

# Inženjerska svojstva tla

**pogodnost tla** za određenu namjenu ovisio o **njegovu ponašanju**

pogodnost tla ovisi o jednom ili više **inženjerskih svojstava**

ova svojstva se određuju na temelju opisanih **fizičkih značajki**

izvođenje inženjerskih radova ovisi o tome koliko je točna procjena inženjerskog svojstva kojom se određuje povoljnost i predviđa ponašanje tla

na svojstva tla utječe geološko porijeklo, ali također i način ispitivanja i određivanja značajki inženjerskih svojstava

posebno su značajna 2 inženjerska svojstva za većinu inženjerskih radova i situacija:

**1. stišljivost (eng. compressibility)**

**2. posmična čvrstoća**

## stišljivost

**STIŠLJIVOST** je stupanj promjene volumena tla uslijed opterećenja

građevina smještena na jako stišljivo tlo vjerojatno će biti oštećena uslijed usijedanja, koje je posljedica smanjenja volumena tla uslijed nanošenja statičkog opterećenja

**POSMIČNA ČVRSTOĆA** je otpornost tla na klizanje

opće poznat primjer je mogućnost da nasip ceste ostane na mjestu kad se smjesti na padinu prekrivenu tlom

## stišljivost

prilikom građenja građevine se često temelje u tlu; zbog toga je važna stišljivost tla

**STIŠLJIVOST** je smanjenje volumena mase tla kao posljedica prirodnog događaja ili ljudskog zahvata

ova volumna promjena događa se zbog promjene volumena pora;  
rjeđe se može dogoditi i zbog promjene volumena čvrstih čestica

**KONSOLIDACIJA** je oblik stišljivosti koji se događa uslijed statičkog opterećenja; konsolidacija je proces 'prolaska' vode kroz pore mase tla

(kada se ne bi razmatrala konsolidacija, moglo bi se dogoditi usijedanje građevine uslijed slijeganja tla)

**KOMPAKCIJA** je povećanje gustoće tla na umjetan način

-ona se razmatra kada se tlo koristi kao građevinski materijal

-smanjenje volumena pora za vrijeme kompaktacije obično se provodi vibracijama, tj. opterećenjem i rasterećenjem mase tla

kako je vlažnost tla faktor koji utječe na konsolidaciju, tako ona utječe i na kompaktaciju

maksimalna kompaktacija se može postići promjenom vlažnosti tla

## **KONSOLIDACIJA**

se događa kada se tlo optereti **statičkom silom**

ona se ispituje kada se građevina temelji u tlu

konsolidacija dovodi do određenog stupnja slijeganja, koje može biti različito na različitim mjestima građevinske lokacije

diferencijalno slijeganje može bit problem za građevinu

(metalni tank za vodu/naftu lakše podnosi diferencijalno slijeganje od višekratnice izgrađene od krutog betona

konsolidacija ovisi o vremenu koje je potrebno da voda izađe iz mase tla kod krupnozrnatih tala drenaža je dovoljno brza da se konsolidacija događa trenutačno

konsolidacija sitnozrnatih saturiranih tala je puno značajnija

prilikom opterećivanja tla, opterećenje preuzima voda u porama i čvrste čestice

voda u porama je nestišljiva; međutim, ona se voda drenira iz stišljivog sloja, tako da se opterećenje prenosi na čvrste čestice

2 faktora od primarnog značaja prilikom istraživanja **konsolidacije**:

**1. treba izračunati potpunu konsolidaciju** (koja se može dogoditi), a to je iznos vertikalnog pomaka ili slijeganja, koje će se dogoditi između početka i završetka konsolidacije; veličina konsolidacije više ovisi o značajkama tla nego o opterećenju

prekonsolidirana glina će pokazati manju konsolidaciju nego normalno konsolidirana glina iste debljine

**2. vrijeme potrebno za konsolidaciju**

također ovisi o značajkama tla; više će vremena trebati debelom sloju tla nego tankom; manje vremena će trebati jače propusnom tlu nego slabije

konsolidacija je proces koji ovisi o vremenu, neovisno o opterećenju

Moguće je:

**1. umanjiti veličinu slijeganja, ili**

**2. ubrzati slijeganje**

Veličina slijeganja se može smanjiti na način da se odstrani stišljivo tlo, ali samo u slučaju kada je ono tanko

U slučaju kada ima dovoljno vremena, može se prije gradnje ugraditi prethodno optrećenje

to može biti otpadni industrijski materijal;

primjenjuje se na relativno tanki stišljivi sloj

konsolidacija se može ubrzati kombinacijom prethodno optrećenje i različitih tipova vertikalnih drenova

## KOMPAKCIJA

se postiže prilikom promjene orijentacije čestica tla kod koje se smanjuju pore;

smanjenje pora se postiže ili lomljenjem zrna ili njihovim svijanjem

glavna svrha kompaktacije je povećati čvrstoću tla i smanjiti propusnost

različite su tehnike i oprema za kompaktaciju tla

u svim se tlo nanosi u slojevima određene debljine koji se zatim opetovano opterećuju ili vibriraju dok se ne postigne odgovarajuća kompaktacija

slika: oprema za kompaktaciju (roleri ili vibratori)



Figure 3.13 A bulldozer pulling a sheepfoot roller to compact the initial soil layers on a reinforced fill for a mountain road.

## posmična čvrstoća

u usporedbi s drugim građevinskim materijalima, tlo ima vrlo nisku čvrstoću;

sveopće korištenje tla u građenju je prisutno zbog toga što: ga ima u izobilju; dostupno je i jednostavno se s njim radi

posmična čvrstoća tla značajno se razlikuje za različita tla, pa čak i za isto tlo

posmična čvrstoća inženjerskog tla ima važnu ulogu prilikom projektiranja, građenja i dugoročne stabilnosti građevina na tlu, u tlu i s materijalima tla

stabilnost prirodnih kosina u tlima također ovisi o čvrstoći tla

**posmična čvrstoća stijena** može se izraziti kao: *tlačna, vlačna i posmična*, ovisno o vrsti pokusa i potrebi inženjerskog projekta

za razliku od stijene, posmična čvrstoća tla je od najvećeg značenja za inženjera

posmična čvrstoća se mjeri:

-**izravno pomoću direktnog smicanja;**

-**indirektno, pomoću jednoosne i troosne kompresije**

posmična čvrstoća dobivena nizom pokusa (za određene uvjete ispitivanja) se definira pomoću **Mohrove anvelope posmične čvrstoće**

S obzirom na uvjete ispitivanja razlikuju se **poremećeni od neporemećenih uzoraka** i s obzirom na uvjete dreniranja

Prilikom ispitivanja se primjenjuju uvjeti kojima će tlo biti podvrgnuto tijekom građenja

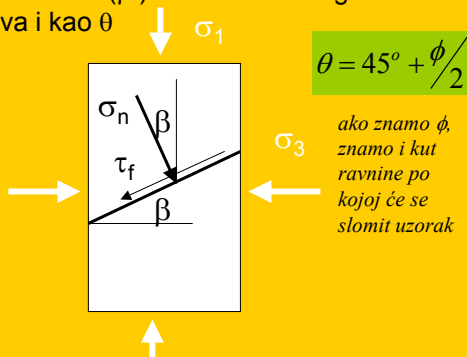
Mohr-Coulombov kriterij sloma

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$$

je linearna jednačba koja **definira posmično naprezanje tla na plohi sloma** ( $\tau_f$ ) i kut unutarnjeg trenja ( $\phi$ ) pri određenom normalnom naprezanju ( $\sigma$ ) koje djeluje na plohu sloma

posmična čvrstoća pri slomu ( $\tau_f$ ) je posmično naprezanje pri slomu

kut plohe sloma ( $\beta$ ) može se dobiti grafički iz Mohrove kružnice; on se često označava i kao  $\theta$



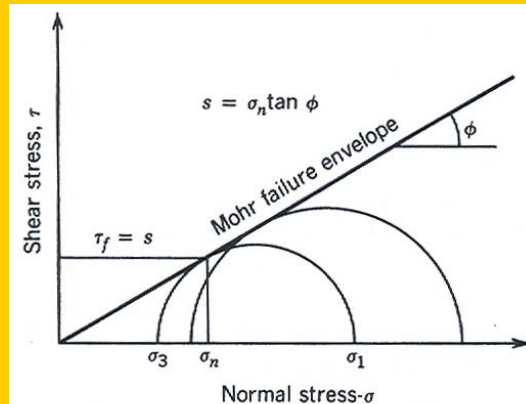
slika??

**koherentna tla** su **PRAHOVI i GLINE** koja imaju koheziju među česticama koja je  $>0$

**nekoherentna tla** su **PIJESCI i ŠLJUNCI**, kod kojih je  $c=0$

slika: *tipičan Mohrov dijagram za nekoherentna tla*

$$\tau_f = \sigma_n \tan \phi$$



**Figure 3.15** Typical Mohr diagram for a noncohesive soil.

praktična vrijednost: *krupnozrnata tla iskazuju posmičnu čvrstoću jedino kada su ograničena i ovisno o veličini ograničavajućih pritisaka i to ovisno o kutu unutanjeg trenja*

## POSMIČNA ČVRSTOĆA U NEKOHERENTNOM TLU

ovisi o:

1. grupa faktora koja ovisi o **načinu pripreme uzorka i proceduri pokusa**

(koeficijent poroziteta na koji je tlo kompaktirano i ograničavajući pritisci tijekom pokusa)

2. grupa faktora vezana za **fizička svojstva tla**

(veličina čestica, oblik čestica, hrapavost površine čestica, granulometrijski sastav; jer oni utječu na uklještenje čestica)

## POSMIČNA ČVRSTOĆA U NEKOHERENTNOM TLU

Što je gušće pakiranje (manji koeficijent poroziteta) to je veći utjecaj uklještenja na kut unutarnjeg trenja i odgovarajuću posmičnu čvrstoću (slika)

*Fizičke značajke tla i gustoća pakiranja utječu na veličinu otpora trenja prilikom relativnog pokretanja čestica, kao što je prikazano varijacijama kuta unutarnjeg trenja*

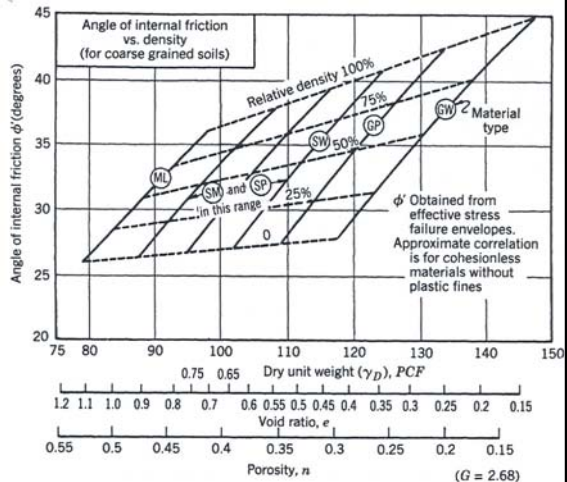


Figure 3.16 Dependence of angle of internal friction on density of cohesionless soils. See Table 3.6 for definition of soil symbols used. (From NAVFAC, 1982)

Krupnozrnasto tlo sadrži vodu u porama, ili šupljinama, koja utječe malo ili nikako na kut unutarnjeg trenja (porni pritisci mogu se raspršiti prilikom opterećivanja)

to se naziva **drenirano stanje**

Ukoliko se porni pritisci povećavaju tijekom opterećivanja, značajno se mijenja kut unutarnjeg trenja. To je **nedrenirano stanje**

Rezultirajuća **hidrostatska napreznja** koja se razvijaju u pornoj vodi djeluju u suprotnom smjeru od opterećenja.



Rezultirajuća hidrostatska naprezanja koja se razvijaju u pornoj vodi djeluju u suprotnom smjeru od opterećenja.

Rezultat je **EFEKTIVNO NAPREZANJE** na uzorku, koje je manje od onoga kojemu je uzorak izložen

U tim uvjetima Mohr-Coulombova jednačba se mijenja:

$$\tau_f = (\sigma_n - \mu) \tan \phi$$

$\mu$  = porni pritisak

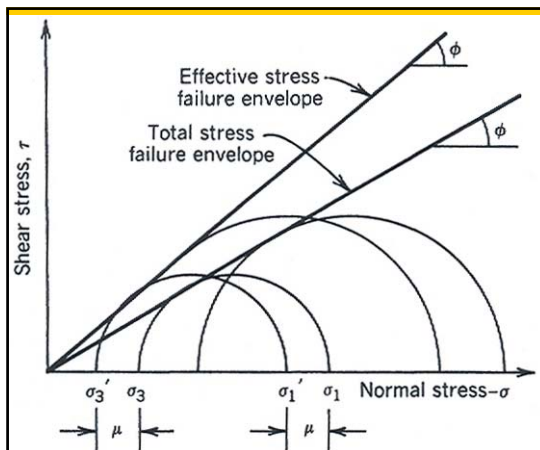


Figure 3.17 Mohr diagram showing influence of pore pressure,  $\mu$ , on axial and confining stresses,  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$ , and resultant effective stress failure envelope.

promjena stanja naprezanja, kao rezultat pornog pritiska

$$\tau_f = (\sigma_n - \mu) \tan \phi$$

ovdje je grafički prikaz zašto je odgovarajuća drenaža i praćenje pornog pritiska pomoću instrumenata važan faktor prilikom građenja i održavanja građevina od tla, kao što su nasipi

Postupci ispitivanja tla omogućavaju procjenu **dreniranog i nedreniranog naprezanja**, kako bi se mogli dobiti podaci koji odgovaraju uvjetima na lokaciji

Zrnati materijali skloni povećanju porednog pritiska, osobito uslijed dinamičkog opterećenja, su prašinski pijesci i sitni pijesci koji imaju manju propusnost od krupnijih materijala

## **POSMIČNA ČVRSTOĆA U KOHERENTNOM TLU**

koherentna tla iskazuju različit stupanj plastičnosti, ovisno o veličini zrna, vlažnosti i mineralima glina (ako ih ima)

Indeks plastičnosti (PI) je mjera raspona vlažnosti u kojemu je koherentno tlo plastično  
prahovi su manje plastični od glina i imaju širi raspon PI (ovisno o min. sastavu)

**indeks plastičnosti obrnuto je proporcionalan posmičnoj čvrstoći u koherentnom tlu**

tla s višom granicom tečenja imaju manju čvrstoću, tj. zbog čega čvrstoća koherentnog tla ovisi o vlažnosti materijala

važno ispitivati uzorke u prirodnom stanju vlažnosti (tzv. neporemećeni uzorci=uzorak zaštićen voskom)

da bi se poboljšala svojstva tla na nekoj lokaciji, najvažnije je sniziti vlažnost

smanjenje koeficijenta pora tkđ. povećava čvrstoću tla (osobito kod glinovitih tala zbog pločastih minerala)

glinovita tla osjetljiva na promjenu volumena, ili konsolidaciju

- **normalno konsolidirana tla** – ona koja nisu bila podvrgnuta efektivnim naprezanjima višim od trenutnih
- ako su efektivna naprezanja u prošlosti bila viša, **tlo je prekonsolidirano** (zbog čega imaju manji koeficijent pora i povećanu čvrstoću)
- geološki razlog za prekonsolidiranost: uklanjanje pritiska nadslojeva erozijom, ili, u vrijeme glacijacija, otapanje velikih ledenih pokrivača

- većina glinovitih tala ima približno jednaku posmičnu čvrstoću u neporemećenom stanju i nakon mehaničkog razaranja strukture (*eng. remolded*)
- gline kod kojih je 'remolded' čvrstoća niža nazivaju se **senzitivnim glinama**
- senzitivnost je ovisna o strukturi, tj. uređenju čestica u tlu
- izraz za senzitivnost u smislu posmične čvrstoće:

senzitivnost = neporemećena p.č./remolded p.č.

- jako senzitivne gline ili **brze gline** koje teku kad im se uništi struktura, imaju senzitivnost=20
- kod nesenzitivnih glina ovaj omjer =1
- poremećaji strukture mogu se dogoditi prilikom građenja ili za vrijeme potresa; posljedica je likvefakcija (i katastrofe)
- prilikom određivanja inženjerskih svojstava glinom bogatih tala koriste se pokusi s različitim uvjetima konsolidacije i dreniranja

## MJERENJE POSMIČNE ČVRSTOĆE

- određivanje posmične čvrstoće:

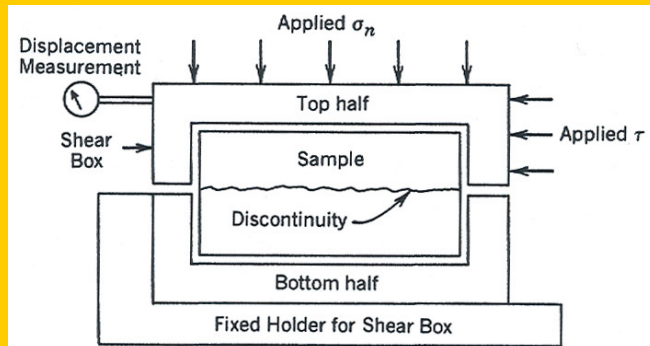
**a) pokus direktnog smicanja i**

**b) triaksijalni pokus**

- odabir pokusa ovisi o :

1. vrsti materijala (koherentan, nekoherentan)
2. uvjetima dreniranja
3. stanju naprezanja na terenu

- **POKUS DIREKTNOG SMICANJA**
- izravno posmično naprezanje uzorka (za razliku od tlačnog naprezanja)
- slika



**Figure 4.36** Diagram of a direct shear box for determining shear strength characteristics of discontinuities.

- niz vrijednosti posmičnih naprezanja sloma uzorka ( $\tau_f$ ) se dobiva za različite vrijednosti normalnog naprezanja na plohu smicanja ( $\sigma_n$ )
- to su koordinate točaka iz kojih se konstruira Mohrova anvelopa posmične čvrstoće i izvodi se kut unutarnje trenja  $\phi$

## TRIAKSIJALNI POKUS

- provodi se u ćeliji koja omogućava kontrolu tlačnih i ograničavajućih napreznja;
- ograničavajuća napreznja ( $\sigma_2$  i  $\sigma_3$ ) su jednaka jer se nanose pomoću tlaka zraka ili hidrauličkog pritiska

• neograničena tlačna čvrstoća je slučaj kada je  $\sigma_3 = 0$

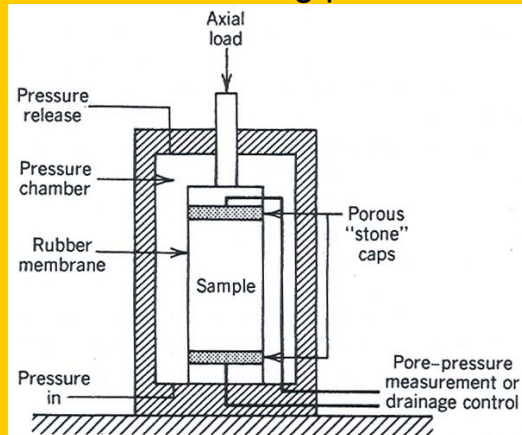


Figure 3.18 Schematic diagram of a triaxial cell.

## TRIAKSIJALNI POKUS

- rezultati se prikazuju u Mohrovom dijagramu: tlačna čvrstoća za svako stanje ograničavajućeg napreznja; očitava se kut unutarnjeg trenja ( $\tau_f$ )

• posmična čvrstoća ili posmično napreznje na plohi sloma ovdje se određuje indirektno kao rezultat primjene osnog ili tlačnog napreznja

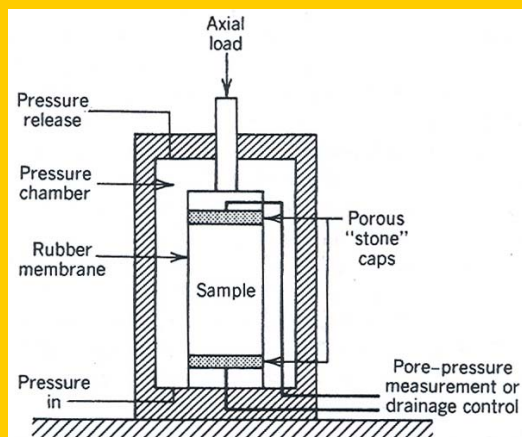
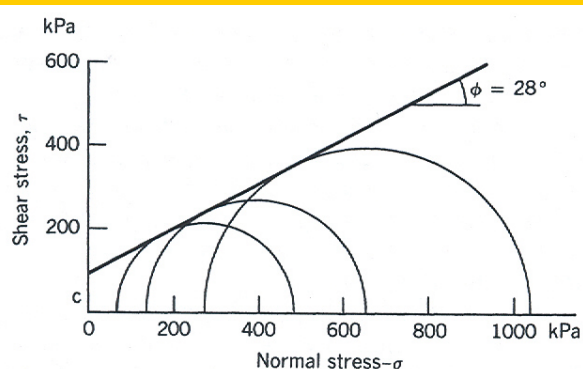


Figure 3.18 Schematic diagram of a triaxial cell.

## triaksijalni pokus

- koristi se za nekoherentna i koherentna tla
- **najčešće za koherentna tla**
- provodi se na neporemećenim uzorcima zbog utjecaja poremećaja strukture na rezultate kod koherentnih tala
- koef. poroznosti može se izmjeriti prije i nakon pokusa kako bi se odredio stupanj konsolidacije za vrijeme pokusa
- uzorci se pripremaju tako da simuliraju željene uvjete građenja i nakon građenja

- rezultati triaksijanog pokusa
- pokus na neporemećenom uzorku s originalnom vlažnosti od cca 19%
- prosječna granica tečenja 38%; indeks plastičnosti 17%
- CL tlo (prema USC sustavu)
- rezultati karaketistični za CL glinu



**Figure 3.19** Mohr diagram for the CL soil described in text.