao tangencijalno naprezanje koje odgovara velikim deformacijama.

Obje su vrijednosti, kao i cijela krivulja, određene veličinom normalnog naprezanja u istoj ravnini, te brzinom smicanja. Redovito se za oznaku čvrstoće rabi indeks "f", od engleskog "failure" za hrvatsko "lom".

S promjenom normalnog naprezanja, mijenja se i razvoj tangencijalnih naprezanja pri smicanju. Uobičajeno se na istom uzorku ili tri ispitna uzorka izrezana iz istog uzorka izvode tri mjerena s tri različita vertikalna opterećenja tj. normalna naprezanja.



Slika 7-11. Mjerenje (pomak, τ) tijekom tri mjerena na tri ispitna uzorka izrezana iz jednog neporemećenog uzorka tla sa različitim vertikalnim opterećenjima (σ) u uređaju za izravni posmik.

7.11 Mohr¹-Coulomb²-ov zakon čvrstoće.

Pokazuje se da se naprezanja koja odgovaraju lomu tla odnosno velikim deformacijama, uglavnom mogu približno opisati parom pravaca u Mohrovoj ravnini σ, τ . Uobičajeni zapis pravca je kroz nagib pravca i odsječak na osi τ .

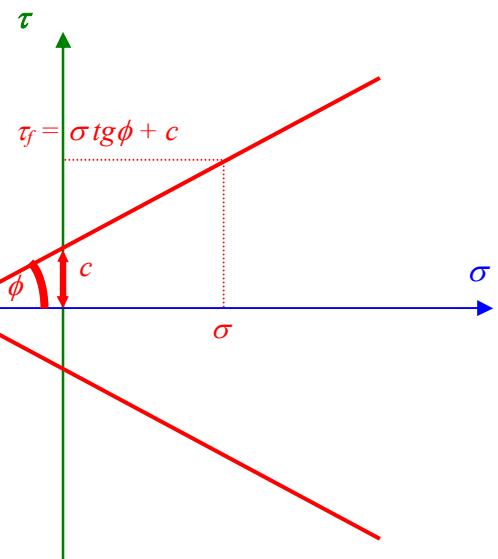
$$\tau_f = \sigma \operatorname{tg} \phi + c$$

gdje σ je normalno naprezanje u nekoj ravnini, a c i ϕ su parametri koji određuju **pravac čvrstoće**. Zovemo ih parametri čvrstoće:

- ♦ c zovemo **kohezija**,
- ♦ ϕ zovemo **kut unutarnjeg trenja**.

Drugim riječima, za moguće posmične naprezanja, uz normalno naprezanje jednako σ , vrijedi:

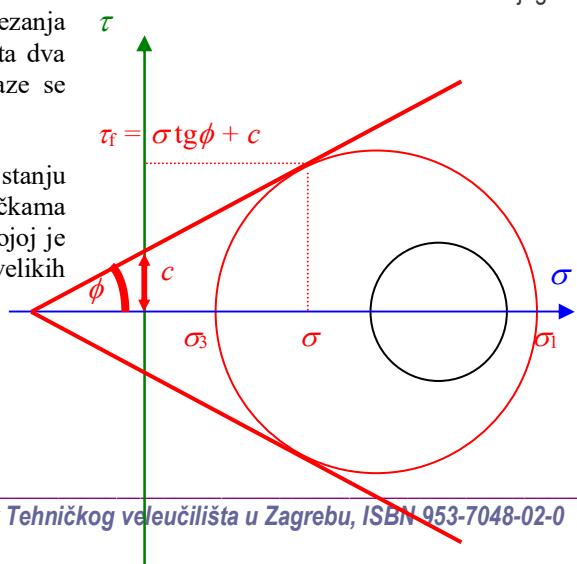
$$\tau \leq \tau_f = \sigma \operatorname{tg} \phi + c$$



Slika 7-12. Mohrovi dijagrami.

Ta dva pravca čine **anvelopu loma**: sva moguća stanja naprezanja opisana parom σ, τ nalaze se u području omeđenom s ta dva pravca. Također i sve moguće Mohrove kružnice nalaze se unutar ta dva pravca.

Mohrova kružnica koja dodiruje envelopu loma, odgovara stanju naprezanja u točki u tlu u kojoj dolazi do sloma. Točkama dodira sa envelopom loma odgovaraju dvije ravnine u kojoj je čvrstoća dosegnuta odnosno u kojoj dolazi do velikih deformacija.



¹ Georg Mohr [mor] 1640-1697

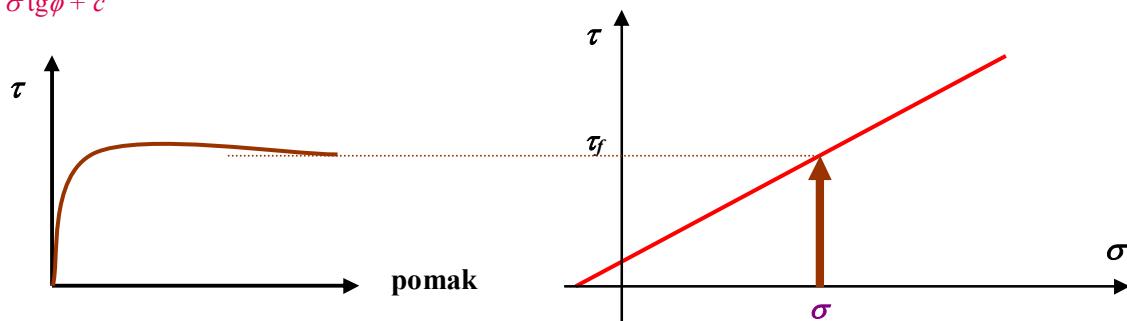
² Charles Augustin Coulomb [kulon] 1736-1806

Da bi se odredili parametri čvrstoće, tj. pravac čvrstoće, potrebne su barem dvije točke, tj. dva ispitivanja. U pravilu se rade tri mjerenja, tj. tri ispitivanja izravnog posmika ili drugačija, u drugim odgovarajućim uređajima (v. npr. 7.12).

Veličinu normalnih naprezanja treba birati tako da odgovaraju analiziranom problemu, jer se s porastom normalnog naprezanja kohezija nešto povećava, a kut unutarnjeg trenja smanjuje.

Mjerenjima dobiveni parametri čvrstoće mogu se primijeniti na dani geotehnički problem – ukoliko odgovaraju uvjeti deformiranja i stanje naprezanja. Na primjer, pri provjeri stabilnosti kosine, često se uspoređuju naprezanja u sustavu potencijalnih kliznih ploha – u onima u kojima bi možda moglo doći do klizanja. Svaki element tla na kliznoj plohi uspoređuje se sa elementom tla ispitivanom npr. u uređaju za izravni posmik. Iz mjerenja čvrstoće i veličine normalnog naprezanja na tom mjestu (u toj točki i tome smjeru), σ , može se odrediti koliki je očekivani granično tangencijalno naprezanje:

$$\tau_f = \sigma \operatorname{tg} \phi + c$$



Slika 7-13. Razvoj τ uz konstantno σ .

Posmično naprezanje u istoj točki i istom smjeru, τ , usporedimo s τ_f , određenima sa σ , ϕ i c : ako je τ blizu τ_f , onda je situacija posve opasna. Mjeru sigurnosti uglavnom izražavamo faktorom sigurnosti, omjerom granične i stvarne vrijednosti posmičnog naprezanja u promatranoj točki i plohi:

$$Fs = \tau_f / \tau = (\sigma \operatorname{tg} \phi + c) / \tau$$

Pri tome treba odlučiti je li za problem odlučujuća vršna ili rezidualna čvrstoća, te koji su odgovarajući uvjeti dreniranja, brzina smicanja i slično. Iako se Mohr-Coulombov zakon bavi graničnim vrijednostima, vrijedi primjetiti da određeni pomaci postoje za bilo koje τ .

Sve ovdje opisano odnosi se samo na dvodimenzionalno smicanje. Treća dimenzija je u nekim problemima posve nezanemariva. Ipak, jednostavni Mohr-Coulombov zakon i uređaj za izravni posmik daju u mnogim situacijama posve dobra rješenja, ako se vodi briga o ograničenjima i primjeni.

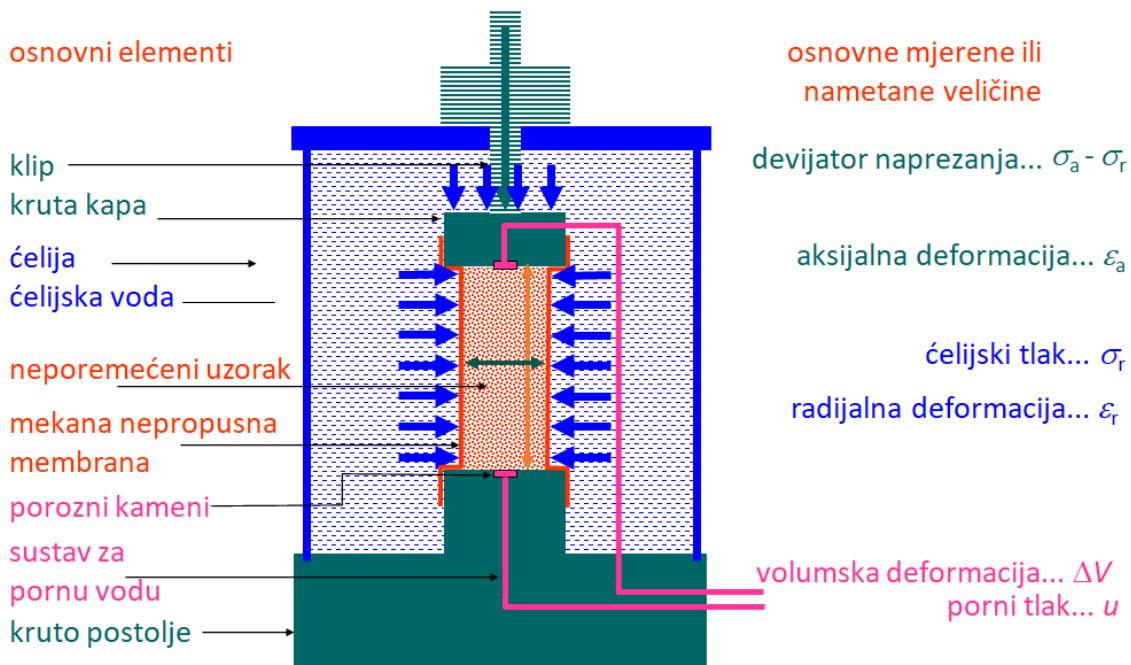
Također, općenito je dobro uočiti važnost anizotropnosti tla: tlo, naime, često, ima ravnine (smjerove) u kojima je čvrstoća veća ili manja – zbog načina sedimentacije, povijesti opterećivanja, prethodnog klizanja i sl.

7.12 Troosni uređaj.

7.12.1 Opis troosnog uređaja.

Troosni uređaj gradi se tako da se ispita ponašanje elementa tla pri homogenoj promjeni naprezanja odnosno homogenom deformiranju – prije svega deformabilnost i čvrstoća. Postoje rijetki uređaji koji omogućavaju neovisno opterećivanje u tri okomita smjera, to su takozvani pravi troosni uređaji. Uobičajeni troosni uređaji – u mnoštву izvedbi – omogućavaju osno simetrično opterećivanje i deformiranje valjkastog ispitnog uzorka.

Slika 7-14. Shema troosnog uređaja



Troosni uređaj omogućava ispitivanje uzorka tla u homogenom stanju deformacija i naprezanja. Troosni je uređaj građen slično različitim uređajima za ispitivanje tlačne čvrstoće, ali osim vertikalnog osno opterećenja, na ispitni uzorak se može nametnuti i radikalno (ustvari izotropno) opterećenje.

Uzorak je obavljen nepropusnom mekanom membranom tako da struktura tla tijekom ispitivanja bude sačuvana od poremećaja na površini i slično, te da uzorak i voda u uzorku budu izolirani od vode oko uzorka.

Osnovni dijelovi uređaja su

- ◆ kruto postolje i kruta kapa, horizontalnih i glatkih ploha tako da vertikalno osno opterećenje bude preneseno homogeno na cijeli uzorak, te sustav za aksijalno opterećivanje;
- ◆ ćelija koja zatvara cijeli uzorak, postolje, kapu... tako da preko vode u ćeliji na uzorak bude preneseno izotropno opterećenje (a membrana treba osigurati da voda u ćeliji doista predstavlja samo opterećenje na uzorak), te sustav za nanošenje ćelijskog tlaka;
- ◆ porozni kameni u postolju i kapi, u dodiru sa dnem odnosno vrhom uzorka, spojeni sustavom cjevčica sa uređajima za mjerjenje promjene volumena ili promjene pornog tlaka u uzorku tijekom pokusa, te sustav za nanošenje pornog tlaka;
- ◆ instrumenti za mjerjenje
 - ❖ dodatnog vertikalnog opterećenja (tj. devijatora naprezanja);
 - ❖ vertikalne deformacije;
 - ❖ možda lokalne vertikalne deformacije, radikalne deformacije na ispitnom uzorku;
 - ❖ ćelijskog tlaka, možda promjene volumena vode u ćeliji;
 - ❖ tlaka porne vode, u novije vrijeme sve češće mjeri se i tlak zraka;
 - ❖ promjene volumena vode u ispitnom uzorku.

Posebno izrađeni troosni uređaji omogućavaju i ciklično opterećivanje i slično.

Slika 7-15. Nekoliko troosnih uređaja s potpunom opremom. Proizvođač: Seiken, Tokyo, Japan.

(a) U sredini: troosni uređaj, lijevo: sustav za nametanje opterećenja, desno: sustav za mjerjenja.



(b) U sredini: troosni uređaj, lijevo: sustav za nametanje opterećenja, desno: mjerjenje i bilježenje rezultata.
U ovoj izvedbi kapa je pričvršćena na okvir tako da se poremećivanje uzorka može biti minimalno tijekom ugradnje.
Čelija se namješta nakon što je uzorak ugrađen i nametnuto je maleno opterećenje koje štiti strukturu uzorka.



(c) Za velika opterećenja i za ispitivanje stijena ili tla pod velikim naprezanjima koriste se čelije od čelika, a za nametanje čelijskog tlaka koristi se ulje kojim se ispuni čelija.

(d) Za velike uzorke izgrađeni su posve veliki uređaji.



7.12.2 Osnovni koraci ispitivanja u troosnom uređaju.

- ❖ **Pravilna priprema i ugradnja ispitnog uzorka** svakako predstavlja prvi važni korak svakog ispitivanja. Budući da se ispituje ponašanje tla, treba svakako sačuvati izvornu strukturu tla, također strukturu treba čuvati i ako se radi o ispitnim uzorcima koji se pripremaju u laboratoriju. Zatvaranje ćelije i slični koraci ugradnje izazivaju poremećaje koje treba minimizirati, pa je za zaštitu uzorka razvijen niz postupaka. Za ispitivanje se može tražiti zasićivanje uzorka vodom što može biti posebno delikatni korak i traži posebne procedure kao što je otapanje zraka u uzorku ugljičnim dioksidom, a potom njegovo ispiranje deariranom vodom.
- ❖ **Konsolidacija uzorka:** dovođenje uzorka u početno stanje: to može biti ono stanje u kome je uzorak bio *in situ* prije vađenja, odnosno ono počevši od kojega se želi ispitati ponašanje tla. Za vrlo osjetljiva tla i sl. razvijene su posebne procedure kojima se umanjuju utjecaji nužnih poremećivanja tijekom vađenja uzorka iz tla. Opterećivanje ispitnog uzorka čini se dovoljno sporo da se ne poremeti struktura tla. Razlikujemo **izotropnu** i različite oblike **anizotropne** konsolidacije, od kojih je možda najzanimljivija **Ko** konsolidacija, u kojoj se opterećenje - i aksijalno i ćelijski tlak - nanosi u malenim koracima tako da se horizontalna deformacija održava na nuli: $\epsilon_h = 0$.
- ❖ **Smicanje uzorka:** promjena vertikalnog opterećenja ili nametanje vertikalne deformacije. Najčešće se rade monotona ispitivanja, "do sloma", ali postoje i različita ciklička ispitivanja i nebrojeno mnogo procesa promjena stanja naprezanja ili deformacija. Pri tome razlikujemo (a) **drenirana** ispitivanja tijekom kojih su drenovi otvoreni odnosno moguće je istjecanje ili utjecanje vode iz ili u uzorku i (b) **nedrenirana** ispitivanja u kojima su drenovi pri smicanju zatvoreni, tj. ako je uzorak zasićen, nije moguća promjena volumena uzorka.

7.12.3 Konsolidirana drenirana (CD) ispitivanja.

Konsolidirana drenirana ispitivanja (*consolidated drained tests*) mogu se izvoditi da se ustanovi deformabilnost i/ili čvrstoća tla u sporim procesima u tlu u kome je uglavnom dovršena konsolidacija. Tijekom ispitivanja, nakon dovršene konsolidacije, smicanje se odvija također sa otvorenim drenovima.

Za ilustraciju ponašanja tla u konsolidiranim dreniranim ispitivanjima prikazuju se (Slika 7-16) rezultati ispitivanja na tri jednaka ispitna uzorka koji su na isti način pripremljeni od pijeska Toyoura, ali s različitim zbijenostima. Uzorci su konsolidirani izotropno na $\sigma_0 = 0,1 \text{ MPa}$. Trag naprezanja pokazuje Slika 7-16(a). Za sva tri ispitivanja, kako su drenovi otvoreni, totalna se naprezanja tijekom ispitivanja ne razlikuju od efektivnih³. Konsolidaciju predstavljaju identične linije koje prate os σ . Smicanje je bilo ostvareno povećanjem aksijalnog opterećenja, uz stalnu vrijednost radijalnog naprezanja. Razvoj aksijalne deformacije vidi se na Slika 7-16(b) ovisno o promjeni devijatora naprezanja (pričekana je ustvari polovica vrijednosti devijatora naprezanja: $\tau_{max} = q/2$). Odgovarajuće promjene volumena i koeficijenta pora prikazuju Slika 7-16(c) i (d). Vidi se da rahlja tla pri nedreniranom smicanju doživljavaju zbijanje, a zbijenja se tla, nakon početnog zbijanja, razrahljuju. Zanimljivo je primijetiti da oni uzorci (istog tla i iste početne strukture) koji su istog početnog stanja naprezanja tijekom smicanja teže ka istom koeficijentu pora.

7.12.4 Konsolidirana nedrenirana (CU) ispitivanja.

Konsolidirana nedrenirana ispitivanja (*consolidated undrained tests*) mogu se raditi da se ustanovi deformabilnost i/ili čvrstoća tla u brzim procesima pri kojima ne može doći do promjene volumena tla, ali u tlu u kojem je bilo dovršeno konsolidaciono slijeganje tla. Tijekom ispitivanja, nakon dovršene konsolidacije, smicanje – dodavanje vertikalnog naprezanja – odvija se sa zatvorenim drenovima. Uzorci su prije ili tijekom konsolidacije redovito zasićeni vodom, tako da je tijekom smicanja sprječena promjena volumena uzorka. Time se izaziva promjena pornog tlaka, pa se tijekom smicanja efektivna naprezanja razlikuju od totalnih⁴. Zato se razlikuju i envelope sloma za totalna naprezanja i one za efektivna naprezanja.

³ Ustvari, može postojati trajna razlika: na početku ispitivanja, da bi se olakšalo zasićivanje uzorka, često se podignu i ćelijski tlak i porni tlak u uzorku, tako da efektivna naprezanja ostaju nepromijenjena (*back pressure*; procedura treba biti pažljivo izvedena tako da se ne poremećuje struktura uzorka). Ovdje se govori o totalnim naprezanjima kao razlici ćelijskog tlaka i te početne vrijednosti, te o pornom tlaku kao razlici mjerenoj i početne vrijednosti.

⁴ Brzina smicanja mora biti prilagođena ispitivanom tlu, jer promjena pornog tlaka te deformiranje uzorka moraju biti jednaki u cijelom uzorku.

Za ilustraciju ponašanja tla pri nedreniranom smicanju pokazuju se rezultati ispitivanja na nizu uzoraka koji su na isti način pripremljeni od pijeska Nevada, ali tako da se zbijenosti, tj. koeficijenti pora razlikuju. Svi su uzorci konsolidirani na istom početnom naprezanju, $\sigma_0 = 0,3 \text{ MPa}$. Slika 7-18(a) prikazuje, u Mohrovom dijagramu, trag naprezanja za svako od ispitivanja, a Slika 7-18(b) prikazuje razvoj odgovarajuće aksijalne deformacije. Najrahlji uzorci tijekom smicanja pokazuju smanjivanje efektivnih naprezanja tj. porast pornog tlaka, što prati i porast, a potom smanjivanje devijatora naprezanja tj. pratećih posmičnih naprezanja i posmične čvrstoće.

Za najrahlje uzorce ($e = 0,956; 0,908; 0,889$) vidi se porast posmičnih naprezanja do najveće vrijednosti, tj. vršne posmične čvrstoće, te zatim smanjivanje do posmične čvrstoće jednake nuli.

Nesto zbijeniji uzorci ($e = 0,847; 0,835; 0,823$) pokazuju porast a potom i smanjivanje pornog tlaka, te dosizanje vršne čvrstoće i, potom, rezidualne čvrstoće veće od nule.

Dva najzbijenija uzorka u ovom nizu pokazuju uglavnom porast pornog tlaka i porast posmičnih naprezanja sa porastom deformacije, pa se ne govori ni o vršnoj ni o rezidualnoj čvrstoći. Ukratko, s porastom zbijenosti raste i čvrstoća tla. Porni tlakovi uglavnom rastu u situacijama gdje bi se tlo zbijalo u dreniranim uvjetima, i smanjuju se gdje bi se razrahljivalo.

Slika 7-18 prikazuje četiri konsolidirana nedrenirana ispitivanja na pijesku Toyoura, na uzorcima koji su pripremljeni i konsolidirani tako da su imali isti koeficijent pora nakon konsolidacije na četiri različita početna naprezanja,

$$\sigma_0 = 0,1 \text{ MPa}; 1 \text{ MPa}, 2 \text{ MPa}, 3 \text{ MPa}.$$

Zanimljivo je primijetiti da se uzorci konsolidirani na manjim naprezanjima ponašaju onako kako bi se ponašali zbijeniji uzorci. Uzorci konsolidirani na većim naprezanjima ponašaju se onako kako bi se ponašali rahlji uzorci. Zanimljivo je primijetiti također i da sva četiri uzorka od istog materijala, iako su konsolidirani na različitim početnim naprezanjima, ali tako da im je koeficijent pora isti, na velikim deformacijama imaju jednako stanje naprezanja.

7.12.5 Nekonsolidirana nedrenirana (UU) ispitivanja.

Nekonsolidirana nedrenirana ispitivanja (*unconsolidated undrained tests*) odgovaraju situacijama u kojima nema vremena niti za proces konsolidacije niti za dreniranje tijekom promjene opterećenja kojoj odgovara smicanje. U takvim se ispitivanjima uzorak ugrađuje, te se bez konsolidacije smiče, tj. dodaje se vertikalno opterećenje. Ukoliko je uzorak posve zasićen, lom se događa pri efektivnim naprezanjima koji ne ovise o nametnutim totalnim naprezanjima. Drugim riječima: za seriju zasićenih identičnih uzoraka, Mohrova kružnica pri lomu jedinstvena je za efektivna naprezanja, a za totalna naprezanja postignuti kut unutarnjeg trenja pri slomu bude $\phi_{UU}=0$.

7.13 Jednoosna čvrstoća.

Ispitivanje jednoosne čvrstoće (*unconfined compression test*) odgovara ispitivanju u troosnom uređaju u kome nema čelijskog tlaka. Ispitivanja su vrlo jednostavna, relativno brza, ali ograničene primjene.

7.14 Poremećeni i neporemećeni uzorci. Laboratorijsko ispitivanje tla.

Sijanje uzorka, kao i ispitivanje granica plastičnosti, ispitivanja su u kojima se reprezentativni uzorak tla prosijava, mijesi, valja... i na različite načine **poremećuje**, tako da se dobivaju podaci o čvrstim česticama koje koristimo za **klasifikaciju** tla.

Da bismo dobili podatke o **stanju** tla, konzistentnom stanju ili zbijenosti, trebamo podatke i o **strukturi** tla: vlažnost, količinu pora i slično. Dakle, trebamo uzorak kome je sačuvana struktura: raspored čvrstih čestica, vlaga, i slično.

Zanima li nas **ponašanje** tla, trebat će nam opet uzorak kome je sačuvana struktura. Štoviše, zbog takozvanog pamćenja tla, tj. zbog važnosti utjecaja povijesti procesa opterećivanja/deformiranja tla, bit će nužno sačuvati uzorak od poremećivanja tijekom vađenja, prenošenja, ugradnje...

- Uređaji kojima se služimo pri vađenju uzorka moraju biti prilagođeni ovim zahtjevima: cilindri kojima uzorak vadimo što tanji itd.
- Cijev u kojoj prenosimo uzorak treba vrlo pažljivo zatvoriti da se uzorak ne suši.
- Pri prenošenju uzorak treba zaštiti od potresanja, zagrijavanja, hlađenja i sličnoga.
- Uzorak treba što prije ispitivati, da bi se smanjilo vrijeme u kome dolazi do sušenja i sličnoga.
- Dok uzorak čeka na ispitivanje, nakon vađenja iz zaštitne cijevi, treba ga parafinirati – da bi se zaštitio od sušenja - pazeti pri tome da uzorak samo na trenutak bude izložen povišenoj temperaturi rastopljenog parafina i hlađeći ga odmah potom. Uzorak treba čuvati u **vlažnoj komori** da se minimizira sušenje.

Zamrznute uzorke treba čuvati u hladnjaku. Uzorak treba neprestano čuvati od opterećivanja, savijanja, gnječenja...

- Pri pripremi uzorka za ugradnju, tzv. ***trimanje*** uzorka: rezanje u potrebnii oblik treba izvesti bez prignjećivanja, savijanja... i to što brže da se sačuva sva vlaga. Prenošenje uzorka u uređaj za ispitivanje,... ugradnja koja uključuje zatvaranje uređaja i nanošenje osnovnog opterećenja (navlačenje membrane, spuštanje kape troosnog uređaja npr.) moraju biti dovoljno spori da se sačuva uzorak.

Takav uzorak, kome je pri vađenju, prijenosu i ugradnji sačuvana struktura možemo zvati ***neporemećeni uzorak***.

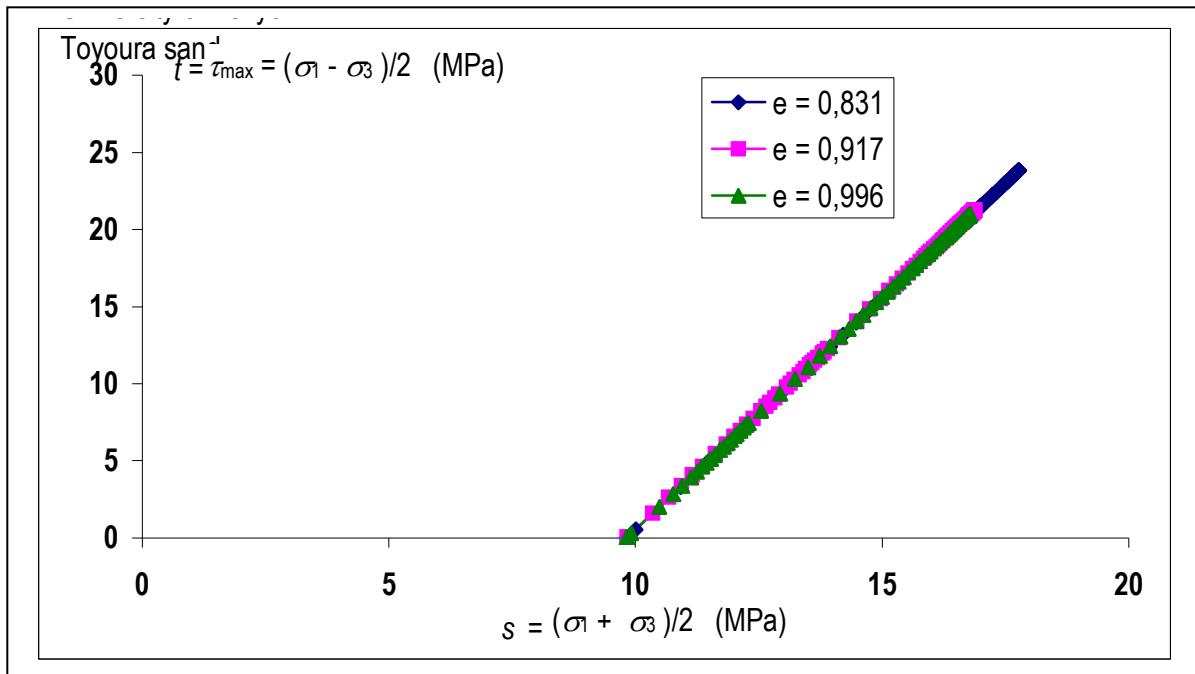
Postoje situacije u kojima nije moguće dobiti neporemećene uzorke, ili ne u dovoljnem broju. Na primjer prah je materijal u kome je vrlo teško, ponekad nemoguće izvaditi neporemećeni uzorak. Također, postoje istraživanja u kojima je važno napraviti niz ispitivanja na jednakim uzorcima. U tim se slučajevima može raditi na ***rekonstituiranim uzorcima***, takvima koji su pripremljeni u laboratoriju, u strogo kontroliranim uvjetima. Česti način pripreme pješčanog uzorka je sipanje sa stalne visine (***air pluviation***), čime se postigne struktura slična onoj nastaloj sedimentacijom vjetrom. Drugi je način ugradnja vlažnog pijeska u slojevima (***moist tamping***). Glineni uzorci mogu biti izmiješani u mnogo vode (***remoulded***), te ostavljeni da se konsolidiraju, možda u posebnom uređaju u kome se pritisak drži stalnim, a omogućena je jednodimenzionalna deformacija. Zatim se režu željeni oblici.

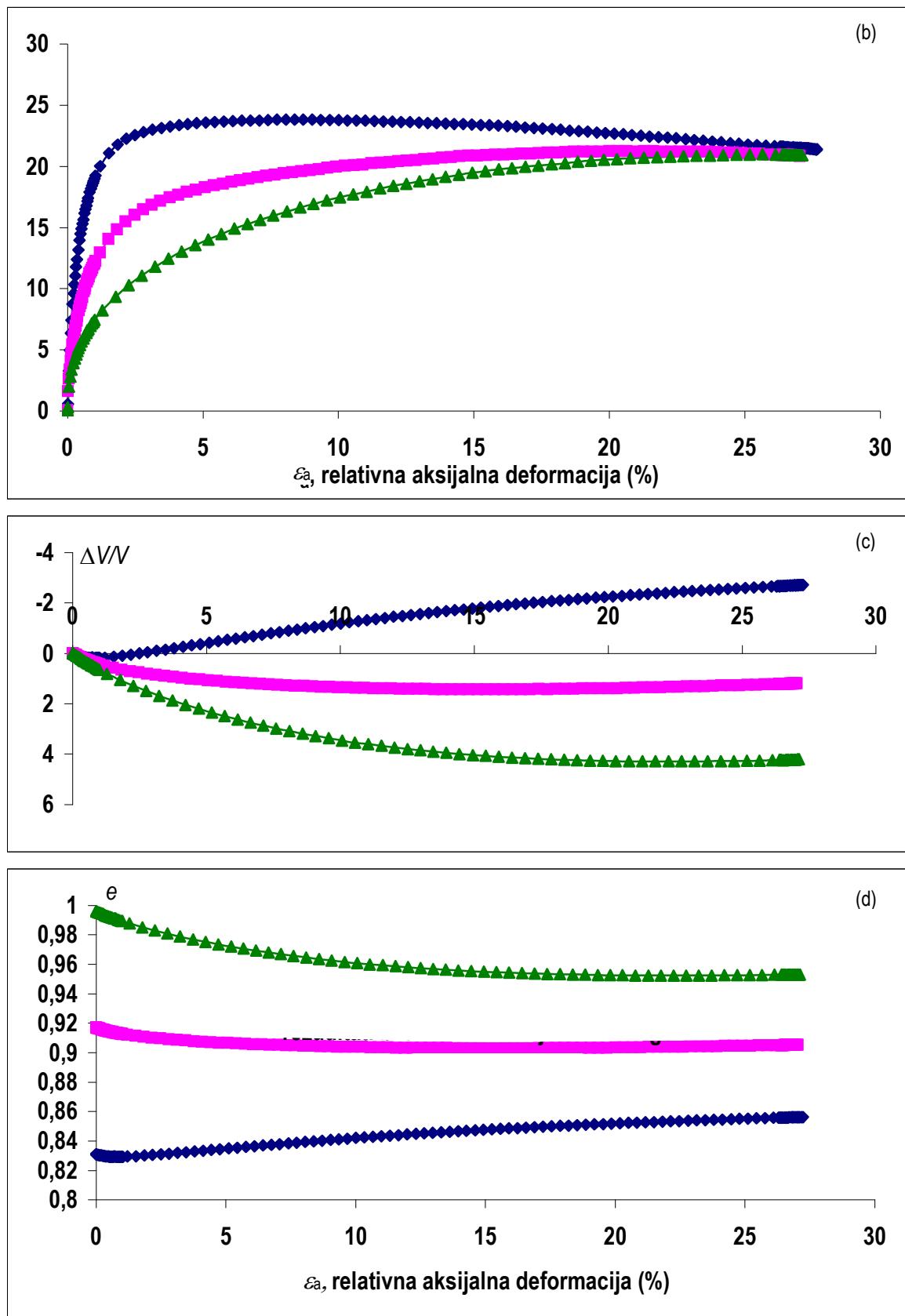
Edometar, troosni uređaj i slični laboratorijski uređaji redovito omogućuju da se tijekom ispitivanja kontroliraju rubni uvjeti – ili deformacije ili naprezanja. Ispitivani uzorak je relativno maleni element jednostavnog oblika. Pri tome veličina ispitnog uzorka mora odgovarati veličini najvećeg zrna, tako da pri ispitivanju ne bude dominantno ponašanje jednog zrna, nego se može smatrati da je stanje naprezanja homogeno.

7.15 Preporučljiva i korištена literatura:

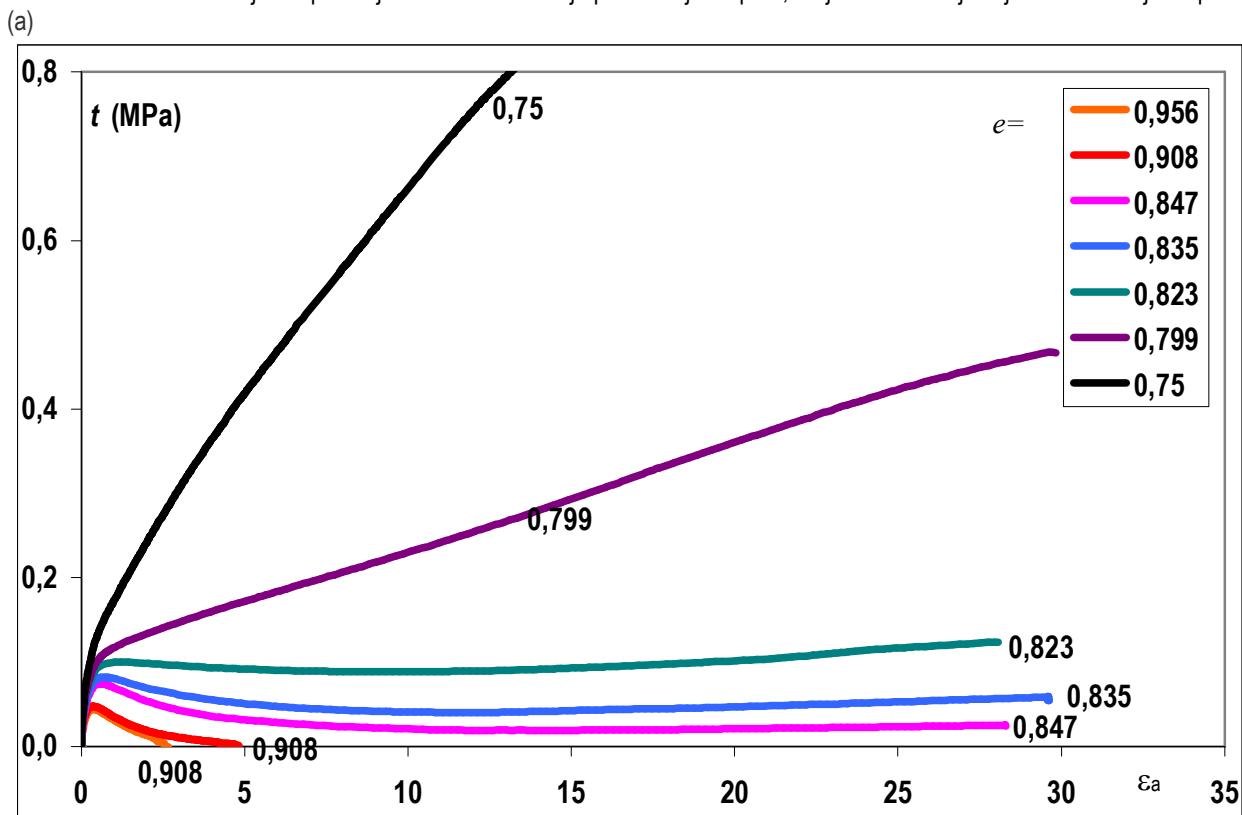
1. Nonveiller, E., 1990, ***Mehanika tla i temeljenje građevina***, Školska knjiga, 823 str.... *više primjeraka nalazi se u Knjižnici u Kačićevoj ulici, knjiga se može kupiti u knjižarama*
2. Verić, F., ***bilješke za predavanje Konsolidacija tla, predmet Mehanika tla i temeljenje, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu***
3. Lambe, T.W., Whitman,R.V., 1969, ***Soil Mechanics***, John Wiley & Sons, Inc., New York, 553 str.... *više primjeraka nalazi se u Knjižnici u Kačićevoj ulici*
4. Holtz, R.D., Kovacs, W.D., 1981, ***An Introduction to Geotechnical Engineering***, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 733 str.
5. ... ostala dostupna literatura

Slika 7-16. Rezultati tri konsolidirana drenirana ispitivanja: (a) trag naprezanja u dijagramu s,t, (b) odnos vertikalne deformacije i naprezanja (*stress-strain curve*), (c) promjena volumena tijekom ispitivanja, (d) promjena koeficijenta pora.

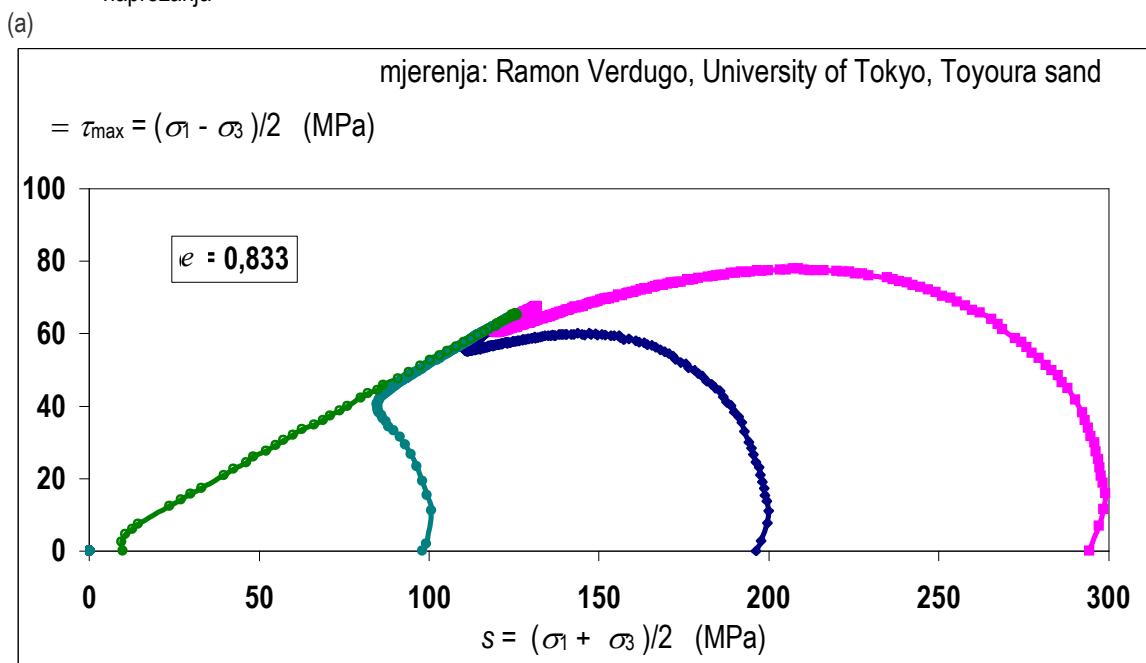




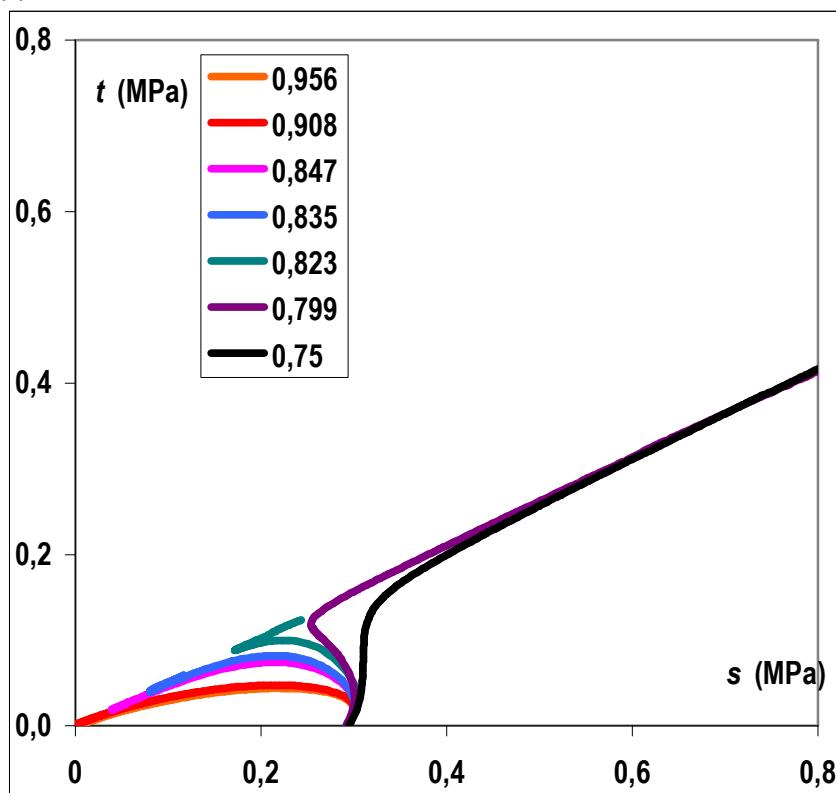
Slika 7-17. Rezultati sedam konsolidiranih nedreniranih pokusa na pijesku Nevada... $s_0 = \text{const}$: (a) trag naprezanja, (b) veza deformacije i naprezanja. Pokusi se razlikuju po koeficijentu pora; brojevi označavaju vrijednost koeficijenta pora.



Slika 7-18. Rezultati četiri konsolidirana nedrenirana pokusa... $e_0 = \text{const}$: (a) trag naprezanja, (b) veza deformacije i naprezanja



(b)



(b)

