

Određivanje parametara tla (linearno-elastični-idealno-plastični model ili “Mohr-Coulombov” model)

Antun Szavits Nossan

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu

2009



Linearno elastični idealno plastični model

Parametri

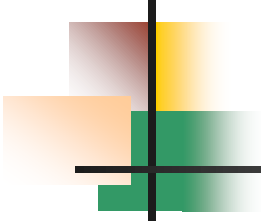
■ Parametri elastičnih deformacija

- Youngov modul E' (drenirano), E (nedrenirano)
- Poissonov broj ν' 0,5

■ Parametri plastičnosti

■ Ploha popuštanja

- Kut trenja φ' $\varphi_u = 0$
- Kohezija c' c_u (nedrenirana čvrstoća)
- Dilatacija ψ ili D 0

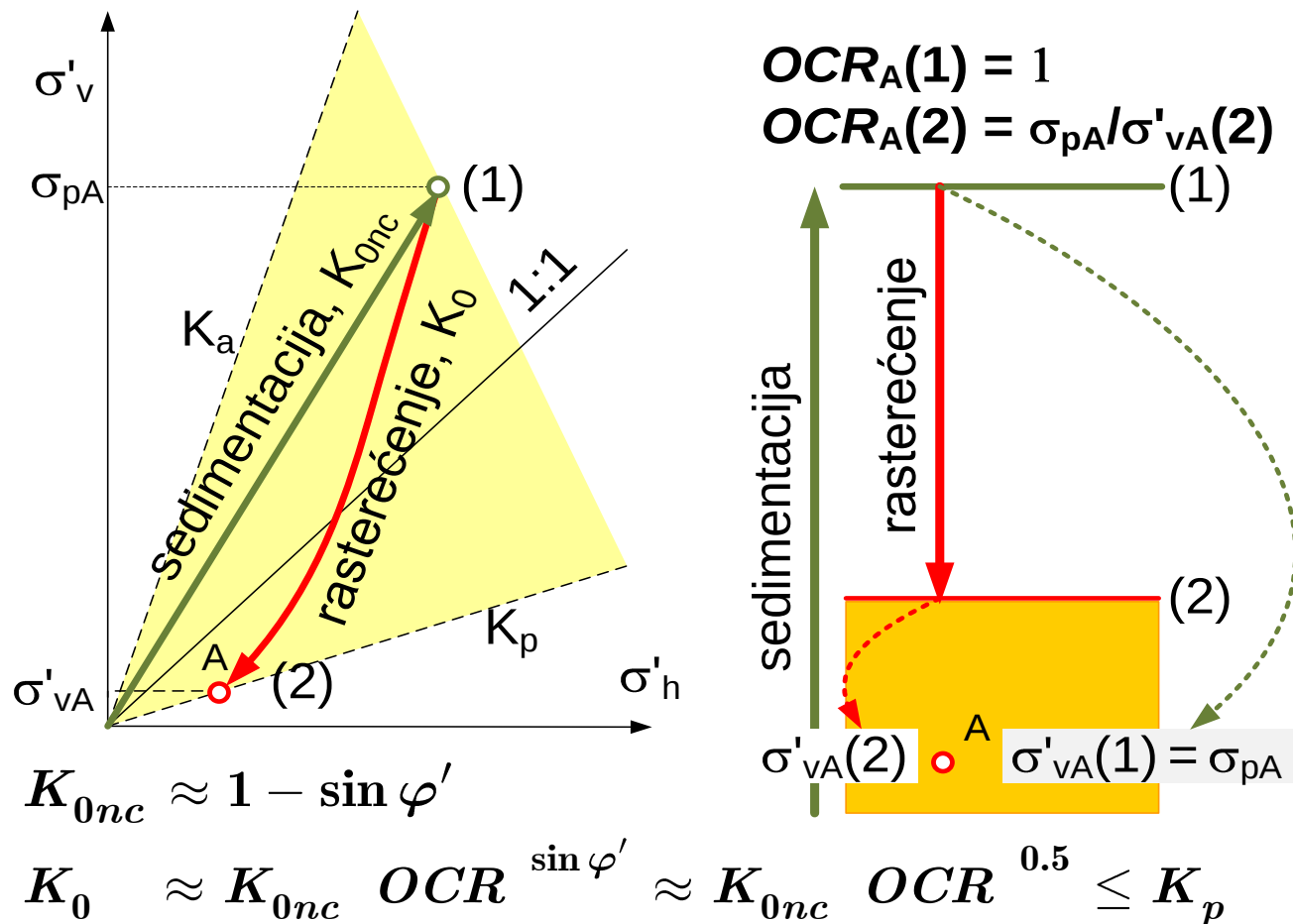


Početno stanje naprežanja

- $$\sigma_v = \int_0^z \gamma dz, \quad \sigma'_v = \sigma_v - u$$
$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_v, \quad \sigma_h = \sigma'_h + u$$
- Normalno konsolidirano tlo $K_{0nc} = 1 - \sin \varphi'$
- Prekonsolidirano tlo $K_0 = K_{0nc} OCR^{\sin \varphi'_{tc}}$
- Kvocijent prekonsolidacije $OCR = \sigma_p / \sigma'_v$

Nastanak prekonsolidacije: sedimentacija i rasterećenje u geološkoj prošlosti

■ Sitnozrno i krupnozrno tlo





Laboratorijski i terenski uređaji za ispitivanje krutosti i čvrstoće tla

■ Laboratorijski

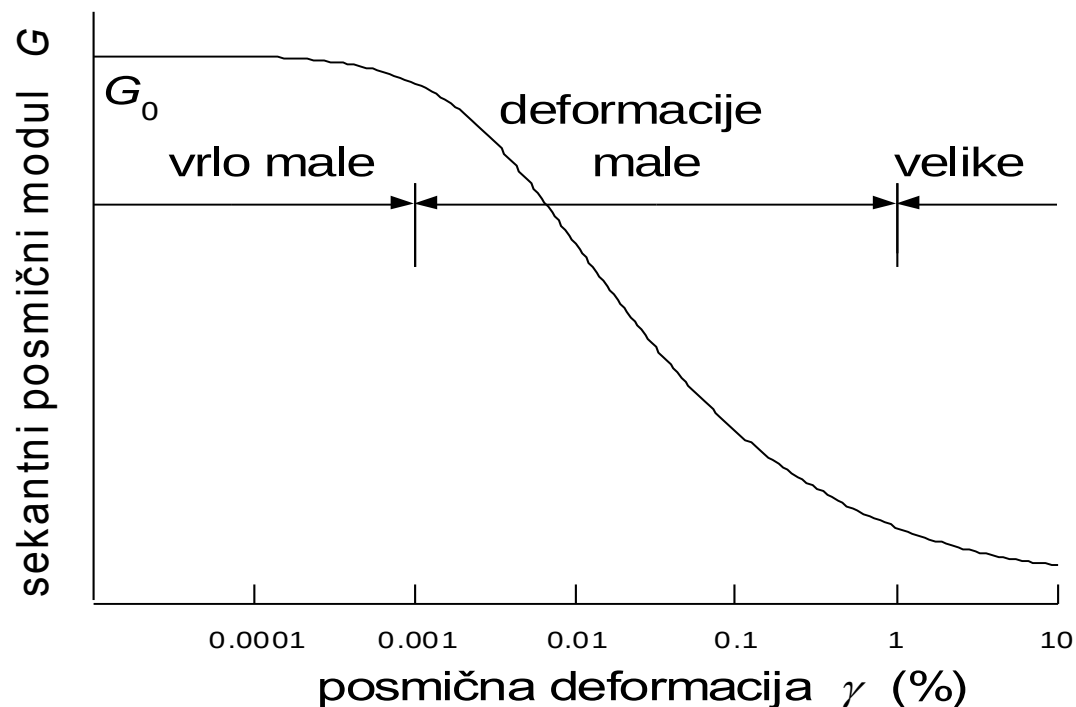
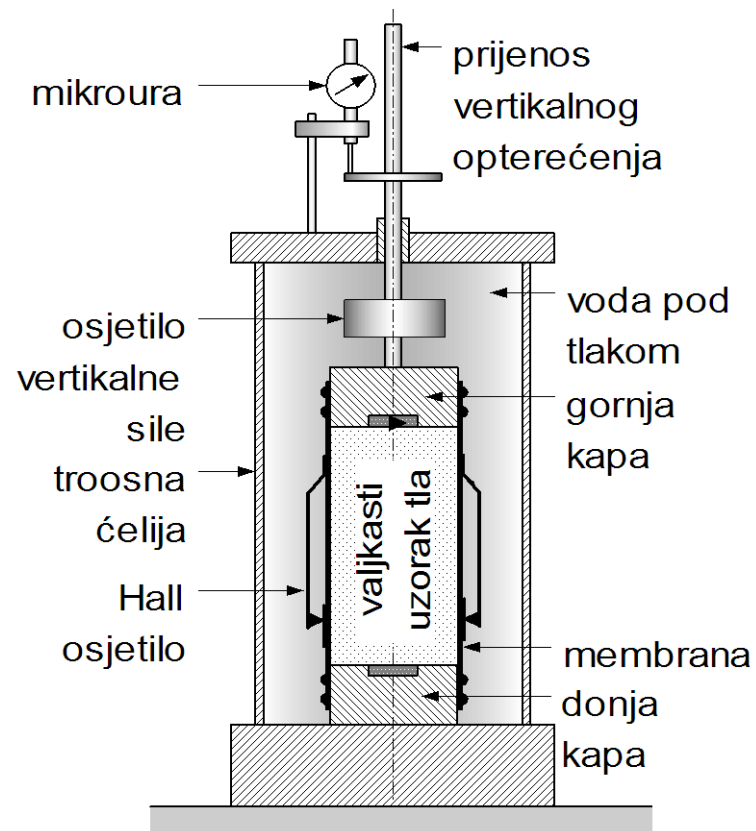
- klasifikacijski pokusi: Atterbergove granice (w_L , w_p), prirodna vlažnost (w_0), granulacija, relativna zbijenost (I_D), jednoosna čvrstoća (q_a), ...
- neposredna ispitivanja uzoraka tla: edometar, troosni uređaj, direktno smicanje, ...

■ Terenski

- posredno ispitivanje (uz korištenje korelacija): standardni penetracijski pokus (broj udaraca N), statički penetracijski pokus (otpor šiljka q_c), ...
- neposredno ispitivanje: krilna sonda (nedrenirana čvrstoća), presiometar (otpor širenju cilindričnog otvora bušotine), probna ploča (slijeganje opterećene kružne ploče na površini tla ili u bušotini), geofizička ispitivanja (brzina širenja elastičnih valova; elastični valovi – širenje poremećaja u tlu pri vrlo malim deformacijama; brzina uzdužnih valova $v_p = \sqrt{E_{\text{oed}} / \rho}$, brzina posmičnih valova $v_s = \sqrt{G_0 / \rho}$)

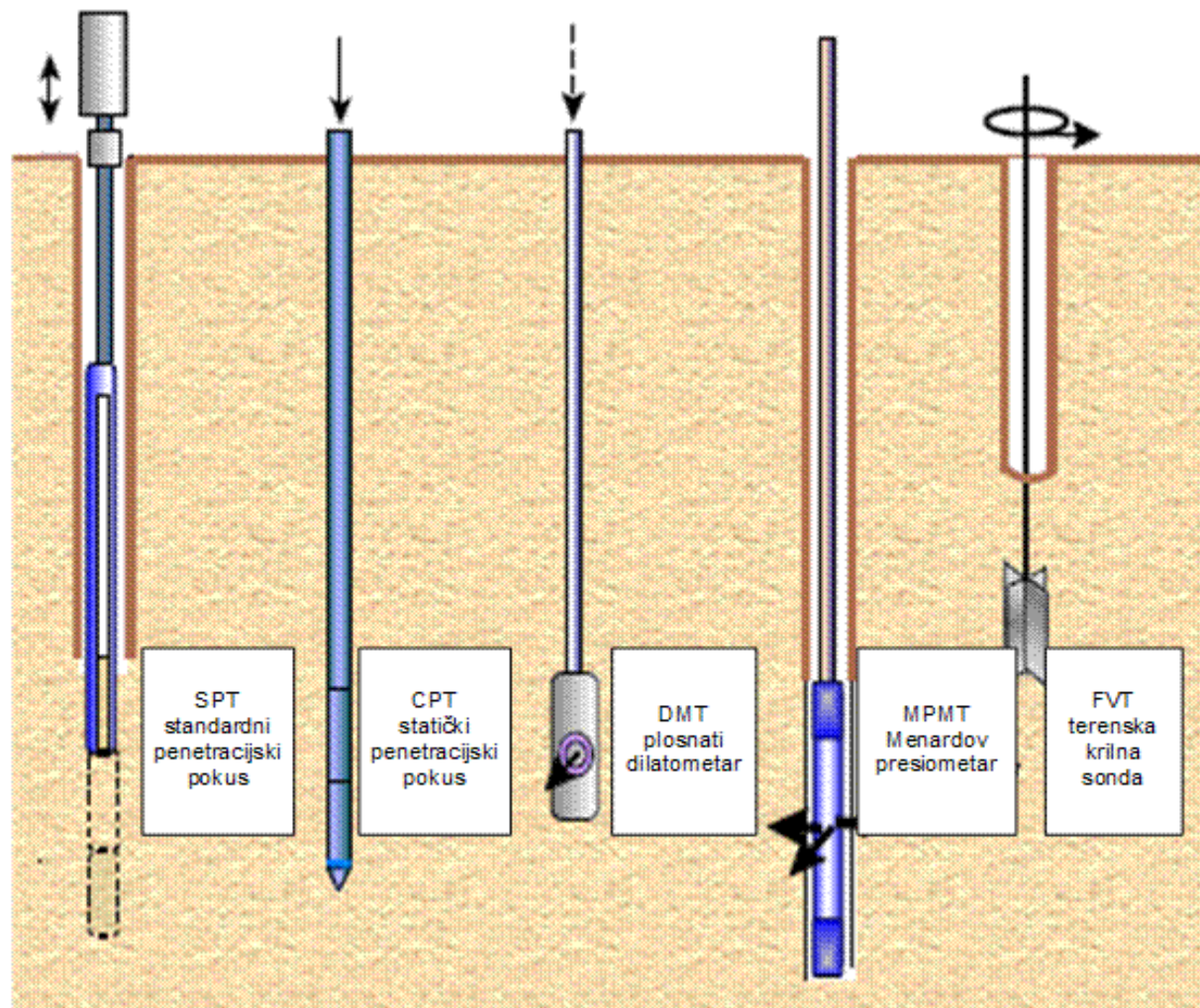
Krutost od malih deformacija do sloma

■ Troosni uređaj i sekantna krutost tla



Terenski pokusi

- SPT
- CPT
- DMT
- MPMT
- FVT
- Geofizički
 - površinska refrakcija
 - SASW
 - cross-hole
 - down hole





Standardni penetracijski pokus (SPT) 1

- Uteg $W = 0,623$ kN; visina pada $H = 0,76$ m; broji se broj udaraca koji sondu-uzorkivač zabiju oko 30 cm u dno bušotine

Teoretska energija udara je $En_t = WH$, stvarna energija udara, En , je manja od teoretske zbog različitih gubitaka; kvocijent energije definiran je kao $ER = En/En_t$, a standardnim se smatra $ER = 0.6$; kod uređaja u Hrvatskoj su mjereni ER u rasponu od 0.6 do 0.7)

- Korekcije mjerenog broja udaraca, N , na standardni, N_{60} :

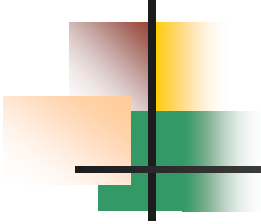
$$N_{60} = C_B C_S C_R \frac{ER}{0.6} N$$



Standardni penetracijski pokus (SPT) 2

- Korekcije na standardni promjer bušotine, C_B
 $C_B = 1$ za promjer bušotine od 65 do 115 mm;
- Korekcija detalja uzorkivača, C_S
 $C_S = 1$ za uzorkivač s košuljicom, a $C_S = 1.2$ kad košuljice nema;
- Korekcija dužine šipki u bušotini, C_R
 $C_R = 1$ za dužinu šipki veću od 10 m, a $C_R = 0.95$ za kraće šipke
- Korekcija na veličinu vertikalnog efektivnog naprezanja u tlu na mjestu sonde:

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \quad C_N = 1 / \sqrt{\sigma'_v / p_a} \quad p_a = 100 \text{ kPa}$$



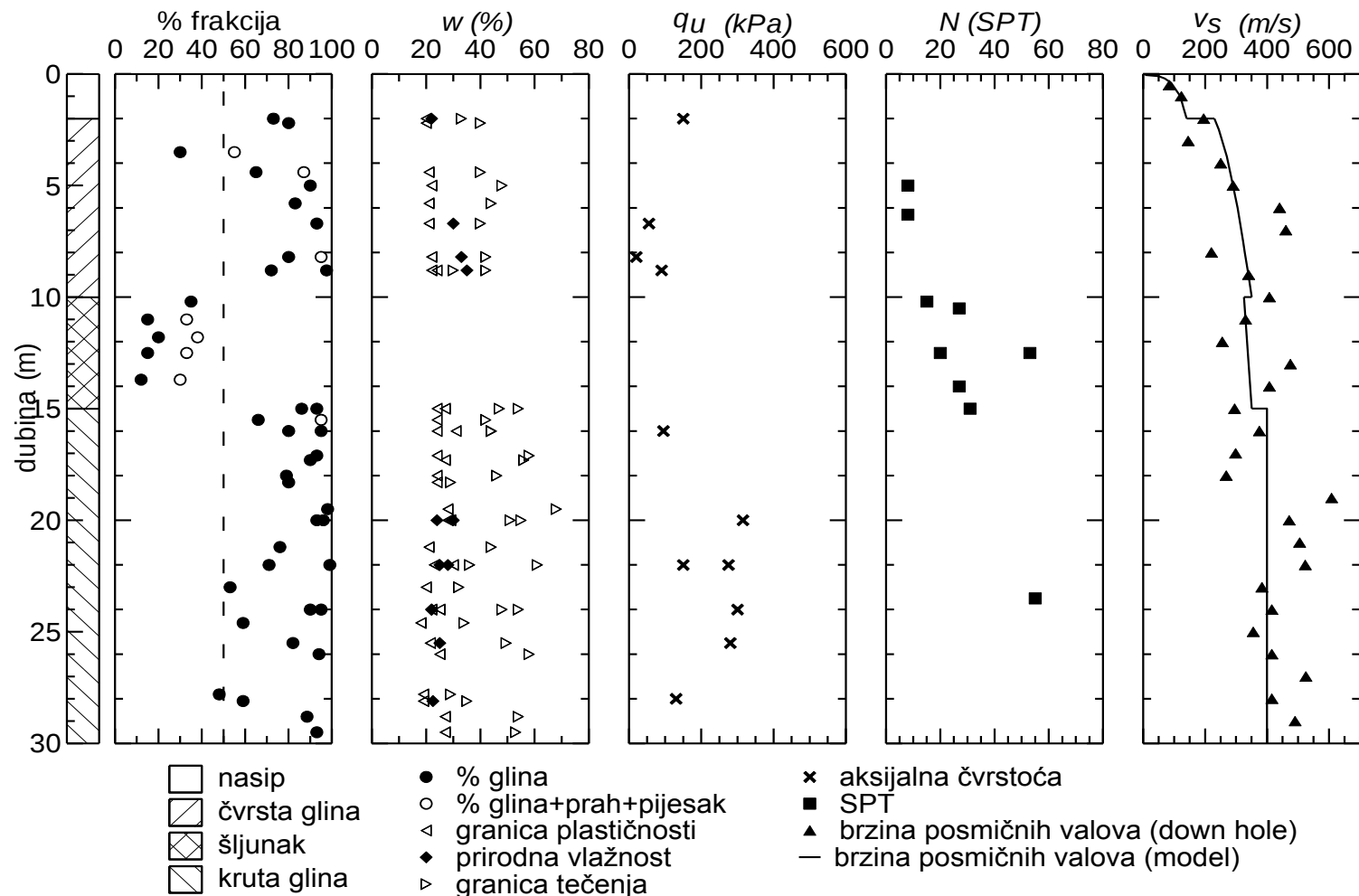
Statički penetracijski pokus (CPT)

- Korekcija kao kod SPT

$$q_n = q_c C_N, \quad C_N \text{ korekcija za SPT}$$

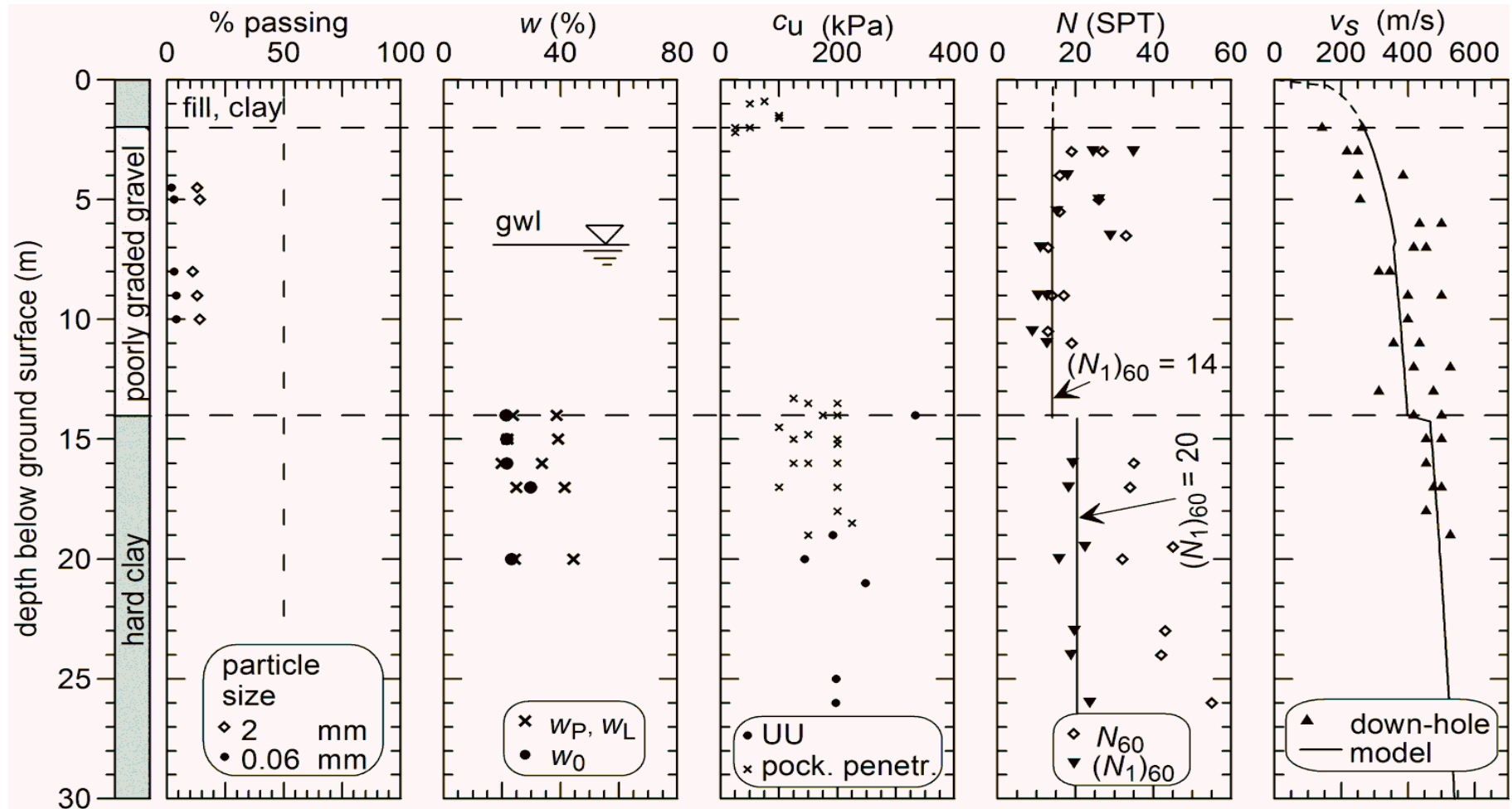
Prikaz rezultata 1

Geotehnički profili, sondažni profili



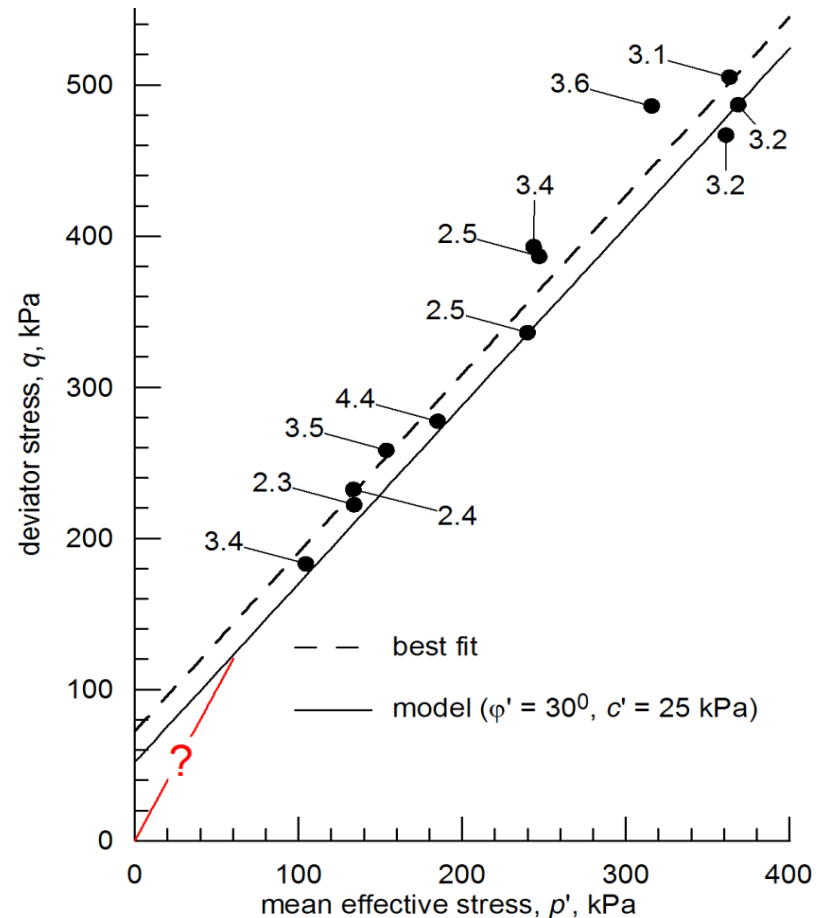
Prikaz rezultata 2

■ Sondažni profili i zbirni prikazi 2



Prikaz rezultata 3

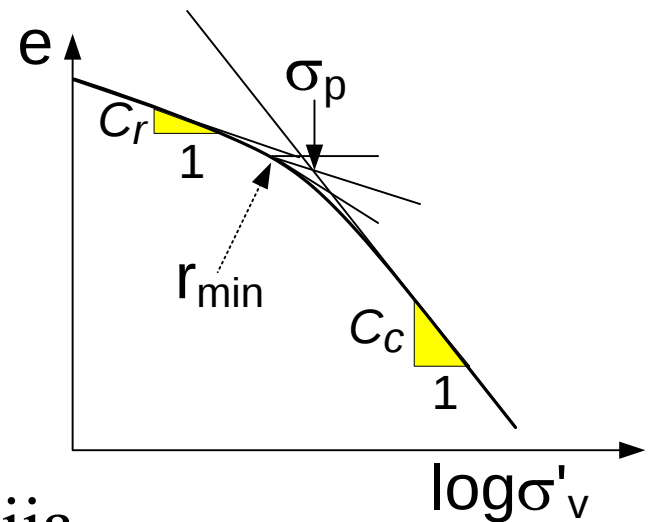
- Specijalizirani prikazi za izbor parametara tla



Određivanje OCR 1

■ Sitnozrno tlo

- Iz edometarskog pokusa (Casagrande) za sitožrna tla



- Iz nedrenirane čvrstoće i korelacija

$$c_u/\sigma_p \approx 0,11 + 0,0037 I_p (\%)$$

$$c_u/\sigma'_v \approx (c_u/\sigma_p) (OCR)^{0,8} \Rightarrow OCR \approx \left(\frac{c_u/\sigma'_v}{(c_u/\sigma_p)} \right)^{1,25}$$

$$\text{iz } q_a \text{ } (c_u \approx q_a / 2)$$

q_q — aksijalna čvrstoća



Određivanje OCR 2

- Iz SPT-a (vrlo grubo)

$$OCR \approx 0,58 N \frac{p_a}{\sigma'_v}, \quad p_a - \text{atmosf. tlak (100 kPa)}$$

- IZ CPT-a uz pomoć pritiska prekonsolidacije

$$\sigma_p = (q_t - \sigma_{v0}) / 3$$

σ_p - pritisak prekonsolidacije; $q_t = q_c + u_2(1 - a)$ je korigirani otpor šiljka sonde q_c , u_2 je mjereni tlak vode u filtarskom kamenu (piezometru) u sondi neposredno iznad stožastog šiljka, a a je kvocijent površine stožastog šiljka koji se dobije kalibracijom i kod kvalitetnih se uređaja kreće u rasponu od 0.75 do 0.82 za uređaje s površinom poprečnog presjeka sonde od 10 cm².



Određivanje OCR 3

- Krupnozrno tlo
 - danas vrlo teško i vrlo nepouzđano
 - pri procjeni koeficijenta bočnog tlaka mirovanja (K_0) pretpostavlja se da je krupnozrno tlo normalno konsolidirano; ima indikacija da je kod zbijenih krupnozrnih tla koeficijent bočnog tlaka mirovanja veći od onog za normalno konsolidirano tlo



Poissonov broj (drenirano stanje)

■ Sitnozrno tlo

- Normalno konsolidirane gline i prašine

$$\nu'_{nc} = \frac{K_{0nc}}{1 + K_{0nc}} = \frac{1 - \sin \varphi'}{2 - \sin \varphi'}, \text{ raspon: 0.25 do 0.35}$$

- Prekonsolidirano

$$\nu'_{oc} < \nu'_{nc}$$

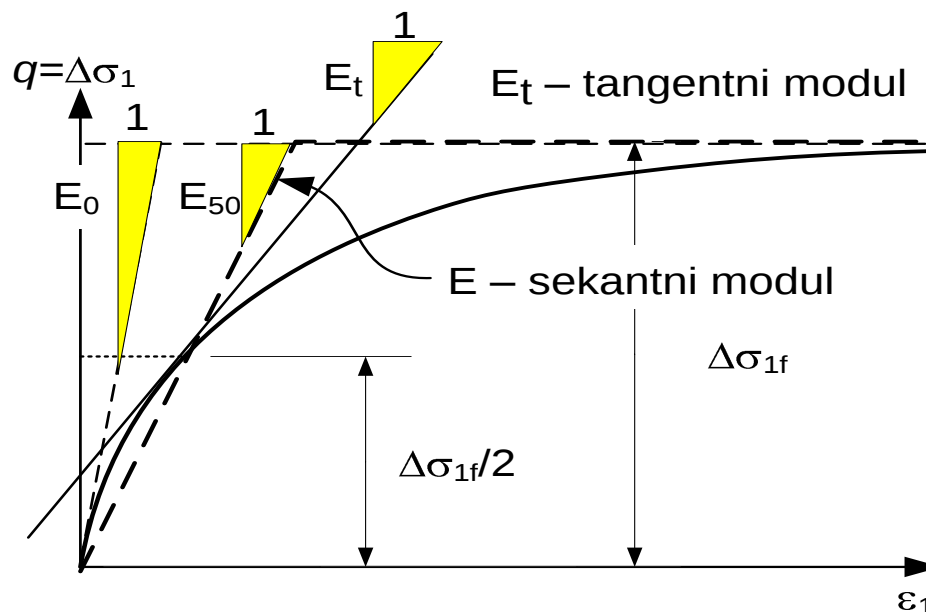
$$\nu'_{oc} \quad \text{raspon: 0.1 do 0.2}$$

■ Krupnozrno tlo

- malo podataka, ali se može pretpostaviti analogija:
 - vrlo rahlo tlo $\leftrightarrow$ normalno konsolidirano tlo
 - zbijeno tlo $\leftrightarrow$ prekonsolidirano tlo

Youngov modul iz troosnog uređaja

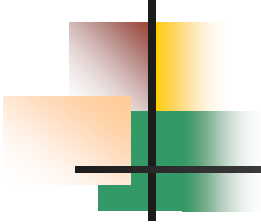
■ Drenirano stanje



■ Odnos nedreniranog i dreniranog modula

$$G' = \frac{E'}{2(1 + \nu')}, \quad G = \frac{E}{2(1 + 0.5)}, \quad G' = G \Rightarrow$$

$$E = \frac{3E'}{2(1 + \nu')}$$



Youngov modul iz edometra

- Youngov i edometarski modul

$$E' = E_{\text{oed}} \frac{(1 + \nu')(1 - 2\nu')}{1 - \nu'}$$

- Opći izraz za tangentni edometarski modul

$$E_{\text{oed}} = \frac{\partial \sigma'_v}{\partial \varepsilon_v} = \frac{2,3(1 + e)}{C} \sigma'_v$$

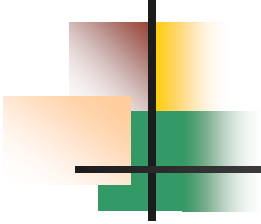
- Normalno konsolidirana glina $C = C_c$

- Prekonsolidirana glina $C = C_r$

- Iz korelacija za gline

$$C_c = 0,009 (w_L(\%) - 10)$$

$$C_c = I_P / 74, \quad C_r = I_P / 370$$



Youngov modul iz korelacija 1

- Iz Cam – Clay modela za gline
 - Nedrenirano stanje

$$E_0 / c_u = \frac{64M'(1+e)(1+\ln OCR)}{C_c(OCR)^{0,8}}, \quad M' = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'}$$

$$E_{50} \approx \frac{1}{2} E_0$$

- Drenirano stanje

$$E' = E \frac{2(1 + \nu')}{3}$$

Youngov modul iz korelacija 2

- Za gline i prašine iz broja udaraca N SPT-a (Stroud 1975)

$$E_{\text{oed}} / p'_a = f_2 N, \quad E' = E_{\text{oed}} \frac{(1 + \nu')(1 - 2\nu')}{1 - \nu'}$$

$I_p(\%)$	f_2
10	8
20	5
30 i više	4,5

I_p – indeks plastičnosti

Youngov modul iz korelacija 3

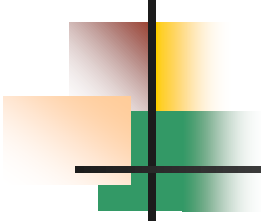
- Raspon za pijeske E' / p_a

Pijesak	Zbijenost (I_D)	Tipično	Piloti
Rahli	0 – 0.4	100-200	275-550
Srednji	0.4 – 0.6	200-500	550-700
Zbijeni	0.6 – 0.8	500-1000	700-1100

- Procjena zbijenosti pijeska iz SPT-a

$$I_D = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{60}}$$

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$



Youngov modul iz korelacija 4

- Za pijeske i šljunke (konzervativno)

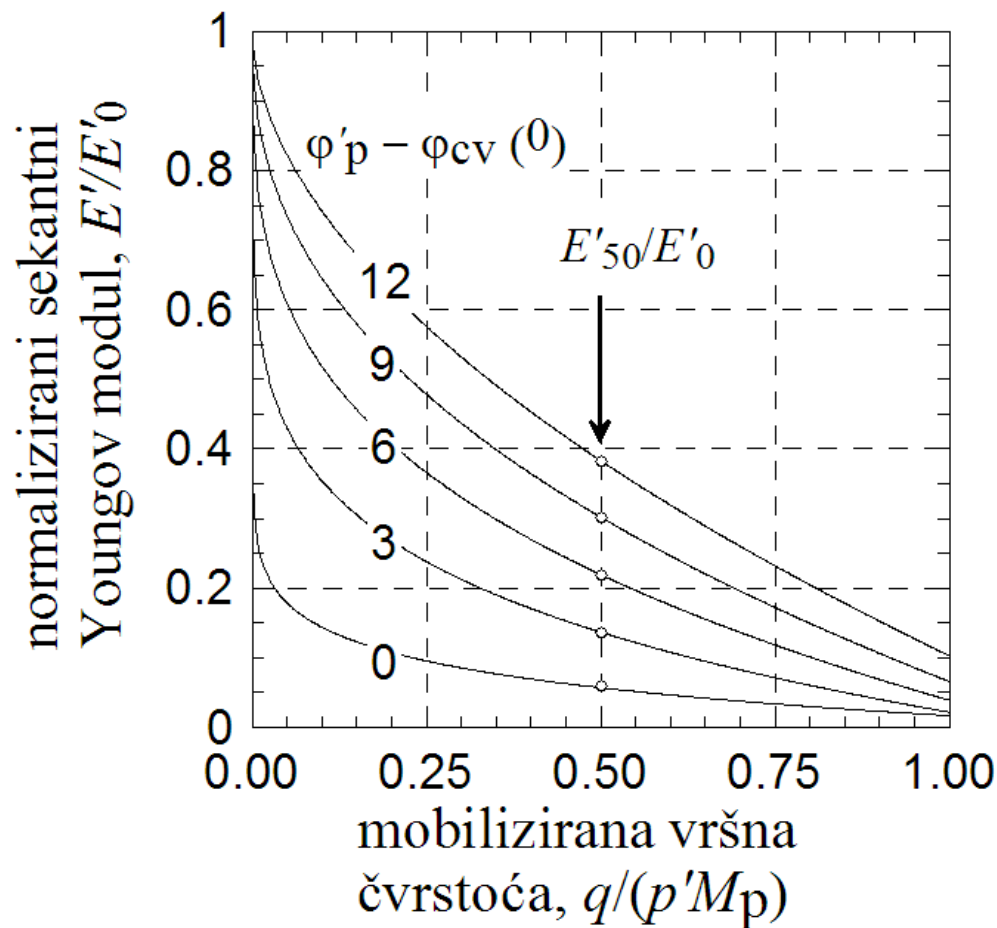
$$E'_{50} / p_a \approx 5N_{60} \quad (\text{za prašinaste pijeske})$$

$$\approx 10N_{60} \quad (\text{za čiste rahle pijeske})$$

$$\approx 15N_{60} \quad (\text{za čiste zbijene pijeske})$$

Youngov modul iz korelacija 5

- Iz modula pri vrlo malim deformacijama (E_0) te razlike vršnog (φ'_p) i kritičnog (φ_{cv}) kuta trenja (Lee, Salgado i Cararro 2004) za pijeske i prašinate pijeske



$$E'_0 = 2G_0(1 + \nu')$$

$$G_0 = \rho v_s^2$$

ρ – gustoća tla

v_s – brzina posmičnih valova

$$M_p = \frac{6 \sin \varphi'_p}{3 - \sin \varphi'_p}$$



Krutost pri vrlo malim deformacijama

- Za vrlo male deformacije iz geoseizmičkih pokusa na terenu (cross-hole, down-hole, refrakcija, SASW, itd.)

$$G_0 = \rho v_s^2$$

- Iz korelacija s SPT

$$G_0 / p_a = (1 \pm 0,5) 120 N^{0,77}$$

- Za deformacije u statičkim uvjetima približno

$$G_{50} \approx (0,05 \text{ do } 0,4) G_0 \quad \left[E'_{50} = 2G_{50}(1 + \nu') \right]$$

Čvrstoća 1

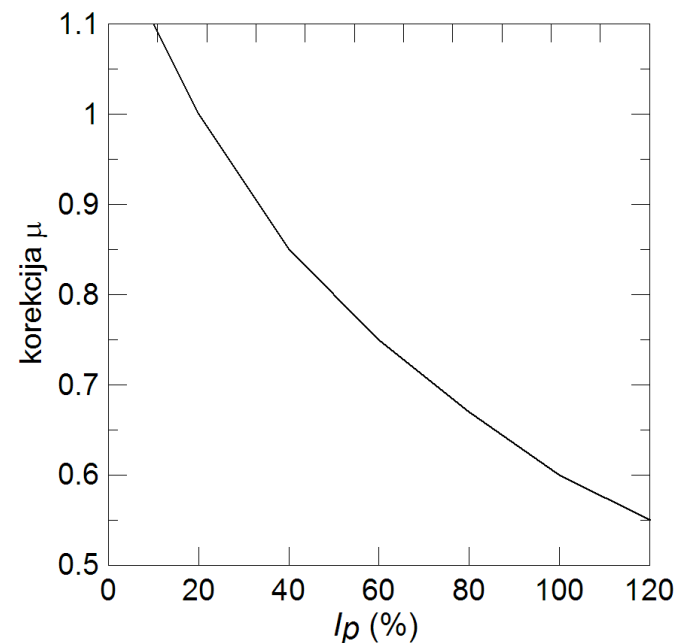
- Sitnozrna tla – nedrenirana čvrstoća
 - Iz troosnog pokusa ili iz aksijalne čvrstoće
$$c_u = q_a / 2, \quad q_a - \text{aksijalna čvrstoća}$$
 - Iz krilne sonde (uz korekciju)

$$c_{u \text{ insitu}} = \mu c_{u \text{ VST}}$$

$$\mu = 1.05 - b \sqrt{I_P (\%)}$$

$$b = 0.015 + 0.0075 \log t_f (\text{min})$$

t_f – vrijeme do sloma u minutama





Čvrstoća 2

- Iz indeksa konzistencije

$$c_u \approx 1,7 \cdot 10^{2I_c}, \quad I_c = \frac{w_L - w_0}{w_L - w_P}$$

- Iz indeksa plastičnosti

$$c_u / \sigma_p = 0,11 + 0,037 I_P \approx 0,23 \pm 0,04$$

- Iz efektivnog kuta trenja iz troosnog pokusa (tc)

$$c_u / \sigma_p = \varphi'_{tc}(0) / 100$$



Čvrstoća 3

- Utjecaj prekonsolidacije

$$c_u / \sigma'_v = (c_u / \sigma_p)(OCR)^{0,8}$$

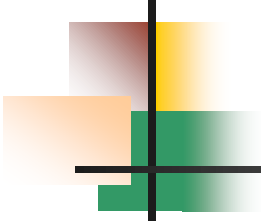
- Utjecaj brzine smicanja

$$c_u / c_{u \dot{\epsilon}_1=1\% / sat} = 1,0 + 0,1 \log(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_1)$$

- Korelacija s SPT

$$c_u / p_a = f_1 N$$

I_p	f_1
10	0.080
20	0.075
30 i više	0.045



Čvrstoća 4

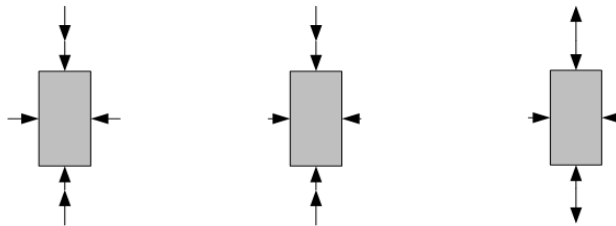
- Korelacija s CPTom

$$c_u / p_a = \frac{q_c - \sigma_v}{N_k}, \quad N_k = 7 \text{ do } 15$$

Čvrstoća 5

■ Utjecaj smjera smicanja

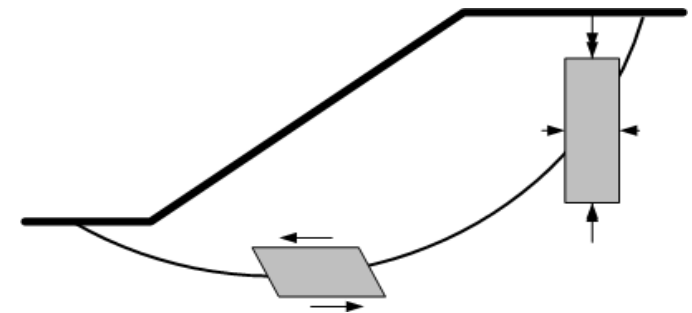
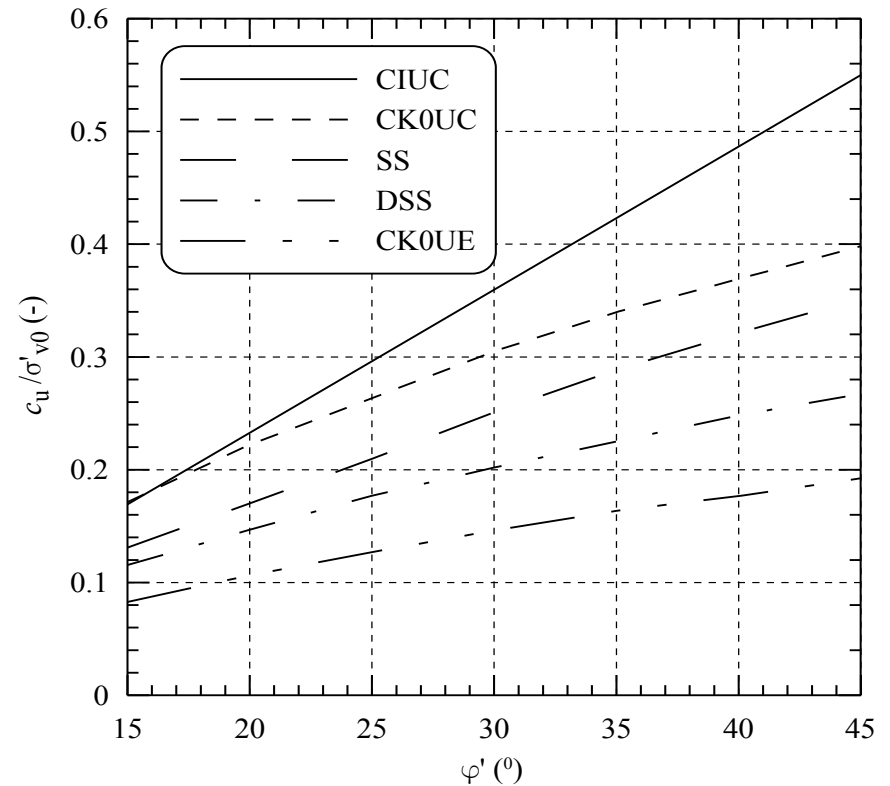
1. CIUC 2. CK0UC 3. CK0UE



4. SS 5. DSS



1. izotropno konsolidirano nedrenirano tlačjenje;
2. anizotropno konsolidirano (K_0) nedrenirano tlačjenje
3. anizotropno konsolidirano (K_0) nedrenirano razvlačenje
4. jednostavno smicanje
5. direktno smicanje





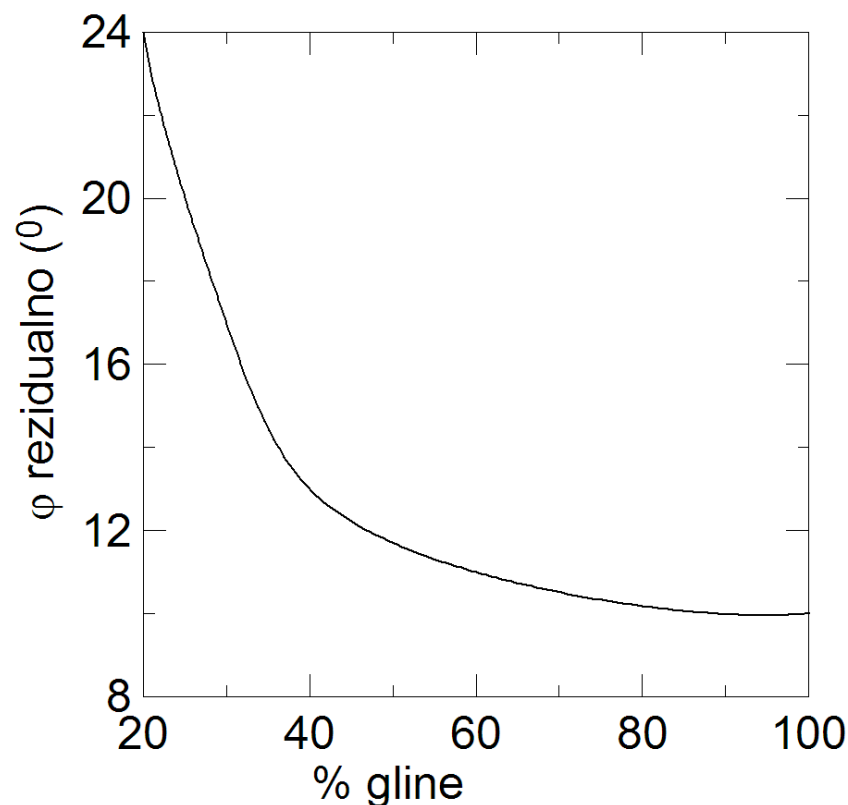
Čvrstoća 6

- Sitnozrna tla – drenirana čvrstoća
 - Vršna (c'_p, φ'_p) samo iz laboratorijskih pokusa smicanja
 - Kritična (φ_{cv}) iz neposrednih mjerenja na prognječenim uzorcima u troosnom uređaju ili procjena iz indeksa plastičnosti (kritična kohezija uvijek je jednaka nuli)

$$\sin \varphi_{cv} = 0,8 - 0,094 \ln I_P$$

Čvrstoća 7

- Rezidualna iz neposrednog mjerenja u uređaju za direktno smicanja (cikličko opterećenje) ili rotacionog direktnog smicanja ili procjenom iz težinskog postotka sadržaja čestica gline (čestice manje od 0.002 mm)





Čvrstoća 8

- Krupnozrna tla (drenirana čvrstoća; nedrenirana rijetko zanimljiva)
 - Vršni efektivni kut trenja iz laboratorijskih pokusa nepouzdan zbog nemogućnosti dobivanja neporemećenih uzoraka
 - Vršni efektivni kut trenja iz SPT-a

$$\varphi_p(^0) = C \operatorname{arctg} \left(\frac{N}{12,2 + 20,3(\sigma'_v / p_a)} \right)^{0,34}$$

$C = 1$ (troosna kompresija), $= 1,2$ (troosna ekstenzija), $= 1,1$ (ravninsko stanje deformacija)



Čvrstoća 9

■ ili

$$\varphi'_p(^0) = 20^0 + \sqrt{15.4(N_1)_{60}}$$

■ Vršni efektivni kut trenja iz CPT-a

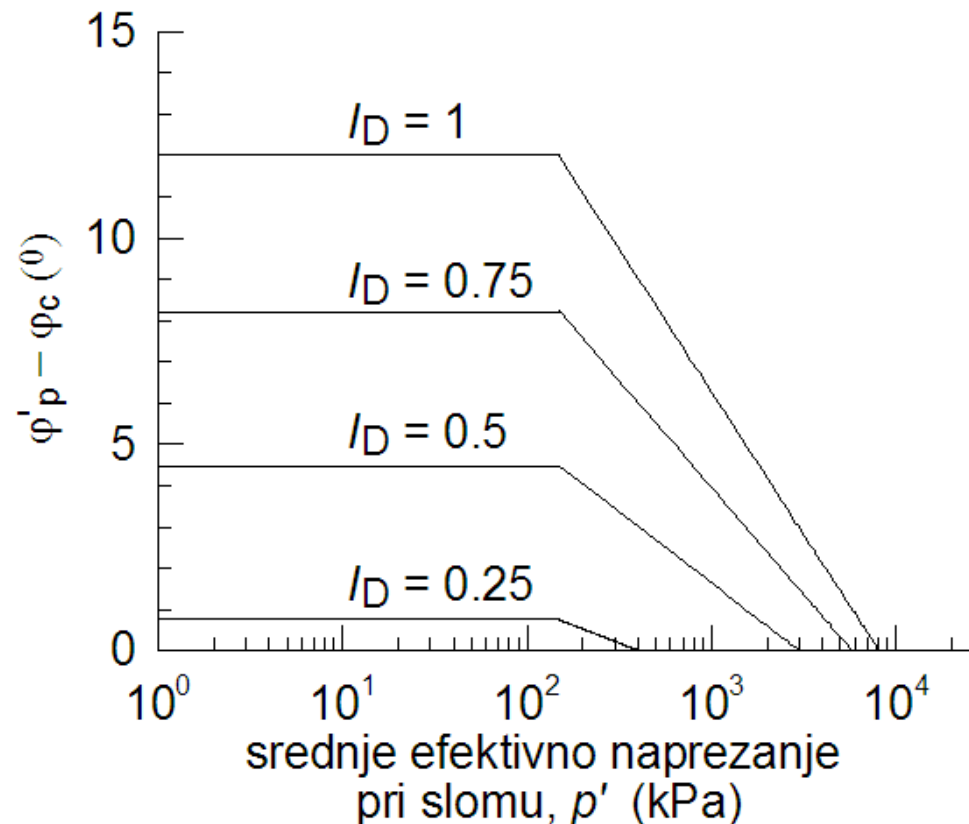
$$\varphi'_p(^0) = C \arctg 0,1 + 0,38 \log(q_c / \sigma'_v)$$

$$\varphi'_p(^0) = C \left(17,6 + 11,0 \log \frac{q_c / p_a}{(\sigma'_v / p_a)^{0,5}} \right)$$

C isti kao u prethodnom izrazu za SPT

Čvrstoća 10

- Iz empiričkih korelacija s indeksom zbijenosti za kvarcne pijeske (Bolton 1986)



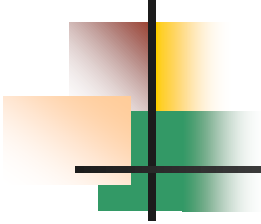


Čvrstoća 11

- Kritični kut trenja – iz neposrednih mjerenja u laboratoriju ili slijedećom procjenom

$$\varphi_{cv} (^{\circ}) = 42^{\circ} - 17R$$

R – zaobljenost (omjer prosječnog polumjera zakrivljenosti površine zrna krupnozrnog tla i polumjera najveće kugle koja se može zrnu opisati); kreće se od 0.1 za uglata do 0.9 za dobro zaobljena zrna



Dilatacija

- U elasto-plastičnom modelu koristiti ju samo u slučaju dreniranih analiza

- Bolton 1986 (pijesci)

$$\varphi'_p - \varphi_{cv} \approx 0.8\psi$$

- Rowe 1962

$$\sin \psi = \frac{\sin \varphi'_p - \sin \varphi_{cv}}{1 - \sin \varphi'_p \sin \varphi_{cv}}$$



Zaključak

- Postoji niz pokusa za određivanje parametara tla; za pojedina vrste tla pogodni su samo neki pokusi;
- Ispitivanja treba prilagoditi vrsti tla i naprezanjima koja se očekuju u danom problemu (ispitivanja prilagoditi utvrđenom problemu, a kako se saznanja upotpunjuju, prilagoditi program istraživanja – istraživanja u više faza);
- Mnogi detalji uređaja i ispitivanja mogu znatno utjecati na rezultate pa o njima svima treba voditi računa i pažljivo ih bilježiti; po mogućnosti pokuse izvoditi po priznatim standardima;
- Sve dostupne podatke treba vrednovati i pogodno prikazati da bi se izvršila suvisla i racionalna sinteza te mogli izabrati **karakteristične vrijednosti parametara tla**;
- Određivanje parametara zahtjevan je i vrlo odgovoran dio rješavanja geotehničkih problema.