

## 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, te 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 naizmjenice dati su

- ❖ opisi jednostavnih i najčešćih laboratorijskih uređaja i odgovarajućih pokusa u mehanici tla tj. geotehničkom inženjerstvu – sa naglaskom na oblik deformiranja/opterećivanja koji se nameće uzorku tla i, odatle, uporabljivosti rezultata mjerenja,
- ❖ objašnjenja ponašanja tla u određenim uvjetima – temeljena na opažanjima, mjerenjima i provjerama,
- ❖ najjednostavniji modeli ponašanja – 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 opisujemo.

### 7.2 Stišljivost tla, kratki uvod

Tijekom građenja na tlo se nanosi opterećenje, i 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 dovoljno– uz određena ograničenja – stišljivost tla ispitati u jednostavnom pokusu u **edometru** – za koherentna tla za koja možemo pribaviti neporemećene uzorke. U ostalim situacijama trebamo **in situ** ispitivanja, a najbolje je kombinirati podatke različitih mjerenja. 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 zbog produbljenja podruma tj. proširenja korisnog prostora susjedne ugostiteljske radnje. Fotografirao ing. Zvonko Čikeš.

### 7.3 Edometar.

Edometar (*oedometer*) je vrlo često korišteni laboratorijski uređaj 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 standardne objekte (*geotechnical category 2*).

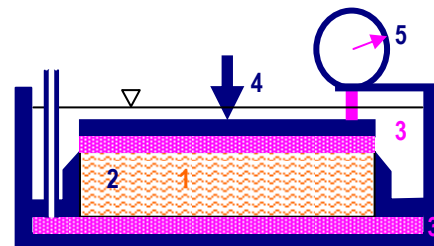
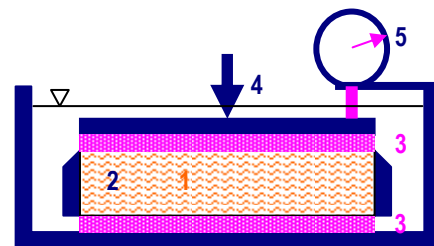
Osnovni dijelovi edometra su:

- ♦ okrugli čelični prsten (2) u koji se uzorak (1) ugradi: unutrašnjost prstena je glatka, a rub prstena zaoštren je s vanjske strane, tako da se ugradnja vrši utiskivanjem prstena u uzorak. (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 pokusa. Visina prstena bira se što manja (npr. 2 cm) da bi što manji bili utjecaji trenja na prstenu; širina prstena određena je širinom uzorka koji se ugrađuje, dakle dostupnom/korištenom garniturom za vađenje uzoraka;
- ♦ dvije porozne ploče (3) koje se postave ispod i iznad uzorka ugrađenog u prsten tako da nesmetano bude dreniranje (tj. istjecanje vode iz uzorka) tijekom pokusa; ploče pri opterećivanju tijesno (često sa zazorom od 0,5 mm) klize u prsten;
- ♦ posuda koja osigurava – kad je to potrebno – potopljenost i zasićenost uzorka;
- ♦ čelična ploča postavljena na gornju poroznu ploču 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 (4);
- ♦ sustav za opterećivanje: najčešće je to – preko kuglice na čeličnoj ploči koja poklapa uzorak – poluga koja povećava djelovanje utega; opterećenje se može nanositi i hidraulički;
- ♦ osjetilo za mjerenje pomaka gornje čelične ploče odnosno deformacije uzorka – to je najčešće mjerna urica pričvršćena na okvir uređaja koja je pomičnim ticalom oslonjena na ploču (5).
- ♦ Edometar može imati osjetila za mjerenje horizontalnih napreznja ugrađena u prsten što je veoma korisno kad nas zanimaju horizontalni pritisci u tlu i njihov razvoj.

Uvjeti odvijanja standardnog pokusa:

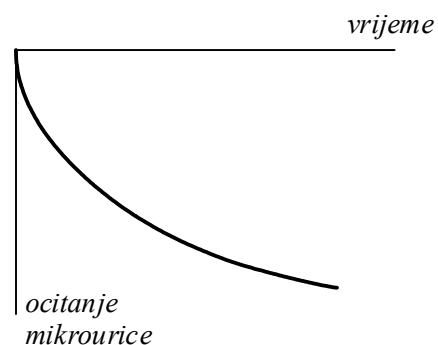
- ♦ uzorak se ugradi, omogući se zasićivanje vodom,
- ♦ očita se položaj čelične ploče koja pokriva uzorak
- ♦ nanese se prvi stupanj opterećenja: najčešće pomoću utega koji se objesi na polugu i time jednoliko optereti cijeli uzorak
- ♦ očita se položaj čelične ploče koja pokriva uzorak
  - ❖ prisustvo vode u porama tla usporava odvijanje deformacije. Zato se, za svaki stupanj opterećenja, više puta očitava visina ploče. Najbrže promjene događaju 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 jednoliko 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 1 h do 24 h dožive umirenje deformacije tako da se može – npr. svakoga dana u isto jutarnje vrijeme – započeti sa novim stupnjem opterećenja.

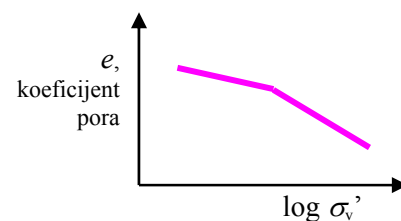
- ◆ nakon što se deformacija umiri, nanese se slijedeći stupanj opterećenja: najčešće dva puta veći od prethodnog tijekom opterećivanja, ili dva ili četiri puta manji od prethodnog tijekom rasterećivanja.

Mjerenja koja se u uređaju vrše su:

- ◆ mjerenje položaja čelične ploče 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.

Prikaz rezultata pokusa:

- ◆ za svaki stupanj opterećenja: tijekom deformacije ili relativne deformacije u vremenu: na horizontalnoj osi prikaže se vrijeme, na vertikalnoj, prema dolje: deformacija;
- ◆ ukupna deformacija nakon u svakom stupnju prikaže se u ovisnosti o opterećenju: na horizontalnoj osi prikaže 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 pokusa: pratite smanjivanje koeficijenta pora s povećanjem vertikalnog opterećenja.

## 7.4 Jednodimenzionalno deformiranje tla. Naprezanje prekonsolidacije.

Dio deformacije tla dogodi se trenutno, a dio – prije svega promjena volumena tla koju čini promjena volumena pora vezana za istjecanje vode iz pora, posebno u sitnozrnim, slabo propusnim tlima – dugotrajni je proces o kome govorimo kao o **vremenskom tijeku slijeganja**. Izbor konačne vrijednosti deformacije nije uvijek jednostavan – v. 7.7 – i često se radi sa vrijednostima koje odgovaraju vremenu od 24 h nakon nanošenja opterećenja. Edometarski dijagram prikazuje konačnu relativnu deformaciju ili koeficijent pora prema nametnutom naprezanju.

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

- ♦ **koeficijent stišljivosti** (*coefficient of compressibility*) u  $i$ -tom koraku opterećenja:  $a_{vi} = \Delta e_i / \Delta \sigma_i$
- ♦ **modul stišljivosti** ili **modul linearne kompresije** (*oedometer modulus, constrained modulus*) u  $i$ -tom koraku opterećenja:  $M_{vi} = \Delta \sigma_i / \varepsilon_i = (1 + e_{i-1}) / a_{vi}$
- ♦ **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 *in situ* pokusa iako neizravno mjeren. Modul stišljivosti jako se često koristi pri procjeni slijeganja u tlu.

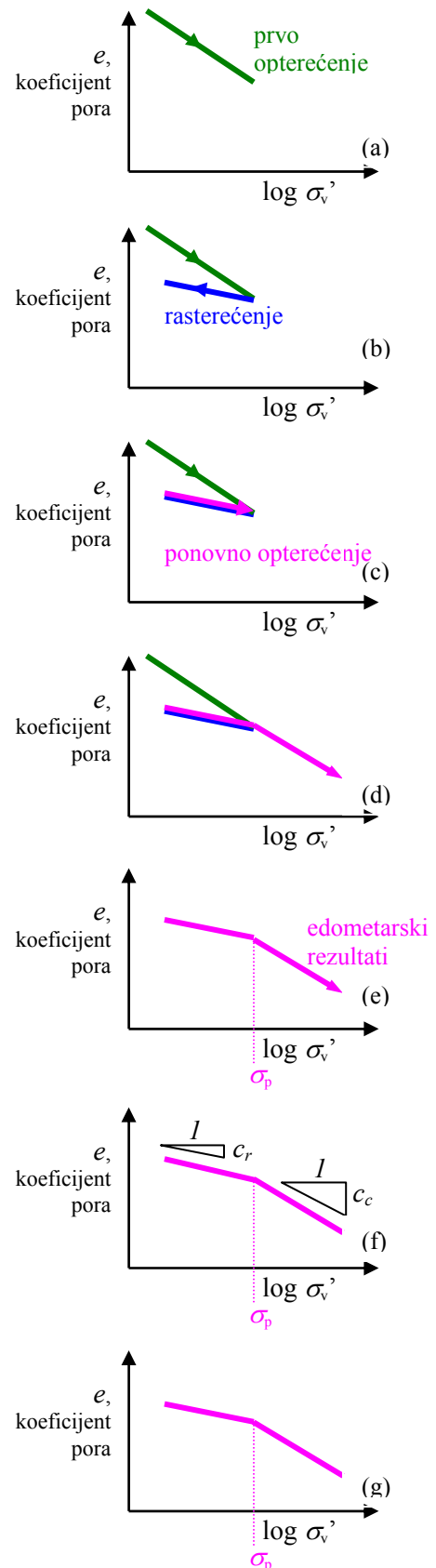
Pažljivo vađeni uzorci u pažljivo vođenim pokusima pokazuju bitnu promjenu stišljivosti tla pri naprezanju otprilike jednakom najvećemu kojemu je tlo u prošlosti bilo izloženo, a koje zovemo **naprezanje prekonsolidacije** (*preconsolidation pressure*) i označavamo  $\sigma_p$ . Zbog promjene stišljivosti,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

Prikaže li se  $\sigma_v'$  u logaritamskom mjerilu, pokazuje se gotovo linearna zavisnost  $\log \sigma_v' \sim e$  u dva područja čiju granicu čini  $\sigma_p$ . Nagib krivulje  $\log \sigma_v' \sim e$  za  $\sigma_v' > \sigma_p$  zovemo **indeks kompresije** (*recompression index*) i označavamo  $C_c$ . Nagib krivulje  $\log \sigma_v' \sim e$  za  $\sigma_v' < \sigma_p$  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  $\sigma_v'$  raste iznad do tada najvećeg opterećenja,  $C_r$  je otprilike jednake vrijednosti za svaki slučaj u kome  $\sigma_v'$  je manje od do tada najvećeg opterećenja, pri rasterećenju kao i pri ponovnom opterećenju.

( $C_c = \Delta e / \Delta (\log \sigma_v')$  u nekom stupnju opterećenja)

Mjerenja pokazuju da se samo posve mali dio deformacije tla odnosi na elastičnu deformaciju čvrstih čestica ili vode. Veliki dio deformacije nastaje premještanjem čvrstih čestica, 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,  $\sigma_p$ , i onoga kome je tlo izloženo u sadašnjem trenutku,  $\sigma_v'$

$$OCR = \sigma_p / \sigma_v'$$

*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 vrijednosti koja se ne mijenja sa dubinom; promjena  $\sigma_p$  sa dubinom zato je paralelna onoj  $\sigma_v'$ ,
- ♦ starenje tla izaziva povećanje  $\sigma_p$  proporcionalno  $\sigma_v'$
- ♦ isušivanje površinskih slojeva uslijed stalnih promjena razine podzemne vode i slično, uglavnom povećava  $\sigma_p$  u gornjim slojevima,
- ♦ kemijski i slični utjecaji izazivaju različite druge oblike promjena.

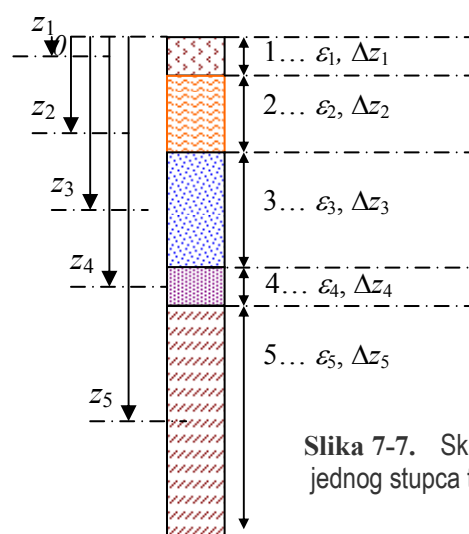
*Nekonsolidirana* su tla u kojima nije dovršen proces promjene pornog tlaka i u kojima se mogu očekivati znatna slijeganja i bez dodatnih opterećenja.

## 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 cjelokupnog tla na promatranom mjestu, može se odrediti kao zbroj deformacija pojedinih slojeva. Da bismo dobili 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  $\Delta z_i$ , dubina neka je prikazana na primjer dubinom sredine sloja,  $z_i$ . Dodatno naprezanje u tom sloju – jednako po dubini ako je opterećenje široko rasprostrto – neka je označeno  $\Delta \sigma$ . Relativnu deformaciju možemo procijeniti prema parametrima iz edometra – za što su potrebni i početna naprezanja u tlu,



Slika 7-7. Skica jednog stupca tla.

$\sigma'_{v0}(z_i)$ , naprezanja prekonsolidacije,  $\sigma_p$ , i parametri  $C_c$  i  $C_r$ , ili na primjer iz modula stišljivosti,  $M_{vi}$ , pri čemu također ne treba zaboraviti da se stišljivost mijenja s razinom naprezanja i dodatnog naprezanja tj.

$$M_{vi} = M_{vi}(\sigma'_{v0}(z_i), \Delta\sigma_{i\dots}).$$

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

$$\varepsilon(z_i) = \Delta\sigma / M_{vi},$$

iz čega ukupna deformacija toga sloja jednaka je

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

te zbrajanjem deformacija svih slojeva dobijemo procjenu ukupnog slijeganja

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

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

U slučaju pak da opterećenje nije široko rasprostrto, 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 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.

### 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 koji se linearno mijenjaju sa dubinom. U literaturi se također mogu naći rješenja za radijalno 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.

Terzaghijevo rješenje zasniva se na usporedbi ravnoteže u horizontalno uslojenom tlu, odnosa naprezanje 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,  $\gamma_w$  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  $U(T_v) = s(t)/s$

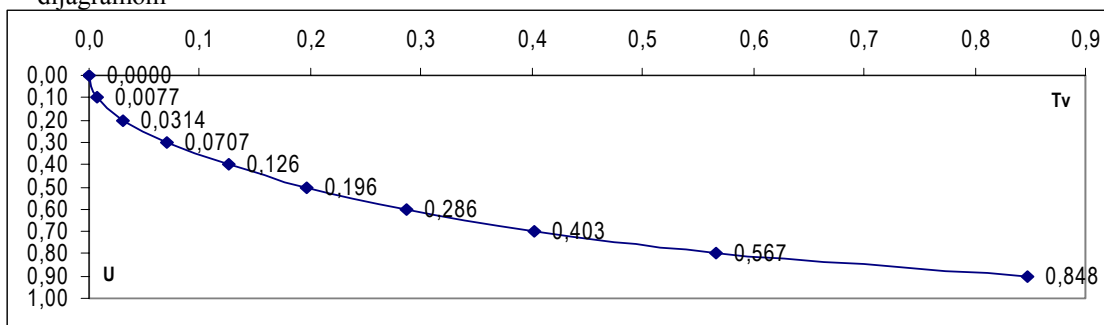
gdje  $s(t)$  je slijeganje u trenutku  $t$ , a  $s$  je konačno slijeganje,

- ♦ *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
- $H$  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

Pijesak do dubine od		4 m
jedinične težine	$\gamma =$	18 kN/m <sup>3</sup>
glinu do dubine od		10 m
jedinične težine	$\gamma =$	19 kN/m <sup>3</sup>
šljunak do dubine od		20 m,
jedinične težine	$\gamma =$	20 kN/m <sup>3</sup>
ispod je nestišljiva podloga		
Razina podzemne vode je na dubini		2 m
<b>Gradi se široki nasip koji će činiti opterećenje od</b>		
	$p =$	20 kPa

### Treba procijeniti

- slijeganje
- vremenski tijek slijeganja.

### Jednoliko rasprostrto opterećenje čini dodatno naprezanje

		20 kPa
po cijeloj dubini		
	$\gamma_w =$	10 kN/m <sup>3</sup>

**Pijesak**

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

**Glina**

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

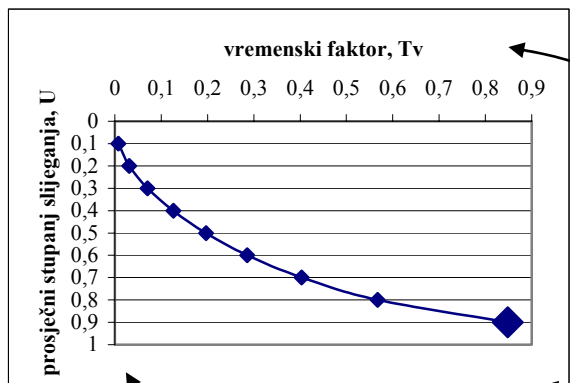
**Šljunak**

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

**Ukupno slijeganje**

$s = \Sigma \Delta s =$   
 $=$  **9 cm**

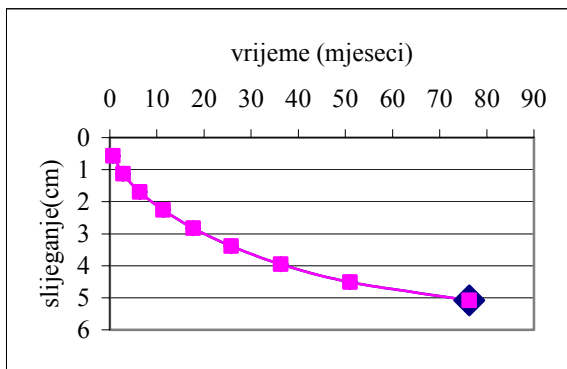
**Vremenski tijek slijeganja**



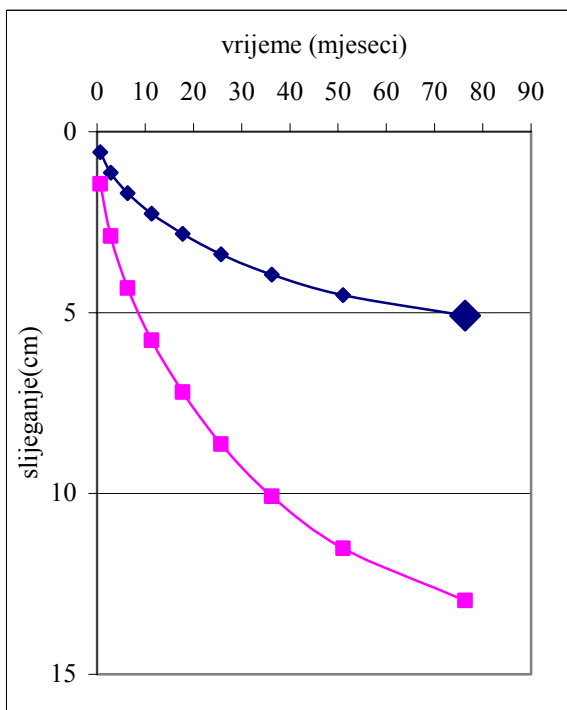
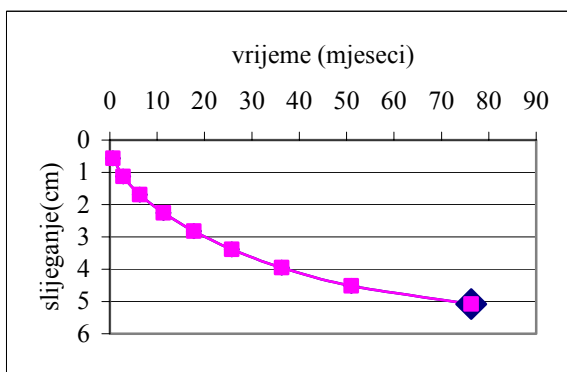
$c_v =$  **0,1 m<sup>2</sup>/mjesec**  
**1** obje granice sloja su propusne  
 $H =$  **3 m**

U =	$T_v =$	$s(t)[cm] =$	$t[m] =$	$t[god] =$
0,1	0,0077	0,56	1	0,1
0,2	0,0314	1,13	3	0,2
0,3	0,0707	1,69	6	0,5
0,4	0,126	2,26	11	0,9
0,5	0,197	2,82	18	1,5
0,6	0,286	3,39	26	2,1
0,7	0,403	3,95	36	3,0
0,8	0,567	4,52	51	4,3
0,9	0,848	5,08	76	6,4





**ubrzanje slijezanja**



**kako učiniti da se**

**90%** slijezanje dogodi za **9** mjeseci?

**t = 9** mjeseci

$$T_v = t \cdot c_v / H^2 = 9 \text{ mjeseci} \cdot 0,1 \text{ m}^2/\text{mjesec} / (3 \text{ m})^2 = 0,1$$

odatle

$U = 0,35$

$s(t) = 5,1 \text{ cm}$

$\bar{s} = 14,4 \text{ cm}$

$\epsilon_w = 0,024$

$\Delta e = 0,036$

**zadanim opterećenjem ostvari se**

$\Delta e = 0,014$

preostaje ostvariti

$\Delta \Delta e = 0,022$

budući da je dodatnim opterećenjem već premašeno  $\sigma'_p$ ,

$\sigma_{\text{konačno}} = 117 \text{ kPa}$

potrebno predopterećenje je

$\Delta \Delta \sigma_v = 18 \text{ kPa}$

U =	$T_v =$	$s(t)[\text{cm}] =$	$t[\text{m}] =$	$t[\text{god}] =$
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 mjerenja i računanja 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 pokusima – također zato što su vrlo instruktivni. Ipak, ni pri jednostavnom ispitivanju ne treba zaboraviti da su rezultati ispitivanja dobri samo koliko je dobar uzorak i pažljivo vođen pokus.

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 proračunate 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 **uređaj za izravni posmik** (ili direktno smicanje).

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

Cijela serija drugih laboratorijskih uređaja omogućava ispitivanje tla u različitim uvjetima opterećivanja tj. deformiranja. Laboratorijski se pokusi uspoređuju i nadopunjuju mjerenjima **in situ**.

## 7.10 Uređaj za izravni posmik.

Uređaj za izravni posmik (*direct shear apparatus*) jednostavni je i često korišten laboratorijski uređaj. Sastoji se od dvodijelne čelične kutije (5, 6) – razdijeljene horizontalno – u koju se ugradi **neporemećeni uzorak** (1) između **dviju poroznih ploča** (2). **Poklopac** (3) tijesno 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 posmik: **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.

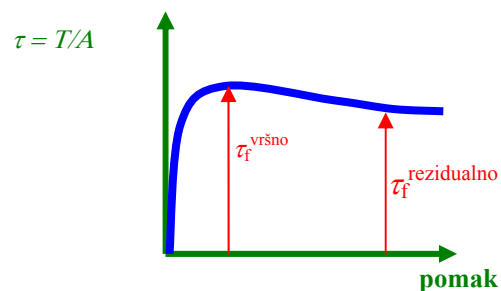
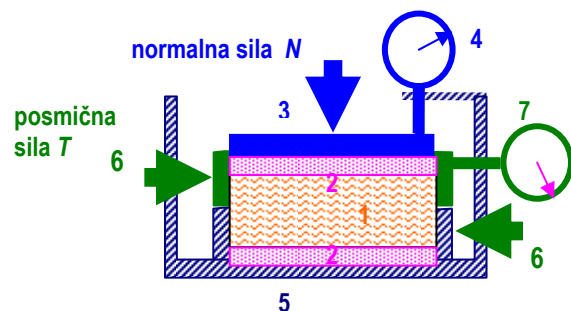
Rezultati mjerenja – **za svako vertikalno opterećenje** – prikazuju se kao relacija između ostvarenog posmičnog naprezanja i odgovarajućeg pomaka između dviju kutija. Posmično i normalno naprezanje u plohi na spoju dviju kutija su

$$\tau = T/A,$$

$$\sigma = N/A$$

gdje  $A$  je površina uzorka u ravnini dodira dviju kutija uređaja. U jednom je pokusu  $\sigma$  stalno, a  $\tau$  raste od nule, ali se tijekom pokusa smanjuje prirast  $\tau$  do maksimalne vrijednosti, nakon koje  $\tau$  ostaje konstantan ili se smanjuje.

Slika 7-9. Skica uređaja za izravni posmik.



Slika 7-10. Mjerenje (pomak,  $\tau$ ) tijekom jednog mjerenja (za jedno normalno naprezanje) u uređaju za izravni posmik.

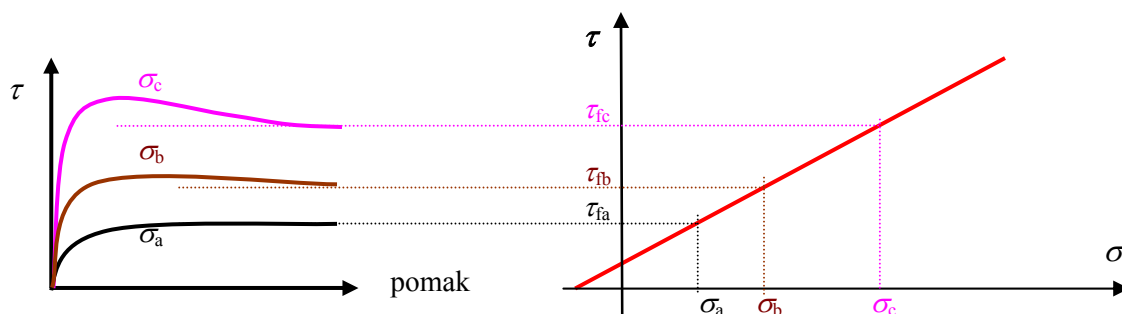
Najzanimljivije su granične vrijednosti posmičnog naprezanja:

- ♦ vršna čvrstoća kao najveća vrijednost posmičnog naprezanja – kad nas zanimaju relativno male deformacije i

- ♦ rezidualna čvrstoća kao 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 "P", od engleskog "failure" za hrvatsko "slom" ili "lom".

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



Slika 7-11. Mjerenje (pomak,  $\tau$ ) tijekom tri mjerenja (za jedno normalno naprezanje) sa različitim vertikalnim opterećenjima ( $\sigma$ ) u uređaju za izravni posmik.

## 7.11 Mohr<sup>1</sup>-Coulomb<sup>2</sup>-ov zakon čvrstoće.

Pokazuje se da se naprezanja koji odgovaraju slomu tla odnosno velikim deformacijama, uglavnom mogu približno opisati parom pravaca u Mohrovoj ravnini  $\sigma, \tau$ . Uobičajeni zapis pravca je kroz nagib pravca i odsječak na osi  $\tau$ .

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

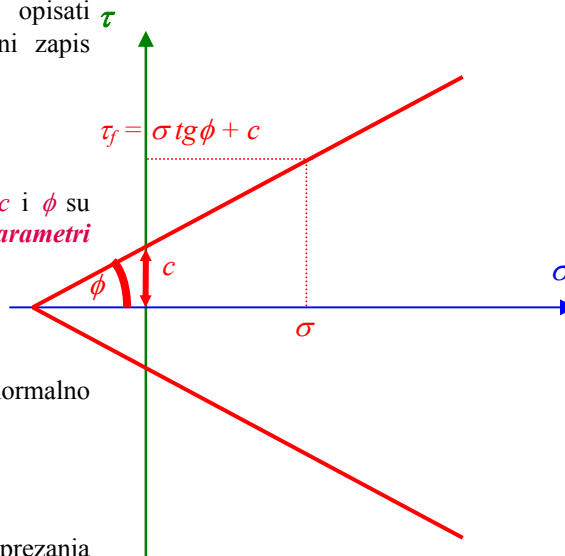
gdje  $\sigma$  je normalno naprezanje u nekoj ravnini, a  $c$  i  $\phi$  su parametri koji određuju **pravac čvrstoće**. Zovemo ih **parametri čvrstoće**:

- ♦  $c$  zovemo **kohezija**,
- ♦  $\phi$  zovemo **kut unutarnjeg trenja**.

Drugim riječima, za moguće posmične naprezanje – uz normalno naprezanje jednako  $\sigma$  – vrijedi:

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

Dva pravca čine **anelopu sloma**: sva moguća stanja naprezanja opisana parom  $\sigma, \tau$  nalaze se u području omeđenom s ta dva pravca. Također i sve moguće Mohrove kružnice nalaze se unutar ta dva pravca.



<sup>1</sup> Georg Mohr [mor] 1640-1697

<sup>2</sup> Charles Augustin Coulomb [kulon] 1736-1806

Slika 7-12. Mohrovi dijagrami.

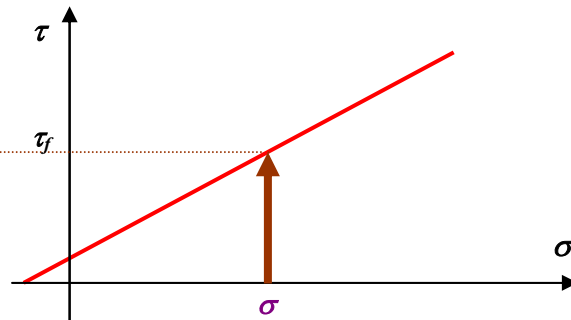
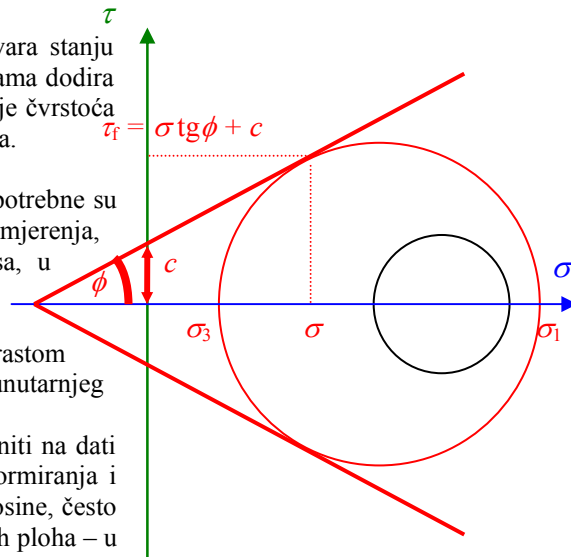
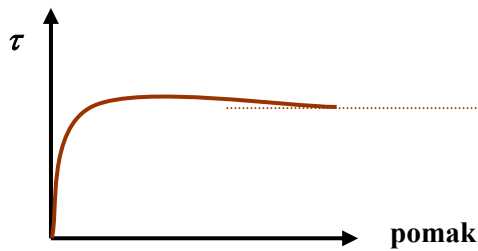
Mohrova kružnica koja dodiruje anvelopu sloma, odgovara stanju naprezanja u točki u tlu u kojoj dolazi do sloma. Točkama dodira sa anvelopom sloma odgovaraju dvije ravnine u kojoj je čvrstoća dosegnuta odnosno u kojoj dolazi do velikih deformacija.

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

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

Mjerenjima dobiveni parametri čvrstoće mogu se primijeniti na dati 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),  $\sigma$ , može se odrediti koliki je očekivani granično posmično naprezanje:

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

Slika 7-13. Razvoj  $\tau$  uz konstantno  $\sigma$ .

Posmično naprezanje u istoj točki i istom smjeru,  $\tau$ , usporedimo s  $\tau_f$ , određenim prema  $\sigma$ ,  $\phi$  i  $c$ : ako je  $\tau$  blizu  $\tau_f$ , onda je situacija posve opasna. Mjeru sigurnosti uglavnom izražavamo faktorom sigurnosti, omjerom granične i stvarne vrijednosti posmičnog naprezanja u promatranoj točki i plohi:

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

Pri tome treba odlučiti da li je 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 primijetiti da određeni pomaci postoje za bilo koje  $\tau$ .

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.

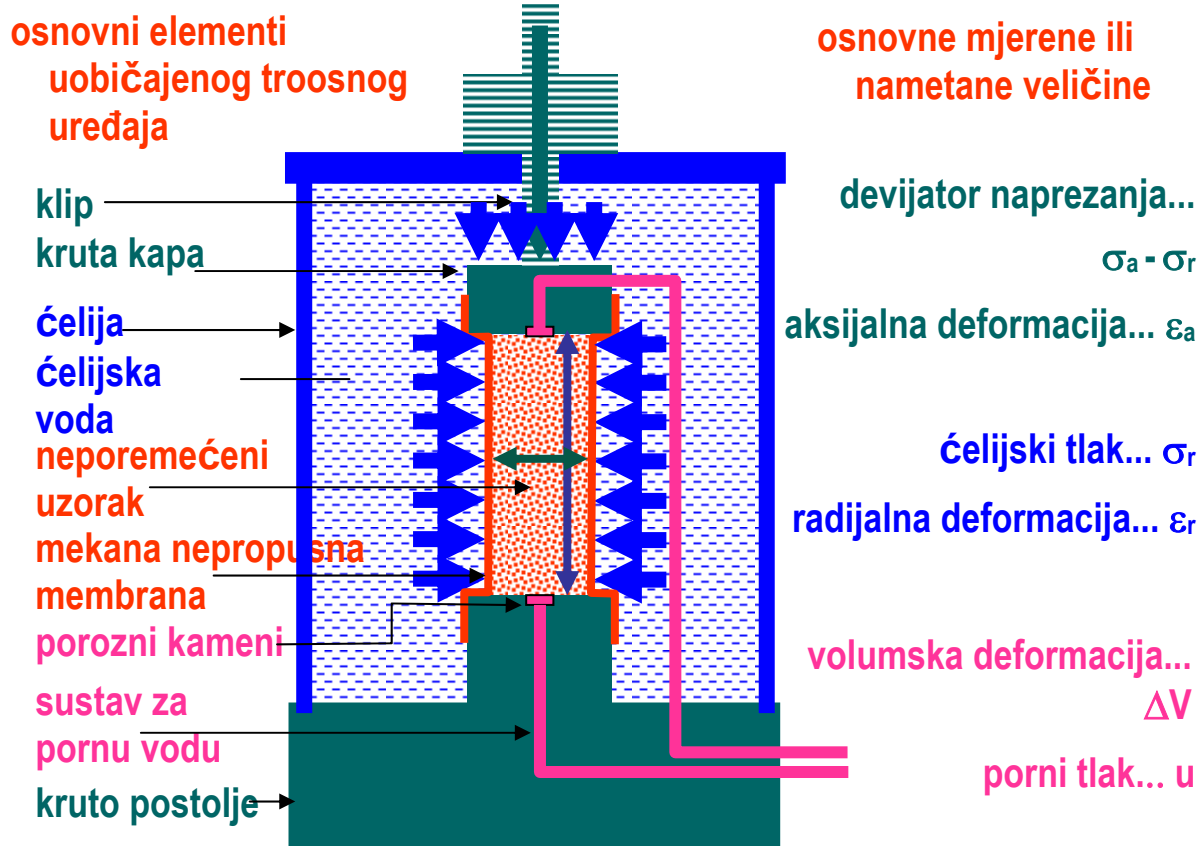
Također, ovdje se ne vodi računa o anizotropnosti tla: tlo, naime, često, ima ravnine (smjerove) u kojima je čvrstoća veća ili manja – zbog načina sedimentacije, povijesti opterećivanja, prethodnog klizanja i sl.

## 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 nezavisno opterećivanje u tri okomita smjera, pravi troosni uređaji. Standardni troosni uređaji – u mnoštvu izvedbi – omogućavaju osno simetrično opterećivanje i deformiranje.

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 aksijalnog opterećenja, na uzorak se može nametnuti i radijalno (ustvari izotropno) opterećenje.

Uzorak je obavijen nepropusnom mekanom membranom tako da struktura tla tijekom pokusa 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

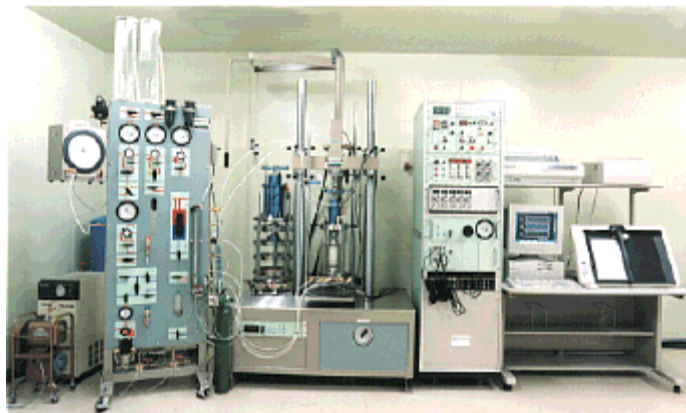
- ♦ kruto postolje i kruta kapa, horizontalnih i glatkih ploha tako da aksijalno opterećenje bude preneseno homogeno na cijeli uzorak, te sustav za aksijalno opterećivanje;
- ♦ ćelija koja zatvara cijeli uzorak, postolje, kapu... tako da preko vode u ćeliji na uzorak bude preneseno izotropno opterećenje (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 dnom odnosno vrhom uzorka, spojeni sustavom cjevčica sa uređajima za mjerenje promjene volumena ili promjene pornog tlaka u uzorku tijekom pokusa, te sustav za nanošenje pornog tlaka;
- ♦ instrumenti za mjerenje
  - ❖ aksijalnog opterećenja (tj. devijatora naprezanja);
  - ❖ aksijalne deformacije;
  - ❖ ćelijskog tlaka, možda promjene volumena vode u ćeliji;
  - ❖ pornog tlaka;
  - ❖ promjene volumena vode u uzorku;
  - ❖ možda lokalne aksijalne deformacije, radijalne deformacije...

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

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



(b) U sredini: troosni uređaj, lijevo: sustav za nametanje opterećenja, desno: mjerenje 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 koriste se ćelije od čelika, a za nametanje ćelijskog tlaka koristi se ulje kojim se ispuni ćelija.



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



### 7.12.2 Osnovni koraci pokusa u troosnom uređaju.

- ❖ **Pravilna ugradnja uzorka** svakako predstavlja prvi važni korak svakog pokusa. Budući da se ispituje ponašanje tla, treba svakako sačuvati izvornu strukturu tla, također i ako se radi o 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 pokus se može tražiti zasićivanje uzorka vodom što može biti posebno delikatni korak i traži posebne procedure.
- ❖ **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 uzorka čini se dovoljno sporo da se ne poremeti struktura tla, a pri tome su drenovi otvoreni tj. moguća je promjena volumena tla. Razlikujemo *izotropnu* i različite oblike *anizotropne* konsolidacije, od kojih je možda najzanimljivija  $K_0$  konsolidacija, u kojoj se opterećenje - i aksijalno i ćelijski tlak - nanosi u malenim koracima tako da se horizontalna deformacija održava na nuli:  $\varepsilon_h = 0$ .
- ❖ **Smicanje uzorka:** promjena aksijalnog opterećenja ili nametanje aksijalne deformacije. Najčešće se rade monotoni pokusi, "do sloma", ali postoje i različiti ciklički pokusi i nebrojeno mnogo procesa promjena stanja naprezanja ili deformacija. Pri tome razlikujemo (a) *drenirane* pokuse tijekom kojih su drenovi otvoreni odnosno moguće je istjecanje ili utjecanje vode iz ili u uzorak i (b) *nedrenirane* pokuse u kojima su drenovi pri smicanju zatvoreni, tj. ako je uzorak zasićen, nije moguća promjena volumena uzorka.

### 7.12.3 Konsolidirani drenirani (CD) pokusi.

Konsolidirani drenirani pokusi (*consolidated drained tests*) mogu se raditi da se ustanovi stišljivost i/ili čvrstoća tla u sporim procesima u tlu u kome je uglavnom dovršena konsolidacija. Tijekom pokusa, nakon dovršene konsolidacije, smicanje se odvija također sa otvorenim drenovima.

Za ilustraciju ponašanja tla u konsolidiranim dreniranim pokusima prikazuju se (Slika 7-16) rezultati pokusa na tri jednaka uzorka koji su na isti način pripremljeni od pijeska Toyoura, ali sa različitim zbijenostima. Uzorci su konsolidirani izotropno na  $\sigma_0 = 0,1 \text{ MPa}$ . Trag naprezanja pokazuje Slika 7-16(a). Za sva tri pokusa, kako su drenovi otvoreni, totalna se naprezanja tijekom pokusa ne razlikuju od efektivnih<sup>3</sup>. Konsolidaciju predstavljaju identične linije koje prate os  $\sigma$ . 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 (prikazana 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 rahlija tla pri nedreniranom smicanju doživljavaju zbijanje, a zbijenija 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 Konsolidirani nedrenirani (CU) pokusi.

Konsolidirani nedrenirani pokusi (*consolidated undrained tests*) mogu se raditi da se ustanovi stišljivost 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 pokusa, nakon dovršene konsolidacije, smicanje se odvija sa zatvorenim drenovima. Uzorci su prije ili tijekom konsolidacije redovito zasićeni vodom, tako da je tijekom smicanja spriječena promjena volumena uzorka. Time se izaziva promjena pornog tlaka, pa se tijekom smicanja efektivna naprezanja razlikuju od totalnih<sup>4</sup>. Zato se razlikuju i envelope sloma za totalna naprezanja i one za efektivna naprezanja.

Za ilustraciju ponašanja tla pri nedreniranom smicanju pokazuju se rezultati pokusa na nizu uzoraka koji su na isti način pripremljeni od Nevada pijeska, 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

<sup>3</sup> Ustvari, može postojati trajna razlika: na početku pokusa, da bi se olakšalo zasićivanje uzorka, često se podignu i ćelijski tlak i porni tlak u uzorku, tako 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 mjerena i početne vrijednosti.

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

naprezanja za svaki od pokusa, 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 uzorke ( $e = 0,956; 0,908; 0,889$ ) vidi se porast posmičnih naprezanja do najveće vrijednosti, tj. vršne posmične čvrstoće, te zatim smanjivanje do posmične čvrstoće jednake nuli.

Nešto 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 pokusa na Toyoura pijesku, 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 rahliji 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 Nekonsolidirani nedrenirani (UU) pokusi.

Nekonsolidirani nedrenirani pokusi odgovaraju situacijama u kojima nema vremena niti za proces konsolidacije niti za dreniranje tijekom promjene opterećenja kojoj odgovara smicanje. U takvim se pokusima uzorak ugrađuje, te se bez konsolidacije smiče. 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 slomu jedinstvena je za efektivna naprezanja, a za totalna naprezanja postignuti kut unutarnjeg trenja pri slomu bude  $\phi_{UU}=0$ .

## 7.13 Jednoosna čvrstoća.

Pokus jednoosne čvrstoće (*unconfined compression test*) odgovara pokusu u troosnom uređaju u kome nema ćelijskog tlaka. Pokusi su vrlo jednostavni, brzi, ali ograničene primjene.

## 7.14 Poremećeni i neporemećeni uzorci. Laboratorijsko ispitivanje tla.

Sijanje uzorka, kao i ispitivanje granica plastičnosti, testovi 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 *strukтури* tla: vlažnost, količinu pora i slično. Dakle, trebamo uzorak kome je sačuvana struktura: raspored čvrstih čestica, vlaga, ...

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,...
- Cijev u kojoj prenosimo uzorak treba vrlo pažljivo zatvoriti da se uzorak ne suši.
- Pri prenošenju uzorak treba zaštititi od potresanja, zagrijavanja, hlađenja...
- Uzorak treba što prije testirati, da bi se smanjilo vrijeme u kome dolazi do sušenja i sl.
- Dok uzorak čeka na testiranje, nakon vađenja iz zaštitne cijevi, treba ga parafimirati – da bi se zaštitio od sušenja - pazeći pri tome da uzorak samo na trenutak bude izložen povišenoj temperaturi rastopljenog parafina i hladeći 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 potrebni oblik treba izvesti bez prignječivanja, savijanja... i to što brže da se sačuva sva vlaga. Prenosjenje 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**.

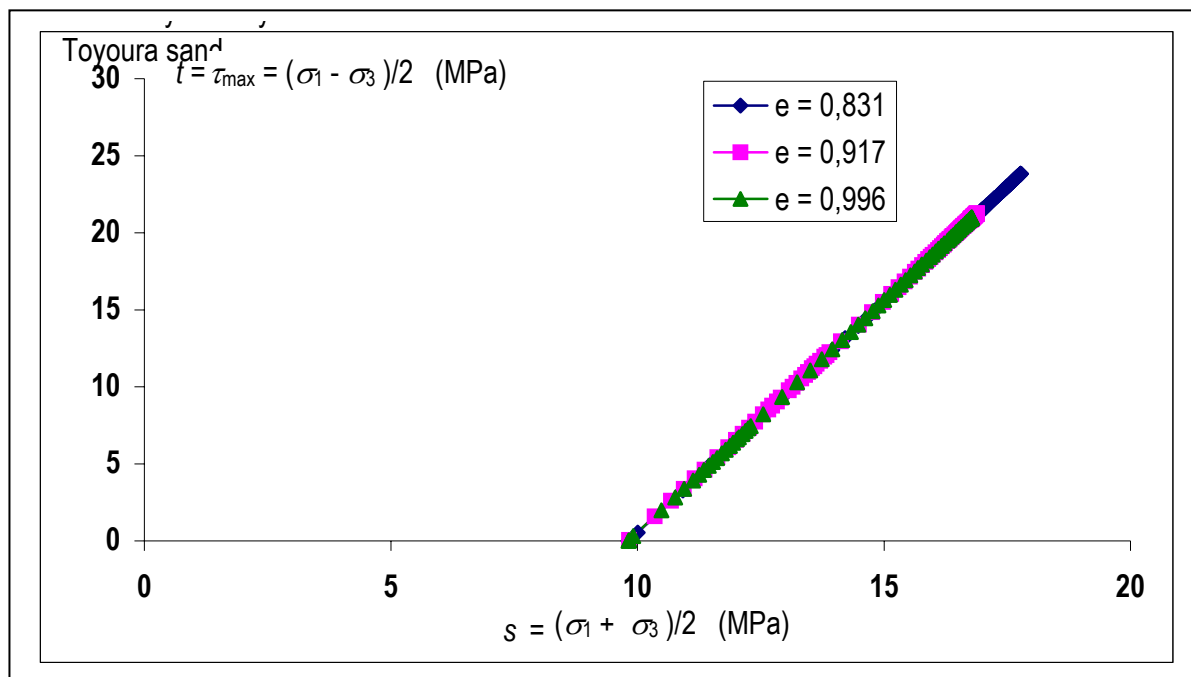
Postoje situacije u kojima nije moguće dobiti neporemećene uzorke, ili ne u dovoljnom broju. Na primjer prah je materijal u kome je vrlo teško, ponekad nemoguće izvaditi neporemećeni uzorak. Također, postoje istraživanja u kojima je važno napraviti niz ispitivanja na jednakim uzorcima. U tim se slučajevima 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.

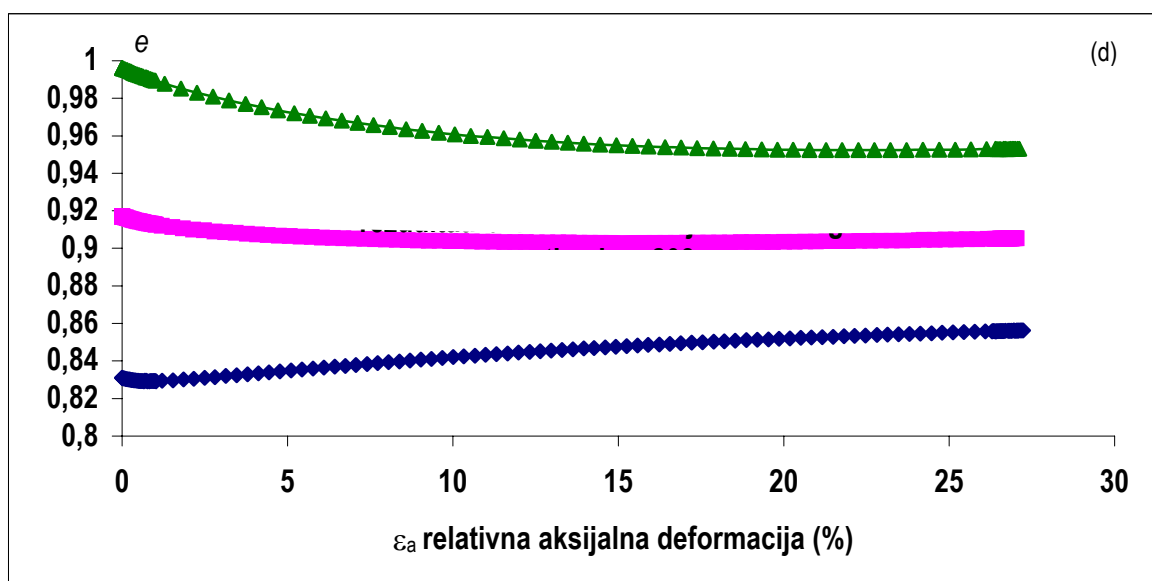
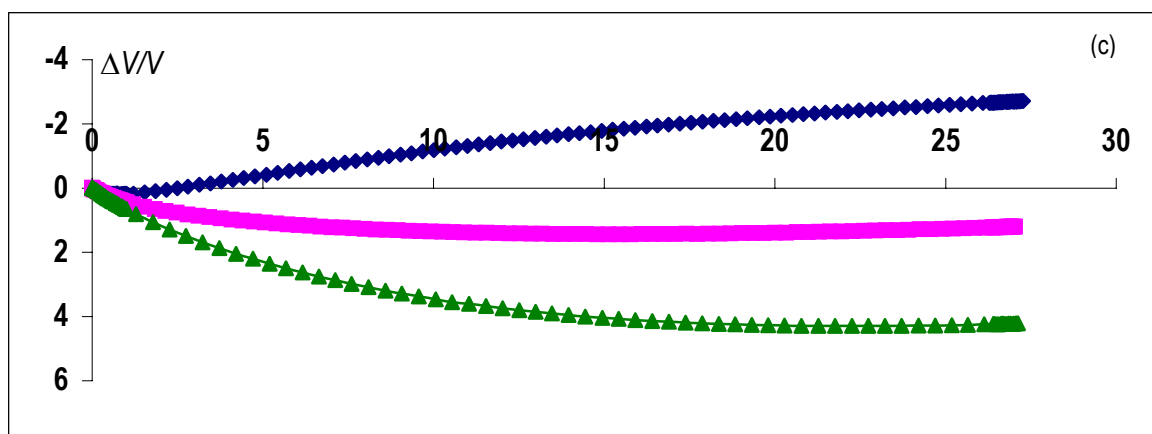
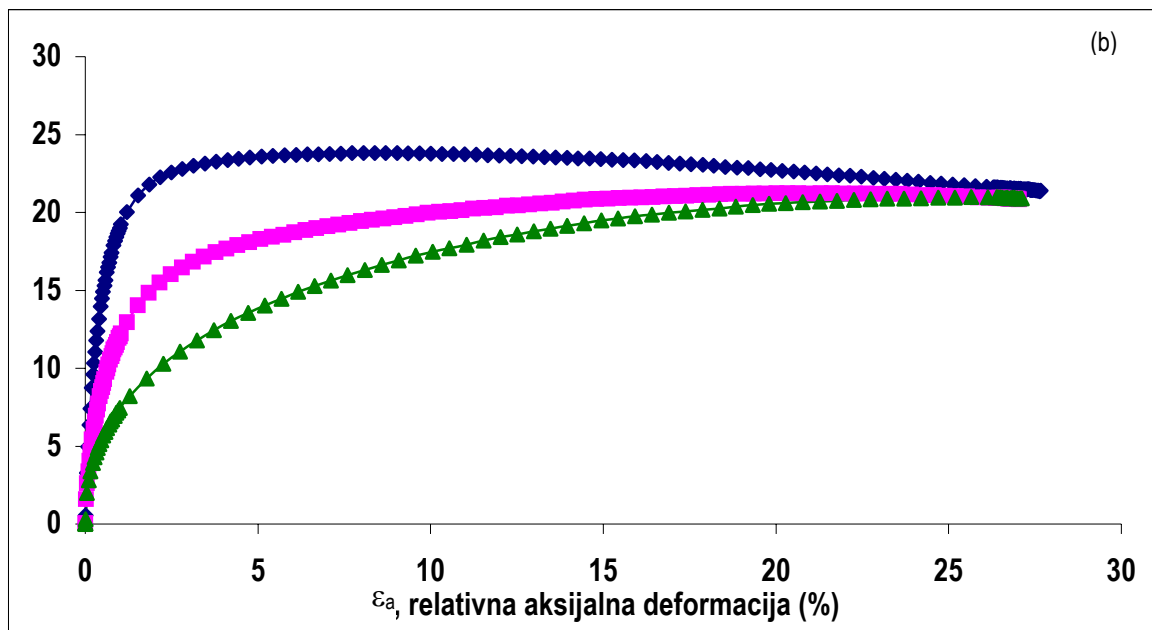
Edometar, troosni uređaj i slični laboratorijski uređaji redovito omogućuju da se tijekom ispitivanja kontroliraju rubni uvjeti – ili deformacije ili naprezanja. Ispitivani uzorak je relativno maleni element jednostavnog oblika. Pri tome veličina uzorka mora odgovarati veličini najvećeg zrna, tako da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

### 7.15 Preporučljiva i korištena literatura:

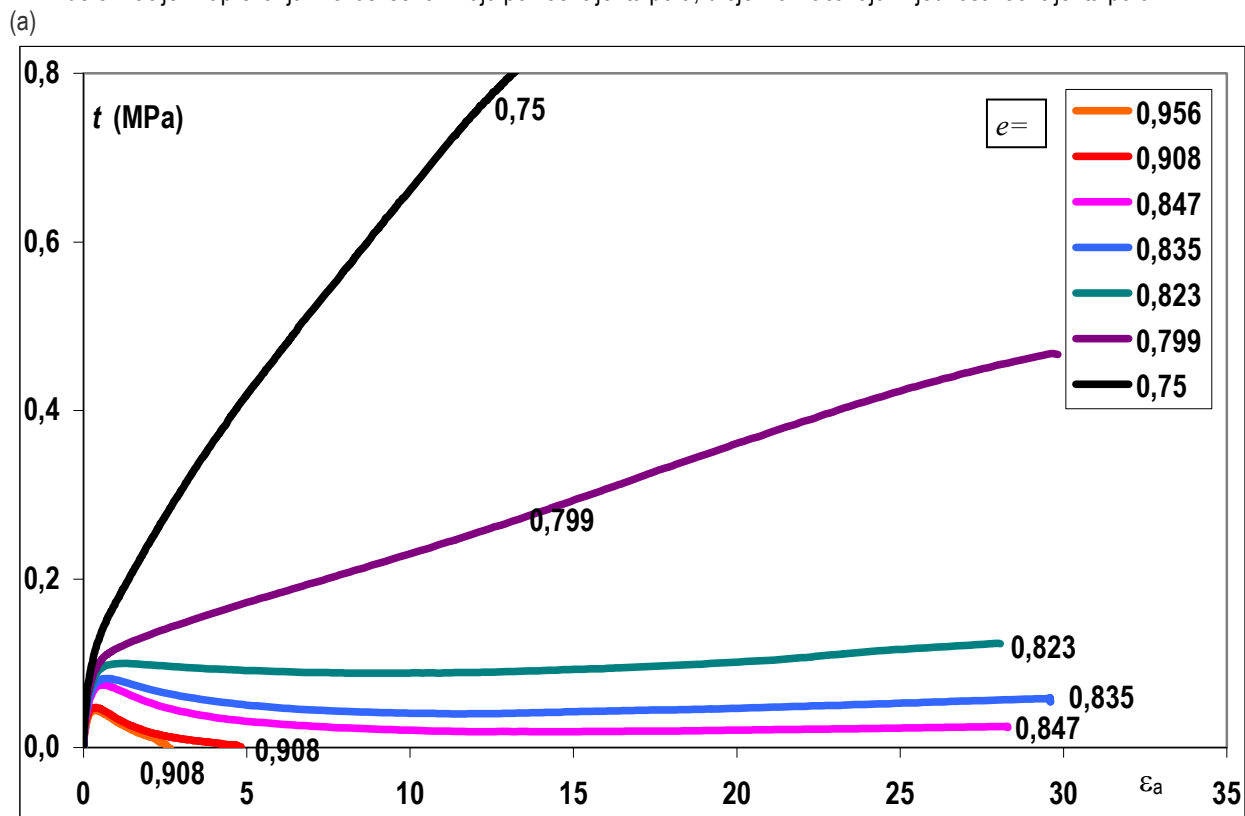
1. Nonveiller,E., 1990, *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, 823 str.... *više primjeraka nalazi se u Knjižnici u Kačićevoj ulici, knjiga se može kupiti u knjižarama*
2. Verić,F., *bilješke za predavanje Konsolidacija tla, predmet Mehanika tla i temeljenje, Građevinski fakultet Sveučilišta 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 pokusa...  $\sigma_0 = \text{const.}$ : (a) trag naprezanja u s,t dijagramu, (b) odnos aksijalne deformacije i naprezanja (*stress-strain curve*), (c) promjena volumena tijekom pokus, (d) promjena koeficijenta pora

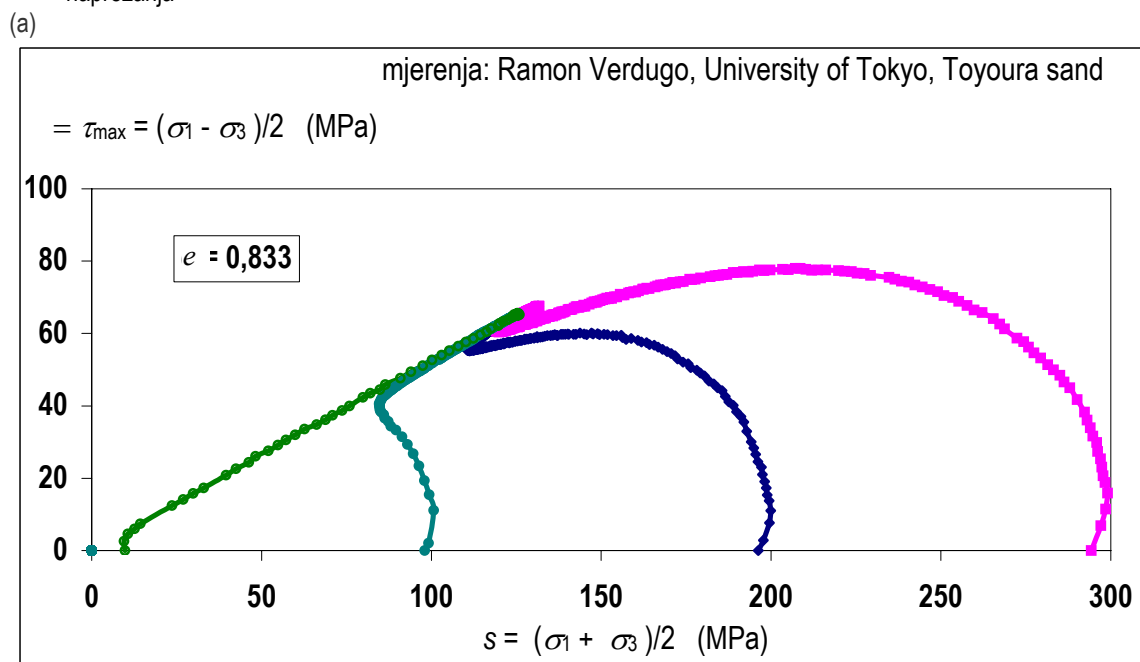




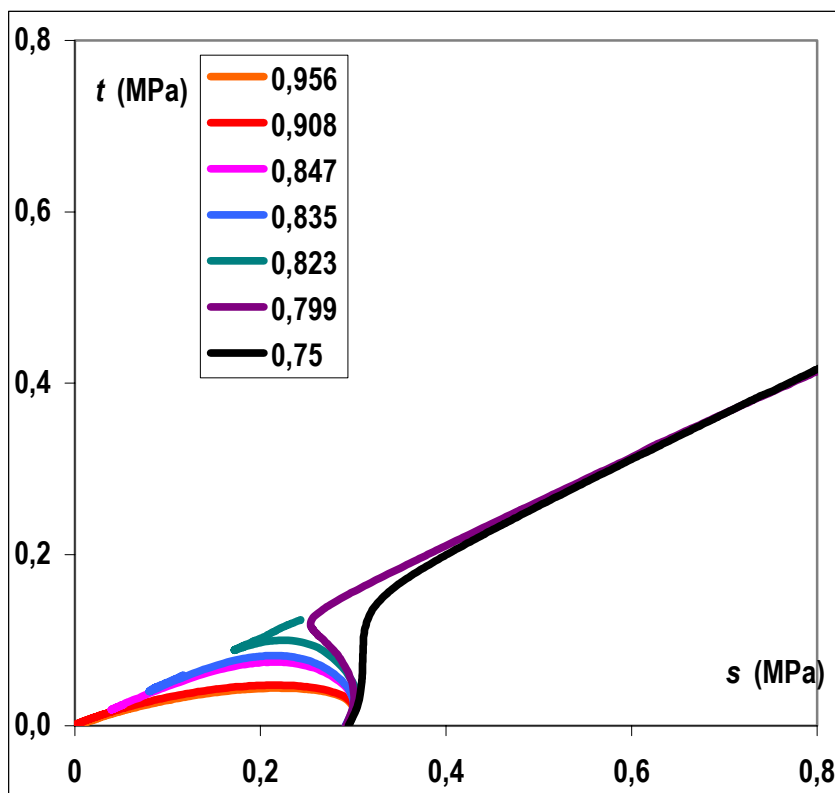
Slika 7-17. Rezultati sedam konsolidiranih nedreniranih pokusa na pijesku Nevada...  $s_0 = \text{const}$ : (a) trag naprezanja, (b) veza deformacije i naprezanja. Pokusi se razlikuju po koeficijentu pora; brojevi označavaju vrijednost koeficijenta pora.



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



(b)



(b)

