

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/313970391>

GEOTECHNICAL PROPERTIES AND ESTIMATION OF CONSTITUTIVE MODELS FOR BELGRADE CLAYS

Conference Paper · March 2010

CITATIONS

0

READS

512

1 author:



[Mirjana Vukicevic](#)

University of Belgrade

49 PUBLICATIONS 143 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Fly ash and slag utilization for embankments and soil stabilization [View project](#)



Constitutive model for overconsolidated clays [View project](#)

Mirjana Vukićević¹, Zoran Radić², Sanja Jocković³

GEOTEHNIČKA SVOJSTVA I IZBOR KONSTITUTIVNIH MODELA ZA LAPOROVITE GLINE SA PODRUČJA BEOGRADA

Rezime:

U radu su prikazani neki od rezultata realizovanih u tehnološkom projektu "Konstitutivno modeliranje kompleksa beogradskih glina sa implementacijom u inženjerskoj praksi".

Težište projekta je konstitutivno modeliranje kompleksa glina sa područja Beograda sa aspekta određivanja parametara za konstitutivne modele tla koji postoje u komercijalnim softverskim paketima. Izbor modela se vrši upoređivanjem rezultata numeričkog predviđanja ponašanja tla u izvedenim opitima korišćenjem različitih modela sa rezultatima dobijenim iz opita.

Ključne reči: laporovita glina, Beograd, konstitutivni modeli, procena, verifikacija

GEOTECHNICAL PROPERTIES AND ESTIMATION OF CONSTITUTIVE MODELS FOR BELGRADE CLAYS

Summary:

The paper reviews some of results realized in technological project "Constitutive modeling of belgrade clays complex with implementation in engineering practice".

Goal of the project is constitutive modeling of the belgrade clays complex with aspect of determination parametars of constitutive models implemented in comercial software. Estimation and selection of appropriate models it carried out by comparation between numerical analyses, using differend models, and results of the laboratory tests.

Key words: marly clay, Belgrade, constitutive models, estimation, verification

¹ Dr, Docent, Građevinski fakultet, Beograd

² Dr, Docent, Građevinski fakultet, Beograd

³ Dipl. građ.inž., Asistent, Građevinski fakultet, Beograd

1. UVOD

U tehnološkom projektu "Konstitutivno modeliranje kompleksa beogradskih glina sa implementacijom u inženjerskoj praksi" (br. projekta 16026) koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije, definisana su dva aspekta istraživanja: formiranje baze podataka geotehničkih svojstava kao i izbor i verifikacija konstitutivnih modela laporovitih glina sa područja Beograda. Cilj istraživanja je pouzdaniji izbor modela i parametara pri korišćenju složenijih modela za tlo u rešavanju inženjerskih problema iz geotehnike: proračuni temeljnih konstrukcija, potpornih i zaštitnih konstrukcija dubokih iskopa, interakcije tunela i tla itd.

U pogledu istraživanja vezanih za konstitutivno modeliranje tla za vrste tla koja se nalaze na terenima u Srbiji, kako u pogledu formiranja novih modela tako i u pogledu verifikacije već postojećih elastoplastičnih modela, postoji vrlo malo istraživanja. Ovaj projekat predstavlja početni korak.

Osnovni značaj rezultata sprovedenog istraživanja su preporuke koje se mogu dati projektantima oko izbora modela i veličine ulaznih parametara za navedene laporovite gline sa područja Beograda. Baza podataka parametara za adekvatne elasto plastične modele će omogućiti, uz korišćenje savremenih softverskih paketa, racionalnije i pouzdanije projektovanje.

Istraživanje obuhvata dve faze:

1) Prikupljanje i analiza postojeće dokumentacije

- Prikupljanje podataka o relevantnim parametrima čvrstoće i deformabilnosti vezanim za beogradske gline iz postojeće dostupne dokumentacije
- Formiranje baze podataka sa statističkom obradom.

2) Konstitutivno modeliranje

- Laboratorijski opiti (triaksijalne kompresije, edometarski, direktnog smicanja) i određivanje relevantnih parametara otpornosti i deformabilnosti tla;
- Statistička obrada rezultata opita;
- Izbor odgovarajućih modela i numerička implementacija (implementacija modela u MKE i verifikacija modela)

2. GEOLOŠKI OPIS KOMPLEKSA GLINA SA PODRUČJA BEOGRADA SA ANALIZOM DOSADAŠNJE ISTRAŽENOSTI

Prema opštoj geološkoj građi, u centralnim delovima Beograda, počev od površine terena do 10-15 m relativne dubine zastupljene su kvartarne naslage, zatim tercijerni panonski glinovito-laporoviti i laporoviti sedimenti. Kompleks glina i lapora neposredno ispod lesa, izgrađuje praktično čitavu teritoriju starog Beograda, šireći se ka istoku, jugoistoku i jugu. Zavisno od dubine i oblika stare podloge, serija je gotovo horizontalna ili blago nagnuta (oko 5-10°) prema zapadu i jugozapadu.

U okviru ovog kompleksa izdvajaju se dve mehanički izrazito različite zone: gornja, ili zona površinskog raspadanja, izdvojena prslinama i pukotinama, mrkožuta i donja, monolitna, homogena, siva. Fizičko-mehanička svojstva laporovitih glina gornje zone su različita jer je sredina uglavnom heterogena i anizotropna, u zavisnosti od lokalnih uslova nastanka i stepena degradiranosti i ispućalosti.

Debljina zone raspadanja varira zavisno od konfiguracije terena. Na zaravnjenim delovima terena je maksimalna, oko 15-20 m, dok je na padinama obično istanjena (usled erozije i klišenja) ili je, pak, pri dnu padine još i deblja (čak i do 25 m).

U degradiranoj zoni laporovite gline su pretežno žute i žuto sive boje, nastale u oksidacionim uslovima, debljine različite. Njihova ispućalost je intenzivna na kontaktu sa kvartarnim sedimentima, a opada sa dubinom. U osnovi ona je bogata karbonatnim prahom, koji je ravnomerno raspoređen u masi, a ređe je prisutan u vidu sočivastih ili nepravilnih nagomilanja beličasto-žute boje. Monoliti su u ovoj zoni najčešće mm-cm dimenzija. U vodozasicećenom stanju stenska masa ove zone pokazuje žilavo plastična i lepljiva svojstva.

Tabela 1 – Rasponi nekih fizičko-mehaničkih karakteristika degradiranih laporovitih glina iz različitih delova Beograda

Table 1 – Values of physico-mechanical characteristics of weathering marly clays from different part of Belgrade

Degradirane laporovite gline i lapori	Područje Ruzveltove, Cvijićeve, Z. Čelara i Preradovićeve	Područje Dunavske padine	Područje vodovodnog tunela „Zvezdara“	Područje oko Višnjičke ulice
parametar	raspon	raspon	raspon	raspon
γ (kN/m ³)	18.0 - 20.0	17.5 - 20.0	18.0 - 20.0	19.5 - 20.5
CI	0.95 - 1.10	-	0.90 - 1.10	0.95 - 1.10
ϕ (°)	15 - 20°	12 - 20°	18 - 22°	16 - 18°
c (kN/m ²)	15 - 40	15 - 40	15 - 30	20 - 30
$Mv_{(100-200)}/E$ (MPa)	$Mv = 5-12$	-	$E = 15-20$	$Mv = 6 - 11$

Osnovne karakteristike ove mehanički oslabljene zone je povećana efektivna poroznost i vodopropustljivost (po svojoj hidrogeološkoj funkciji to je uglavnom kolektor sprovednik) koja omogućuje cirkulaciju i slobodne podzemne vode.

Kompleks laporovitih glina i glinovih lapora na padinama u zoni blokova na prostoru ulica Ruzveltove, Cvijićeve, Zdravka Čelara i Preradovićeve, prostire se na dubinama većim od 4.5m od površine terena. Sedimenti iz kompleksa imaju horizontalan do blag pad niz padinu terena. U okviru ovog kompleksa izdvajaju se zona degradiranih glinovih lapora i zona delimično izmenjenih laporovitih glina i lapora. Debljina zone kore raspadanja je promenljiva. Naslage leporovitih glina na ovom području imaju sledeće lokalne karakteritike i raspone geomehaničkih parametara (prve kolone u Tabeli 1. i Tabeli 2.), prema dokumentaciji [19].

Tabela 2 – Rasponi nekih fizičko-mehaničkih karakteristika delimično izmenjenih i neizmenjenih laporovitih glina iz različitih delova Beograda

Table 2 – Values of physico-mechanical characteristics of fractionally weathering and non weathering marly clays from different part of Belgrade

Delimično izmenjene i neizmenjene laporovite gline i lapori	Područje Ruzveltove, Cvijićeve, Z. Čelara i Preradovićeve	Područje Dunavske padine	Područje vodovodnog tunela „Zvezdara“	Područje oko Višnjičke ulice
parametar	raspon	raspon	raspon	raspon
γ (kN/m ³)	18.5 - 20.5	18.5 - 21.0	19.0 - 21.0	20.0 - 21.0
CI	>1.00	-	0.95 - 1.20	1.00 - 1.20
φ (°)	17 - 23°	15 - 25°	17 - 27°	18 - 25°
c (kN/m ²)	15 - 50	30 - 80	28 - 48	30 - 70
$M_{V(100-200)}/E$ (MPa)	$M_v = 10 - 20$	-	$E = 20 - 60$	$M_v = 18 - 30$

Glinovito laporoviti sedimenti zastupljeni na dunavskoj padini (Ocokoljić i dr. [18]) u području ulica Jevremove, Francuske, Palmotićeve, Takovske i Vladetine čine neposrednu podlogu kvartarnim naslagama. Debljine od nekoliko metara do 20-25m na zaravnima i platoima. U okviru ovih kompleksa konstatovana su i starija kliženja terena koja su kasnije deponovanjem kvartarnih naslaga prekrivena i fosilizovana. U Tabelama 1. i 2. su date neke vrednosti pojedinih parametara fizičko-mehaničkih svojstava glinovito-laporovitih sedimenata.

Na padinama Zvezdare, prema Dedić M., Ignjatović M. [20], laporovita glina i glinoviti lapor u konstrukciji terena, u zavisnosti od podloge, imaju horizontalan do blag nagib niz padine. Debljina sedimenata jako varira i kreće se od nekoliko metara u nožičnim delovima, do desetine metara na platou.

Žuto mrki i žuto sivi glinoviti lapori i laporovite gline su zona površinskog raspadanja sivih glinovitih lapora. Stenska masa odlikuje se velikom izdeljenošću, tako da je diskontinualnost ove zone njihova najznačajnija karakteristika sa stanovišta inženjerske geologije.

U pogledu laboratorijskih ispitivanja (Tabela 1.) može se smatrati da uzorci iz degradirane zone odgovaraju stvarnom stanju na terenu, tačnije da se ova zona u odnosu na veličinu ispitivanog uzorka može smatrati homogenijom.

Različitu sredinu od zone raspadanja čini delimično izmenjen i neizmenjen deo glinovitog lapora. U većoj meri zadržali su prvobitan karakter, monolitnost i primarnu sivu boju. Polučvrste do čvrste su konsistencije, manje do malo stišljivo tlo. Može se smatrati da se ponaša kao kvazimonolitna, anizotropna sredina. U dodiru sa vodom bubri, a dobijena veličina sile bubrenja iznosi 4 – 25 kN/m².

Najmanje vrednosti ugla smicanja i modula elastičnosti odgovaraju materijalima koji se nalaze na prelazu između izmenjenih i monolitnih lapora (Tabela 2), a veće vrednosti karakterišu uglavnom monolitne sive laporovite gline i lapore.

Na desnoj obali Dunava, prema radovima izvedenim za potrebe Idejnog projekta izgradnje saobraćajnice SMT, petlja kod Višnjičke ulice i od ul. Nove dunavske do mosta preko Dunava ka putu Beograd-Pančevo, Rudarsko-geološki fakultet [23] i Građevinski fakultet [24], tercijerni sedimenti predstavljeni su laporovitim glinom - fizičko hemijski izmenjenom (Tabela 1) i sivim neizmenjenim laporovitim glinama i laporima (Tabela 2).

Degradirane gline i laporovite gline su iste starosti kao i primarne sive laporovite gline i lapori i predstavljaju koru njihovog površinskog raspadanja. Prosečne debljine su oko 4.0-6.0 m. Glinovito-prašinatog i peskovitog su sastava. U povlatnom delu su intenzivno fizičko-hemijski degradirani (zona oksido-redukcionih procesa). Stenska masa je visokoplastična (CH), pukotinsko prslinske poroznosti, masivne teksture i tvrda. Odlikuje se promenljivom, lokalno sniženom otpornošću na smicanje. Stalno su vodozasićeni i pretežno slabo vodopropusni.

Delimično izmenjene do neizmenjene laporovite gline i lapori su u potpunosti istih teksturnih karakteristika kao i povlatni delovi. Utvrđena debljina ovih naslaga u području namenski bušotina je preko 8.00 m. Stenska masa je homogenog prašinatog sastava, visokoplastična (CH), sive boje. Odlikuju se pukotinama manjeg zeva i to u gornjem - povlatnom delu prema degradiranoj zoni, prekonsolidovani, tvrdi i školjkastog preloma.

Tabela 3 – Vrednosti osnovnih fizičko-mehaničkih svojstava degradiranih i delimično izmenjenih i neizmenjenih laporovitih glina

Table 3 – Values of physico-mechanical characteristics of weathering and fractionally weathering marly clays from different parts of Belgrade

Deo grada	Područje tunela "Vračar"		Gradsko područje Beograda	
Tercijerni glinovito laporoviti sedimenti	Zona degradirane gline	Zona delimično izmenjenih glina	Zona degradirane gline	Zona delimično izmenjenih glina
parametar	raspon ili sred. vrednost	raspon ili sred. vrednost	raspon	raspon
γ (kN/m ³)	19.0-20.0	19.0-20.0	18.0 - 20.0	18.0 - 20.0
CI	0.95	1.05	0.8-1.0	0.9-1.2
φ (°)	7-20° (φ')	18-20° (φ')	14 - 22°	10 - 22°
c (kN/m ²)	20-40 (c')	20-70 (c')	40-100	80-100
E (MPa)	8	25	6 - 8	30 - 40

U neogenim laporovitim glinama i laporima su izbijeni tuneli "Vračar" (skoro celom dužinom) i tunel "Dedinje" (manji ulazni i središnji deo tunela). U tom kompleksu stenskih masa, prema [12] i [22], geotehnički uslovi gradjenja se bitno razlikuju u zavisnosti od dubine. U plicim zonama su stenske mase degradirane procesima i uticajima površinskog raspadanja.

Povlatni horizonti su površinski degradirane mase, pretežno ispucale, vodozasićene i slabijih fizičko-mehaničkih svojstava, Tabela 3. Po unificiranoj klasifikaciji to je neorganska glina visoke plastičnosti (CH), aktivna, visoke osetljivosti, od mekog do tvrdog stanja konsistencije. S obzirom na veličinu monolita posmatranog područja može se smatrati anizotropnom i heterogenom, na šta ukazuju i određeni parametri čvrstoće u laboratoriji koji ne odgovaraju stvarnom stanju na terenu.

Za potrebe projektovanja metro sistema Beograda (Čubrilović P., 1997.), za laporovite gline i lapore definisani su rasponi fizičko-mehaničkih svojstava ovog kompleksa (Tabela 3.) u sklopu generalnih inženjersko-geoloških odlika beogradskih terena [13].

Eksperimentalno dobijene zavisnosti naponsko-deformacijskih funkcija, utvrđene na uzorcima iz žuto mrkih i posebno sivih laporovitih glina, dati su analitički odgovarajućim hiperboličnim modelom (Čorić [21]). Pri tome je ukazano da mehanička svojstva neogenih

laporovitih glina i lapora zavise u najvećoj meri od konkretnih uslova na terenu, pre svega od stepena raspadnutosti, naponskog stanja i vlažnosti, odnosno konsistencije.

3. KONSTITUTIVNO MODELI RANJE

3.1 KONSTITUTIVNI MODELI ZA GLINE

Konstitutivno modeliranje tla spada u posebnu oblast mehanike tla. S obzirom da tlo ima složeno izrazito nelinearno naponsko deformacijsko ponašanje, u poslednjih četrdeset godina uloženi su veliki naponi u formiranju konstitutivnih matematičkih modela za tlo koji će na adekvatan način opisati njegovo ponašanje u različitim naponsko deformacijskim uslovima. Prema rezultatima laboratorijskih ispitivanja naponsko deformacijsko ponašanje sitnozrnih tla kao što su gline najadekvatnije se može opisati elasto plastičnim konstitutivnim modelima. Bez obzira na vrlo kompleksnu strukturu na mikro planu, tlo se može u makroskopsom ponašanju idealizovati kao kontinuum.

Konstitutivne jednačine se formulišu za materijalnu tačku u čijoj je okolini homogeno stanje napona i deformacije. Kao materijalni prototip za to se često uzima tlo čije se ponašanje ispituje u laboratorijskim triaksijalnim ili pravim kubičnim optitima. Prvi moderni elasto-plastični konstitutivni model glina je bio "Cam Clay" model (Schofield and Wroth, [8], Roscoe and Burland, [7]). Model je nastao na bazi rezultata standardnog triaksijalnog optita. Konstitutivnim relacijama "Cambridge" modela se obuhvataju neki rezultati dobijeni triaksijalnim optitima kao što su:

- veza između zapreminske deformacije i hidrostatičkog opterećenja;
- veza između promene zapremine i promene smičućih napona;
- povećanje zapremine kod zbijenog tla a smanjenje kod rastresitog u toku smicanja.

Od 60-tih godina prošlog veka nastao je određeni broj elasto- plastičnih modela na bazi Cam - Clay modela u pokušaju prevazilaženja njegovih ograničenja i nedostataka. Najpopularniji i široko korišćeni modeli iz te grupe su modeli sa kapom (Di Maggio i Sandler [4], Drucker Prager [10], bazirani na klasičnoj izotropnoj teoriji plastičnosti. U većini modela pretpostavlja se da je ponašanje tla rotaciono simetrično u odnosu na hidrostatičku osu. U pokušaju opisivanja evidentne anizotropije prirodno formiranog tla nastalo je nekoliko konstitutivnih anizotropnih modela predstavljenih u p-q ravni distorziranom elipsom u odnosu na p' osu (Dafalias [2], Davis i Newton [3]).

Da bi se za ciklična opterećenja uveli efekti histerezisa u elastoplastične modela je uvedena kombinacija izotropnog i kinematičkog ojačanja (Zienkiewicz, Mroz i Norris [6]).

Kao posebna klasa modela razvili su se tkz. deformacijski zavisni modeli. U takve modele spadaju "Bubble" model za londonske gline koja su predložili Al-Tabbaa i Wood [1] kao i 3-SKH model koji je predložila Stallebrass [8]. Oni spadaju u modele sa više površi koji mogu imati izotropno i kinematičko ojačanje. U kratkom opisu konstitutivnih modela za gline naznačeni su, uglavnom, samo modeli i autori koji su najviše doprineli razvoju ove oblasti.

Razvoj računarske tehnologije i numeričkih metoda omogućava primenu kompleksnih konstitutivnih modela, ali s druge strane kompleksni modeli zahtevaju veći broj ulaznih

parametara, koji se obično ne mogu svi dobiti iz standardnih opita. Za inženjersku praksu su najpogodniji oni modeli čiji se parametri mogu dobiti iz standardnih laboratorijskih opita.

Da bi se, i sa ovakvim ograničenjem, složeni elasto plastični modeli primenili u praktičnim proračunima, neophodna je primena numeričkih metoda, pre svega metoda konačnih elemenata (MKE). Zahvaljujući razvoju računara različiti modeli su implementirani u programske pakete za proračun geotehničkih konstrukcija metodom konačnih elemenata. Praktična primena složenih konstitutivnih modela za tlo u proračunu geotehničkih konstrukcija predstavlja zajednički rezultat:

- razvoja teorijskih rešenja (pre svega teorije plastičnosti)
- numeričkih metoda (posebno MKE)
- razvoja računara
- eksperimentalne baze koja omogućava verifikaciju i unapređenje modela i iz koje se dobijaju relevantni parametri modela

3.2 IZBOR I VERIFIKACIJA MODELA ZA GLINE SA PODRUČJA BEOGRADA

Izbor i verifikacija konstitutivnih modela koji odgovaraju ispitivanim glinama sa područja Beograda vršeni su numeričkim predviđanjem naponsko deformacijskog ponašanja tla u izvršenim laboratorijskim opitima korišćenjem različitih konstitutivnih modela. Simulirano je ponašanje tla u uslovima opita triaksijalne kompresije i u uslovima edometarskog opita. Poređenjem rezultata dobijenih iz opita i numeričkom implementacijom nekog od raspoloživih modela, napravljen je izbor konstitutivnog modela koji više odgovara ispitivanom tlu.

Za naponsko deformacijsko predviđanje ponašanja tla metodom konačnih elemenata na raspolaganju nam je bio softverski paket PAK, program za statičku i dinamičku analizu konstrukcija MKE, Laboratorije za inženjerski softver Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Od elasto plastičnih modela u program su implementirani opšti Drucker Prager-ov model, (Rakić D, Živković M. [11]), Cam-Clay (modifikovan), (Kojić M., Vukicević M. [5])

Tabela 4: Parametri tla za linearno elastičan model, Cam-Clay i Drucker Prager-ov model sa kapom

Table 4: Values of parameters for linear elastic, Cam-Clay and Drucker Prager model

Lokacija/ dubina	φ' 0	C' kN/ m ²	Elastičan Mv (kPa)		Cam-Clay			Drucker Prager	
			100- 200	200- 400	λ	κ	M	α	k
BB/9	23	40	6200	8200	0.035	0.01	0.52	0.38	35.9
BB/12	18	50	8500	10700	0.037	0.012	0.39	0.30	44.9
VS/22	23	57	6500	11700	0.046	0.026	0.52	0.38	51.2
KN/21	21	40	10700	13900	0.037	0.022	0.48	0.35	36.6

Laboratorijska ispitivanja su rađena u laboratoriji za mehaniku tla Građevinskog fakulteta u Beogradu. Uzorci za ispitivanja su uzeti sa tri lokacije: Botanička bašta, Vojvode Stepe i

Knežepoljska. Uzorci su iz zone žuto mrkih i žuto sivih laporovitih glina. Rezultati ispitivanja su dati u tabelama 4 i 5 sa mehaničkim parametrima za korišćene modele i fizičkim karakteristikama uzoraka.

Tabela 5: Fizičke karakteristike ispitivanih uzoraka tla

Table 5 – Values of physical characteristics of the soil specimens

Lokacija/dužina	glina %	praš. %	pes. %	γ kN/m ³	γ_d kN/m ³	e_0	W %	I_c	USCS
BB/9	45	53	2	19.2	15.1	0.86	30.0	1.03	CH
BB/12	48	50	1	18.4	15.7	0.81	29.2	0.90	CH
VS/22	47	52	1	20	16.0	0.85	25.5	0.93	CH
KN/21	42	55	3	20.1	16.4	0.72	23.7	0.97	CH

Procena i izbor modela su rađeni na osnovu edometarskog i CD opita triaksijalne kompresije koristeći karakteristične dijagrame dobijene iz opita: za edometarski i fazu konsolidacije CD opita dijagram $e - \log \sigma$, a za fazu smicanja u CD opitu $\varepsilon_1 - \tau$. Na sl. 1 i 2 su dati eksperimentalni rezultati opita i numeričke analize rađene u PAK-u za uzorak VS/22. Usporedni dijagrami za ostale uzorke nisu prikazani zbog ograničenog obima rada.

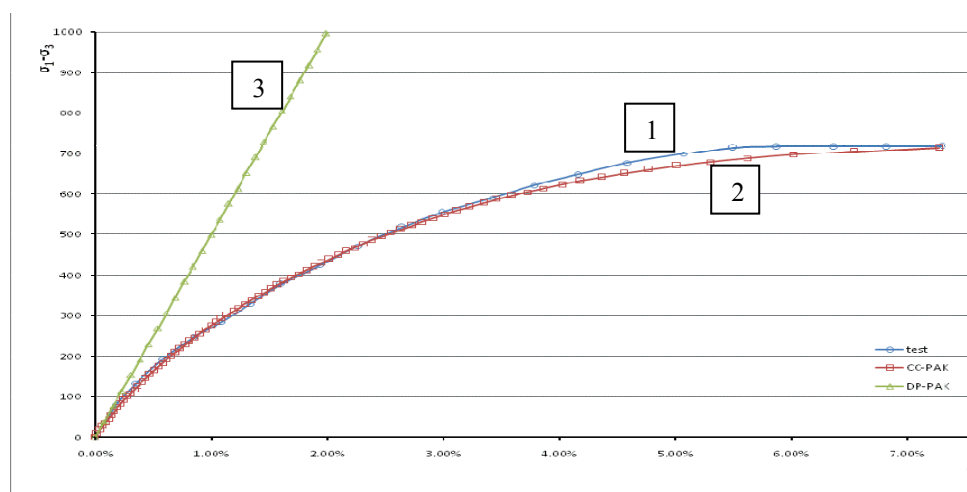
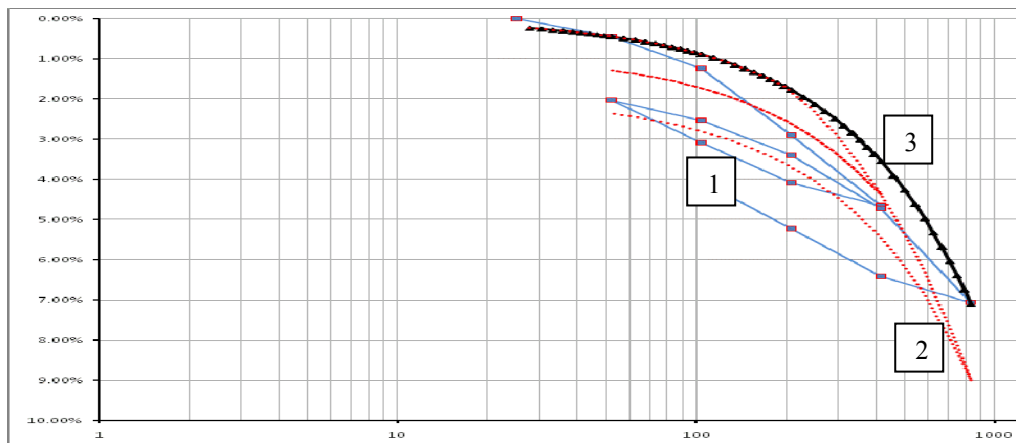
Prema dobijenim rezultatima, u edometarskom opitu Cam Clay modifikovani model daje manje odstupanje od eksperimentalnih u intervalu napona do 500kPa, dok pri većim naponima daje veće deformacije. To se može objasniti time da je nastao analizom rezultata opita na mekim londonskim glinama gde pri većim naponima dominiraju plastične deformacije, što ne odgovara sasvim ponašanju ispitivanih gline koje su uglavnom tvrdo plastične i polutvrde konzistencije. Iz tih razloga Drucker Prager-ov model daje manje odstupanje u domenu velikih napona. U CD opitu (faza smicanja), Cam-Clay model daje znatno bolje rezultate od Drucker Prager-a.

4. ZAKLJUČCI

Procena pogodnosti modela je izvršena na malom broju uzoraka i sa dva modela, što sigurno nije dovoljno za donošenje generalnog zaključka. Za pouzdaniju procenu je neophodno formirati bazu podataka iz većeg broja opita i testirati i druge modele koji se mogu naći u komercijalnim programima, što će se delom realizovati u nastavku projekta.

Na osnovu ovako sprovedene procene i izbora modela, za verifikaciju izabranog modela mogu se koristiti poređenja podataka merenja izvršenih na izvedenoj geotehničkoj konstrukciji sa rezultatima numeričke analize.

Treba naglasiti da je u procesu izbora konstitutivnog modela neophodan uslov pouzdanost određivanja parametara modela koji se dobijaju iz laboratorijskih opita. Bez ispunjavanja tog uslova je svaki model neupotrebljiv.



SI.1: $e - \log \sigma$, edometarski opit; SI.2: $\varepsilon_1 - \tau$, CD triaks. opit (faza smicanja)
 kriva 1- rezul. opita; kriva 2- Cam-Clay (PAK), kriva 3- Drucker Prager (PAK)

Fig.1: $e - \log \sigma$, consolidation test; Fig.2: $\varepsilon_1 - \tau$, triax. CD test (failure stage)
 curve 1- test results; curve 2- Cam-Clay (PAK); curve 3- Drucker Prager (PAK)

LITERATURA

- [1] Al-Tabba A., Muir Wood D. (1989), An experimentally based "bubble" model for clay, Proceedings of Numer Model in Geomech. III, Elsevier, Rotterdam, 91-99
- [2] Dafalias Y.F (1986), Bounding surface Plasticity: Mathematical Foundation and Hypo - plasticity, Jour. Engng. Mech. ASCE, Vol 112, No 9, 966-987.
- [3] Davis, M.C., Newton T.A. (1993), Critical state constitutive model for an isotropic soil; In "Predictive Soil Mechanics", Holsby and Schofield, 219-229, Thomas Telford, London.

- [4] Di Maggio F.L., Sandler I.S. (1971), Material models for granular Soils, Jour. Engng ASCE, 97, 935-950.
- [5] Kojić M., Vukicević M., (1992), In implicit procedure for stress integration in elastic - plastic deformation on the modified Cam-Clay model, COMPLAST III, Barcelona
- [6] Mrozz Z., Norris, V.A, Zienkiewicz O.C. (1981), An an isotropic, critical state model for soils subject to cyclic loading, Geotechnique 31, Vol 4, 451-469.
- [7] Roscoe K.N., Burland J.B., (1968), On the Generalized Stress - Strain Behavior of Wet Clay, Engineering Plasticity,
- [8] Schofield, A.N., Wroth C.P, Critical State Soil Mechanics, (1968)
- [9] Stallebrass S.E. (1990), Modelling the effect of recent stress history on the deformation of over consolidated soils, PhD. Thesis, The City University, London
- [10] Drucker, D.C., Gibson, R.E., Henkel, D.J., 1957. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. Transactions American Society of Civil Engineers 122, 338–346.
- [11] Rakić D, Živković M., Stress Integration for the Drucker-Prager Material Model Without Hardening Using the Incremental Plasticity Theory, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics / Vol. 2 / No. 1, 2008 / pp. 80-89
- [12] Ignjatović M., (1997) - Geotehnički uslovi izgradnje podzemnih objekata železničkog čvora u Beogradu – Podzemni prostor u izgradnji Beograda, Beograd, str.105-110.
- [13] Čubrilović P, (1997) – Inženjersko-geološke odlike Beograda i projektovanje metro sistema – Podzemni prostor u izgradnji Beograda, Beograd, str.249-255.
- [14] Marković R. (1987.) – Inženjerskogeološke karakteristike terena u koridoru linija prve etape metroa u Beogradu – Podzemna izgradnja u Beogradu, Beograd, str.272-293.
- [15] Marković R., Lokin P. i dr. (1987.) – Inženjerskogeološke karakteristike terena i geotehnički uslovi građenja podzemnih objekata u Beogradu – Podzemna izgradnja u Beogradu, str. 185-202
- [16] Milković D, Pavlović N, Ćorić Slo. (1987.) – Geotehnički uslovi izgradnje podzemnog stajališta Vukov spomenik - Podzemna izgradnja u Beogradu, Beograd, str.295-303.
- [17] Nikolić T. (1987.) – Inženjerskogeološki uslovi izgradnje metro stanica na području Beograda - Podzemna izgradnja u Beogradu, str. 305-312
- [18] Očokoljić M. i dr. (1987) – Inženjerskogeološka građa i osnovni problemi pri izgradnji podzemnih objekata na Dunavskoj padini od Kalemegdana do Pančevačkog mosta - Podzemna izgradnja u Beogradu, str.343-353
- [19] Inženjersko-geološke podloge za nivo DUP-a blokova na prostoru ulica Ruzveltove, Cvijićeve, Zdravka Čelara i Preradovićeve, Institut za puteve, 1991. g.
- [20] Dedić, M., Ignjatović, M.,(1987)-Geotehnički uslovi projektovanja i građenja vodovodnog tunela „Zvezdara“, Zbornik radova, Podzemna izgradnja u Beogradu, Društvo za mehaniku stena i podzemne radove Srbije; Savez društva IT, 203 – 211 str.
- [21] Ćorić, S., (1987) - Naponsko-deformacijska analiza tla primenom konačnih elemenata, Monografija - Institut za puteve, Beograd, 69-70 str.
- [22] Dedić, M., Milković, D., (1987) - Geotehnički uslovi projektovanja i građenja železničkog tunela „Vračar“, Zbornik radova, Podzemna izgradnja u Beogradu, Društvo za mehaniku stena i podzemne radove Srbije; Savez društva IT, 213 – 222 str.
- [23] Inženjerskogeološka dokumentacija za potrebe izrade Idejnog projekta Spoljne magistralne tangente, Rudarsko-geološki fakultet Beograd /Lokin P. i dr./ 2005.g.
- [24] Idejni projekat saobraćajnice SMT od ulice Nove Dunavske do Pančevačkog puta - deo Geotehnička dokumentacija - / D.Nikolić, Z.Radić, D.Bajić i dr. / GRF, Beograd, 2008.g.