

# Suvremeni pristup numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija

Igor Sokolić, Antun Szavits-Nossan

## Ključne riječi

numeričko modeliranje,  
sidrena zaštitna  
konstrukcija,  
naprezanje,  
građevna jama,  
parametri tla,  
HSs model

## Key words

numerical modelling,  
anchored protective  
structure,  
stress,  
foundation pit,  
soil parameters,  
HSs model

## Mots clés

modélisation numérique,  
constructions de  
protection ancrées,  
contrainte,  
fondation,  
paramètres de sol,  
modèle HSs

## Ключевые слова

цифровое моделирование,  
анкерная защитная  
конструкция,  
напряжение,  
строительный котлован,  
параметры грунта,  
модель HSs

## Schlüsselworte

numerisches Modellieren,  
verankerte  
Schutzkonstruktion,  
Spannung,  
Baugrube,  
Bodenparameter,  
HSs Modell

I. Sokolić, A. Szavits-Nossan

Pregledni rad

## Suvremeni pristup numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija

U radu je opisan suvremeni pristup numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija s osvrtom na iskustva u primjeni računalnog programa Plaxis 2D i modela tla s izotropnim očvršćivanjem. Objašnjena su osnovna obilježja u ponašanju tla u dreniranim i nedreniranim uvjetima za naprezanja koja se pojavljuju pri iskopu građevne jame. Prikazan je primjer simulacije sidrene zaštitne konstrukcije i dane su smjernice za strategiju odabira parametara materijala HSs modela tla.

I. Sokolić, A. Szavits-Nossan

Subject review

## Modern approach to numerical modelling of anchored protective structures

A modern approach to numerical modelling of anchored protective structures is presented in the paper, and an overview is given of experience gained in the use of the Plaxis 2D computer program, and soil model with isotropic strengthening. Basic properties of soil in drained and undrained conditions, due to stress occurring during foundation pit excavation, are explained. An example involving simulation of an anchored protective structure is presented, and guidelines for the selection of soil materials for the HSs soil model are given.

I. Sokolić, A. Szavits-Nossan

Ouvrage de synthèse

## L'approche moderne à la modélisation numérique des constructions de protection ancrées

Une approche moderne à la modélisation numérique des constructions de protection ancrées est présentée dans l'ouvrage, et un aperçu est donné de l'expérience gagnée dans l'utilisation du logiciel Plaxis 2D, et du modèle de sol avec le renforcement isotrope. Les propriétés essentielles du sol dans les conditions drainées et non drainées, sous les contraintes causées par l'excavation des fondations, sont expliquées. Un exemple avec simulation d'une construction de protection ancrée est présentée, et les indications pour la sélection des matériaux pour le modèle de sol HSs sont fournies.

И. Соколич, А. Сзавитс-Носсан

Обзорная работа

## Современный подход к цифровому моделированию анкерных защитных конструкций

В работе описан современный подход к цифровому моделированию анкерных защитных конструкций с описанием опыта применения расчетной программы Plaxis 2D и модели грунта с изотропным отвердением. Объяснены основные характеристики поведения грунта в условиях дренирования и при отсутствии дренирования для напряжений, появляющихся при выкопе строительного котлована. Приведен пример симуляции анкерной защитной конструкции, и даны рекомендации по стратегии выбора параметров материалов HSs модели грунта.

I. Sokolić, A. Szavits-Nossan

Übersichtsarbeit

## Zeitgemässer Zutritt zum numerischen Modellieren verankerter Schutzkonstruktionen

Im Artikel beschreibt man einen zeitgemässen Zutritt zum numerischen Modellieren verankerter Schutzkonstruktionen mit Hinblick auf Erfahrungen in der Anwendung des Computerprogramms Plaxis 2D und des Bodenmodells mit isotroper Verfestigung. Erklärt sind die Grundkennzeichen des Betragens des Bodens in drainierten und undrainierten Umständen für Spannungen die beim Aushub der Baugrube auftreten. Ein Beispiel der Simulierung einer verankerten Schutzkonstruktion ist dargestellt und und Richtlinien für die Strategie der Auswahl der Materialparameter des HSs Bodenmodells sind vorgelegt.

Autori: **Igor Sokolić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Antun Szavits Nossan**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb

## 1 Uvod

Proračun sidrenih zaštitnih konstrukcija složen je geotehnički problem u kojem je izrazito naglašen utjecaj međudjelovanja tla i konstrukcije. Klasične metode proračuna stabilnosti opterećene su velikim brojem pretpostavki na temelju kojih se definira raspodjela aktivnog i pasivnog pritiska tla na zid te način određivanja sila u vezama. Pretpostavke i ograničenja ne ovise samo o vrsti tla u kojemu se izvodi zaštitna konstrukcija, već i vrsti zaštitne konstrukcije, što se prvenstveno odnosi na krutost i tip zaštitnog zida (dijafragma, talpe i razne vrste zidova od pilota) te tip, raspored i redosljed ugradnje veza (sidara i razupora) [1], [2], [3]. Klasične metode proračuna uporabljivosti konstrukcije dodatno su opterećene pretpostavkama o krutosti tla (Winklerov koeficijent reakcije podloge) i krutosti sidara koji nisu konstantni za promatrani materijal nego su rezultat interakcije tla i konstrukcije. Unatoč mnogim pretpostavkama i ograničenjima, klasične metode proračuna svakodnevno se primjenjuju u geotehničkom projektiranju radi brzine i jednostavnosti postupka proračuna. Metode su uglavnom kalibrirane na temelju opažanja izvedenih geotehničkih konstrukcija, a to osigurava njihovu pouzdanu primjenu na sličnim geotehničkim konstrukcijama, u sličnim geotehničkim uvjetima. Iskustvo pokazuje da su rezultati proračuna primjenom klasičnih metoda na strani sigurnosti u odnosu na mjerene rezultate, a da su pomaci zaštitnih konstrukcija redovito precijenjeni.

S razvojem graditeljstva svakodnevno se pojavljuju sve složenije geotehničke konstrukcije koje izlaze iz okvira dosadašnjeg iskustva. Time se nameće potreba za razvojem novih metoda proračuna koje bi obuhvatile što više elemenata realnog ponašanja tla i ponašanja konstrukcijskih elemenata te uzele u obzir njihovo međudjelovanje. Među takvim suvremenim metodama prvenstveno se ističe metoda konačnih elemenata razvoj kojih je potaknut velikim napretkom na području numeričkog modeliranja i računalstva te naglim razvojem novih konstitucijskih modela tla započetim 1970-ih godina. Numeričke metode omogućuju sofisticirane analize, kao što je npr. spregnuta konsolidacijska analiza s elasto-plastičnim modelom tla, međutim za njihovu je provedbu nužno detaljno poznavanje numeričkih metoda i teorijske mehanike te prvenstveno teorijske mehanike tla. To je ponekad zanemareno u praksi zbog toga što brošure i upute koje prate komercijalne programe ostavljaju dojam da je dobivanje pouzdanih rezultata jednako jednostavno kao i upravljanje programom, a to nipošto nije istina!

Suvremeni pristup numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija opterećen je nizom problema s kojima se korisnici susreću u njegovoj praktičnoj primjeni. Istraživanja koja su proveli De Vos i Whenman

[4] pokazuju da se među osnovnim elementima numeričkog modeliranja problemi pojavljuju ponajprije pri sljedećem:

- odabiru parametara modela (23 % ispitanika)
- određivanju inicijalnog stanja naprezanja u tlu (16 % ispitanika)
- odabiru konstitutivnog modela tla (15 % ispitanika)
- interpretaciji rezultata simulacije (13 % ispitanika)
- diskretizaciji mreže konačnih elemenata (11 % ispitanika)
- definiranju rubnih uvjeta (10 % ispitanika)
- definiranju vrste proračuna (9 % ispitanika)
- odabiru vrste elemenata modela (5 % ispitanika) i dr. (1 % ispitanika).

Prva su tri elementa suština numeričkog modeliranja pa je stoga zabrinjavajuće da uzrokuju glavni problem u praktičnoj primjeni kod više od 50 % ispitanika. Dodatno je zabrinjavajuća činjenica da korisnici istih numeričkih metoda, koji modeliraju istu geotehničku konstrukciju na temelju istih geomehaničkih istražnih radova, dobivaju vrlo veliko rasipanje rezultata u granicama neprihvatljivim s aspekta projektiranja. Među značajnijim usporednim istraživanjima (engl. *Benchmarking*) ističu se ispitivanja sidrenih zaštitnih konstrukcija u pijesku koje su proveli Schweiger [5] i Wolfersdorff [6].

Velik doprinos razvoju suvremenoga numeričkog modeliranja sidrenih zaštitnih konstrukcija ostvarila su istraživanja na području naprednih konstitucijskih modela tla [7], teorijske mehanike tla [8], ispitivanja tla [9] i opažanja izvedenih zaštitnih konstrukcija [10]. Upravo je uska prožetost navedenih područja glavni preduvjet za provedbu kvalitetnih povratnih, parametarskih i usporednih analiza te ujedno glavni pokretač razvoja suvremenog pristupa modeliranju geotehničkih konstrukcija, ali i razumijevanja realnog ponašanja tla općenito.

Među značajnijim komercijalnim računalnim programima konačnih elemenata široku primjenu u praksi našao je program Plaxis 2D [11]. Model tla s izotropnim očvršćivanjem (Hardening Soil model - HS) [12], koji je dostupan u programu Plaxis, te njegova inačica s povećanom krutošću tla pri malim deformacijama (engl. *Hardening Soil small model* - HSs) [13] pokazali su veliku primjenjivost pri modeliranju krupnozrnatih tla te prekonsolidiranih sitnozrnatih tla. Iz navedenih razloga računalni program Plaxis 2D i HSs model tla često su prisutni i na domaćem tržištu, prvenstveno kod proračuna sidrenih zaštitnih konstrukcija na području grada Zagreba u čijem geotehničkom profilu dominiraju slojevi šljunka i krute gline. Dodatno, u praksi se sve češće provode inklinometarska mjerenja horizontalnih poma-

ka konstrukcija [14], što je omogućilo provođenje kvalitetnih povratnih i parametarskih analiza [15], [16], [17], [18], [19] i otvorilo put sigurnijem i ekonomičnijem projektiranju novih sidrenih zaštitnih konstrukcija.

## 2 Osnovni elementi numeričkog modeliranja

Na temelju velikog broja istraživanja, koja su provedena na području numeričkog modeliranja sidrenih zaštitnih konstrukcija, mogu se izdvojiti određene opće prihvaćene smjernice za definiranje pojedinih elemenata numeričkog modela.

Numerički model sidrene zaštitne konstrukcije sastoji se od elemenata tla, elemenata konstrukcije (zaštitni zid, slobodna i sidrišna dionica sidara) te rubnih uvjeta (kinematički uvjeti spriječenih ili nametnutih pomaka te statički uvjeti vanjskog opterećenja ili sila prednapinjanja u sidrima). Praksa je pokazala da su, s aspekta numeričkog proračuna, trokutasti elementi mreže stabilniji od pravokutnih elemenata, pri čemu bi izdužene i nepravilne višekutne elemente trebalo izbjegavati [4]. Pri uporabi trokutastih elemenata važno je da oni imaju minimalno šest čvorova, kako bi se postigla zadovoljavajuća točnost proračuna, dok se za slučaj kada u proračunu može doći do sloma tla preporučuje upotreba elemenata s više čvorova [11]. Gustoću mreže konačnih elemenata treba prilagoditi modelu tako da je gustoća veća na mjestima koncentracije naprezanja (na dnu zaštitnog zida, uza zid i tijelo sidrišne dionice, na mjestu djelovanja površinskog naprezanja i sl.), a da je u ostalim područjima mreže gustoća manja, kako bi se smanjilo vrijeme proračuna. Optimalnu gustoću za promatrani model potrebno je odrediti povećanjem gustoće mreže do razine gdje daljnje povećanje nema znatan utjecaj na rezultate proračuna [4]. Isto načelo povećanja dimenzija uz kontrolu utjecaja na rezultate vrijedi i za određivanje optimalne veličine modela. Ispitivanja koja su proveli Potts i Zdravković [20] na modelu zaštitne konstrukcije s razuporom u krutoj glini pokazuju da visina modela znatno utječe na slijeganje tla iza zida. Utjecaj je više izražen kod modela tla s linearnom krutošću nego kod nelinearnog modela s većom krutošću pri malim deformacijama, a može se zanemariti za omjer visine modela i širine građevne jame veći od 10. Utjecaj širine modela na slijeganje tla iza zida značajniji je od utjecaja visine modela. Kod modela tla s većom krutošću pri malim deformacijama utjecaj je zanemariv za omjer širine modela i širine iskopa veći od 20, a za linearno elastičan model tek kod omjera većeg od 40. Kempfert i Gebreselassie [21] pokazali su na modelu sidrene zaštitne konstrukcije s tri reda sidara, izvedene u mekoj glini, da širina modela ima zanemariv utjecaj na horizontalnu deformaciju i savijanje zaštitnog zida. Dominantan utjecaj na slijeganje površine terena iza zida i uzdizanje tla na

dnu građevne jame ima visina modela u odnosu na širinu. Zanemariva razlika u rezultatu postiže se za omjer visina modela/širina iskopa te širina modela/širina iskopa veći od 10.

Pri definiranju zaštitnog zida treba voditi računa da njegova debljina može imati utjecaj na rezultate proračuna, što se često zanemaruje kada se zid modelira štapnim linijskim elementima. Potts i Zdravković [20] pokazali su da se kod zida modeliranog volumenskim elementima, zbog deformacije zida pojavljuje trenje na kontaktu s tlom, što rezultira manjim konačnim pomacima konstrukcije i maksimalnim momentom savijanja. Stoga je proračun zidova od talpi ili sekantnih pilota te dijafragmi, uporabom štapnih elemenata, na strani sigurnosti. Štapni se elementi rabe također i za modeliranje zidova od razmaknutih pilota, pri čemu je potrebno definirati efektivnu širinu zida za koju se postiže odgovarajuća osna krutost i krutost na savijanje [11], [20].

Kontakt između zida ili sidrišnog tijela i tla modelira se kontaktnim elementima (engl. *interface*) kojima je moguće reducirati čvrstoću i krutost tla na kontaktu. Istraživanja pokazuju da redukcija krutosti u kontaktnim elementima ima zanemariv utjecaj na rezultate proračuna [20], dok redukcija čvrstoće ima zanemariv utjecaj na aktivni tlak i horizontalni pomak pri dnu zida, blagi utjecaj na momente savijanja te znatan utjecaj na rotaciju i vertikalnu deformaciju zida [22].

Problem definiranja vrste proračuna (drenirani, nedrenirani ili spregnuti konsolidacijski proračun) i početnog stanja naprezanja u tlu te odabira modela tla i pripadnih parametara znatno je složeniji zbog njihove međusobne zavisnosti. Poznato je da idealno elastični model tla (engl. *Linear-Elastic model* – LE) daje izrazito nerealne deformacije zaštitne konstrukcije i okolnog tla, što se očituje u prevelikom izdizanju tla u području iskopa građevne jame i izrazitoj rotaciji donjeg dijela zaštitne konstrukcije prema iskopu [5], [19], [20]. U aktivnom se području pojavljuje nerealno vlačno naprezanje u tlu te preveliko tlačno naprezanje u pasivnom području što se donekle može korigirati uvođenjem Mohr-Coulombova zakona čvrstoće (engl. *Mohr – Coulomb model* – MC) [20]. Međutim MC model tla nema mogućnost opisivanja dilatacije tla što je značajan problem u nedreniranim analizama kod kojih je potrebno modelirati promjenu pornog tlaka zbog posmika. Općenito, glavni trend u suvremenom numeričkom modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija jest korištenje naprednim konstitucijskim modelima tla, koji omogućuju provedbu spregnutih konsolidacijskih analiza uz uporabu istih efektivnih parametara tla te uzimaju u obzir ovisnost krutosti tla o stanju naprezanja, veliku krutost pri malim deformacijama, kinematičko i izotropno očvršćivanje i sl. [1], [4], [5], [7], [15], [17].

### 3 Stanje naprezanja u tlu i tragovi naprezanja

Poradi iskopa građevne jame i ugradnje elemenata sidrene zaštitne konstrukcije dolazi do znatne promjene naprezanja i deformacija u okolnom tlu. S obzirom na karakterističnu promjenu tragova naprezanja, okolno se tlo može podijeliti u sljedeća područja (slika 1.): 1. područje u kojem vertikalna naprezanja ostaju gotovo stalna dok se horizontalna smanjuju zbog iskopa i pomaka zaštitnog zida prema građevnoj jami (aktivno područje); 2. područje u kojem vertikalna naprezanja ostaju gotovo stalna, dok se horizontalna povećavaju zbog djelovanja sila u sidrima; 3. područje u kojem se vertikalna naprezanja smanjuju zbog iskopa, a horizontalna povećavaju uslijed pomaka zida prema tlu (pasivno područje); 4. područje u kojem se vertikalna naprezanja smanjuju zbog iskopa, a horizontalna ostaju gotovo stalna. Tragovi naprezanja u promatranim područjima i točkama modela kreću iz početnog stanja naprezanja koje je u horizontalno uslojenom tlu određeno efektivnom težinom tla  $\gamma'$  i koeficijentom mirnog tlaka  $K_0$ . U sitnozrnatom i krupnozrnatom normalno konsolidiranom tlu, koeficijent  $K_0$  može se dobro odrediti na temelju Jakyeva izraza:

$$K_0 = K_0^{nc} = 1 - \sin(\varphi') \quad (1)$$

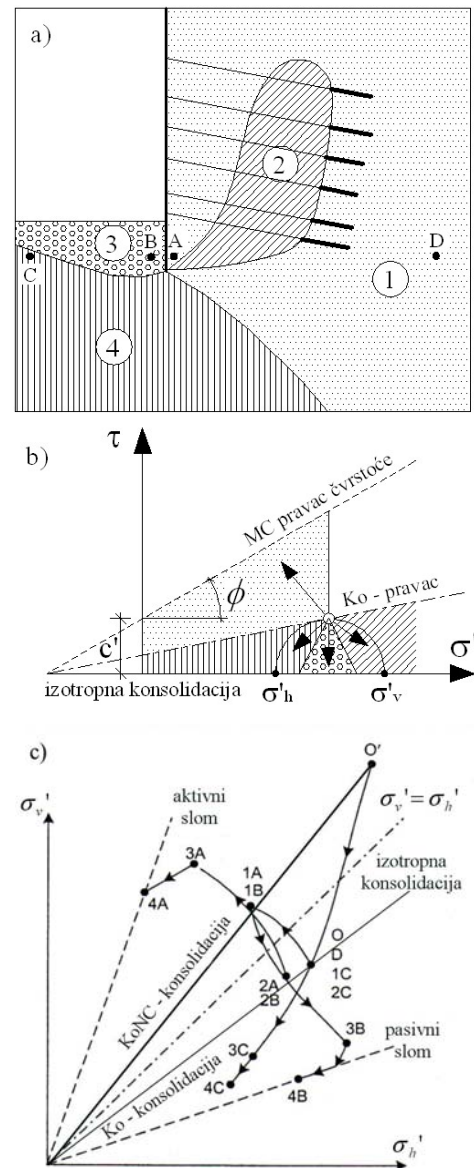
gdje je  $\varphi'$  efektivni kut unutarnjeg trenja tla, a u prekonsolidiranom sitnozrnatom tlu prema izrazu koji su predložili Mayne i Kulhawy [23]:

$$K_0 = K_0^{nc} OCR^{\sin(\varphi')} \quad (2)$$

gdje je OCR koeficijent prekonsolidacije tla koji se može pouzdano odrediti ispitivanjem tla u edometru. Međutim kod izrazito prekonsolidiranih glina za to je potreban vrlo veliki tlak, što se rijetko primjenjuje pri ispitivanju u standardnim geotehničkim laboratorijima. Rezultati istraživanja koje je na takvim glinama proveo Burland [24] pokazuju da vrijednost rasterećenja znatno utječe na koeficijent  $K_0$  međutim vrlo malo na horizontalna efektivna naprezanja u tlu, te da se koeficijent  $K_0$  kreće u rasponu od  $K_0 = K_p$  na površini terena do  $K_0 = 1$  u dubljim slojevima tla. Iako relativno nepouzdana, koeficijenti  $K_0$  i OCR mogu se odrediti i pokusima *in situ* kao što su CPT [25], presiometar te dilatometar [9].

Na slici 1.c prikazani su tragovi naprezanja koji se pojavljuju zbog iskopa građevne jame u izrazito prekonsolidiranoj glini. Za takvo je tlo poznato da vrijedi  $\sigma_h' > \sigma_v'$  (točka O) te da je tlo u stanje prekonsolidiranosti došlo iz normalno konsolidiranog stanja (točka O') uklanjanjem dijela nadsloja (rasterećenje). U slučaju da ugradnja zaštitne konstrukcije podrazumijeva prethodni iskop tla (npr. kod dijafragme ili zida od sekantnih pilota) u točkama uz zaštitni zid, prvobitno dolazi do smanjenja horizontalnog naprezanja (točke 1A i 1B) nakon čega se ono vraća u približno početno stanje (točke 2A i 2B). S napredovanjem iskopa građevne jame trenutno dolazi do

smanjenja horizontalnog naprezanja iza zida (točka 3A) te povećanja naprezanja ispred zida (točka 3B), ali i do smanjenja porednog tlaka zbog pojave procjediivanja podzemne vode (što se ne smije zanemariti i kod slabopropusnih prekonsolidiranih glinovitih materijala). Međutim poredni tlak u prekonsolidiranim glinama, koji se pojavljuje trenutačno nakon iskopa, redovito je manji od onog za konačno stacionarno tečenje, zbog čega u procesu konsolidacije dolazi do dodatne relaksacije efektivnog naprezanja, a to u konačnosti može uzrokovati pojavu aktivnog sloma (točka A4) odnosno pasivnog sloma tla (točka 4B) [1].



Slika 1. a) Područja karakterističnih tragova naprezanja u tlu zbog iskopa građevne jame; b) smjer tragova naprezanja u pripadnim područjima; c) pojava aktivnog i pasivnog sloma uz zaštitnu konstrukciju, u prekonsolidiranoj glini. Rekonstruirano prema [1] i [21]

Složenost i različitost tragova naprezanja jedan je od glavnih uzroka složenosti numeričkog modeliranja sidrenih zaštitnih konstrukcija. Postupak proračuna efektivnih tragova naprezanja izrazito je osjetljiv na početno stanje naprezanja u tlu (slika 1.c) i dodatno je opterećen proračunom pornog tlaka u nedreniranim analizama, što je glavni problem pri odabiru konstitucijskog modela tla mjerodavnog za proračun.

#### 4 Ponašanje tla i odabir matematičkog modela

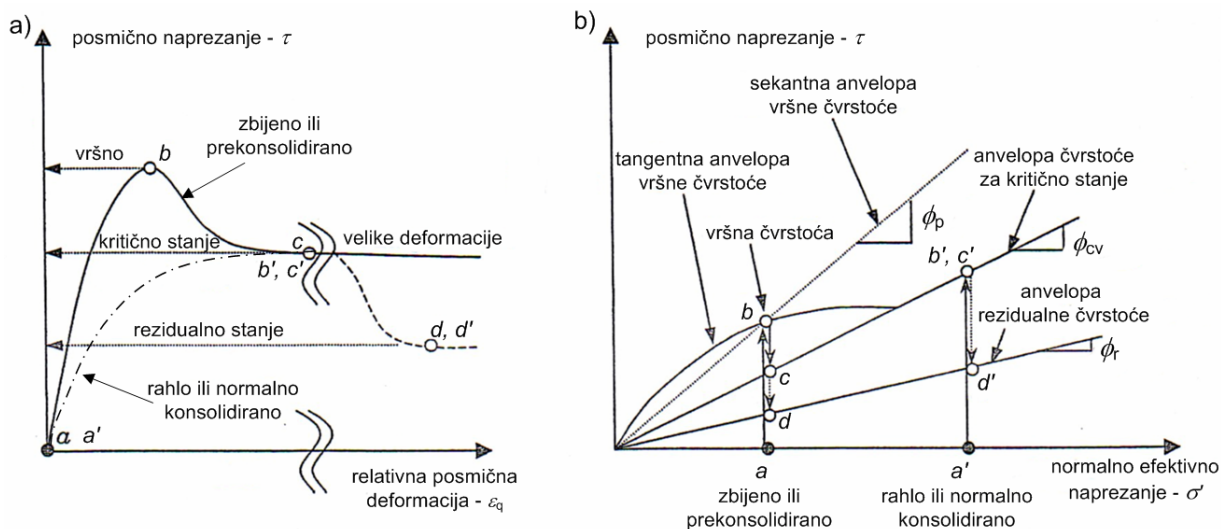
U klasičnom pristupu proračunu sidrenih zaštitnih konstrukcija, koji se temelji na MC modelu tla, potrebno je za kontrolu graničnih stanja nosivosti i uporabljivosti odrediti čvrstoću i srednju krutost tla jedino za konačno stanje naprezanja i deformacija. Pristup proračunu jednak je bilo da se radi o dreniranim ili nedreniranim uvjetima u tlu, pri čemu je potrebno prilagoditi parametre tla uvjetima dreniranosti (drenirane i nedrenirane analize). Međutim postupak proračuna metodom konačnih elemenata provodi se u koracima (postupnim nametanjem rubnih uvjeta) pa je potrebno poznavanje krivulje naprezanje-deformacija pri posmiku i tlaku za proizvoljan raspon te smjer naprezanja i deformacija u tlu, kako bi se konačno ravnotežno stanje moglo proračunati postupcima integracije. Zbog izrazito nelinearnog i plastičnog ponašanja tla te pojave dilatacije karakteristične za zrnate materijale, do danas još uvijek nije razvijen konstitucijski model koji bi opisivao sve elemente realnog ponašanja tla. Pojedini suvremeni modeli tla mogu se, međutim vrlo pouzdano rabiti za opisivanje pojedinih skupina tala. Tako je npr. Cam-Clay model tla našao široku primjenu pri modeliranju ponašanja mekih glina, a HS model tla pri modeliranju pijeska, šljunka i krutih glina [11].

Svaki konstitucijski model tla temelji se prvenstveno na opisivanju krivulje posmično naprezanje-deformacija

koja određuje čvrstoću i krutost tla za proizvoljno stanje naprezanja i deformacija. Na slici 2.a prikazana je krivulja posmično naprezanje-deformacija tla, a na slici 2.b trag naprezanja za posmik pri konstantnom normalnom naprezanju te linije koje određuju čvrstoću tla ovisno o veličini deformacije.

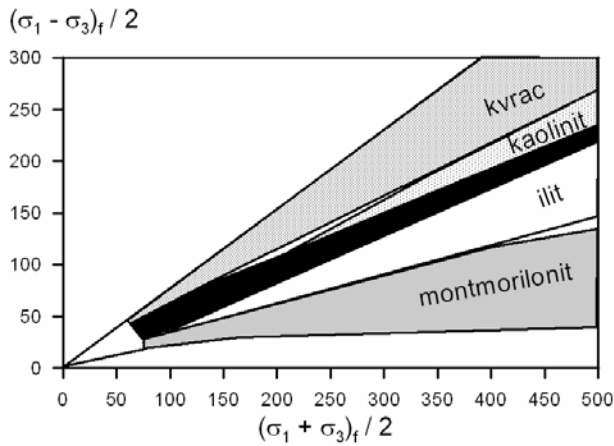
Vršna se čvrstoća pojavljuje kod zbijenih krupnozrnatih i prekonsolidiranih sitnozrnatih tala, kao posljedica „uklještenja“ čestica tla odnosno pojave dilatacije karakteristične za zrnate materijale. Daljnjim posmikom materijal dilatira što rezultira padom čvrstoće sve do postizanja čvrstoće za kritično stanje. U kritičnom se stanju tlo deformira pri konstantnom posmičnom naprezanju bez daljnje promjene volumena. Volumen se u kritičnom stanju može izraziti kritičnim koeficijentom pora  $e_{cv}$ , a njegova vrijednost ovisi o efektivnom izotropnom naprezanju pri kojem se odvija posmik  $p_{cv}$ . Istraživanja pokazuju da se za različite vrste tala, uređeni parovi  $e_{cv} - p_{cv}$  mogu aproksimirati linijom kritičnog stanja [26], [27].

Rahli pijesci i normalno konsolidirane gline zbog posmika dolaze u kritično stanje postupnim očvršćivanjem, pri čemu im se volumen postupno smanjuje. Daljnjim posmikom glinovitih materijala nakon kritičnog stanja dolazi do usmjeravanja čestica gline u smjeru plohe posmika što dodatno reducira čvrstoću do konačne vrijednosti koja se naziva rezidualnom čvrstoćom. Na slici 2.b može se vidjeti da se čvrstoća za kritično stanje i rezidualna čvrstoća mogu opisati Moh-Coulombovim pravcem čvrstoće, dok je anvelopa vršne čvrstoće krivulja čiji oblik ovisi o vrsti tla (slika 3.). Hvorslev [28] je na temelju edometarskog dijagrama i stupnja prekonsolidacije gline definirao plohu vršne čvrstoće za prekonsolidirane gline, a Bolton [29] je na temelju relativnog indeksa zbijenosti i pripadnog kuta dilatacije definirao plohu vršne čvrstoće za pijeske (slika 4.).

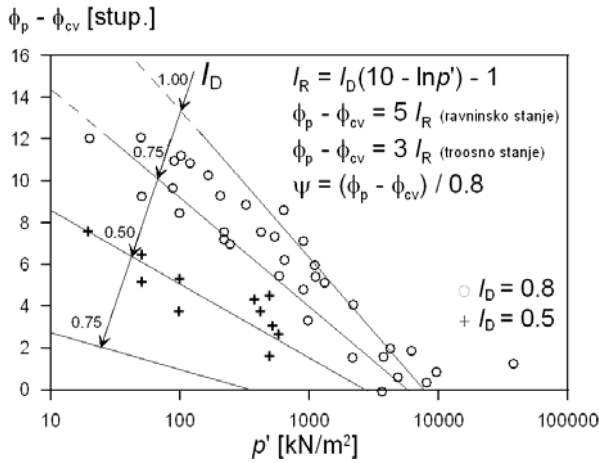


Slika 2. Vršna, kritična i rezidualna čvrstoća tla prema Michellu [8]





Slika 3. Efektivna vršna čvrstoća tla za čiste minerale gline te za kvarc, prema Michellu [8]



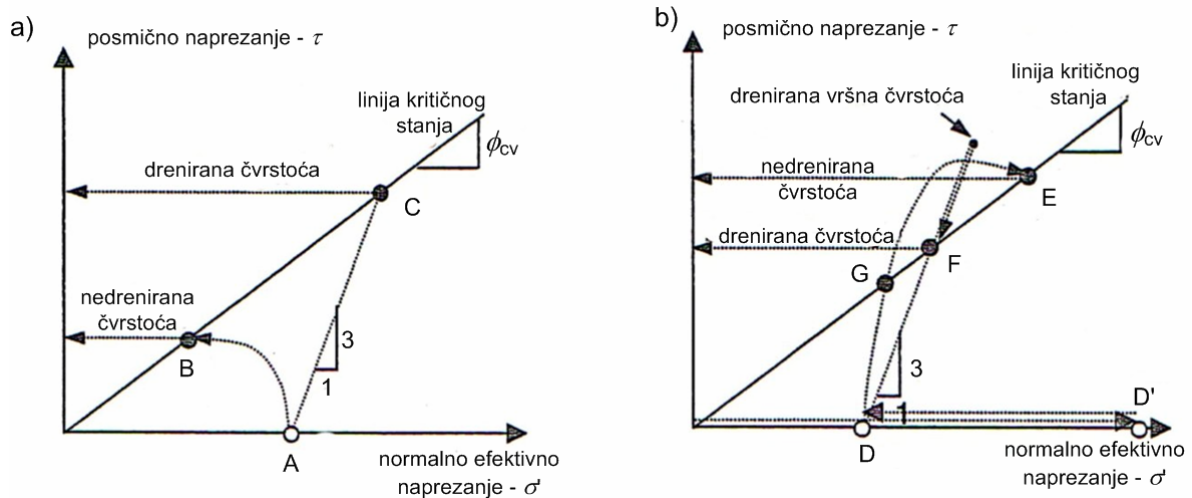
Slika 4. Vršna čvrstoća pijeska ovisno o relativnom indeksu zbijenosti i razini izotropnog naprezanja, prema Boltonu [29]

Oblik anvelope vršne čvrstoće prvenstveno proizlazi iz dilatacijskog svojstva tla. Ista pojava uzrokuje promjenu pornog tlaka pri posmiku tla u nedreniranim uvjetima

jer je u tim uvjetima spriječena mogućnost promjene volumena. S promjenom pornog tlaka mijenjaju se i efektivna naprezanja u tlu što može dovesti do povećanja odnosno smanjenja čvrstoće u nedreniranim uvjetima. Na slikama 5.a i 5.b shematski su prikazani tragovi naprezanja troosnog posmika gline u dreniranim i nedreniranim uvjetima za različiti stupanj prekonsolidacije. Poznato je da normalno konsolidirane gline postižu veću čvrstoću u dreniranim uvjetima posmika (točka C) nego u nedreniranim uvjetima (točka B), dok kod prekonsolidiranih gline vrijedi obrnuto (točke F i E). Oblik krivulje posmika gline također ovisi o stanju prekonsolidacije i uvjetima dreniranosti uzorka.

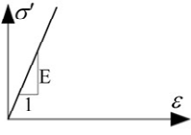
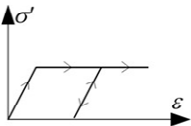
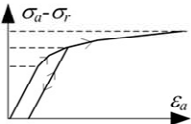
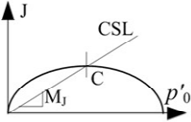
Pri posmiku prekonsolidiranih gline dolazi do redukcije vršne čvrstoće odnosno do krhkog sloma u dreniranim, ali i u nedreniranim uvjetima. Pojava krhkog sloma u nedreniranim uvjetima posebno je izražena kod prekonsolidiranih gline kod kojih se uslijed sušenja ili dugotrajnoga cikličkog opterećenja pojavljuju pukotine (tzv. raspucane gline, [8]). Problem određivanja nedrenirane čvrstoće u prekonsolidiranim raspucanim zagrebačkim glinama detaljnije je opisan u [15].

Za tlo je karakteristično da s povećanjem opterećenja dolazi do postupnog očvršćivanja materijala. Posljedica očvršćivanja jest da se tlo ponaša znatno krucije te približno linearno-elastično u području rasterećenja odnosno ponovnog opterećenja. Rubne vrijednosti koje omeđuju dano područje u polju naprezanja i deformacija nazivaju se plohama popuštanja i sastavni su element suvremenih konstitucijskih modela tla. Primjer takvog ponašanja jasno je izražen na rezultatima edometarskog pokusa na glini kod koje se krutost može dobro aproksimirati koeficijentima kompresije i rekompresije u dijagramu  $e - \log \sigma'_p$ , a ploha popuštanja određena je tlakom prekonsolidacije  $\sigma'_p$ . Suvremeni konstitucijski modeli tla redovito definiraju



Slika 5. Drenirana i nedrenirana čvrstoća gline prema Michellu [8]: a) meke gline, b) krute gline

Tablica 1. Konstitucijski modeli tla

MODEL	temeljna krivulja	elementi ponašanja tla	nedostatci	vrsta modela (primjena)
LINEARNO ELASTIČNI		- linearno elastično ponašanje	- neograničena čvrstoća - nema pojave dilatacije - jedinstvena krutost za opterećenje / rasterećenje - zavisnost volumenske i posmične krutosti	- LE model (Plaxis) - Hooke <b>(gruba kontrola uporabivosti) (monolitne stijene)</b>
IDEALNO ELASTO-PLASTIČNI		- linearno elastično ponašanje do sloma - jedinstvena ploha sloma - jedinstvena dilatacija pri slomu	- jedinstvena krutost za opterećenje / rasterećenje - jedinstvena krutost ovisno o stanju napreznja i deformacija	- Mohr-Coulomb MC (Plaxis) - Von Mises - Druker-Prager <b>(gruba kontrola nosivosti)</b>
OČVRŠĆA-VAJUĆI		- posmično očvršćivanje - redukcija krutosti ovisno o stanju deformacija - ovisnost početne krutosti o stanju napreznja	- nedostaje redukcija vršne čvrstoće - nedostaje kritično stanje - dodatna pravila za ponašanje pri rasterećenju	- Hardening soil HS (Plaxis) - BRICK model - NOVA model <b>(pijesci, šljunci, krute gline)</b>
MODEL KRITIČNOG STANJA		- kritično stanje - izotropno očvršćivanje - redukcija vršne čvrstoće	- kritično stanje	- Cam-Clay (Plaxis) <b>(meke gline)</b>

dva zasebna sustava ploha popuštanja koji kontroliraju ponašanje tla: zbog posmika te uslijed čiste promjene volumena. U tablici 1. prikazani su neki od konstitucijskih modela tla, koji se često primjenjuju u geotehničkoj praksi, s osnovnim elementima opisivanja realnog ponašanja tla te pripadnim područjem primjene.

### 5 Hardening soil small model tla

Hardening soil model tla (HS), dostupan u računalnom programu Plaxis, originalno je razvijen za opisivanje realnog ponašanja pijeska [12]. U verziji v.7 programa model je proširen za modeliranje ostalih vrsta tala, a u verziji v.8 dodatno je proširen za opisivanje ponašanja tla pri malim deformacijama (HSs) [13]. Osnovni su elementi HSs modela tla: ovisnost krutosti o stanju napreznja; razvoj plastičnih deformacija za primarni posmik; slom tla prema Mohr-Coulombovu zakonu; pojava dilatacije; razvoj plastičnih deformacija za primarnu kompresiju; elastično ponašanje pri rasterećenju i ponovnom opterećenju; veća krutost pri malim deformacijama; nelinearno elastično ponašanje u području malih deformacija [11], [13].

Osnovna ideja u formulaciji HSs modela tla je hiperbolna veza između vertikalne deformacije  $\sigma_1$  i posmičnog napreznja  $q$  u dreniranom troosnom pokusu posmika (slika 6.):

$$-\varepsilon_1 = \frac{q}{2E_{50}(2-R_f)(1-qR_f/q_f)} \quad (2)$$

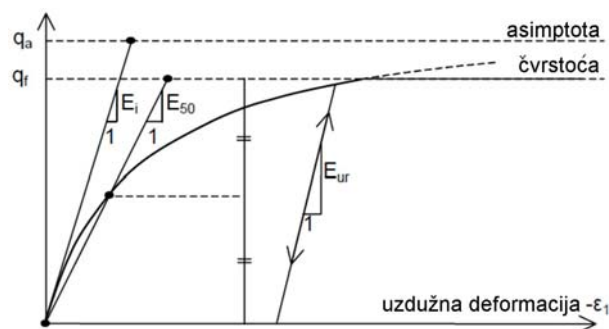
gdje je  $R_f$  koeficijent sloma (maksimalna vrijednost posmičnog napreznja  $q_f$  podijeljena s asimptotskom vrijednošću  $q_a$ ),  $E_{50}$  (Youngov modul elastičnosti ovisan

o glavnom napreznju) i  $q_f$  (maksimalno posmično napreznje) definirani izrazima (3) i (4):

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (3)$$

$$q_f = (c \cot \varphi - \sigma'_3 \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}) \quad (4)$$

gdje je  $E_{50}^{ref}$  referentna krutost koja odgovara referentnom napreznju  $p^{ref}$ ,  $\sigma'_3$  najmanje glavno napreznje,  $m$  koeficijent ovisnosti krutosti o napreznju, a  $c$  i  $\varphi$  su parametri čvrstoće.



Slika 6. Krivulja napreznje-deformacija za HS model tla prema [11], [12]

Krutost tla pri rasterećenju / ponovnom opterećenju  $E_{ur}$ , volumenska krutost  $E_{oed}$  te posmična krutost pri malim deformacijama  $G_0$  definirani su izrazima:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (5)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_1 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (6)$$

$$G_0 = E_0^{ref} \left( \frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (7)$$

gdje je  $\sigma'_1$  najveće glavno naprezanje.

Uz navedene parametre model zahtijeva definiranje parametara karakterističnih za sve vrste modela, kao što su jedinična težina tla  $\gamma$  i koeficijenti vodopropusnosti  $k_x$  i  $k_y$ , te manje poznate parametre, koeficijent dilatacije  $\psi$  i prag posmične deformacije  $\gamma_{0,7}$  ( $\gamma_{0,7} \approx 10^{-5}$  za pijeske).

Iz izraza (2) do (7) proizlazi da krutost i čvrstoća tla u svakom koraku simulacije iskopa građevne jame ovise o stanju naprezanja  $\sigma'_1$  i  $\sigma'_3$  u pripadnoj točki mreže konačnih elemenata. Kako je već naglašeno u poglavlju 2., vrlo je važno definirati početno stanje naprezanja u tlu ( $K_0$ -procedura u programu Plaxis) te ovisno o početnoj krutosti tla u profilu odrediti referentne parametre HSs modela. Primjer određivanja referentnih parametara krutosti za potrebe iskopa sidrene zaštitne konstrukcije na području grada Zagreba dan je na slici 7.b, a detaljnije je objašnjen u [19].

Unatoč velikom broju navedenih mogućnosti i prednosti HSs modela tla, potrebno je istaknuti i njegova ograničenja i nedostatke. HSs model tla nema mogućnost opisivanja redukcije čvrstoće odnosno krhkog sloma, čemu treba posvetiti posebnu pažnju pri proračunima u kojima se koristi vršna čvrstoća tla (na način da se kontroliraju deformacije tala). Navedeni nedostatak prisutan je kod zbijenih i prekonsolidiranih tla u dreniranim uvjetima, ali i kod prekonsolidiranih glina u nedreniranim uvjetima.

U nedreniranim uvjetima treba obratiti posebnu pozornost na iznos parametra dilatacije  $\psi$  zbog njegova značajnog utjecaja na trag naprezanja i nedreniranu čvrstoću (slika 5.). Za slučaj kada je  $\psi > 0$  nedrenirana čvrstoća teži u  $\infty$ , a za slučaj kada je  $\psi < 0$  teži u 0. Navedeno može dati nerealne rezultate pri proračunu globalne stabilnosti zaštitne konstrukcije metodom redukcije parametara čvrstoće ( $\varphi - c$  analiza).

HSs model tla ne zasniva se na teoriji kritičnog stanja, iz čega proizlazi da čvrstoća, krutost i dilatacija ne ovise o promjeni 'volumena' odnosno koeficijenta pora tla. Iz navedenog razloga potrebno je parametre tla prilagoditi zbijenosti te kontrolirati promjenu volumena u proračunu.

## 6 Sidrene zaštitne konstrukcije na području grada Zagreba

Početak izvođenja zahtjevnijih sidrenih zaštitnih konstrukcija na području grada Zagreba veže se uz izgradnju zgrade INA-Naftaplina, trgovačkog centra

Esplanade, centra Branimir te podzemne garaže na Iblerovu trgu. Prvi proračuni konstrukcija bazirali su se na klasičnim metodama proračuna [30] i [31], a usporedno s razvojem numeričkih metoda počinju se primjenjivati suvremeni računalni programi, FLAC [32] te u najnovije vrijeme Plaxis 2D [14] do [19].

U geotehničkom profilu na području grada Zagreba dominiraju slojevi šljunka i krute gline u podlozi, karakteristični za aluvijalno područje rijeke Save. Istražni radovi, koji se učestalo provode u praksi, uglavnom obuhvaćaju osnovna laboratorijska ispitivanja (fizikalne karakteristike tla te ispitivanja u uređaju za direktni posmik, edometar ili troosni pokus) te terenska ispitivanja, uglavnom SPT pokus, a u novije vrijeme i mjerenje brzine posmičnih valova (SASW, *down-hole*, *cross-hole*). Primjer karakterističnoga geotehničkog profila tla, proračuna i mjerenja zaštitne konstrukcije te pripadnih parametara HSs modela tla prikazani su na slici 7. i opisani u radu [15]. Na temelju prikazanih ispitivanja moguće je okvirno procijeniti parametre HSs modela tla.

Za određivanje nedrenirane čvrstoće  $c_u$  i krutosti gline  $E$  u praksi se rabe razne korelacije prema broju udaraca SPT-a čija je pouzdanost često vrlo upitna. Stroud je pokazao da se za krute gline navedeni parametri mogu relativno pouzdano odrediti na temelju broja udaraca SPT-a korigiranog prema standardnoj energiji zbijanja  $N_{60}$  te indeksa plastičnosti gline  $I_p$ , uz primjenu sljedećih izraza:

$$c_u = f_1 N_{60} \quad (8)$$

$$E = f_2 N_{60} \quad (9)$$

gdje je  $f_1$  koeficijent koji ovisi o indeksu plastičnosti gline i kreće se u rasponu od 4 do 6 za  $I_p$  u rasponu od 10 do 70 %, a  $f_2$  koeficijent koji dodatno ovisi o mobilizaciji čvrstoće  $q/q_f$  i kreće se u rasponu od 1 do 2 za  $q/q_f = 0,5$  [33].

Efektivni parametri čvrstoće gline mogu se pouzdano odrediti u uređaju za izravni posmik te u troosnom uređaju ili procijeniti ovisno o vrsti minerala gline (slika 3.).

Na temelju normaliziranog broja udaraca SPT-a  $(N_1)_{60}$ , npr. prema Skemptonu [34]:

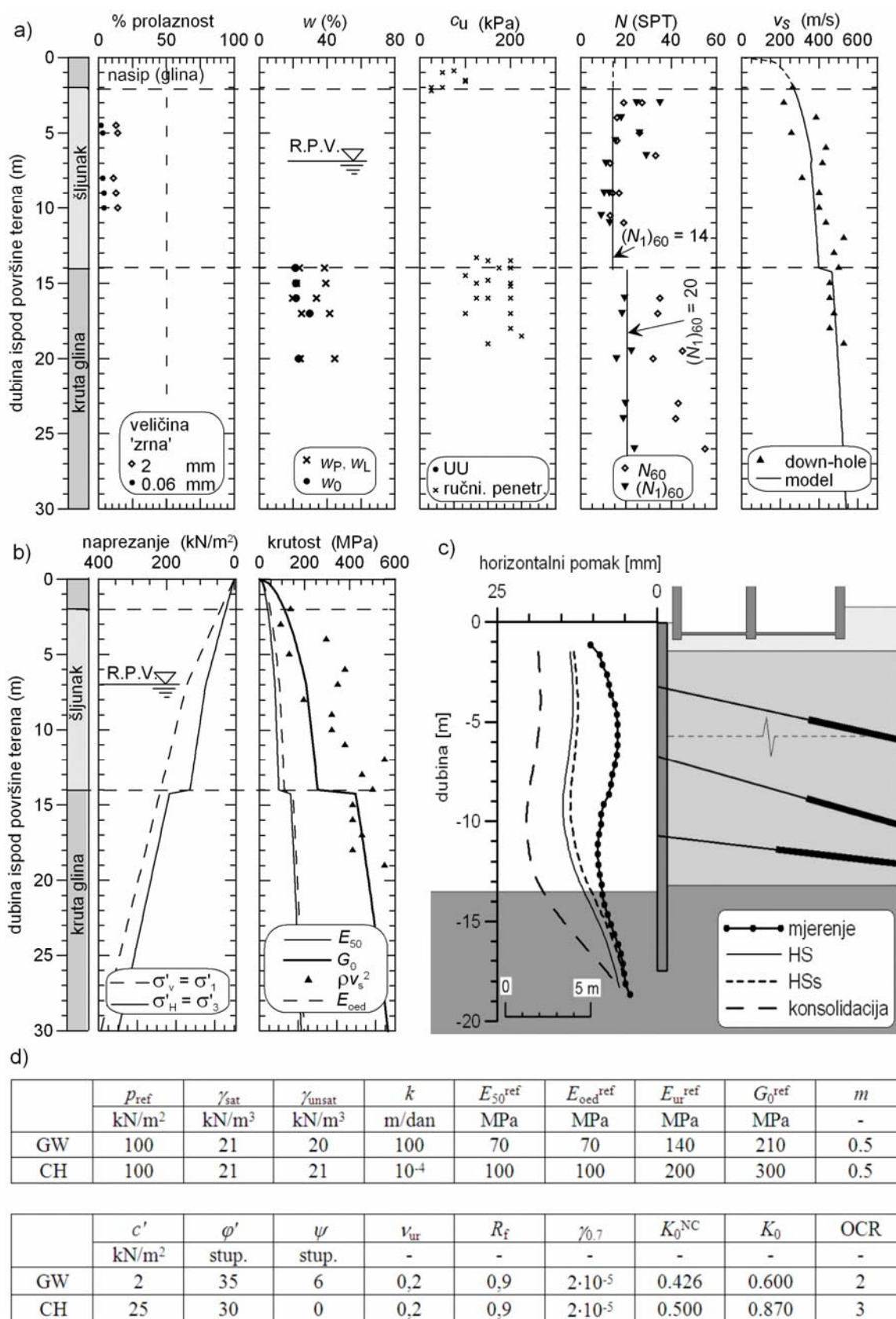
$$(N_1)_{60} = N_{60} \sqrt{p^{ref} / \sigma'_v} \quad (10)$$

gdje je  $\sigma'_v$  vertikalno efektivno naprezanje u tlu, može se procijeniti vršna čvrstoća za šljunke, prema izrazu koji su predložili Hatanaka i Uchida [35]:

$$\varphi'_p = 20^\circ + \sqrt{15.4(N_1)_{60}} \quad (11)$$

te krutost šljunka prema izrazu sličnom kao za gline (9).





Slika 7. Lokacija Radnička cesta a) geotehnički profil tla; b) početno stanje naprezanja i krutosti u tlu; c) poprečni presjek konstrukcije i

Početno stanje naprezanja u tlu može se proračunati na temelju prethodno definiranih izraza za  $K_0$  (1) i (2) te jedinične težine tla koja se pouzdano određuje u laboratoriju. Koeficijent prekonsolidacije gline OCR može se odrediti ispitivanjem tla u edometru. Pri određivanju koeficijenta  $K_0$  za gline treba imati na umu preporuku prema Burlandu (poglavlje 3.). Zbog starosti i geološke prošlosti aluvijalnih naslaga rijeke Save moguće je očekivati koeficijent prekonsolidacije krute gline u podlozi OCR  $\approx 3$ , ali i sloja šljunka OCR  $\approx 2$ , na što ukazuju povratne analize na izvedenim zaštitnim konstrukcijama [15] i [17].

Krutost tla pri malim deformacijama može se odrediti ispitivanjem brzine širenja posmičnih valova u tlu  $v_s$  (slika 7.) uporabom izraza za linearno-elastični materijal:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (12)$$

$$E_0 = 2G_0(1 + \nu) \quad (13)$$

gdje je  $G_0$  početni posmični modul,  $\gamma$  gustoća tla,  $E_0$  početni Youngov modul elastičnosti, a  $\nu$  Poissonov omjer. Ispitivanja pokazuju da se omjer krutosti  $E_{50}^{\text{ref}} / E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$  kreće u rasponu 2 do 5,  $E_0^{\text{ref}} / E_{50}^{\text{ref}}$  u rasponu 5 do 10, dok je  $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} / E_{50}^{\text{ref}}$  približno 1 [11], [21]. Parametarske analize provedene na privremenoj sidrenoj zaštitnoj konstrukciji od čeličnih talpi [19] ukazuju na činjenicu da je za kvalitetnu prognozu pomaka konstrukcije najvažnije dobro procijeniti parametar krutosti  $E_{50}$ , dok je utjecaj parametara  $E_0$  i  $E_{\text{ur}}$  u navedenim rasponima manje značajan. Slično se može primijetiti i na sidrenoj zaštitnoj konstrukciji s dijafragmom [15]. Općenito, povratnim se analizama dobivaju nešto veći parametri krutosti tla od očekivanih prema klasičnom pristupu [15].

Na temelju početnog stanja naprezanja u tlu i početne krutosti određuju se referentni parametri krutosti i koeficijent ovisnosti krutosti o naprezanju  $m$  (slika 7.b). Parametar  $m$  kreće se u rasponu od 0,5 (za šljunke) do 1,0 (za gline), a referentne vrijednosti krutosti mogu se procijeniti primjenom izraza prema Szavits-Nossanu [15]:

$$E_{50}^{\text{ref}} [\text{MPa}] = 5 \cdot (N_1)_{60} \quad (14)$$

$$G_0^{\text{ref}} [\text{MPa}] = 15 \cdot (N_1)_{60} \quad (15)$$

Parametar dilatacije  $\psi$  može se procijeniti za šljunak na temelju zbijenosti šljunka i izotropnog naprezanja uporabom izraza prema Boltonu (slika 4.). Kod gline treba imati na umu da parametar  $\psi \neq 0$  ima znatan utjecaj na trag naprezanja u nedreniranim uvjetima te u konačnosti na nedreniranu čvrstoću gline [15], [36]. Za prekonsolidirane gline preporučuje se upotreba  $\psi = 0$  što je na strani sigurnosti.

## 5 Zaključak

U radu je prikazan suvremeni pristup modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija koji se temelji na detaljnom poznavanju realnog ponašanja tla i zahtijeva primjenu suvremenih metoda ispitivanja mehaničkih i fizičkih karakteristika tla. Prikazani su glavni problemi koji se pojavljuju pri modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija, a koji proizlaze prvenstveno iz složenosti tragova naprezanja, što se pojavljuju u tlu pri iskopu te potrebe za poznavanjem ponašanja tla za proizvoljno stanje i smjer naprezanja i deformacija. Objasnjena je i osjetljivost proračuna na početno stanje naprezanja u tlu te prije svega na uvjete dreniranosti. Prikazani su osnovni elementi suvremenoga konstitucijskog modela tla HSs modela tla dostupnog u računalnom programu Plaxis 2D za projektiranje geotehničkih konstrukcija. Navedene su njegove mogućnosti te glavne prednosti zbog kojih je našao široku primjenu pri modeliranju sidrenih zaštitnih konstrukcija na području grada Zagreba.

Na temelju iskustva, koje proizlazi iz povratnih i parametarskih analiza provedenih na mjerenim zaštitnim konstrukcijama, dane su glavne smjernice za odabir parametara modela za šljunak i prekonsolidirane gline. Međutim važno je istaknuti da predložene korelacije treba prihvatiti samo kao grube smjernice, a proračunske parametre odrediti primjenom suvremenih geotehničkih ispitivanja tla te ih kontrolirati mjerenjima konstrukcija tijekom izgradnje i upotrebe.

## LITERATURA

- [1] Gaba, A. R.; Simpson, B.; Powrie, W.; Beadman, D.: *Embedded retaining walls - guidance for economic design*. London: CIRIA C580, 2003.
- [2] Twine, D.; Roscoe, H.: *Temporary propping of deep excavations - guidance on design*. London: CIRIA C517, 1999.
- [3] German Society for Geotechnics: *Recommendations on Excavations*. Ernst & Sohn, Berlin, 2003.
- [4] De Vos, M.; Whanman, V.: *Workpackage 3 - Innovative design methods in geotechnical engineering*. Background document to part 2 of the final WP3 report on the use of finite element and finite difference methods in geotechnical engineering. Geotechnet <http://www.geotechnet.org>, 2006.
- [5] Schweiger, F. H.: *Benchmarking in geotechnics 1*. Report No. CGG\_IR006\_2002. Computational Geotechnics Group, Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graz University of Technology, Austria, 2002.
- [6] von Wolffersdorff P. A.: *Feldversuch an einer Spundwand in Sandboden: Versuchergebnisse und Prognosen*. Geotechnik 17(2), 73-83, 1994.
- [7] Potts, D. M.; Axelsson, K.; Grande, L.; Schweiger, H.; Long, M.: *Guidelines for the use of advanced numerical analysis*. London: Thomas Telford, 2002.
- [8] Mitchell, J. K.; Soga, K.: *Fundamentals of Soil Behavior* (Third Edition ed.). Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

- [9] Mayne, P. W.; Christopher, B.R.; DeJong, J.: *Manual on Subsurface Investigations*. Publication No. FHWA NHI-01-031, Washington, DC: National Highway Institute, Federal Highway Administration, 2001.
- [10] Dunicliff, J.: *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1993.
- [11] Brinkgrave, R. B.; Swolfs, W. M.; Engin, E.: *Plaxis 2D 2010*. Delft: Plaxis bv. P.O. Box 572, 2010.
- [12] Schanz, T.; Vermeer, P. A.; Bonnier, P. G.: *The hardening soil model - formulation and verification*. Plaxis Symposium "Beyond 2000 in Computational Geomechanics". Amsterdam: Balkema, 1999.
- [13] Benz, T.: *Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences*. PhD Thesis. Stuttgart: Institute of Geotechnics, University of Stuttgart, 2007.
- [14] Sokolić, I.; Plepelić, G.: *Retaining wall movements due to deep excavation in Zagreb*, Int. Geotech. Conf. Geotechnical Challenges in Megacities, Moscow, Russia, Vol.3, 951-957, 2010.
- [15] Szavits-Nossan, A.: *Advances and uncertainties in the design of anchored retaining walls using numerical modeling*, Acta Geotechnica Slovenica 5 (1), 2008.
- [16] Sokolić, I.; Vukadinović B.: *Soil parameter analysis based on inclinometer measurements of sheet pile displacement*. 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, Vol. 4, 2007.
- [17] Szavits-Nossan, A.; Sokolić, I.; Plepelić, G.: *Design of anchored retaining structures by numerical modeling*, 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt. Vol. 3, 2009.
- [18] Tomac, I.; Marić, B.: *Deep excavation case histories in the city of Zagreb*. 13th Danube-European conference on geotechnical engineering, Ljubljana, Slovenia, 2006.
- [19] Sokolić I.: *Sheet pile wall analysis by computer program Plaxis using different constitutive models for soil*. International Geotechnical Conference Development of Urban Areas and Geotechnical Engineering, Saint Petersburg, Vol. 1, 2008.
- [20] Potts, D. M.; Zdravković, L.: *Finite element analysis in geotechnical engineering - Application*. London: Thomas Telford, 2001.
- [21] Kempfert, H. G.; Gebreselassie, B.: *Excavations and Foundations in Soft Soils*. Springer, Berlin, 2006.
- [22] Freiseder, M. G.: *Ein Beitrag zur numerischen Berechnungen von tiefen Baugruben in weichen Boden*. Gruppe Geotechnik Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Heft 3. 1998.
- [23] Mayne, P. W.; Kulhawy, F.H.: *K<sub>0</sub>-OCR relationships in soil*. Journal of Geotechnical Engineering, 108 (GT6): 851-872. 1982
- [24] Burland, J. B.; Simpson, B.; St John, H. D.: *Movements around excavations in London Clay*. Proc 17 Euro conf soil mechanics and foundation eng, vol 1, 1979.
- [25] Lunne, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M.: *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. Blackie Academic and Professional, London UK, 1997.
- [26] Roscoe, K. H.; Schofield, M. A.; Wroth, M. A.: *On the yielding of soils*. Géotechnique, 8 (1), 22-53, 1985.
- [27] Jefferies, M.; Been, K.: *Soil liquefaction - A critical state approach*. Oxon: Taylor & Francis, 2006.
- [28] Hvorslev, M. J.: *Physical components of the shear strength of saturated clays*, Proc ASCE Research Conference on the Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, CO, pp. 169-273, 1960.
- [29] Bolton, M. D.: *The strength and dylatancy of sands*, Géotechnique, Vol.36, No. 1, 1986.
- [30] Škacan, B.; Verić, F.; Szavits-Nossan, A.: *Retaining structure for the open excavation of Esplanade center*. Geotehnika prometnih građevina, Novigrad, Croatia, Vol. 1, 1994.
- [31] Šilhard, V.; Verić, F.; Ivšić, T.: *Protection of deep excavation for the "Branimir" Center*. 3rd Conference of the Croatian Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Geotechnics through Eurocode 7, Hvar, Croatia, 2002.
- [32] Szavits-Nossan, A.; Kovačević, M.S.; Szavits-Nossan, V.: *Modeling of an anchored diaphragm wall*. Proc. Internatl. FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics: FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics. Minneapolis, 1999.
- [33] Clayton, C.R.I.: *The Standard Penetration Test (SPT): Methods and Use*. Report 143, CIRIA, London, 1995.
- [34] Skempton, A.W.: *SPT procedures and the effects in sand of overburden pressure, relative density, particle size, aging, and overconsolidation*. Géotechnique, Vol.36(3), 1986.
- [35] Hatanaka, M.; Uchida, A.: *Empirical correlation between penetration resistance and effective friction of sandy soil*. Soils & Foundations, Vol. 36(4), 1996.
- [36] Shweiger, H. F.: *Note on pore pressure*. Plaxis Bulletin No.12, 2002.