

M. Marjanović, S. Jocković, and M. Vukićević, 'Određivanje dinamičkih karakteristika tla', in Zbornik radova Šestog naučno-stručnog [!] međunarodnog savetovanja Geotehnički aspekti građevinarstva = Conference Proceedings [of] Sixth International Conference Geotechnics in Civil Engineering, Vršac, 3.-6. novembar 2015., Beograd, 2015, pp. 227–234.

ODREĐIVANJE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA TLA

Miloš Marjanović, Sanja Jocković, Mirjana Vukićević

*Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73,
Beograd. mmarjanovic@grf.bg.ac.rs*

REZIME

U ovom radu opisano je određivanje dinamičkih karakteristika tla za ekvivalentnu 1D linearnu analizu dinamičkog odgovora. Istraživanja u ovoj oblasti pokazala su da ovakva analiza daje rezultate koji su u skladu sa merenim vrednostima, pod uslovom da su zadovoljene odgovarajuće pretpostavke i da su dinamičke karakteristike pravilno definisane. Do danas je razvijeno više terenskih i laboratorijskih metoda za određivanje dinamičkih karakteristika tla, kao i veliki broj empirijskih formula.

KLJUČNE REČI: modul smicanja, male deformacije, prigušenje, dinamička analiza

DETERMINATION OF DYNAMIC SOIL PROPERTIES

ABSTRACT

This paper presents the determination of dynamic soil properties for the equivalent 1D linear dynamic response analysis. Researches in this area have shown that this kind of analysis can give results that are consistent with the measured values, if the appropriate assumptions are met and if the dynamic properties are defined correctly. Many field and laboratory methods, as well as the large number of empirical formulas for determining the dynamic soil properties have been developed up to date.

KEY WORDS: stiffness modulus, small strain, damping, dynamic analysis

UVOD

Ponašanje tla pri dinamičkim naprezanjima definiše se posebnim fizičkim veličinama - dinamičkim karakteristikama tla. Istraživanja u ovoj oblasti pokazala su da 1D analiza

dinamičkog odgovora daje rezultate koji su u skladu sa merenim vrednostima, pod uslovom da su zadovoljene odgovarajuće pretpostavke i da su dinamičke karakteristike tla pravilno definisane (Kramer, 1996). U 1D analizi tlo se modelira kao horizontalno uslojeni poluprostor, čije se dinamičke karakteristike menjaju u vertikalnom pravcu. Pretpostavlja se da je pravac prostiranja talasa vertikalalan. Ove pretpostavke su zadovoljene u najvećem broju praktičnih problema.

U pogledu deformacija tlo je prvenstveno izloženo deformacijama smicanja, sa čijim porastom mehaničko ponašanje postaje složenije. Pri deformacijama manjim od 10^{-5} smatra se da je ponašanje tla elastično, dok se u rasponu deformacija od 10^{-5} do 10^{-2} osim elastičnih javljaju i plastične deformacije. Kod većih deformacija tlo dolazi u stanje loma. U području malih i srednjih deformacija, za matematičko opisivanje konstitutivnih relacija najviše se koriste linearno elastični i viskoelastični modeli tla, dok se u domenu velikih deformacija moraju koristiti složeni elasto-plastični modeli (Slika 1). Za analizu dinamičkog odgovora podloge u domenu malih deformacija koristi se linearna analiza, a u području srednjih i velikih deformacija najčešće se koristi metoda ekvivalentne 1D linearne analize. Ovom analizom vrši se aproksimacija nelinearnog dinamičkog odgovora primenom niza sukcesivnih linearnih analiza, u kojima se dinamičke karakteristike tla prilagođavaju ostvarenom nivou deformacije. Na ovaj način se primenom linearne analize u obzir uzimaju najvažniji elementi nelinearnog ponašanja. Kod linearne dinamičke analize važi princip superpozicije, što omogućava da se dejstva stohastičkog karaktera aproksimiraju sumom prostih harmonijskih funkcija. Složeniji nelinearni dinamički modeli koji zahtevaju viši stepen znanja i iskustva u njihovoj primeni detaljnije opisuju ponašanje tla, pre svega promenu smičuće čvrstoće i pomnih pritisaka, ali uz uvođenje većeg broja dodatnih parametara. U ovom radu opisano je određivanje dinamičkih parametara tla za ekvivalentnu linearnu analizu.

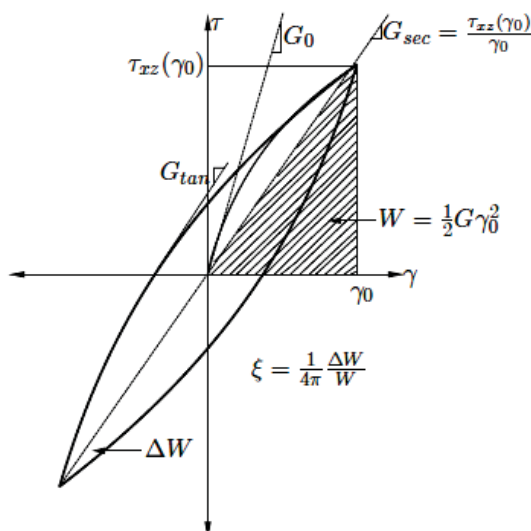
Deformacija smicanja	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Male def.	Srednje deformacije	Velike deformacije	Lom		
Elastično	[Hatched area from 10^{-6} to 10^{-5}]					
Elasto-plastično		[Hatched area from 10^{-5} to 10^{-2}]				
Lom				[Hatched area from 10^{-2} to 10^{-1}]		
Konstitutivni modeli	Linearno elastični	Viskoelastični		Elasto-plastični		
Analiza odgovora	Linearna	Ekvivalentna linearna		Direktna integracija		

Slika 1. Ponašanje tla u zavisnosti od veličine deformacije smicanja
Figure 1. Behavior of the soil according to the size of shear deformation

EKVIVALENTNI LINEARNI DINAMIČKI PARAMETRI TLA

Poznato je da tlo uvek osciluje kao prigušeni sistem. Najčešće korišćeni model prigušenja u dinamici tla je Kelvin-Voight-ov viskoelastični model, čiji su parametri analogni

parametrima prigušenog dinamičkog sistema sa jednim stepenom slobode (Kramer, 1996). Za slučaj harmonijskih smičućih oscilacija radni dijagram τ - γ Kelvin-Voight-ovog modela ima oblik elipse (Slika 2). Tangens ugla nagiba tangente na dijagram τ - γ je tangentni modul smicanja G_{tan} u posmatranoj tački. Na početku ciklusa G_{tan} ima maksimalnu vrednost G_0 i naziva se modul smicanja pri malim deformacijama (small strain shear modulus).



Slika 2. Dijagram τ - γ i energija deformacije pri cikličnom naprezanju
Figure 2. Diagram τ - γ and the strain energy under cyclic stress

Prosečna vrednost G_{tan} tokom jednog ciklusa aproksimira se sekantnim modulom G_{sec} :

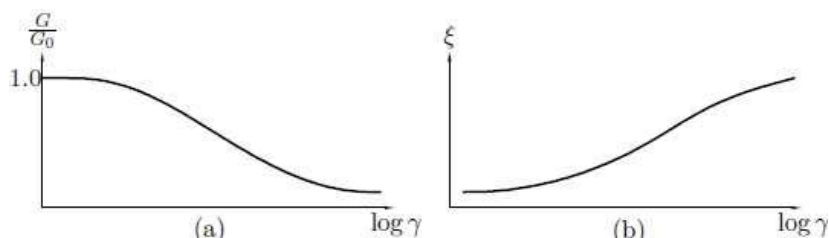
$$G_{sec} = G = \frac{\tau_{xz}(\gamma_0)}{\gamma_0} \quad (1)$$

Promena modula smicanja G sa povećanjem nivoa deformacije smicanja pri cikličnom naprezanju prikazuje se polulogaritamskim dijagramom (Slika 3a) koji se naziva kriva redukcije modula smicanja (modulus reduction curve). Da bismo u potpunosti definisali ponašanje tla pri dinamičkom cikličnom naprezanju, potrebno je poznavati vrednost G_0 , kao i krivu redukcije modula u domenu deformacija koji je od interesa za razmatrani problem. Relativno prigušenje SDOF sistema ξ definiše se kao odnos koeficijenta prigušenja c i kritičnog koeficijenta prigušenja c_{cr} . Za slučaj harmonijskih oscilacija se ξ može izraziti iz odnosa energije izgubljene tokom jednog cikličnog naprezanja ΔW i energije elastične deformacije W :

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (2)$$

Izraz (2) primenjuje se za određivanje relativnog prigušenja na osnovu eksperimentalnih ispitivanja cikličnim naprezanjem, za slučaj kada radni dijagram nije eliptičnog, već

složenijeg oblika. Modul smicanja G se korišćenjem izraza (1) takođe može odrediti iz eksperimentalnog radnog dijagrama, određivanjem ukupne energije elastične deformacije W i amplitude deformacije smicanja γ_0 (Slika 2). Sa povećanjem deformacije smicanja relativno prigušenje raste. Ova promena se prikazuje na polulogaritamskom dijagramu (Slika 3b), koji nazivamo kriva prigušenja (damping curve).



Slika 3. Kriva redukcije modula smicanja (a) i kriva prigušenja (b)
Figure 3. Modulus reduction curve (a) and damping curve (b)

Ekvivalentni linearni dinamički parametri tla (G i ξ) su najvažnije dinamičke karakteristike tla, kako u domenu malih, tako i u domenu srednjih ili velikih deformacija. Ovi parametri mogu se primenom kompleksne formulacije objediniti u jedan parametar koji nazivamo kompleksni modul smicanja G^* :

$$G^* = G(1 + 2i\xi) \quad (3)$$

Pored navedenih parametara, u dinamičkoj analizi potrebno je definisati i zapreminsku masu (gustinu) tla ρ i Poisson-ov koeficijent ν , uz napomenu da ovi parametri nemaju presudan uticaj na dinamički odgovor sistema, kao i da variraju u uskim granicama.

ODREĐIVANJE DINAMIČKIH KARAKTERISTIKA TLA

Do danas je razvijeno više terenskih i laboratorijskih metoda za određivanje dinamičkih karakteristika tla, sa različitim prednostima i ograničenjima. Ove metode pokrivaju kako domen malih, tako i srednjih i velikih deformacija. Dok neke metode služe isključivo za određivanje dinamičkih karakteristika, pojedine predstavljaju modifikacije metoda za određivanje karakteristika tla pri statičkom opterećenju. Pored terenskih i laboratorijskih metoda, razvijen je i veliki broj empirijskih formula kojima se dinamičke karakteristike tla mogu odrediti iz opšte poznatih osnovnih parametara tla pri statičkom opterećenju.

Terenske metode omogućavaju određivanje dinamičkih karakteristika tla na licu mesta. Prednost ovog pristupa leži u činjenici da nema uzorkovanja tla, pa se stanje napona i deformacija ne menja. Ispitivani domen tla je reprezentativan i relativno veliki. Međutim, u terenskim ispitivanjima se dinamičke karakteristike ne mere direktno, već korišćenjem teorijske analize ili empirijskih korelacija. Laboratorijskim ispitivanjima se dinamičke karakteristike tla takođe mogu odrediti kako u domenu malih, tako i u domenu srednjih i velikih deformacija. Osnovni nedostatak je što se ispitivanje vrši na elementu tla

ograničenih dimenzija. Takođe, pouzdanost parametara dosta zavisi od mogućnosti laboratorijske opreme da simulira početne uslove i uslove naprežanja za problem od interesa. Generalno, laboratorijski određen G_0 ima manju vrednost u odnosu na vrednost dobijenu terenskim ispitivanjima. Najpouzdaniji način određivanja G_0 je preko poznate brzine prostiranja smičućih talasa kroz tlo v_s (ρ je zapreminska masa tla):

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (4)$$

Jednu od najčešće korišćenih empirijskih formula, koja važi za sve tipove tla, predložili su Hardin i Drnevich 1972.:

$$\frac{G_0}{p_a} = 625 F(e) OCR^k \left(\frac{\sigma_M'}{p_a} \right)^n \quad (5)$$

- p_a atmosferski pritisak, u istim jedinicama kao σ_M' ,
- $F(e)$ funkcija koeficijenta poroznosti tla e ,
- OCR stepen prekonsolidacije,
- k eksponent stepena prekonsolidacije, dat u Tabeli 1,
- n naponski eksponent (najčešće se usvaja $n=0.5$)
- σ_M' srednji efektivni napon ($=1/3(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')$)

Funkcija koeficijenta poroznosti $F(e)$ koju je predložio Hardin 1978. glasi:

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (6)$$

Jamiolkowski 1991. predlaže sledeću funkciju $F(e)$:

$$F(e) = e^{-1.3} \quad (7)$$

Pored pomenutih univerzalnih formula, definisan je i veliki broj formula koje važe za određene tipove tla. Za peskove Seed i Idriss 1970. predlažu sledeću formulu:

$$\frac{G_0}{p_a} = 22.4 K_{2,\max} \left(\frac{\sigma_M'}{p_a} \right)^{0.5} \quad (8)$$

gde je $K_{2,\max}$ koeficijent dat u Tabeli 2 u funkciji koeficijenta poroznosti e ili relativne zbijenosti tla D_r . Za šljunkove je vrednost $K_{2,\max}$ veća i iznosi 80-180 (Seed i dr., 1986).

Za sitnozrna tla se, prema Weiler-u (1988), G_0 može preliminarno proceniti na osnovu vrednosti indeksa plastičnosti I_p , stepena prekonsolidacije OCR i nedrenirane smičuće čvrstoće s_u iz CU opita triaksijalne kompresije. Preporučene vrednosti su date u Tabeli 3.

Tabela 1. EkspONENT stepena prekonsolidacije (Kramer 1996)

Table 1. OCR exponent (Kramer 1996)

Indeks plastičnosti I_p	k
0	0.00
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
≥ 100	0.50

Tabela 2. Koeficijent $K_{2,max}$ Table 2. Coefficient $K_{2,max}$

e	$K_{2,max}$	D_r (%)	$K_{2,max}$
0.4	70	30	34
0.5	60	40	40
0.6	51	45	43
0.7	44	60	52
0.8	39	75	59
0.9	34	90	70

Tabela 3. Vrednosti G_0/s_u Table 3. Values G_0/s_u

Indeks plastičnosti I_p	OCR		
	1	2	5
15-20	1100	900	600
20-25	700	600	500
35-45	450	380	300

G_0 se može empirijski proceniti i na osnovu rezultata terenskih penetracionih (SPT i CPT) ispitivanja tla. Prilikom određivanja G_0 na ovaj način treba biti naročito oprezan, jer je nivo deformacija tla pri penetracionim optima veći od nivoa koji odgovara vrednosti G_0 .

Generalno, modul smicanja kod visoko plastičnog tla opada znatno sporije nego u slučaju tla niske plastičnosti. Na osnovu analize velikog broja eksperimentalnih rezultata za različite tipove tla, Dobry i Vučetić (1987) su definisali niz G/G_0 krivih za tla različite plastičnosti ($I_p=0-200$). Kramer (1996) navodi da se kriva redukcije modula prema (Dobry i Vučetić, 1987) za slučaj $I_p=0$ može koristiti kao kriva redukcije modula za peskove. Rollins i dr. (1998) su analizirali veliki broj eksperimentalnih rezultata za peskove i šljunkove i definisali krivu G/G_0 u funkciji deformacije smicanja (decimalno):

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + 1600\gamma(1 + 10^{-2000\gamma})} \quad (9)$$

Ova kriva redukcije slaže se sa rezultatima Seed-a i dr. (1970.) za peskove, kao i sa empirijskim korelacijama za sitnozrna neplastična tla (prašine sa $I_p = 0$) (RIVAS 2012).

Stokoe i dr. (1999) za redukciju modula smicanja predlažu sledeću funkciju u normalizovanom obliku:

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^\alpha} \quad (10)$$

gde je:

- α parametar krivine,
- γ_{ref} referentna deformacija pri kojoj je $G/G_0=0.5$

Referentna deformacija γ_{ref} se najčešće dovodi u vezu sa indeksom plastičnosti I_p . Sumirajući rezultate 67 opita na 21 vrsti sitnozrnog tla (gline i prašine), Vardanega i Bolton 2011. predlažu sledeću relaciju za primenu u dinamičkim analizama:

$$\begin{aligned} \gamma_{ref} &= 3.7 \times 10^{-5} I_p, \\ \alpha &= 0.943 \end{aligned}$$

Teoretski, u domenu malih deformacija gde je ponašanje tla približno linearno elastično, prigušenje ne bi trebalo da postoji. Međutim, eksperimentalna ispitivanja pokazuju da i u ovoj oblasti postoji izvesno prigušenje (Kramer, 1996). Generalno, ξ je najveće je kod krupnozrnih materijala, a najmanje kod visoko plastičnog i organskog tla. Povećanje ξ sa porastom nivoa deformacije kod sitnozrnog tla najviše zavisi od I_p (Kokusho i dr. 1982, Dobry i Vučetić 1987, Sun i dr. 1988), pri čemu je ovaj uticaj značajniji u domenu srednjih ili velikih deformacija. Na prigušenje nisko plastičnih i krupnozrnih vrsta tla značajno utiču i relativna zbijenost D_r i efektivni vertikalni napon u tlu. Ishibashi i Zhang su 1993. formulisali empirijsku formulu na osnovu koje se iz poznatog odnosa G/G_0 može odrediti ξ krupnozrnog ($I_p = 0$) i sitnozrnog tla:

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 I_p^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_0} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_0} + 1 \right] \quad (11)$$

ZAKLJUČAK

Određivanje dinamičkog odgovora tla usled zemljotresa, vibracija od saobraćaja i sl. jedan je od najzahtevnijih zadataka geotehničkog inženjerstva. Ekvivalentni linearni parametri tla (G i ξ) su najvažnije dinamičke karakteristike tla, kako u domenu malih, tako i u domenu srednjih ili velikih deformacija. Važno je napomenuti da empirijske formule treba koristiti isključivo za preliminarnu ocenu dinamičkih karakteristika tla, kako bi se kasnije mogao pravilno definisati program terenskih i laboratorijskih ispitivanja za njihovo tačnije određivanje. Dugo se smatralo da eksperimentalni rezultati dobijeni pri statičkom opterećenju nisu primenljivi u analizi pri dinamičkom opterećenju. 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. Termini u literaturi poznati kao statički modul smicanja i dinamički modul smicanja nisu dve različite elastične konstante, već su to dve vrednosti modula smicanja određene pri različitom nivou smičućih deformacija. Ova hipoteza je potvrđena brojnim laboratorijskim i terenskim ispitivanjima.

LITERATURA:

- Dobry R., Vučić M.: Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils. Mexico City (1987) 51–87
- Hardin B.O., Drnevich V.P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division 98 (1972) 667-692
- Hardin B.O.: The nature of stress-strain behavior for soils. Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics (1978) 3-89
- Ishibashi I., Zhang X.: Unified dynamic shear moduli and damping ratio of sand and clay. Soils and Foundations 33 (1993) 182-191
- Jamiolkowski M., Leroueil S., Lo Presti D.C.F.: Theme Lecture: Design parameters from theory to practice. Proceedings of Geo-Coast '91 (1991) 1–41
- Kokusho T., Yoshida Y., Esashi Y.: Dynamic properties of soft clay for wide strain range. Soils and Foundations 22 (1982) 1-18
- Kramer S.L.: Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, Inc. New York 1996.
- RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project: Test procedures for the determination of the dynamic soil characteristics. International Unions for Railways, 2012. www.rivas-project.eu
- Rollins K.M., Evans M.D., Diehl N.B., Daily W.D.: Shear modulus and damping relationships for gravels. Geotechnical Engineering 124 (1998) 396–405
- Seed H.B., Idriss I.M.: Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses (Report No. EERC 70-10). Earthquake Engineering Research Center, Berkeley. University of California. 1970.
- Seed H.B., Wong R.T., Idriss I.M., Tokimatsu, K.: Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. Journal of Geotechnical Engineering 112 (1986) 1016–1032
- Stokoe K.H., Darendeli M.B., Andrus R.D., Brown L.T.: Dynamic soil properties: laboratory, field and correlations studies. Proceedings of Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Lisbon (1999) 811–845
- Sun J.I., Golesorkhi R., Seed H.B.: Dynamic moduli and damping ratios for cohesive soils (Report No. EERC-88/15). Earthquake Engineering Research Center, Berkeley. University of California. 1988.
- 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 (2011)
- Weiler W.A.: Small strain shear modulus of clay. Proceedings of the ASCE Conference on Geotechnical Engineering and Soil Dynamics II: Recent Advances in Ground Motion Evaluation (1988) 331–335