

Napredak i poteškoće u projektiranju sidrenih potpornih konstrukcija numeričkim modeliranjem

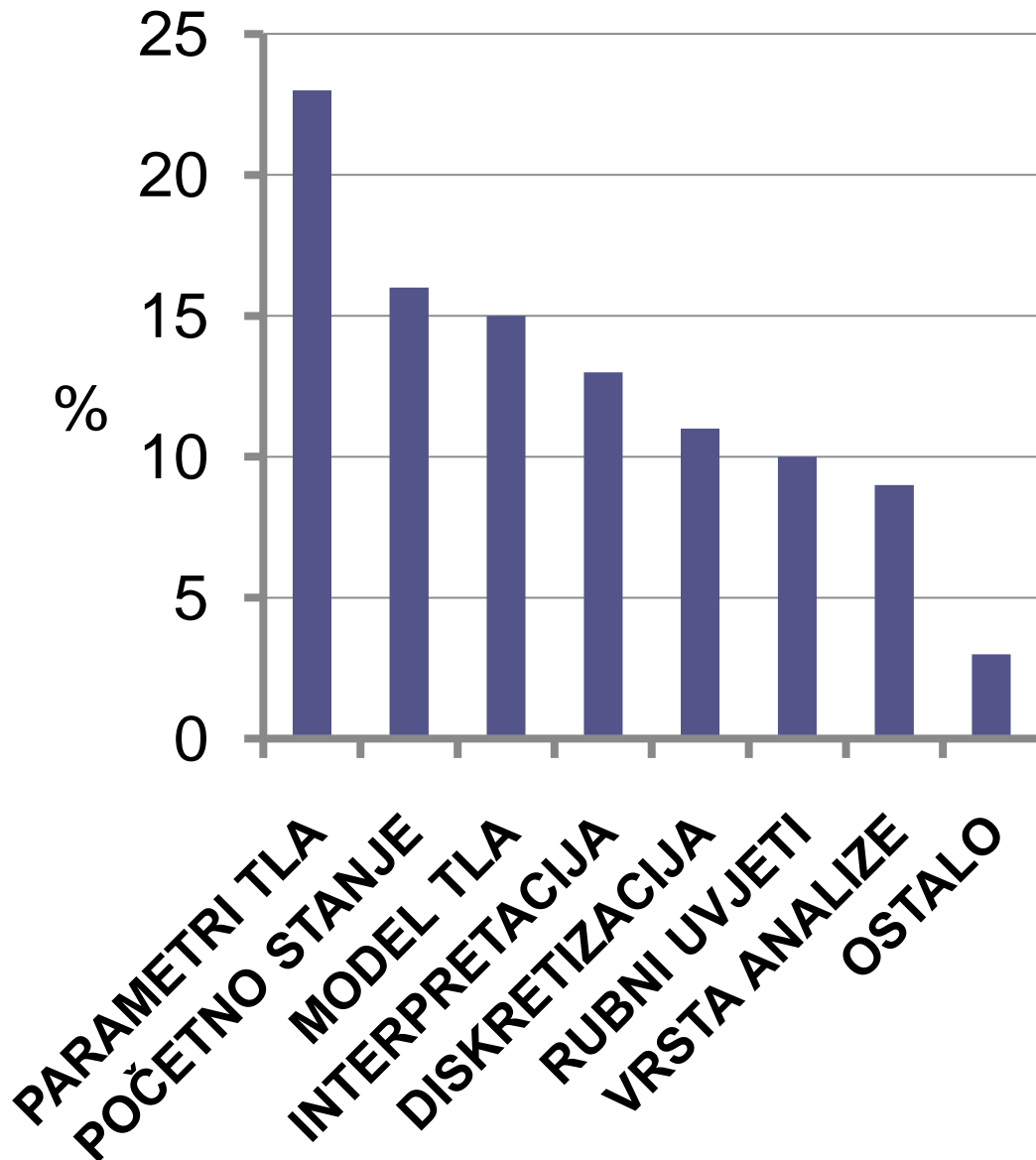


Antun Szavits Nossan
Sveučilište u Zagrebu

9. Šukljetov dan, Nova Gorica, Juni 2008

Numeričko modeliranje u geotehnici danas

- Prednosti
 - Složene konstrukcije i složeni mehanizmi u tlu;
 - Atraktivni modeli ponašanja tla;
 - Pristupačnost, dostupnost, cijena i brzina;
 - Grafički prikaz – brza i atraktivna interpretacija;
- Problemi
 - Odnos MODEL \Leftrightarrow STVARNOST ?
 - PARAMETRI MODELA ?
 - ISKUSTVO
 - . . .



PROBLEMI

(www.geotechnet.org)

UZROCI

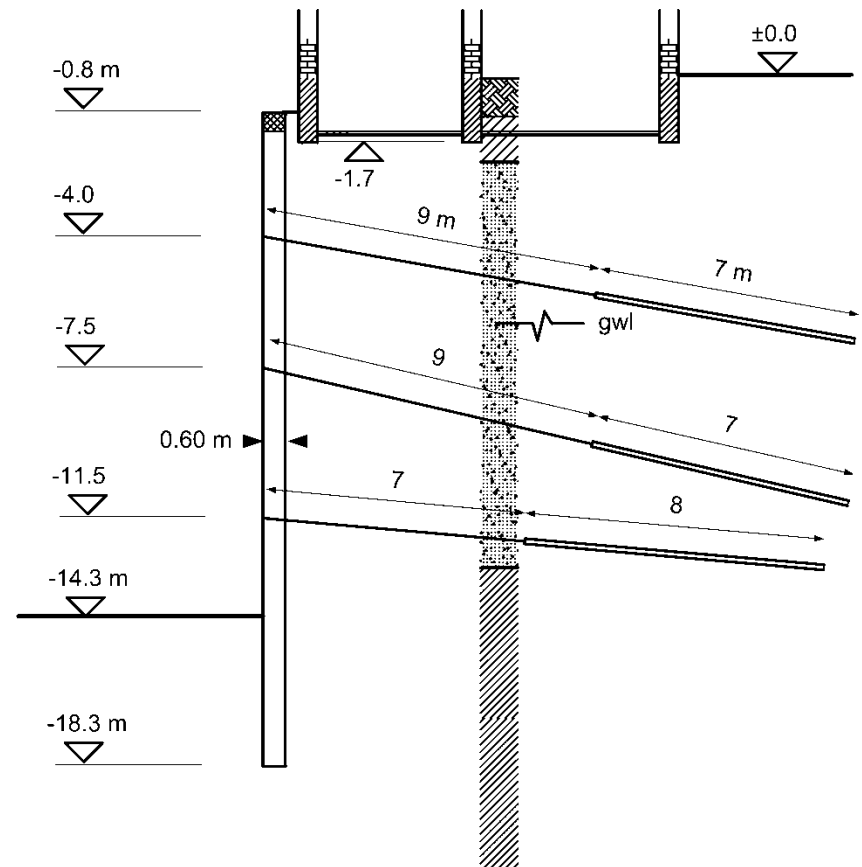
Gaba i dr. (2003):

- neprikladni modeli tla;
- nepouzdana podaci o tlu;
- nedovoljno iskustvo korisnika;
- modeliranje nedrenirane čvrstoće iz efektivnih parametara tla? ...

Sadržaj

- Primjer sidrene potporne konstrukcije
 - konstrukcija, ispitivanje tla
- Model tla
 - HS model programa Plaxis
- Izbor parametri tla i početnog stanja
 - krutost, čvrstoća, prekonsolidacija
- Modeliranje izgradnje i analiza
 - usporedba izračunatih i mjerenih pomaka
- Zaključak
 - mogućnosti i ograničenja

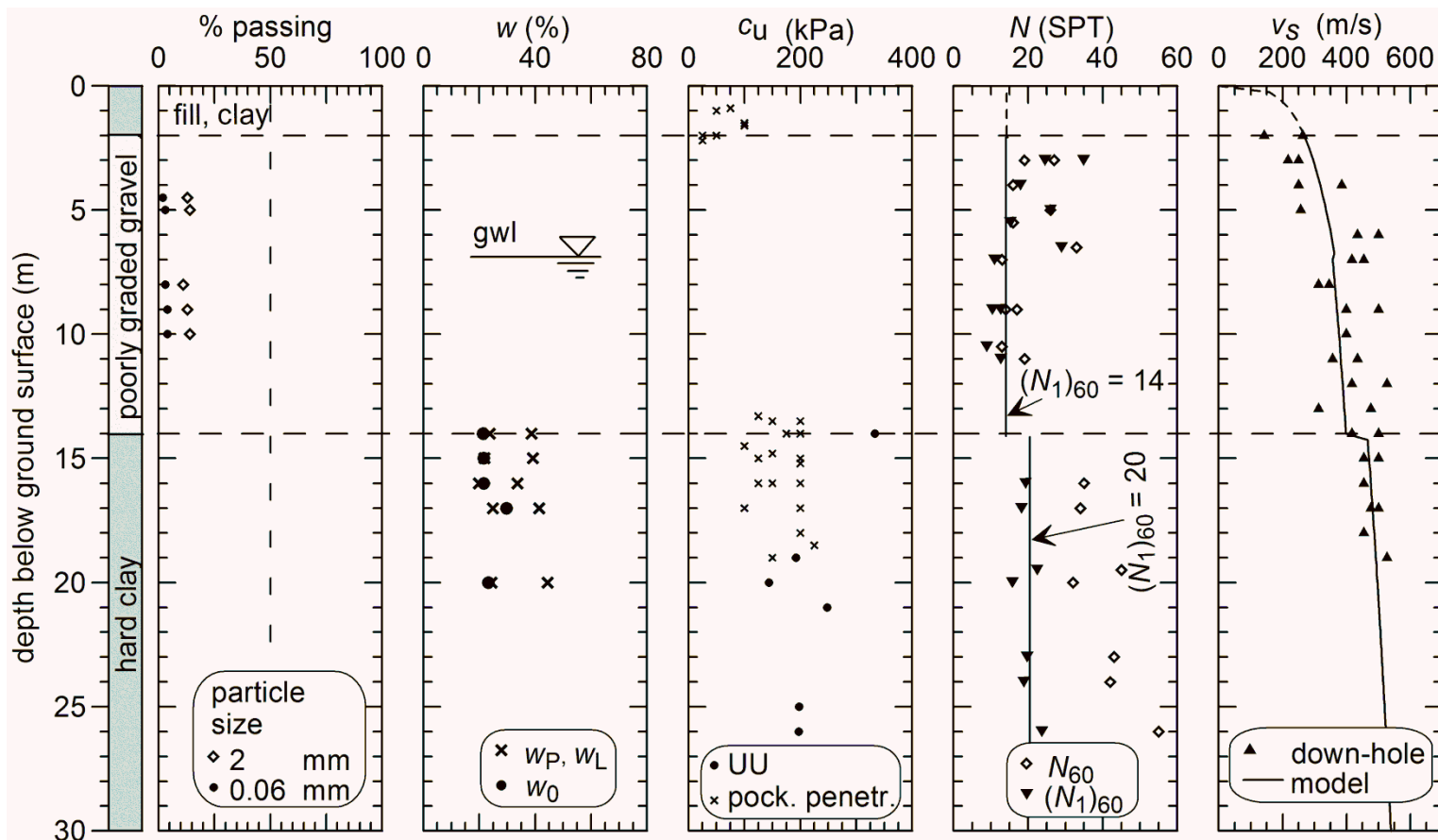
Primjer sidrene potporne konstrukcije u Zagrebu



Ispitivanje tla

- Standardna ispitivanja
 - bušenje s jezgrovanjem, SPT, džepni penetrometar,
 - klasifikacijski parametri (granulacija, prirodna vlažnost, Atterbergove granice, aksijalna čvrstoća, troosni UU pokusi, edometri
- Nestandardna ispitivanja
 - geofizička mjerenja: “down-hole” - v_s
 - troosni CIU pokusi

Prikaz osnovnih podataka o tlu



Izbor osnovnih parametara tla

- Korekcija SPT (Skempton, 1986): $(N_1)_{60} = N_{60} \sqrt{\frac{p_{\text{ref}}}{\sigma'_v}}$

- Izbor karakterisitičnih veličina (EC 7)

- brzine elastičnih valova:

$$v_s = \sqrt{\frac{G_0^{\text{ref}}}{\rho}} \sqrt{\frac{\sigma'_v}{p_{\text{ref}}}}$$

- čvrstoća u šljunku

(Hatanaka & Uchida, 1996):

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

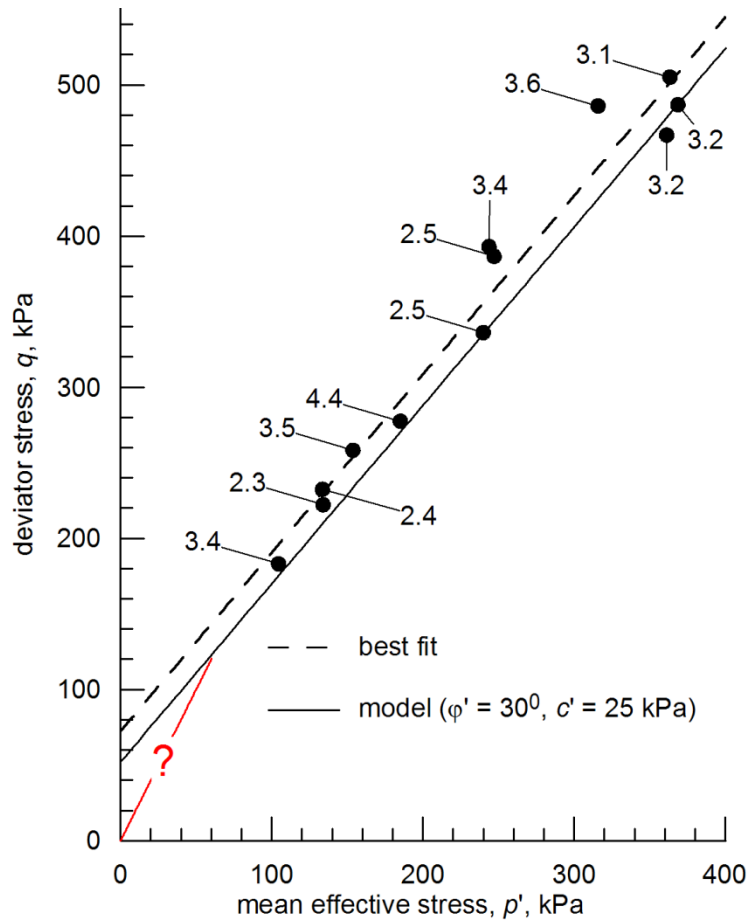
- parametri u donjoj tvrdoj glini iz CIU troosnih pokusa:

$$c', \varphi'$$

- ostali parametri:

ovisni o modelu tla

Troosna ispitivanja tvrde gline (CIU)



Interpretacija efektivnih
parametara čvrstoće :
iz

$$\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{\max}$$

a ne iz

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$$

brojevi na kružićima: vertikalna
deformacija pri $\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_{\max}$

“HSsmall” model tla (Plaxis V8)

- elasto-plastični model s izotropnim očvrščavanjem (posebno u “smjeru” kompresije, a posebno u “smjeru” smicanja)
- dodatno kinematičko očvrščavanje pri smicanju za područje malih posmičnih deformacija

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{\text{ref}} \sin \varphi'} \right)^m$$

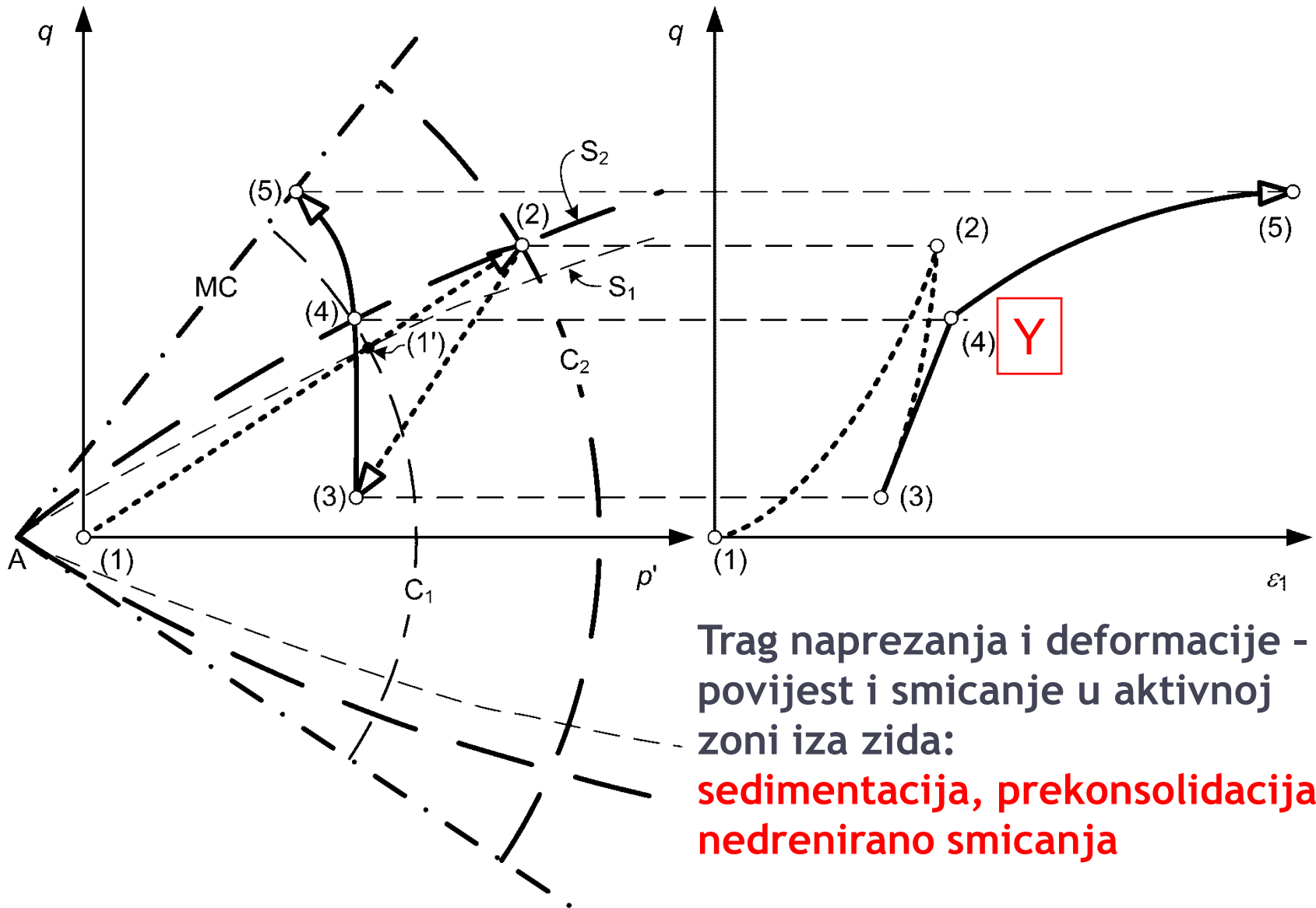
$$\varepsilon_1 \approx \frac{2 - R_f}{2 E_{50}} \frac{q}{1 - R_f q / q_f}$$

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{\text{ref}} \sin \varphi'} \right)^m$$

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

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma'_1 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{\text{ref}} \sin \varphi'} \right)^m$$

$$G_{0.7} = 0.7 G_0 \quad \text{za } \gamma = \gamma_{0.7}$$



Trag naprezanja i deformacije - povijest i smicanje u aktivnoj zoni iza zida:

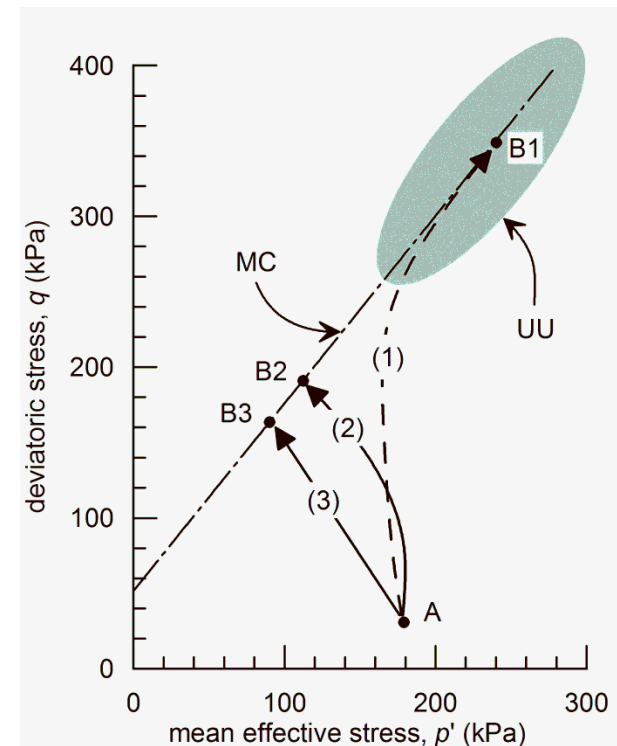
sedimentacija, prekonsolidacija i nedrenirano smicanja

Određivanje parametara modela (1)

- Tvrda glina
 - c' i φ' iz CIU pokusa
 - dilatacija $\psi = 0$
 - (vidi sliku)
 - $OCR \approx 3$: edometar, odnos mjerene nedrenirane čvrstoće iz UU pokusa i nedrenirane čvrstoće normalno konsolidiranog tla, i brzina v_s

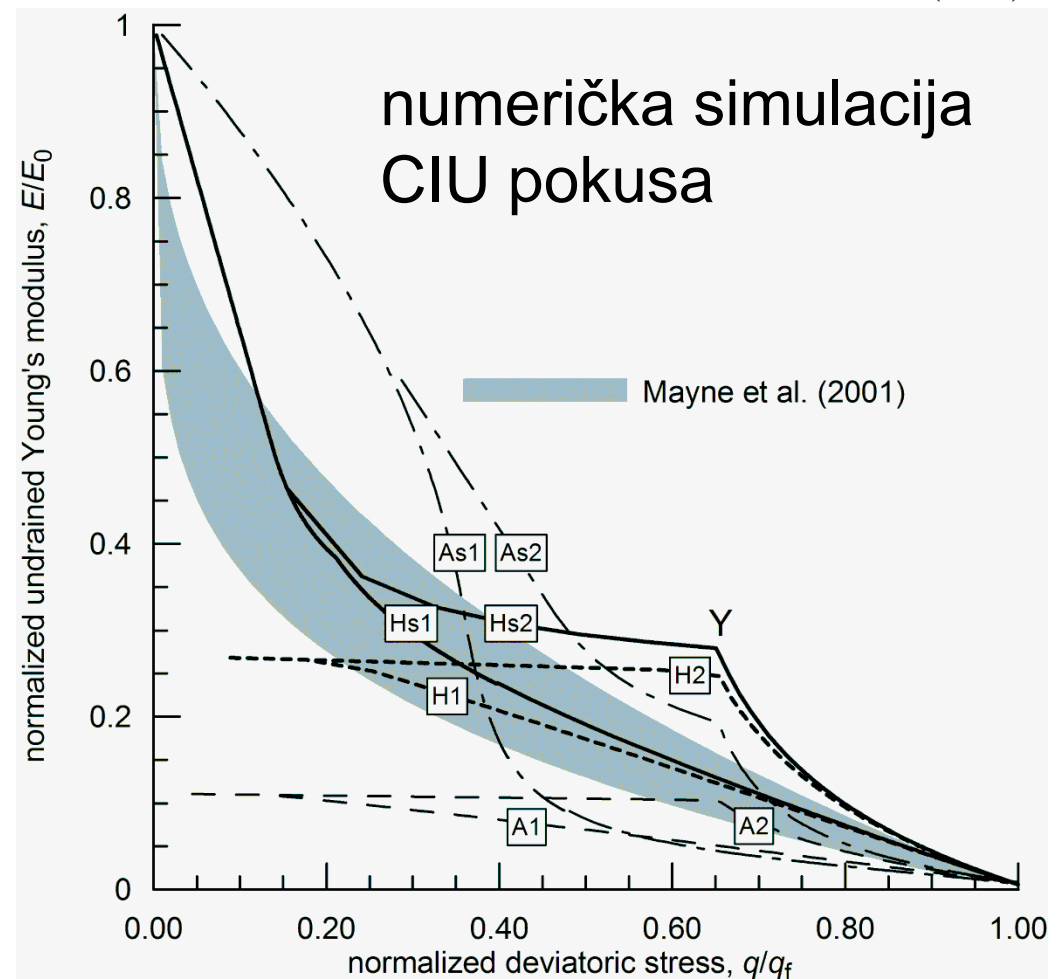
$$\sigma'_p \text{ (kPa)} = 0.106 [v_s \text{ (m/s)}]^{1.47}$$
 - $K_0 \approx 0.87$ iz $K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi'$ i

$$K_0 = K_0^{nc} OCR^{\sin \varphi'}$$



Određivanje parametara modela (2)

- G_o^{ref} iz v_s
- ostali parametri iz krivulje redukcije modula s mobiliziranim posmičnim naprežanjem (Mayne i dr. 2001)
 $E/E_o = 1 - (q/q_f)^{0.3}$
- As1 i As2 pokušaji
- **Hs1 i Hs2 najbolje poklapanje**
- A1 i A2, H1 i H2 redukcija modula bez uvođenja krutosti pri malim deformacijama



Određivanje parametara modela (3)

- Tvrda glina (nastavak)
 - dodatna verifikacija izabranih parametara krutosti: usporedba mjerenih deformacija uzorka u CIU pokusu pri $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{\max}$ koje se kreću od 2.4 % do 4.4 % s izračunatim iz numerički simuliranih CIU pokusa, koji se kreću od 2.8 % do 3.2 %.
- Jednoliki šljunak
 - parametri čvrstoće iz korelacija s SPT-om, a krutosti određeni slično kao i za tvrdu glinu iz brzina elastičnih valova i iz krivulje redukcija modula jer troosnih pokusa nije bilo;
 - dilatacija $\psi = 6^\circ$ određena temeljem korelacija φ_{cv} i zaobljenosti zrna R : kako je za poluzaobljena zrna $R \approx 0.6$, slijedi iz korelacije Santamarine i Choa (2004) $\varphi_{cv} (^\circ) = 42^\circ - 17R$, a iz toga i φ' slijedi ψ .
 - **OCR = 2** pretpostavljen

Određivanje parametara modela (4)

- Ova analiza daje kako za šljunak tako i za tvrdu glinu zanimljive korelacije, koje mogu biti korisne za praksu (ali ih treba provjeravati i za druge slučajeve)

$$\frac{E_{50}^{\text{ref}} \text{ (MPa)}}{(N_1)_{60}} \approx 5 \text{ MPa}$$

$$\frac{G_0^{\text{ref}} \text{ (MPa)}}{(N_1)_{60}} \approx 15 \text{ MPa}$$

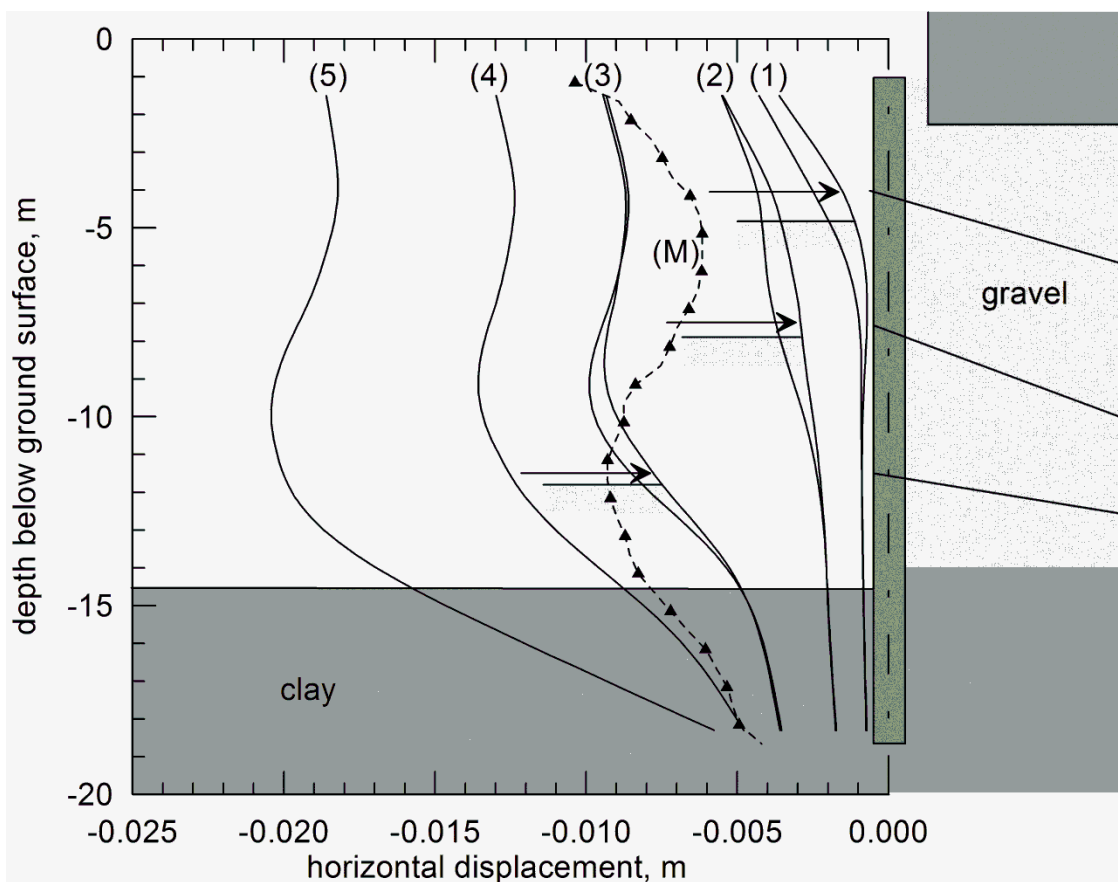
Određivanje parametara modela (5)

- Zaključak o određivanju parametara modela
 - parametri čvrstoće za tvrdu glinu određeni iz kvalitetnih troosnih CIU pokusa, a za šljunak iz SPT-a;
 - parametri krutosti određeni iz brzina širenja elastičnih posmičnih valova i normalizirane ovisnosti Youngovog modula o mobiliziranom posmičnom naprezanju uz dodatnu verifikaciju usporedbom deformacija pri slomu izvedenih i simuliranih troosnih CIU pokusa na tvrdoj glini.

Numerička simulacija izvedbe

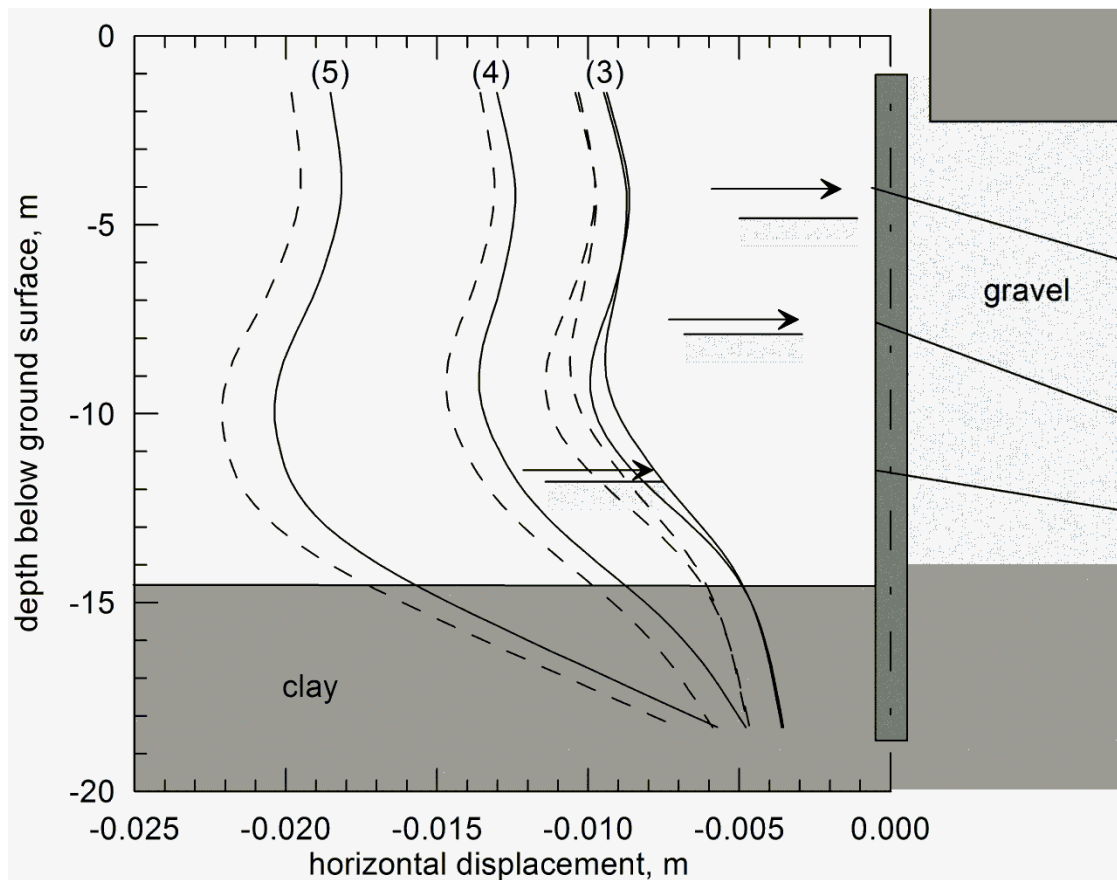
- Numerička simulacija u fazama
 - početno stanje
 - opterećenje susjednom zgradom
 - iskop ispod prvog reda sidara
 - prednaprezanje prvog reda sidara
 - iskop ispod drugog reda sidara
 - prednaprezanje drugog reda sidara
 - iskop ispod trećeg reda sidara
 - prednaprezanje trećeg reda sidara
 - konačni iskop
 - konsolidacija
 - “c/fi” redukcija za određivanje “faktora sigurnosti”

Usporedba numeričkog rješenja i mjerenja pomaka inklinometrom



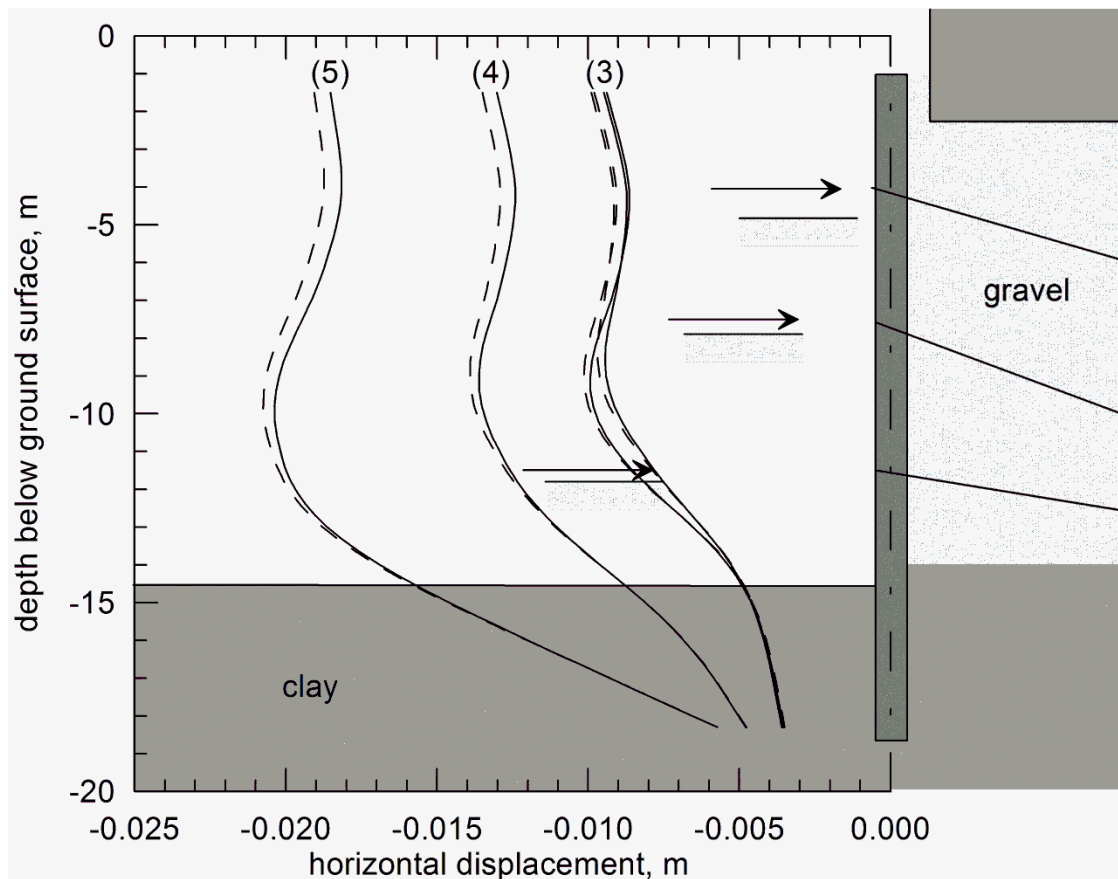
- (1), (2), faze gradnje
- (4) – konačni iskop (nedrenirano stanje gline)
- (5) – konačni iskop (drenirano stanje gline)
- (M) – mjereni pomaci inklinometrom nakon konačnog iskopa

Parametarske analize (1) - utjecaj ponašanja pri malim deformacijama



pune linije –
utjecaj uključen;
crtkane linije –
utjecaj isključen

Parametarske analize (2) - utjecaj OCR na šljunak



pune linije –
OCR = 2;
crtkane linije –
OCR = 1.

Utjecaj na ponašanje
šljunka, za razliku
od ponašanja
gline, je mali!

Zaključak oko usporedbe računa i mjerenja

- Mada se radi o C klasi predviđanja (predviđanje nakon izvedbe jame), parametri su određivani po “geomehaničkoj logici” te nisu prilagođavani opažanjima;
- Obzirom na takve okolnosti, a uzimajući u obzir današnju razinu mogućnosti mehanike tla u predviđanju pomaka tla, moglo bi se zaključiti da je “točnost” predviđanja dobra.

Zaključak

- Provedena je numerička simulacija interakcije sidrene konstrukcije i tla na jednom primjeru iz prakse koristeći najsvremeniji dostupni komercijalni software i rezultate standardnih geotehničkih istražnih radova;
- maksimalni je napor uložen pri izboru parametara modela kako bi se njime što bolje opisalo stvarno ponašanje tla, uzimajući u obzir njegova graničenja; ograničenja modela su očita, posebno pri opisu nedreniranog ponašanja tla;

Zaključak (nastavak 1)

- prikazana analiza traži dubinsko poznavanje svojstava raspoloživog modela tla (rijetko u praksi) te niz provjera kojima se dokazuje da je ponašanje modela u okviru očekivanog ponašanja stvarnog tla;
- analiza traži od korisnika detaljno i široko poznavanje sličnih vrsta tla (rijetko u praksi);
- analiza je vremenski zahtjevna;

Zaključak (nastavak 2)

- analiza pokazuje da je danas moguće relativno dobro opisati ponašanje složenog problema interakcije konstrukcije i tla koristeći suvremeni komercijalni software te rezultate standardnih geotehničkih istražnih radova;
- čak što više, može se reći da suvremeni software omogućuje dublje analize od onih za koje su osposobljeni prosječni inženjeri;

Zaključak (nastavak 3)

- analiza pokazuje vrlo veliku korist od mjerenja brzina posmičnih elastičnih valova na lokaciji, što nije uobičajeno u praksi za takve vrste konstrukcija; treba napomenuti da takva ispitivanja nisu pretjerano skupa;
- potrebne su slične analize na nizu drugih primjera iz prakse da bi se postupak određivanja parametara modela “standardizirao” i postao manje ovisan o subjektivnoj procjeni korisnika;

Zaključak (nastavak 4)

- za očekivati je da će se software i dalje ubrzano usavršavati, dok će se tehnologija ispitivanja tla razvijati znatno sporije;
- u praksi se primjećuje velika očekivanja od suvremenog softwarea, ali je prisutna i opasnost da njegovi korisnici izgube iz vida da korištenje njegovog potencijala zahtijeva i njegovo dubinsko razumijevanje – **software je sredstvo koje je korisno samo ako korisnik dobro razumije čemu ono služi.**

Zahvaljujem na pažnji