
DGKS

**DRUŠTVO GRAĐEVINSKIH
KONSTRUKTERA SRBIJE**

14. KONGRES

NOVI SAD
24-26. SEPTEMBAR

2014.

14

K

O

N

G

R

E

S

2014

U SARADNJI SA:



**GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

**MINISTARSTVOM PROSVETE,
NAUKE I TEHNOLOŠKOG RAZVOJA
REPUBLIKE SRBIJE**



**INŽENJERSKOM KOMOROM
SRBIJE**

**ZBORNİK
RADOVA**



**CHINA ROAD AND BRIDGE
CORPORATION SERBIA BRANCH**

Izdavač: **Društvo građevinskih konstruktora Srbije**
Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73/1

Urednici: prof. dr **Miloš Lazović**
prof. dr **Boško Stevanović**

Tehnička
priprema: **Saška - Stoja Todorović**

Priprema za
štampanje: **Nebojša Ćosić**

Štampanje: **DC Grafički centar**

Tiraž: **150 primeraka**

Beograd, septembar 2014.

ORGANIZACIONI ODBOR

PREDSEDNIŠTVO DGKS

Prof. dr Miloš LAZOVIĆ, dipl.inž.grad., predsednik
Aleksandar BOJOVIĆ, dipl.inž.grad., potpredsednik
Prof. dr Boško STEVANOVIĆ, dipl.inž.grad., sekretar
Prof. dr Đorđe VUKSANOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Mihajlo ĐURĐEVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Dragoslav STOJIC, dipl.inž.grad.
Prof. dr Đorđe LADINOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Snežana MARINKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Prof. dr Aleksandar RISTOVSKI, dipl.inž.grad.
Doc. dr Bratislav STIPANIĆ, dipl.inž.grad.
Dr Zoran FLORIĆ, dipl.inž.grad.
Mr Slobodan GRKOVIĆ, dipl.inž.grad.
Branko KNEŽEVIĆ, dipl.inž.grad.
Gojko GRBIĆ, dipl.inž.grad.
Goran VUKOBRATOVIĆ, dipl.inž.grad.
Đorđe PAVKOV, dipl.inž.grad.
Svetislav SIMOVIĆ, dipl.inž.grad.

ČLANOVI ORGANIZACIONOG ODBORA IZVAN PREDSEDNIŠTVA

Prof. dr Zlatko MARKOVIĆ, dipl.inž. grad.
Miroslav MIHAJLOVIĆ, dipl.inž.grad.
Aleksandar TRAJKOVIĆ, dipl.inž.grad.

NAUČNO-STRUČNI ODBOR

1. Prof. dr Radenko Pejović, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
2. Prof. dr Duško Lučić, Građevinski fakultet Podgorica, Crna Gora
3. Prof. dr Goran Markovski, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
4. Prof. dr Meri Cvetkovska, Univerzitet "Kiril i Metodij" Gradežen fakultet, Skopje, Makedonija
5. Prof. dr Tatjana Isaković, Univerzitet u Ljubljani Fakultet građevinarstva i geodezije, Ljubljana, Slovenija
6. Prof. dr Viktor Markelj, Ponting d.o.o., Maribor, Slovenija
7. Prof. dr Zlatko Šavor, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije, Katedra za mostove, Zagreb, Hrvatska
8. Prof. dr Radu Bancila, University "POLYTEHNICA", Temišvar, Rumunija
9. Mr Predrag Popović, Čikago, SAD
10. Prof. dr Kostadin Topurov, Sofija, Bugarska
11. Prof. dr Dušan Najdanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
12. Prof. dr Miloš Lazović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
13. Prof. dr Đorđe Vuksanović, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
14. Prof. dr Dejan Bajić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija
15. Prof. dr Đorđe Ladinović, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
16. Prof. dr Dragoslav Stojić, Arhitektonsko-građevinski fakultet, Niš, Srbija
17. Doc. dr Bratislav Stipanić, Univerzitet u Beogradu Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

14. KONGRES JE ORGANIZOVAN U SARADNJI SA:

GRAĐEVINSKIM FAKULTETOM UNIVERZITETA U
BEOGRADU

MINISTARSTVOM PROSVETE, NAUKE I TEHNOLOŠKOG
RAZVOJA REPUBLIKE SRBIJE

INŽENJERSKOM KOMOROM SRBIJE, Beograd

DONATORI SIMPOZIJUMA:

DIJAMANTSKI

CHINA ROAD & BRIDGE CORPORATION, SERBIA BRANCH,
Belgrade

SREBRNI

SIKA d.o.o., Novi Sad

BRONZANI

"POTISJE KANJIŽA" AD, Kanjiža

Sanja Jocković¹, Mirjana Vukićević²

KRUTOST TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA

Rezime:

Određivanje krutosti tla u području veoma malih i malih deformacija je ključni faktor za racionalno projektovanje i predviđanje ponašanja tla kako pri statičkom tako i pri dinamičkom opterećenju. U radu je dat pregled laboratorijskih i terenskih postupaka merenja deformacija i određivanja krutosti tla, sa osvrtom na uticaj brzine smicanja na krutost sitnozrnog tla. Prikazana je hiperbolička funkcija kojom je opisan pad krutosti sa porastom smičućih deformacija za primenu u statičkim analizama.

Ključne reči: krutost tla, male deformacije, modul smicanja, brzina smicanja

SMALL STRAIN STIFFNESS OF SOIL

Summary:

Soil stiffness determination in the area of very small and small deformation is a key factor for the rational design and prediction of soil behaviour both in static and dynamic load. This paper presents an overview of laboratory and field methods for strain measurements and determination of soil stiffness, with emphasis on the effect of strain rate on the fine-grained soil stiffness. Hyperbolic function which describes the decrease of stiffness with increasing shear deformation for use in static analyses is presented.

Ključne reči: soil stiffness, small strain, shear modulus, strain rate

¹ Asistent, dipl. inž. grad., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

² Docent dr, dipl. inž. grad., Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, Beograd

1 UVOD

Za racionalno projektovanje geotehničkih konstrukcija neophodna je adekvatna analiza deformacija tla. To podrazumeva upotrebu metoda proračuna koje bi obuhvatile što više elemenata realnog ponašanja tla i konstrukcije, kao i njihovu interakciju. Veliki napredak u razvoju savremenog numeričkog modeliranja postignut je neprekidnim usavršavanjem terenskog i laboratorijskog ispitivanja tla, korišćenjem naprednih konstitutivnih modela tla, kao i kvalitetnim povratnim, parametarskim i uporednim analizama.

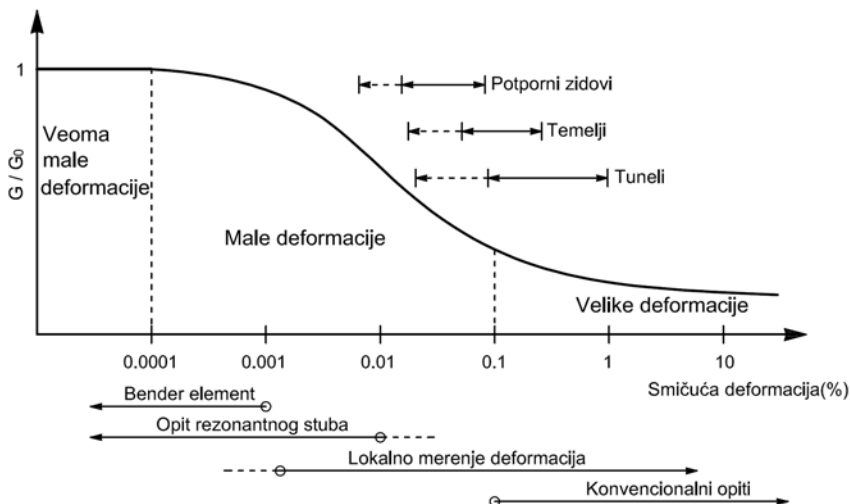
Upravo povratnim analizama, iz registrovanih pomeranja u tlu u okolini geotehničkih konstrukcija, je utvrđeno da je krutost tla određena konvencionalnim laboratorijskim opitima znatno potcenjena. Krajem sedamdesetih i početkom osamdesetih godina prošlog veka, intenzivno se radilo na razvijanju laboratorijskih uređaja za merenje deformacija na samom uzorku u triaksijalnom aparatu [1-6]. Opsežna laboratorijska ispitivanja su dokumentovala da je odnos napona i deformacija izrazito nelinearan i u području malih deformacija. Takođe je utvrđeno da je krutost tla u tom području i do nekoliko puta veća od one koja se dobija ispitivanjem tla u statičkom triaksijalnom opitu [7-9]. Zabeležen je pad krutosti i preko deset puta sa porastom smičućih deformacija od 0.001% do 1%. Atkinson [10] navodi da je ovo jedno od glavnih dostignuća u oblasti geotehničkog inženjerstva u poslednjih 30 godina.

U polulogaritamskom dijagramu, pad krutosti sa porastom smičućih deformacija je prikazan kao karakteristična *S-kriva* (Slika 1), dok se generalno smičuće deformacije mogu svrstati u tri grupe [11, 12]:

1. veoma male deformacije, $\gamma_{EL} < 0.0001\%$. Područje linearne elastičnosti, deformacije su povratne, a modul smicanja je približno konstantan i obeležava se sa G_0 (inicijalni modul smicanja) ili G_{max} (maksimalni modul smicanja).
2. male deformacije, $0.0001\% < \gamma < 0.1\%$ (1%). Modul smicanja nelinearno opada sa porastom smičućih deformacija. Sa povećanjem deformacija u ovom području iz zone nelinearne elastičnosti se prelazi u zonu gde se pojavljuju trajne plastične deformacije u tlu.
3. velike deformacije, $\gamma > 0.1\%$ (1%). Područje konvencionalnih laboratorijskih opita, gde modul smicanja ima relativno malu vrednost.

Vrednosti graničnih deformacija su zasnovane na konceptualnim okvirima ponašanja tla i objavljenim eksperimentalnim podacima.

U dinamici tla, fenomen krutosti pri malim i veoma malim deformacijama datira još od 1970. godine [13]. Dugo se smatralo da eksperimentalni rezultati dobijeni pri dinamičkom opterećenju nisu primenljivi u analizi pri statičkom opterećenju, pre svega zbog prirode opterećenja, odnosno inercijalnih efekata i velike brzine smicanja. Razvoj novih tehnologija merenja deformacija doveo je do saznanja da su zavisnosti modula smicanja i smičućih deformacija dobijene pri statičkom opterećenju vrlo slične već ranije poznatim zavisnostima pri dinamičkom opterećenju. Stokoe i dr. [14] navode da inercijalni efekti neznatno utiču na povećanje krutosti tla pri veoma malim deformacijama. Termini u literaturi poznati kao „statički modul smicanja” i „dinamički modul smicanja” nisu dve različite elastične konstante, već su samo dve vrednosti modula smicanja (sekantni ili tangentni) određene pri različitim nivou smičućih deformacija. Ova hipoteza je potvrđena brojnim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima tla [8, 9, 11, 15].



Slika 1. Pad krutosti sa porastom smičućih deformacija (S-kriva)
Atkinson & Sallfors [1], Mair [12]

2 ODREĐIVANJE KRUTOSTI TLA U PODRUČJU MALIH DEFORMACIJA

Zabeležene deformacije u tvrdom prekonsolidovanom tlu u okolini geotehničkih objekata kao što su temelji, potporne konstrukcije i tuneli obično ne prelaze 0.5% pri radnom statičkom opterećenju, Slika 1 [8, 16, 17]. Iz tog razloga je adekvatno određivanje krutosti tla u području veoma malih i malih deformacija ključni faktor za racionalno projektovanje i predviđanje pomeranja u tlu.

Za određivanje veze između napona i deformacija u tlu, u laboratoriji se najčešće koristi konvencionalni triaksijalni aparat. Međutim, krutost tla određena na osnovu rezultata ovog opita je znatno niža od krutosti izračunate povratnim analizama. Dobijena mala krutost se pripisivala ispucalosti uzoraka tokom uzimanja na terenu i tokom ugrađivanja u laboratorijsku aparaturu, tj. „poremećenosti uzoraka”. Unapređenjem tehnike merenja deformacija uzorka u opitu, utvrđeno je da su nesavršenost aparata i načina merenja deformacija, kao i nesavršen kontakt uzorka, postolja i kape (naročito ako gornja i donja površina uzorka nisu paralelne i glatke) glavni uzroci takvog neslaganja. U početnoj fazi opterećivanja, tokom naleganja uzorka je već prekoračen region malih deformacija i najmanja deformacija koja može biti izmerena u konvencionalnom triaksijalnom aparatu iznosi približno 0.1%.

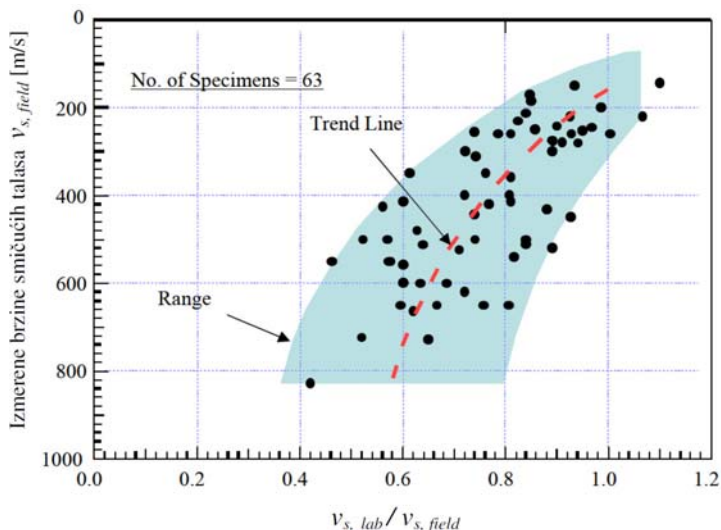
Da bi se izbegli parazitski uticaji, deformacije je potrebno meriti na samom uzorku. Transduseri visoke rezolucije (LDT - *Local Deformation Transducer*, LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*, HELST - *Hall Effect Local Strain Transducer*) se postavljaju na srednjoj trećini visine uzorka u triaksijalnom aparatu i na taj način je moguće ispitati naponsko deformacijsko ponašanje tla u širokom rasponu deformacija. Pored statičkih ispitivanja, krutost tla u području veoma malih i malih deformacija je moguće odrediti i dinamičkim ispitivanjima

i to opitom rezonantnog stuba, opitom torzionog smicanja, dinamičkim triaksijalnim opitom, kao i bender element testom i geofizičkim ispitivanjima na terenu. Na Slici 1 je prikazan merni opseg deformacija u pojedinim laboratorijskim ispitivanjima.

Postupci za utvrđivanje karakteristika tla na terenu, zasnivaju se na merenju brzina smičućih i kompresionih talasa koji se šire kroz tlo. Geofizičkim metodama se u tlu indukuju deformacije manje od 0.001%, tako da se baziraju na teorijama širenja talasa u elastičnim sredinama. Na osnovu izmerene brzine smičućih talasa v_s i poznavanjem zapremineke težine (gustine) tla ρ , inicijalni modul smicanja se može odrediti kao:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2 \quad (1)$$

Prednost terenskih ispitivanja je u tome što ne zahtevaju uzorkovanje, a ispitivanje velike zapremine tla smanjuje mogućnost da se karakteristike tla odrede na nereprezentativnim uzorcima. Sa druge strane u terenskim ispitivanjima se ne mere karakteristike tla, već se određuju indirektno. Uticaj poremećenosti uzoraka na G_0 istraživali su: Richart [18], Toki i dr. [19], Kohata i dr. [20], Hight i dr. [21], Stokoe i Santamarina [22], Landon i dr. [23]. Sistematizacijom podataka određivanja inicijalnog modula smicanja u laboratoriji $G_{0,lab}$ i na terenu $G_{0,field}$ sa nekoliko lokacija u Japanu, Toki i dr. [19] su utvrdili da se odnos $G_{0,lab}/G_{0,field}$ pretežno kreće u granicama 0.8-1.2 za reprezentativne uzorke gline (uzorkovane tankozidnim cilindrom). Takođe je zabeleženo da za uzorke peska i mekih stena, čija je struktura znatno poremećena tokom uzorkovanja, $G_{0,lab}$ iznosi svega $0.25G_{0,field}$. Rezultati ROSRIN studije (Resolution Of Site Response Issues from Northridge Earthquake) [22] pokazuju da se laboratorijskim ispitivanjima dobijaju niže vrednosti inicijalnog modula smicanja (Slika 2). U laboratoriji su ispitana 63 neporemećena uzorka (uzeta sa dubina od 4-240m) u opitima rezonantnog stuba i opitima torzionog smicanja. Sa druge strane, terenskim *Crosshole* testovima i *Suspension logger* testovima su dobijene brzine prostiranja smičućih $v_{s,field}$ talasa do dubina od oko 300m.



Slika 2. Rezultati ROSRIN studije, Stokoe & Santamarina [22]

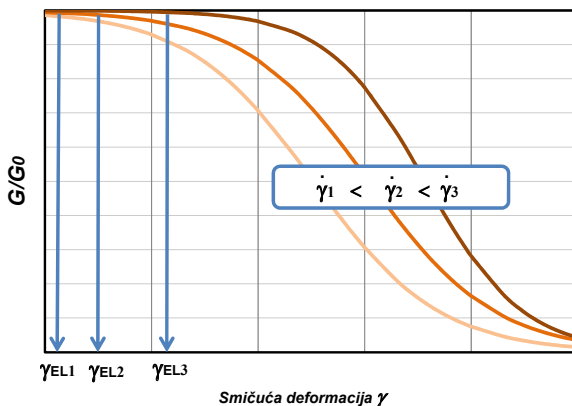
Može se uočiti trend da odnos $G_{0,lab}/G_{0,field}$ opada sa porastom brzine prostiranja smičućih talasa i da laboratorijski određen inicijalni modul smicanja može imati i tri puta manju vrednost u odnosu na vrednost dobijenu terenskim ispitivanjima. Dobijeni rezultati svakako ukazuju na važnost pravilnog uzorkovanja uz minimalne poremećaje strukture i vlažnosti, koji imaju odlučujući uticaj na mehaničko ponašanje tla.

Određivanje krutosti tla od veoma malih do velikih deformacija najčešće zahteva kombinovanje tehnologija ispitivanja. Uobičajen je postupak da se moduli pri veoma malim deformacijama odrede dinamičkim ili geofizičkim ispitivanjima, a odgovarajuće krive redukcije modula, utvrde na reprezentativnim, neporemećenim uzorcima tla ispitivanjem u triaksijalnom aparatu sa lokalnim merenjem deformacija na uzorku.

3 UTICAJ BRZINE SMICANJA NA KRUTOST SITNOZRNOG TLA

Laboratorijska ispitivanja pokazuju da na krutost tla od veoma malih do velikih deformacija najviše utiču koeficijent poroznosti tla, srednji efektivni napon, indeks plastičnosti, stepen prekonsolidacije, dijagenetski procesi, istorija napona i deformacija. U literaturi su publikovane i brojne empirijske korelacije, pre svega za inicijalni modul smicanja G_0 [24, 25, 26, 27]. Takođe je utvrđeno da povećanje brzine smicanja neznatno utiče na povećanje G_0 [28, 29, 30], što potvrđuje hipotezu da je G_0 moguće odrediti pri statičkom i dinamičkom opterećenju, kao i u dreniranim i nedreniranim uslovima opterećivanja, jer se pri veoma malim deformacijama ne razvija dodatni porni pritisak u tlu.

Sa druge strane, uočen je uticaj brzine smicanja na krutost sitnozrnog tla u području malih i velikih deformacija ($\gamma > 0.0001\%$) [28, 30]. Dok se sa povećanjem brzine smicanja vrednost G_0 ne menja, povećava se vrednost granične deformacije smicanja γ_{EL} koja razdvaja područje veoma malih i malih deformacija, Slika 3.



Slika 3. Povećanje elastične zone sa povećanjem brzine smicanja

Za desetostruko povećanje brzine smicanja, Kulhawy i Mayne [31] su u području velikih deformacija zabeležili povećanje krutosti uzoraka gline od 10 %, dok su Lo Presti i dr. [32] ispitivanjem gline niske do srednje plastičnosti dobili povećanje krutosti od 5% za deformacije od 0.01% i povećanje od 10% za deformacije od 1%. Dobijeni rezultati ukazuju da se program laboratorijskih ispitivanja (brzina smicanja) mora planirati u zavisnosti od vrste problema koja će se analizirati (statička ili dinamička analiza).

U nedostatku laboratorijskih i terenskih istraživanja za konkretan problem, publikovani rezultati ispitivanja različitih vrsta tla i u različitim uslovima imaju neprocenjiv značaj za uspostavljanje korelacija. Vardanega i Bolton [33] su analizirali rezultate 67 testova na 21 sitnozrnom tlu (gline i prašine). Baza podataka je obuhvatala ispitivanja krutosti tla u širokom rasponu deformacija na normalno konsolidovanim i prekonsolidovanim uzorcima (OCR=1-17), sa različitim lokacija, u različitim laboratorijskim testovima (opit rezonantnog stuba, triaksijalni opit, opit torzionog smicanja) u periodu od 30 godina. Cilj je bio da se odredi funkcija kojom će se najbolje opisati redukcija modula smicanja u području malih deformacija i to za primenu u statičkim analizama u praksi. S obzirom da je većina podataka iz dinamičkih laboratorijskih opita (opit rezonantnog stuba sa velikom brzinom smicanja), bilo je potrebno redukovati vrednosti izmerenih modula smicanja. Koeficijent redukcije je određen u odnosu na procenjenju brzinu smicanja u statičkom nedreniranom opitu triaksijalne kompresije koja iznosi 0.0001%/s i uz pretpostavku da krutost sitnozrnog tla raste 5% za desetostruko povećanje brzine smicanja. Korigovane krive su prikazali u normalizovanom obliku hiperboličkom funkcijom [34]:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^\alpha} \quad (2)$$

gde su:

γ_{ref} – referentna deformacija pri kojoj modul smicanja opadne na polovinu prvobitne vrednosti
 α – parametar krivine

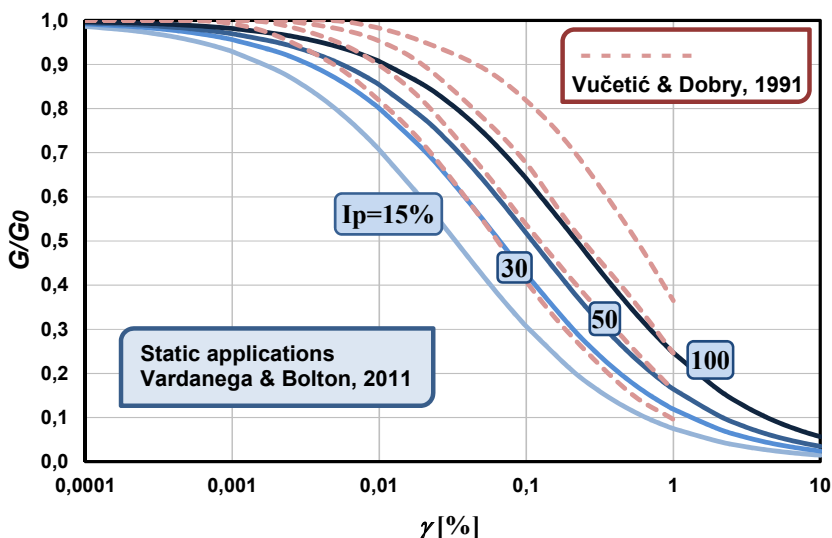
Nakon sistematizacije i obrade podataka (za detalje videti [33]), predložena funkcija za primenu u statičkim analizama (mala brzina smicanja) je:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^{0.736}} \quad (3)$$

sa referentnom deformacijom koja zavisi samo od indeksa plastičnosti (decimalno) u obliku:

$$\gamma_{ref} = 2.2 \frac{I_p}{1000} \quad (4)$$

Na Slici 4 su prikazane dobijene redukcionne krive za statičke analize, za nekoliko vrednosti indeksa plastičnosti. Takođe su, za iste vrednosti indeksa plastičnosti, prikazane i redukcionne krive koje su eksperimentalno odredili Vučetić i Dobry [35], a koje se u dinamici tla koriste već više od 20 godina. Za sve nivoe deformacija, krive Vučetić i Dobry pokazuju veću krutost, što je i razumljivo jer su određene u dinamičkom opitu rezonantnog stuba, sa velikom brzinom smicanja.



Slika 4. Redukcione krive modula smicanja za primenu u statičkim analizama

5 ZAKLJUČAK

Unapređene tehnike merenja deformacija uzoraka u laboratoriji su doprinele da se uoči trend ponašanja tla u funkciji veličine smičućih deformacija, pri statičkom i dinamičkom opterećenju. Osnovni zaključak je da termini u literaturi poznati kao „statički modul smicanja” i „dinamički modul smicanja” nisu dve različite elastične konstante, već su samo dve vrednosti modula smicanja (sekantni ili tangentni) određene pri različitom nivou smičućih deformacija. S obzirom da brzina smicanja ne utiče na krutost tla pri veoma malim deformacijama, inicijalni modul smicanja je moguće odrediti u statičkim i dinamičkim optitima, u dreniranim i nedreniranim uslovima opterećivanja, jer se pri veoma malim deformacijama ne razvija dodatni porni pritisak u tlu. Pored pažljivo sprovedenih opita, pravilno uzorkovanje ima odlučujući uticaj na mehaničko ponašanje tla.

U nedostatku laboratorijskih i terenskih istraživanja za konkretan problem, publikovani rezultati ispitivanja različitih vrsta tla i u različitim uslovima imaju neprocenjiv značaj. U literaturi se mogu naći brojne empirijske korelacije inicijalnog modula smicanja sa karakteristikama tla koje se rutinski određuju u laboratoriji. Zbog uticaja brzine smicanja na krutost sitnozrnog tla u području malih i velikih deformacija, kod usvajanja odgovarajuće krive iz literature je potrebno voditi računa ne samo o sličnim karakteristikama tla, već i pod kojim uslovima je kriva određena (statička ili dinamička ispitivanja), kao i o tome da li se primenjuje u statičkoj ili dinamičkoj analizi deformacija tla. Redukcija modula smicanja se najčešće predstavlja u normalizovanom obliku i to hiperboličkom funkcijom.

Za pouzdano i ekonomično predviđanje deformacija tla je pored kvalitetnog uzorkovanja i laboratorijskih i terenskih ispitivanja, potrebno korišćenje naprednih konstitutivnih modela koji uzimaju u obzir izrazitu nelinearnost tla. To je naročito bitno u tvrdom prekonsolidovanom tlu,

gde deformacije u okolini geotehničkih objekata obično ne prelaze 0.5% pri radnom statičkom opterećenju. U analizama sa konstantnom krutošću koja je određena u konvencionalnom laboratorijskom opitu su obično precenjena pomeranja fleksibilnih potpornih konstrukcija i sleganja tla ispod temelja, a naročito u okolini opterećenje površine koja je u zoni malih deformacija. Sa druge strane, sleganja tla usled izgradnje tunela su potcunjena u zoni iznad tunelske konstrukcije (zona velikih deformacija), dok se u okolnom području (zona malih deformacija) dobijaju nešto veća sleganja od vrednosti izmerenih na terenu.

U Srbiji je određivanje krutosti tla pri veoma malim i malim deformacijama još uvek na nivou empirijskih korelacija. U okviru naučno istraživačkog projekta broj 36046 *Istraživanje uticaja vibracija od saobraćaja na zgrade i ljude u cilju održivog razvoja gradova*, je predviđena nabavka laboratorijske opreme (bender element) za određivanje inicijalnog modula smicanja. Ispitivanja će se vršiti u Laboratoriji za mehaniku tla Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

LITERATURA

- [1] Burland, J.B., Symes, M.: *A simple axial displacement gauge for use in the triaxial apparatus*. Géotechnique, Volume 32, Number 1, 1982, 62-65.
- [2] Jardine, R. J., Symes, M. J. R. P., Burland, J.B.: *The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus*. Géotechnique, Volume 34, Number 3, 1984, 232-340.
- [3] Clayton, C.R.I., Khratush, S.A.: *A new device for measuring local strains on triaxial specimens*. Géotechnique, Volume 36, Number 4, 1986, 593-597.
- [4] Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S., Sato, T.: *A simple gauge for local strain measurements in the laboratory*. Soils and Foundations, Volume 31, Number 1, 1991, 169-180.
- [5] Cuccovillo, T., Coop, M.R.: *The measurement of local axial strains in triaxial testing using LVDTs*. Géotechnique, Volume 47, Number 1, 1997, 167-171.
- [6] Da-Re, G., Santagata, M.C., Germaine, J.T.: *Lvdt based system for the measurement of the prefailure behaviour of geomaterials*. Geotechnical Testing Journal 24(3), 2001, 288-298.
- [7] Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B., Burland, J.B.: *Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction*. Géotechnique, Volume 36, Number 3, 1986, 337-396.
- [8] Burland, J. B.: *Ninth laurits bjerrum memorial lecture: 'small is beautiful' - the stiffness of soils at small strains*. Canadian Geotechnical Journal 26, 1989, 499-516.
- [9] Tatsuoka, F., Shibuya, S.: *Deformation characteristics of soils and soft rocks from field and laboratory tests*. Keynote Lecture, Proc. 9th Asian reg. Conf. on SMFE, Bangkok, 1992, 101-170.
- [10] Atkinson, J.H.: *Non-Linear soil stiffness in routine design*. Géotechnique, Volume 50, Number 5, 2000, 487-508.
- [11] Atkinson, J.H., Sallfors, G.: *Experimental determination of soil properties characteristic in laboratory and situ test*. Proc. 10th ECSMFE, Florence, 3, 1991, 915-956.

- [12] Mair, R.J.: *Developments in geotechnical engineering research: application on tunnels and deep excavations*. Proceedings of Institution of Civil Engineers, Civil Engineering, Unwin Memorial Lecture, 1992, 27-41.
- [13] Seed, H.B., Iddris, I.M.: *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*. Report 70-10, EERC, Berkeley, CA, 1970.
- [14] Stokoe, K.H., Darendeli, M.B., Andrus, R.D., Brown, L.T.: *Dynamic soil properties: laboratory, field and correlations studies*. Proc. Second Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering, Lisbon, (3), 1999, 811-845.
- [15] Georgiannou, V.N., Rampello, S., Silvestri, F.: *Static and dynamic measurements of undrained stiffness on natural overconsolidated clays*. The Proceedings of the 10th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, Vol. 1, 1991, 91-95.
- [16] Burland, J.B., Simpson, B., St. John, H.D.: *Movements around excavations in London clay*. Proceedings of the 7th European Conference on Soil Mechanics, Vol. 1, Brighton, 1979, 13-30.
- [17] Tatsuoka, F., Kohata, Y.: *Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications*. Keynote Lecture, Proc. of Int. Symposium Pre-Failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Rotterdam, Volume 2, 1995, 947-1063.
- [18] Richart Jr., F.E.: *Dynamic stress-strain relationships for soils, S-O-A*. Proceedings 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, Tokyo, 1977, 605-612.
- [19] Toki, S., Shibuya, S., Yamashita, S.: *Standardization of laboratory test methods to determine the cyclic deformation properties of geomaterials in Japan*. Proc. of Int. Symposium Pre-Failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Rotterdam, Volume 2, 1995, 741-784.
- [20] Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G.L., Hoques, E., Kodaka, T.: *Modeling of the non-linear deformation properties of stiff geomaterials*. Geotechnique, Volume 47, Number 3, 1997, 563-580.
- [21] Hight, D.W., Bennell, J.D., Chana, B., Davis, P.D., Jardine, R.J., Porovic, E.: *Wave velocity and stiffness measurements of the Crag and Lower London Tertiaries at Sizewell*. Geotechnique, Volume 47, Number 3, 1997, 451-474.
- [22] Stokoe, K.H., Santamarina, J.C.: *Seismic-wave-bases testing in geotechnical engineering*. GeoEng 2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Volume 1, 2000, 1490-1536.
- [23] Landon, M.M., De Groot, D.J., Jakubowski, J.: *Comparison of shear wave velocity measured in situ and on block samples of a marine clay*. Proceedings 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec, 2004, 22-28.
- [24] Hardin, B. O., Drnevich, V.P.: *Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects*. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Div., ASCE, Volume 98, Number SM6, June, 1972, 603-624.
- [25] Jamiolkowski M., Leroueil S., LoPresti D.C.F.: *Theme lecture: Design parameters from theory to practise*. Proceedings, Geo-Coast '91, Yokohama, Japan, 1991, 1-41.

- [26] Viggiani, G., Atkinson, J. H.: *Stiffness of fine-grained soil at very small strains*. Géotechnique, Volume 45, Number 2, 1995, 249-265.
- [27] Benz, T.: *Small-strain stiffness and its numerical consequences*. Ph.D. Thesis, University of Stuttgart, 2007.
- [28] Tatsuoka, F., Jardine, R.J., LoPresti, D., Di Benedetto, H., Kodaka, T.: *Theme Lecture: characterizing the pre-failure deformation properties of geomaterials*. Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 4, Hamburg, 1997, 2129-2164.
- [29] Leroueil, S., Marques, M.E.S.: *Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering*. Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behavior, GSP No. 61, ASCE, New York, 1996, 1-60.
- [30] Quinn, T.: *Rate effects in fine grained soils*. Ph.D. Thesis, University of Dundee, 2013.
- [31] Kulhawy, F.H., Mayne, P.W.: *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Electric Power Research Institute, Report EL-6800, Palo Alto, 1990.
- [32] Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M., Pallara, O., Cavallaro, A., Pedroni, S.: *Shear modulus and damping of soils*. Géotechnique, Volume 47, Number 3, 1997, 603-617.
- [33] Vardenega, P.J., Bolton, M.D.: *Practical methods to estimate the non-linear shear stiffness of fine grained soils*. International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Seoul, Korea, 2011.
- [34] Darendeli, M.B.: *Development of a new family of normalised modulus reduction and material damping curves*. PhD thesis, University of Texas at Austin, USA, 2001.
- [35] Vučetić, M., Dobry, R.: *Effect of soil plasticity on cyclic response*. Journal of Geotechnical Engineering (ASCE), Volume 117, Number 1, 1991, 89-117.