

Antun SZAVITS-NOSSAN

prof.dr.sc., dipl.ing.građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Odjel za geotehniku

ISTRAŽIVANJE I PRIMJENA KRUTOSTI TLA PRI MALIM DEFORMACIJAMA NA GRAĐEVINSKOM FAKULTETU SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

SAŽETAK: U radu se prikazuju glavni rezultati istraživanja krutosti tla u širokom rasponu deformacija, prvenstveno vrlo male i male, u laboratoriju, na terenu i s teoretskog stanovišta, koja se provode na Geotehničkom odjelu Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u zadnjih pet godina. Od laboratorijskih istraživanja opisuje se mjerenje malih deformacija na uzorku tla u troosnom uređaju, a od terenskih istraživanja metoda spektralne analize površinskih (Rayleigh-evih) valova. Od teoretskih istraživanja opisuje se praktičnost normaliziranog oblika krivulje redukcije posmičnog modula s porastom posmične deformacije, od vrlo malih deformacija do sloma. Također se ukratko opisuje nova kinematski očvršćavajuća elastoplastična konstitucijska jednadžba u koju je ugrađena normalizirana krivulja redukcije posmičnog modula. Na kraju se prikazuje primjena te konstitucijske jednadžbe u numeričkoj simulaciji iskopa 18 m duboke građevne jame zaštićene armiranobetonskom dijafragmom pridržanom prednapetim sidrima.

RESEARCH AND APPLICATION OF SOIL STIFFNESS AT SMALL STRAINS AT THE FACULTY OF CIVIL ENGINEERING OF THE UNIVERSITY OF ZAGREB

SUMMARY: The paper presents main results of a five year research on stiffness of soils at small strains that is under way at the Geotechnical department of the Faculty of civil engineering at Zagreb University. Laboratory research included small strain measurements on the surface of soil samples in the triaxial apparatus. For in situ measurements the relatively novel method of spectral analysis of surface waves was introduced. Theoretical research was aimed at development of a normalised relationship for the shear modulus reduction with increase of shear strain. Also, a new kinematic hardening elastoplastic constitutive equation is described. The equation incorporates the normalised shear modulus reduction curve. Finally, an application of the new constitutive equation in the numerical analysis of a 18m deep excavation supported by a reinforced concrete diaphragm wall with prestressed anchors is briefly described.

UVOD

U radu se prikazuje istraživanja i primjena krutosti tla pri malim deformacijama na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu koja su započela prije nekoliko godina.

Predviđanja deformacija tla izazvanih građevinskim zahvatima jedna je od značajnih zadaća u geotecnici. Potreba za takvim predviđanjima javlja se, među ostalim, pri procjeni slijeganja temeljnog tla kao i pri problemima interakcije konstrukcija-temelj-tlo. Postupci predviđanja deformacija tla temelje se općenito na mehanici kontinuuma (u praksi se najčešće to sužava na primjenu teorije elastičnosti) koja zahtjeva poznavanje parametara stišljivosti tla u dovoljno širokoj okolini oko mjesta djelovanja opterećenja. Ovi se parametri stišljivosti u praksi određuju laboratorijskim ili terenskim postupcima u okviru geotecnčkih istražnih radova. Međutim, praksa nas uči da je često pouzdanost predviđanja deformacija tla vrlo slaba i nedostatna za racionalno projektiranje građevinskih konstrukcija. Nadalje, pouzdanost predviđanja deformacija tla prvenstveno ovisi o vrsti tla i njegovom geološkom porijeklu. Razlozi tome su brojni i njihovo nabrojanje prelazi okvire ovog članka. Međutim, razvojem mehanike tla i geotecnike stanje se u pojedinim elementima znatno popravlja. Priču o razvoju postupka za predviđanje deformacija u krutim glinama i slabim stijenkama, kako su je opisali Jardine i dr. (1986), ovdje je poučno prepričati.

Dugo se smatralo da se krute ili prekonsolidirane gline ponašaju kao linearno elastični materijal ili barem da se dodatna naprezanja u takvim materijalima ponašaju po pravilima linearne teorije elastičnosti. Prva je teza bila prvenstveno podržavana istraživanjima ponašanja prekonsolidiranih glina u laboratorijskim uređajima kakav je, na primjer, troosni (triaksijalni) uređaj. Druga je teza podržavana pokazateljima da vertikalna dodatna naprezanja slabo ovise o naponsko-deformacijskom zakonu. Iz toga je proizlazilo da točnost predviđanih slijeganja temeljnog tla prvenstveno ovisi o točnosti utvrđenih elastičnih modula krutih glina i njihovoj promjeni s dubinom. Međutim, ubrzo se ustanovilo da je teško izmjeriti ove elastične parametre. Standardni laboratorijski pokusi redovito su bitno potcjenjivali krutost takvih materijala u odnosu na krutosti dobivene povratnim analizama iz opaženih slijeganja. Čak su i te povratne analize davale rezultate ovisne o izboru opaženih rezultata i prihvaćenih pretpostavki. Osim za slučaj plitkih temelja, takvi su problemi uočeni i za slučajeve građevnih jama i savitljivih potpornih konstrukcija. Rješenje ovih problema pokušalo se naći primjenom in situ ispitivanja tla, ali bez većeg uspjeha. Premala krutost laboratorijskih uzoraka krutih glina pripisivala se njihovoj redovitoj raspucalosti, koja se tokom vađenja uzoraka iz tla i tokom ugrađivanja u odgovarajući laboratorijski uređaj, nije uspjela održati neporemećenom.

Koncem sedamdestih i početkom osamdesetih godina počeo je razvoj uređaja za mjerenje malih deformacija na samom uzorku tla u laboratorijskom uređaju. Razvijeni su razni tipovi uređaja, prvenstveno za primjenu u troosnom uređaju (na pr.: Burland i Symes, 1982, Jardine, Symes i Burland, 1984, Clayton i Khatrush, 1986, Goto i dr., 1991), s mogućnošću mjerenja relativnih deformacija do 0.01% pa i manjih. Rezultati pokusa, uz korištenje navedenih uređaja, bacili su ozbiljnu sumnju na tezu o linearno elastičnom ponašanju krutih glina. Oni su pokazali dvije važne novosti. Prvo, u području malih deformacija ponašanje tla pa i krutih glina izrazito je nelinearno, a ne linearno kako se do tada mislilo. Na primjer, posmična krutost tla u području smičućih deformacija od 0,01% do 1% pada s porastom deformacija i preko deset puta. Drugo, posmična je krutost tla pri malim deformacijama izrazito veća od one mjerene u klasičnim laboratorijskim uređajima. Razlog tome je značajna razlika u mjerenim deformacijama klasičnim načinom preko kape i podnožja uzorka u odnosu na mjerenje deformacija direktno na površini uzorka tla. Slična su zapažanja primijećena i za druge vrste tla, posebno one veće krutosti.

Opisani je razvoj tehnologije mjerenja malih i vrlo malih deformacija na površini uzoraka tla u laboratorijskim uređajima doveo do novih saznanja o ponašanju tla pri smicanju. Paralelna istraživanja pomno opaženih mjerenja deformacija tla pri raznim geotecnčkim zahvatima na terenu potvrdila su ova laboratorijska istraživanja (na pr.: Martin, McCoy i Hunt, 1986, Burland, 1989, Simpson, 1992). Čak ima naznaka da su ovisnosti posmične krutosti o relativnoj posmičnoj deformaciji dobivene opisanom tehnologijom za monotona (statička) opterećenja sukladna već ranije poznatim ovisnostima dobijenih pri dinamičkim laboratorijskim pokusima, kao što je, na primjer, pokus rezonantnog stupca (Atkinson i Sallfors, 1991), a koje su dugo smatrane neprimjerenim za analize sa statičkim opterećenjem. Tako je nova tehnologija mjerenja malih deformacija u laboratoriju pomogla smanjenju razlike u, do nedavno, različitim poimanju statičke i dinamičke posmične krutosti tla.

U opsežnim studijama o krutosti tvrdih tla i mekih stijena Tatsuoka i Shibuya (1991) te Tatsuoka i Kohata (1995) sistematiziraju dosadašnja saznanja dobijena laboratorijskim i terenskim istraživanjima te povratnim analizama dobro opažanih geotehničkih zahvata na terenu. Njihovi zaključci se mogu svesti ukratko na slijedeće:

- veličina pomaka geotehničkih konstrukcija (temelji, potporne konstrukcije i sl.) u krućim tlima temeljena na mjeranju krutosti tla u laboratoriju i terenu klasićnim postupcima obićno je znatno pretjerana;
- pretjerana velićina prognoziranih pomaka još do nedavno pripisivana je poremećenju uzoraka tla i relaksaciji napreznja u bušotini;
- razvojem lokalnog mjerenja malih deformacija na uzorcima tla u laboratoriju opaža se znatno veća krutost od one mjerene klasićnim putem, izvana sa mikrourom;
- lokalno mjerena krutost tla pokazuje izrazitu nelinearnost u području malih deformacija (manjih od 0,1%);
- mjerene krutosti tla u odgovarajućim laboratorijskim pokusima na kvalitetnim uzorcima pri vrlo malim deformacijama (manjim od 0,001%) pokazuju slične krutosti kao one mjerene geofizićkim metodama na terenu;
- krutosti tla mjerene odgovarajućim laboratorijskim postupcima pri monotonom ili dinamićkom (cikličkom) opterećenju približno su istih velićina za istu razinu deformacija i napreznja;
- pomaci tla pri radnom opterećenju mogu se pouzdano predvidjeti na temelju krutosti tla izmjerene geofizićkim metodama na terenu uzimajući u obzir promjenu krutosti ovisno o velićini deformacija i razine napreznja iz odgovarajućih laboratorijskih pouasa;
- pokus aksijalne ćvrstoće ćak i s mjerenjem brzine ultrazvućnih valova daje premale krutosti i ćvrstoće pa ti rezultati nisu preporućljivi za praktićnu uporabu.

Na tragu ovih saznanja poćela su istraživanja ponašanja tla pri malim deformacijama na Odjelu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilića u Zagrebu još 1991. godine nabavkom odgovarajućeg troosnog uređaja, snabdjevenog mjeraćima malih deformacija na površini uzorka tla. Ujedno su postavljene opći ciljevi ovih istraživanja:

- ♦ usvojiti tehnologije mjerenja malih deformacija u laboratoriju i na terenu;
- ♦ razviti konstitucijsku jednadžbu koja će opisivati ponašanje tla u širokom rasponu deformacija ukljućujući i krutost pri vrlo malim deformacijama, a ćiji parametri se mogu jednostavno i pouzdano odrediti u geotehnićkoj praksi;
- ♦ razviti postupak numerićke simulacije geotehnićkih zahvata uvaćavajući nelinearnost krutosti tla od vrlo malih do velikih deformacija;
- ♦ primijeniti rezultate ovih istraživanja pri projektiranju geotehnićkih zahvata.

Mada još zacrtani ciljevi nisu u potpunosti dosegnuti, ipak su osnovni rezultati postignuti. Njihov prikaz sadržaj je narednih poglavlja.

MJERENJE KRUTOSTI TLA U LABORATORIJU I NA TERENU

Zadnjih desetak godina bilježi se nagli razvoj saznanja o krutosti tla pri smicanju. Krutost tla pri smicanju ćesto se prikazuje kao odnos sekantnog modula smicanja G i relativne posmićne deformacije γ (slika 2). Pri tome se sekantni modul posmika definira kao odnos najvećeg posmićnog napreznja τ i najveće relativne posmićne deformacije γ , tj. $G = \tau/\gamma$ (vidi sl. 1). Kod troosnog laboratorijskog pokusa, na primjer, najveće posmićno napreznje definirano je izrazom $\tau = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$, gdje su σ_1' i σ_3' glavna efektivna napreznja, a najveća je relativna posmićna deformacija definirana izrazom $\gamma = \epsilon_1 - \epsilon_3$, gdje su ϵ_1 i ϵ_3 odgovarajuće glavne relativne deformacije. Na toćnost određivanja posmićnog modula utjeće kako preciznost mjerenja posmićnog napreznja tako i preciznost mjerenja posmićne deformacije. Dok sa preciznošću mjerenja posmićnog napreznja uglavnom nema problema, postizavanje odgovarajuće preciznosti u mjerenju malih, a posebno vrlo malih deformacija, do nedavno je bilo vrlo otežano. Iz slike 2 je vidljivo da mjerenje posmićnih deformacija u laboratorijskim uređajima od vrlo malih do velikih još uvijek nije rutinski zadatak jer je potrebna primjena nekoliko razlićitih tehnologija, ovisno o velićini deformacija koje se žele mjeriti. Tehnologije za mjerenje vrlo malih i malih relativnih deformacija još su u razvojnoj fazi i tek su od nedavno komercijalno dostupne. Njihovo korištenje i interpretaciju prati još niz problema te u praksi traže vrlo paćljiv rad i umješnost.

U grafičkim se prikazima ovisnost G od γ obično prikazuje u polulogaritamskom mjerilu iz razloga postizavanje jednolike grafičke pogreške za relativne posmične deformacije od vrlo malih do velikih veličina (slika 2). Na slici je prikazano i što se ponekad podrazumijeva pod pojmovima vrlo malih, malih ili velikih relativnih posmičnih deformacija.

Za daljnja razmatranja pogodno je definirati slijedeće posmične module prema slici 1: početni modul

$$G_0 = \left. \frac{d\tau}{d\gamma} \right|_{\gamma=0} \quad (1)$$

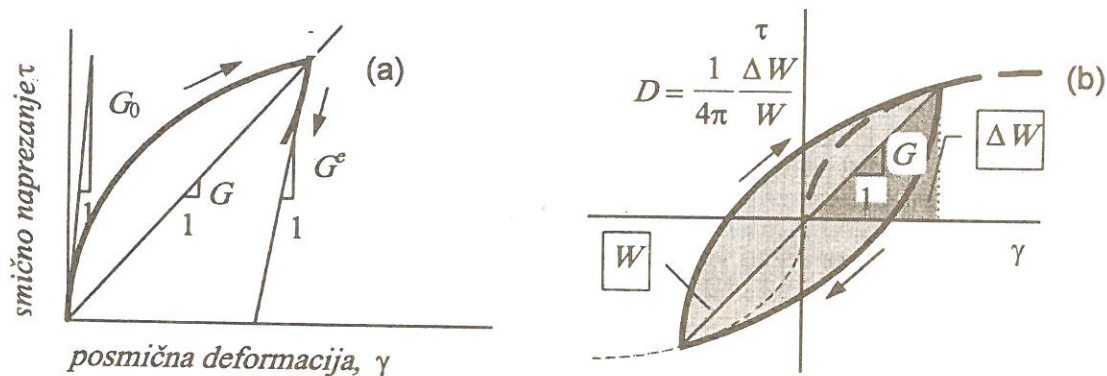
sekanтни modul

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

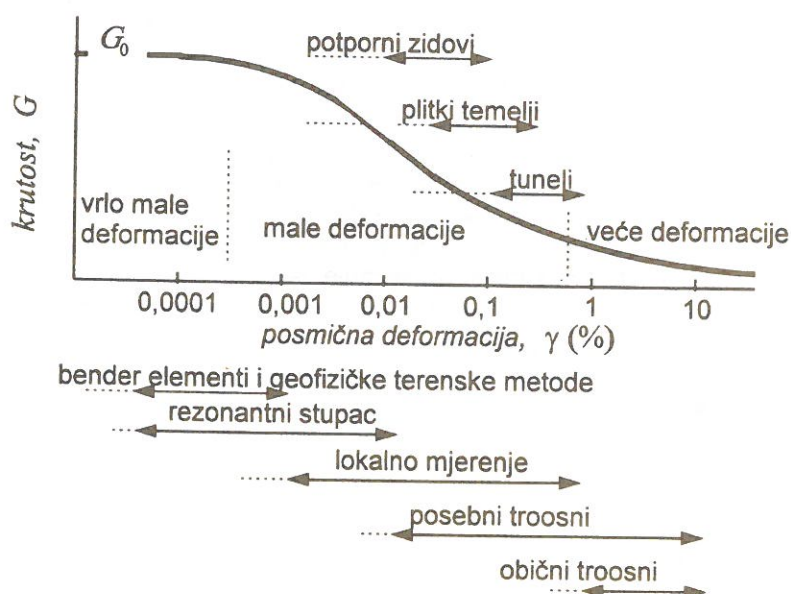
i elastični modul

$$G^e = \frac{d\tau}{d\gamma^e} \approx G_0 \quad (3)$$

Ove veličine su uobičajene u dinamici tla, ali se rijeđe ili tek od nedavna susreću i u standardnoj geotehničkoj literaturi.



Slika 1 Definicija posmičnih modula pri monotonom (a) i cikličkom (b) opterećenju (D je prigušenje)



Slika 2 Približne granične vrijednosti pouzdanog mjerenja posmičnih deformacija

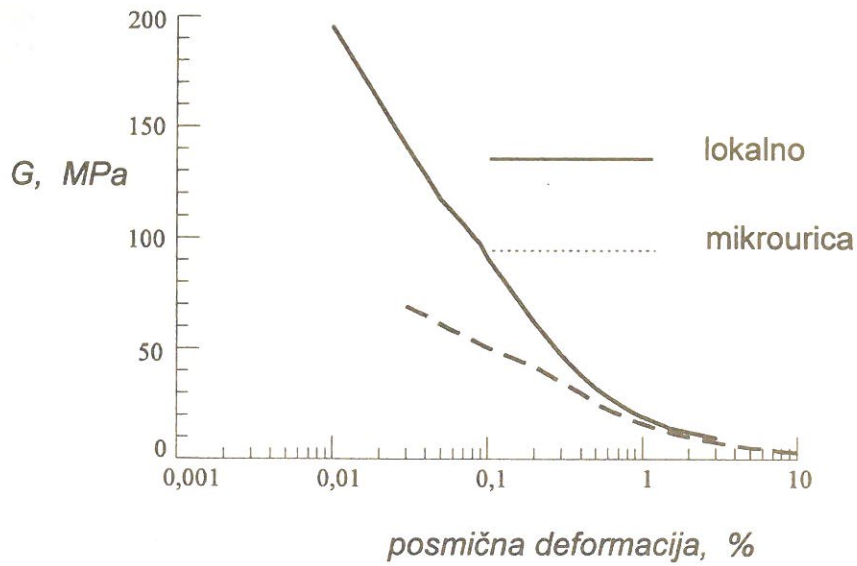
Danas ne postoji jedinstveni mjerni uređaj koji bi mogao mjeriti deformacije uzorka tla u širokom rasponu, od vrlo malih do velikih deformacija. Na slici 2 prikazana je tipična krivulja redukcije posmičnog modula od vrlo malih deformacija pa do sloma. Nju je eksperimentalno u laboratoriju moguće dobiti tek nizom različitih mjernih uređaja čiji je približni raspon mjerenja prikazan na istoj slici.

Krutosti pri vrlo malim deformacijama od oko 0,001% mogu u troosnom uređaju indirektno mjeriti tzv. bender elementima (Dyvik i Madshus, 1985). Tom se mjernom tehnikom mjeri brzina širenja posmičnih valova u uzorku tla, iz čega se pak može izračunati elastični modul posmika. Isti se modul može mjeriti i geofizičkim metodama na terenu. Posmični moduli pri posmičnim deformacijama do oko 0,01% mogu se mjeriti u pokusu rezonantnog stupca. Kao što je u Uvodu napomenuto, male se deformacije mogu mjeriti uređajima koji se pričvršćuju direktno na uzorak i koji su tek nedavno razvijeni (Burland i Symes, 1982, Jardine, Symes i Burland, 1984, Clayton i Khatrush, 1986, Goto i dr., 1991). Obični troosni uređaj može pouzdano mjeriti posmične deformacije tek od oko 0,1% na više. Na slici 2 su prikazane i približne granice deformacija koje se javljaju kod pojedinih slučajeva temeljenja.

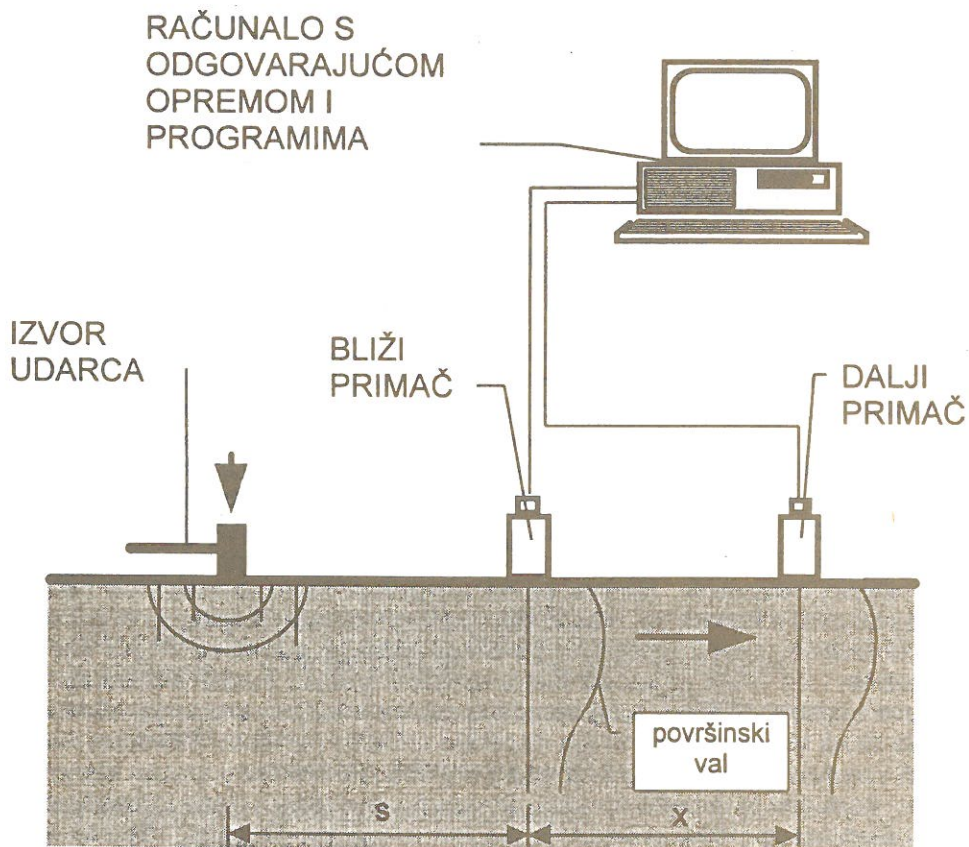
Odjel za geotehniku Građevinskog Fakulteta Sveučilišta u Zagrebu nabavio je 1991. godine hidraulički troosni uređaj vođen računalom firme GDS iz Velike Britanije. Uređaj je snabdjeven lokalnim električnim mjeračima malih deformacija na plaštu uzorka tla, temeljenih na iskorištavanju Hallovog efekta (Clayton i Khatrush 1986). Uređaj je temeljito preuređen radi uklanjanja problema oko ugradnje uzoraka tla te radi mnogih drugih poboljšanja. Detaljnije su troosni uređaj kao i mjera lokalnih deformacija prikazani u radu Zlatović i dr. (1996) na ovom Simpoziju.

Na slici 3 je prikazan je tipični odnos sekantnog posmičnog modula i posmične deformacije mjen standardnim postupkom mikrouricom kao i lokalnim mjeračima firme GDS u izotropno konsolidiranom troosnom pokusu na prekonsolidiranoj krutoj zagrebačkoj glini. Uočava se da su pouzdana mjerenja lokalnim mjeračima ostvarena od posmične deformacije od oko 0,01% te da su moduli iz lokalno mjerenih deformacija bitno veći od onih iz mjerenja mikrouricom u području deformacija manjim od oko 0,1%. Nažalost, lokalni mjerači deformacija na plaštu uzorka tla temeljeni na Hall-ovom efektu firme GDS ne mogu precizno mjeriti posmične deformacije mnogo manje od 0,01% što onemogućuje utvrđivanje početnog modula G_0 kod vrlo malih deformacija. U tu se svrhu planira izrada lokalnih mjerača temeljenih na savitljivim perima s tenzotrakama (Goto i dr., 1991) koji bi trebali obuhvatiti i te deformacije.

Za potrebe mjerenja elastičnih posmičnih modula na terenu, na Građevinskom fakultetu u Zagrebu nabavljena je 1996. godine oprema za spektralnu analizu površinskih valova (SASW - Spectral Analysis of Surface Waves). Ova je analiza temeljena na poznatoj pojavi disperzije površinskih (Rayleighevih) valova u uslojenim elastičnim sredinama, tj. ovisnosti brzine njihova širenja o valnoj dužini. Površinski se valovi mogu izazvati na razne načine, najčešće udarcem. Njihova se brzina izračunava preko faznih pomaka komponenti istih frekvencija fourierova rastava signala mjerena na dva mjesta odgovarajućim geofonima ili akcelerometrima i udaljenosti između ta dva mjerna mjesta. Valna dužina površinskih Rayleighevih valova doseže različitu dubinu ispod površine terena, obratno proporcionalno njihovoj frekvenciji. Njihova brzina prostiranja nešto je manja od brzine posmičnih valova u tlu koja pak ovisi o krutosti tla. Ako je tlo u području dosega Rayleighevih valova uslojeno sa slojevima različite krutosti, brzina prostiranja tih valova ovisit će o krutosti slojeva koji su u dosegu njihove valne dužine. To znači da se za svaku uslojenu sredinu postoji jedinstveni odnos brzine površinskih valova i njihove dužine, a taj se odnos naziva krivuljom disperzije. SASW metoda se sastoji u tome da se na terenu izmjeri krivulja disperzije te da se postupkom inverzije nađe raspodjela debljina i krutosti vodoravno uslojenog poluprostora koji ima istu teoretsku krivulju disperzije kao i ona što je izmjerena. Postupak je detaljno opisan u Stokoe II i dr. (1994) i Addo i Robertson (1992), a u radu Hiltunena i Gucunskog (1994) prikazan je pregled relevantne literature. Na slici 4 je prikazana tipična dispozicija izvedbe SASW pokusa na terenu.

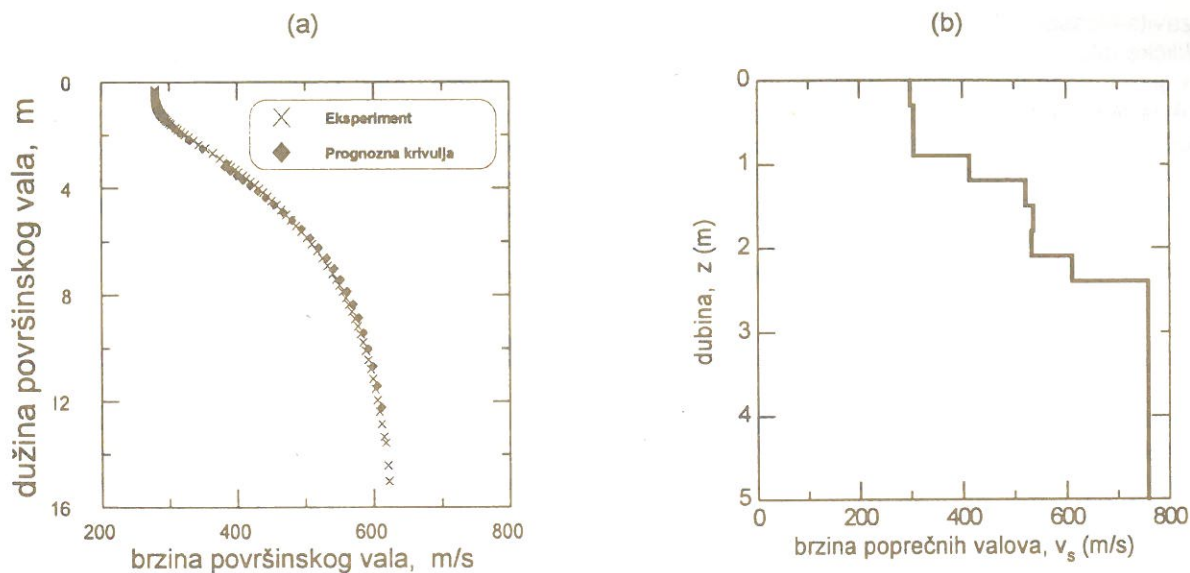


Slika 3 Posmični modul mjereno na uzorku zagrebačke krute gline pomoću lokalnih mjeraca deformacija firme GDS (Hall-efekt) i klasičnim putem pomoću mikrourice



Slika 4 Skica izvedbe SASW pokusa na terenu

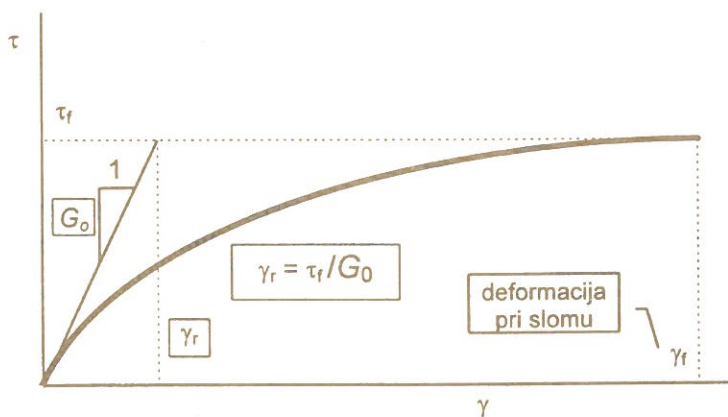
Tipična mjerena krivulja disperzije kao i krivulja disperzije odgovarajućeg teoretskog profila brzina posmičnih valova prikazana je na slici 5. Elastični modul posmika odredi se iz poznatog izraza $G = \rho v_s^2$.



Slika 5 Tipična mjerena i prognozna krivulja disperzije površinskih valova (a) i vertikalni profil krutosti vodoravno uslojenog elastičnog poluprostora za prognozu krivulju disperzije (b)

NORMALIZACIJA ODNOSA KRUTOSTI I POSMIČNE DEFORMACIJE

Anderson i Richart (1976) te Richart (1977, 1978, 1982) su pokazali da se odgovarajućim normaliziranjem ovisnosti sekantnog posmičnog modula o amplitudi relativne posmične deformacije može dobiti jedinstvena normalizirana funkcija, neovisna o srednjem efektivnom pritisku na uzorak. Oni su sekantni posmični modul G normalizirali s najvećim posmičnim modulom za vrlo male deformacije G_0 , a relativnu posmičnu deformaciju s tzv. referentnom deformacijom γ_r . Pri tome su kao referentnu deformaciju definirali veličinu "elastične deformacije pri slomu", tj. $\gamma_r = \tau_r / G_0$ (slika 6).

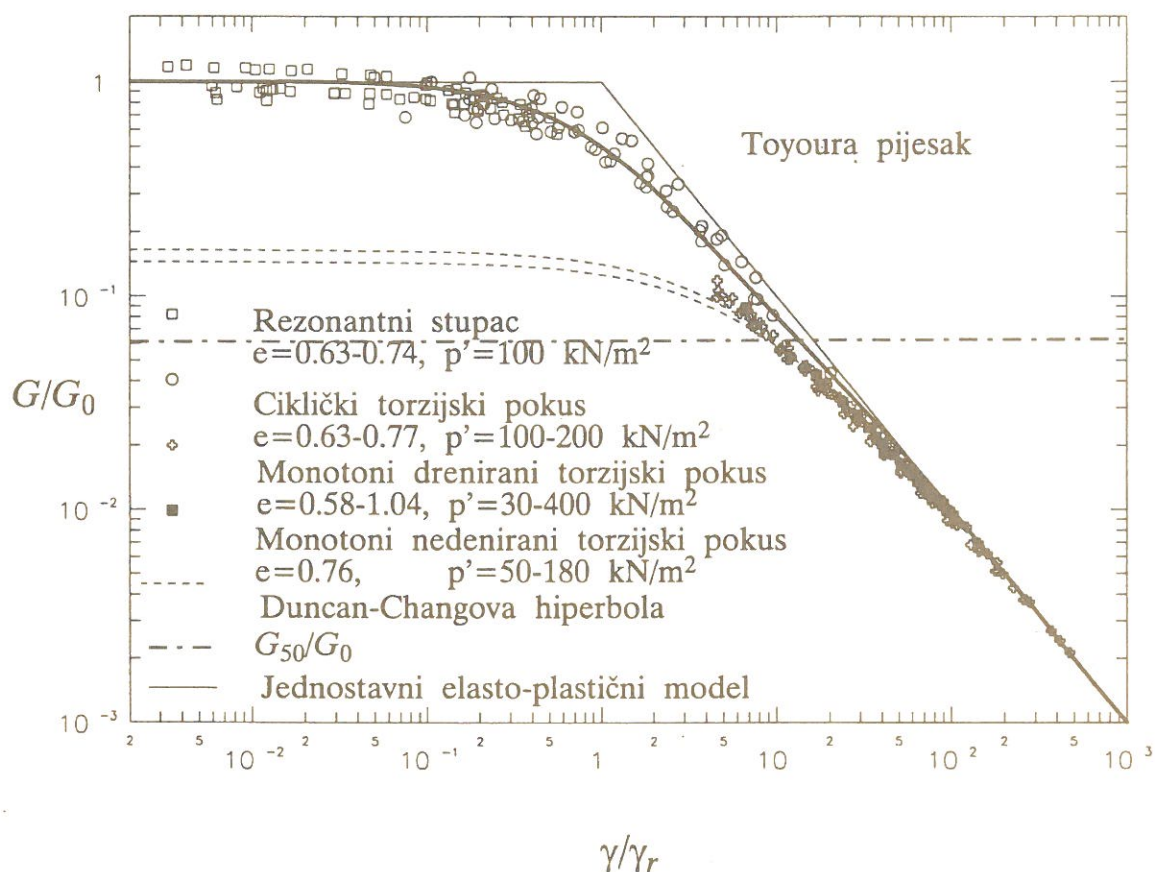


Slika 6 Parametri normalizacije funkcije ovisnosti posmičnog modula o posmičnoj deformaciji

Umjesto veličine G_0 može se koristiti elastični posmični modul G^e koji je definiran za svako stanje naprezanja (vidi sl. 1). Takva se normalizirana i jedinstvena funkcija "g" tada može pisati u obliku

$$\frac{G}{G^e} = g\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \quad (4)$$

Szavits-Nossan i Kovačević (1995) su pokazali da ima indikacija da ista zakonitost vrijedi kako za cikličke tako i za monotone (statičke) pokuse. Jedna takva funkcija "g" za Toyoura pijesak prikazana je na slici 7 u log-log mjerilu. Funkcija g je uspoređena s rezultatima niza različitih pokusa iz literature: pokus rezonantnog stupca, ciklički torzijski pokus i monotoni drenirani i nederenirani torzijski pokus. Uočava se relativno mala ovisnost normaliziranih mjerenih vrijednosti o zbijenosti (koeficijent pora e) i o srednjem efektivnom pritisku konsolidacije p'. Također, bilo koja normalizirana krivulja ima uvijek dvije jedinstvene asimptote: pravac $G/G_0 = 1,0$ te $G/G_0 = (\gamma/\gamma_r)^{-1}$. Iz toga bi se mogla izvući hipoteza da normalizirana krivulja "g" ne ovisi bitno niti o poremećenju tla, što bi bilo od velike praktične vrijednosti obzirom na poteškoće dobivanja neporemećenih uzoraka tla.



Slika 7 Normalizirana posmična krutost Toyoura pijeska u širokom rasponu deformacija i usporedba s rezultatima različitih pokusa (e : koeficijent pora; p' : srednje efektivno naprezanje; za Duncan-Changovu hiperbolu i G_{50} vidi tekst)

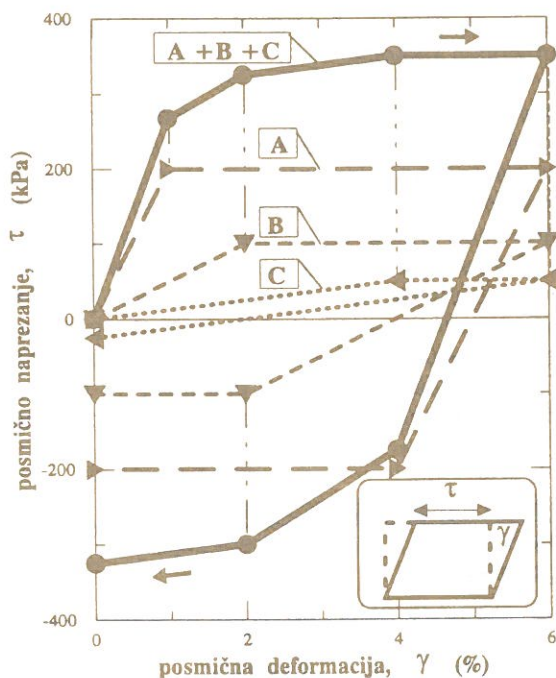
Prema opisanoj hipotezi, za karakterizaciju posmične krutosti tla u praksi dovoljno bi bilo utvrditi normaliziranu krivulju "g" iz pokusa na uzorcima koji nisu nužno neporemećeni, veličinu elastičnog modula G^e , koja se može odrediti iz ne pre skupih terenskih geofizičkih pokusa, te veličinu posmične čvrstoće tla, koja se ionako mora određivati pri uobičajenim geotehničkim istražnim radovima. Za približne analize čak bi se normalizirana funkcija "g" mogla preuzeti iz literature za slične materijale pa se izbjegavaju složeni pokusi određivanja posmične krutosti tla u području od vrlo malih do velikih deformacija. U toku je prikupljanje podataka iz literature za izradu normaliziranih krivulja krutosti za druge vrste tla. Takvih podataka je relativno malo. Dok literatura iz dinamike tla obiluje podacima za male i vrlo male deformacije, nedostaju joj podaci o čvrstoći tla koji su nužni za normalizaciju. Tamo gdje ima podataka o velikim deformacijama nedostaju pak podaci u rasponu vrlo malih deformacija koji su također nužni za normalizaciju.

Na slici 7 crtkano je prikazan raspon krivulja "g" koji bi se dobio interpretacijom troosnih pokusa po Duncanu i Changu (1970), u kojoj ne dolaze do izražaja krutosti pri malim i vrlo malim deformacijama

jer je i temeljena na rezultatima pokusa iz običnih troosnih uređaja. Vidi se da su po takvoj interpretaciji, koja je dugo u stručnoj praksi bila prihvaćena, posmični moduli pri malim i vrlo malim deformacijama skoro za red veličine manji od stvarnih. Na slici 7 ucrtan je i konstantni ekvivalentni linearni posmični modul G_{50} koji se definira kao sekantni modul pri omjeru posmičnog naprezanja i čvrstoće od 50%. Takav se modul ponekad u literaturi predlagao za korištenje u analizama deformacija tla za praksu. Očito je da će korištenje funkcije "g" kako po Duncanu i Changu tako i preko G_{50} bitno precijeniti deformacije u području malih promjena dodatnih naprezanja kakva se nalaze na većim udaljenostima od mjesta opterećenja. U radu Szavits-Nossan, Kovačević (1995a) pokazano je koliko to može biti značajno u procjeni slijeganja temelja.

KINEMATIČKI OČVRŠĆAVAJUĆA KONSTITUCIJSKA JEDNADŽBA

Za potrebe numeričkih simulacija geotehničkih zahvata pri kojima će se uvažiti normalizirana krivulja posmične krutosti tla opisana u predhodnom poglavlju, razvijena je odgovarajuća konstitucijska jednadžba za tlo za ravninsko stanje deformacija (Szavits-Nossan, Kovačević, 1995). Ovdje će se prikazati samo njena osnovna svojstva, dok se detalji mogu naći u citiranom radu. Razvijena jednadžba spada u kategoriju elastoplastičnih kinematski očvršćavajućih jednadžbi. Osnovne su joj karakteristike ovisnost elastičnog posmičnog modula o srednjem naprezanju preko odgovarajućeg eksponencijalnog zakona, Mohr-Coulombov zakon čvrstoće, uvažavanje normalizirane krivulje posmične krutosti te kinematski zakon očvršćavanja koji zadovoljava Masingova pravila histereze naprezanja i deformacija pri cikličkom opterećenju.



Slika 8 Primjer kinematski očvršćavajućeg konstitucijskog modela za tlo s tri obična linearno elastična-plastična elementa

Jednadžba opisuje ponašanje paralelno spojenog niza jednostavnih, linearno elasto-plastičnih, elemenata koji prolaze iste tragove deformacija čime se dobio efekt kinematskog očvršćavanja i zadovoljenja Masingovih pravila. Kako se konstitucijski model sastoji iz paralelnog niza od n linearno elasto-plastičnih elemenata, krivulja odnosa naprezanja i deformacija pri monotonom smicanju je n -linearna, gdje je n broj paralelnih elemenata. Povoljnim izborom karakteristika svakog pojedinog elementa kao i njihova broja može se po volji precizno aproksimirati svaka krivulja odnosa naprezanja i deformacija. Jasno, što je veći broj izabranih elemenata to će biti potreban veći računski napor u numeričkim simulacijama. U dosad provedenim analizama pokazalo se da se već prihvatljivi rezultati

dobiju s pet elemenata. Princip predložene konstitucijske jednadžbe s paralelnim spojem od tri linearno elastična-plastična modela (A, B i C) prikazan je na slici 8. Detaljna elastična i plastična svojstva jednadžbe, način određivanja materijalnih parametara kao i primjer opisivanja eksperimentom utvrđenih zakonitosti ponašanja Toyoura pijeska opisani su u radu Szavits-Nossana i Kovačevića (1995). U numeričkim simulacijama konstitucijski model je ugrađen u računalni program FLAC (1993) kao jedini program na tržištu za numeričku simulaciju geotehničkih zahvata koji pomoću posebnog programskog jezika omogućuje ugradnju proizvoljnih konstitucijskih modela. Program koristi metodu konačnih elemenata za dvodimenzionalne probleme ravninskog stanja deformacija te metodu dinamičke relaksacije za rješavanje nelinearnog problema rubnih uvjeta.

NUMERIČKA SIMULACIJA ZAŠTITE I ISKOPA DUBOKE GRAĐEVNE JAME U ZAGREBU

U klasičnoj se geotehničkoj praksi uspravne potporne stijene obično dimenzioniraju na opterećenje aktivnim tlakom kao najmanjim mogućim pritiskom tla na stijenu. Pod aktivnim tlakom podrazumijeva se ono opterećenje tla na stijenu koje nastaje kao posljedica potpunog sloma tla u pozadini stijene. Pri tome se pretpostavlja da su pomaci stijene, a time i deformacije tla u pozadini, takvi da omoguće slom tla. Nadalje, stijena opterećena aktivnim tlakom mora se uravnotežiti potpornim silama koje obično osigurava, uz dovoljni faktor sigurnosti, bilo pasivni otpor tla ispred stijene, bilo sustav zatega ili razupornih konstrukcija. Ovakvom pristupu dimenzioniranja potporne stijene na uvjete graničnog stanja sloma tla skoro redovito nedostaje utvrđivanje kinematike kompatibilnih pomaka u tlu i stijeni nužnih za ostvarenje sloma u tlu i aktiviranje potporne sile pa projektna rješenja temeljena na opisanom pristupu često ne osiguravaju stvarno postizavanje graničnog stanja ravnoteže, niti daju potrebne informacije o deformacijama tla. Iz navedenih se razloga klasičnim proračunom samo, možda, osigurava od rušenja stijene, ali se stvarne sile u stijeni teško mogu pouzdano utvrditi, pa se teško može govoriti o ekonomičnosti zahvata.

Razvoj metode konačnih elemenata kao i bolje poznavanje ponašanja tla pri raznim uvjetima naprezanja i deformacija, načelno omogućuje racionalniji pristup dimenzioniranju potpornih konstrukcija u tlu. U literaturi se mogu naći mnogi takvi pokušaji. Međutim pravi napredak bilježi se tek zadnjih nekoliko godina, kada je razvojem eksperimentalne tehnike u laboratoriju kao i prikupljenim opažanjima na terenu uočena znatno veća krutost tla pri malim deformacijama od one koja se do tada mjerila uobičajenim postupcima (Simpson, 1992). U nastavku će se ukratko prikazati analize i proračuni za planiranu potpurnu konstrukciju zaštite 18m duboke građevne jame za poslovni i trgovački centar na Iblerovom trgu u Zagrebu uzimajući u obzir izrazito nelinearno ponašanje tla pri smicanju. Proračuni su provedeni spomenutim računalnim programom FLAC uz korištenje opisane konstitucijske jednadžbe. Detalji istražnih radova kao i proračuna prikazani su u glavnom građevinskom projektu zaštite građevinske jame armiranobetonskom dijafragmom za Importanne galeriju na Iblerovom trgu u Zagrebu (IGH, 1996).

Tablica 1 Geotehnički profil tla na mjestu građevne jame

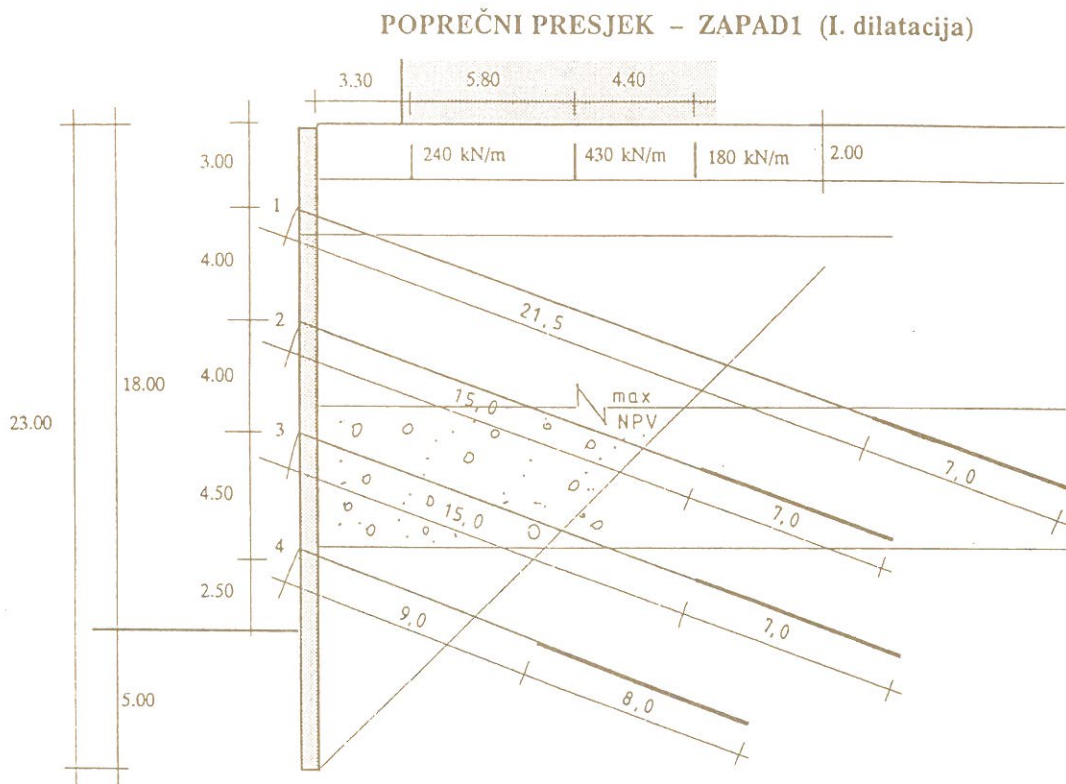
sloj	dubina (m)	naziv sloja i konzistencija	stanje dreniranja	tlakovi porne vode	naprezanja za konstitucijsku jednadžbu
I	0,0-2,0	nasip	drenirano	= 0	efektivna
II	2,0-10,0	gornja glina, srednje gnječiva	drenirano	= 0	efektivna
III	10,0-15,0	šljunak, zbijeni	drenirano	hidrostatski sa vodnim licem na dubini od 10,0m	efektivna
IV	15,0-35,0	donja glina, polučvrsta	nedrenirano	-	totalna

Na tablicama 1 i 2 su prikazani računski geotehnički profili tla te proračunske faze kojima se nastojalo što bliže oponašati planirane faze izgradnje. Na slici 9 prikazan je poprečni presjek zaštitne armiranobetonske dijafragme sa rasporedom prednapetih sidara i opterećenjem susjednom sedmerokatnom zgradom. Istražni radovi za ovaj projekt uključivali su istražne bušotine s vađenjem neporemećenih uzoraka tla te geofizička "down hole" ispitivanja u bušotinama (slika 10) kojima se utvrdio profil

reprezentativnih elastičnih modula posmika za pojedine slojeve tla. Na neporemećenim uzorcima je u laboratoriju izmjerena drenirana i nedrenirana čvrstoća te sekantni posmični modul od malih posmičnih deformacija do sloma. Posljednja vrsta ispitivanja provedena je na opisanom troosnom uređaju Odjela za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Tablica 2 Faze numeričke simulacije iskopa građevne jame zaštićene armiranobetonskom dijafragmom pridržanom prednapetim sidrima koje slijede faze planirane izgradnje

Faza pro-računa	Opis
0	Opterećenje sujednom sedmokatnom zgradom, dijafragma još nije izvedena (ovo nije faza izgradnje, već računski postupak utvrđivanja početnog stanja naprezanja).
1	Iskop do dubine od 4,0 m, dijafragma je prije iskopa izvedena u potpunosti
2	Izvedba i prednapinjanje prvog reda sidara silom od 150 kN/m' na dubini od 3,0 m
3	Iskop do dubine od 8,0 m
4	Izvedba i prednapinjanje drugog reda sidara silom od 200 kN/m' na dubini od 7,0 m
5	Iskop do dubine od 12,0 m
6	Izvedba i prednapinjanje trećeg reda sidara silom od 200 kN/m' na dubini od 11,0 m
7	Iskop do dubine od 16,5 m
8	Izvedba i prednapinjanje četvrtog reda sidara silom od 200 kN/m' na dubini od 15,5 m
9	Iskop do konačne dubine od 18,0m

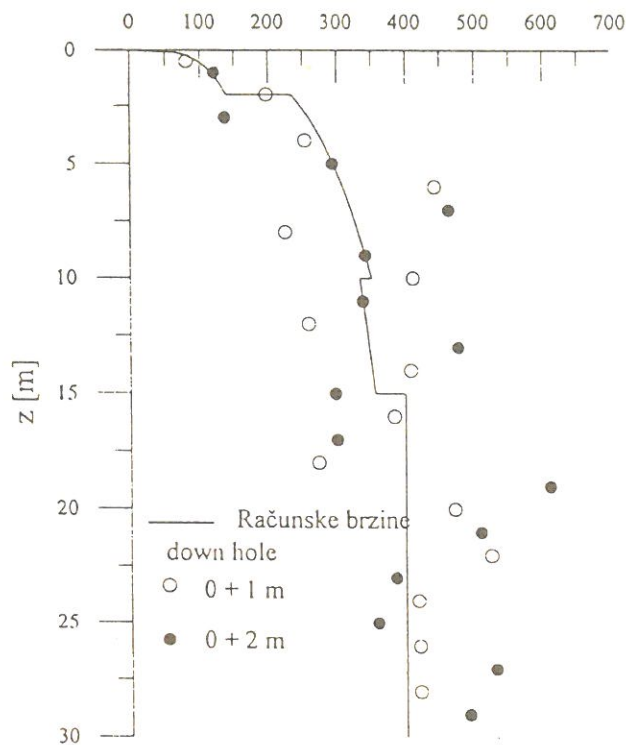


Slika 9 Skica poprečnog presjeka zaštitne armiranobetonske dijafragme s prednapetim sidrima

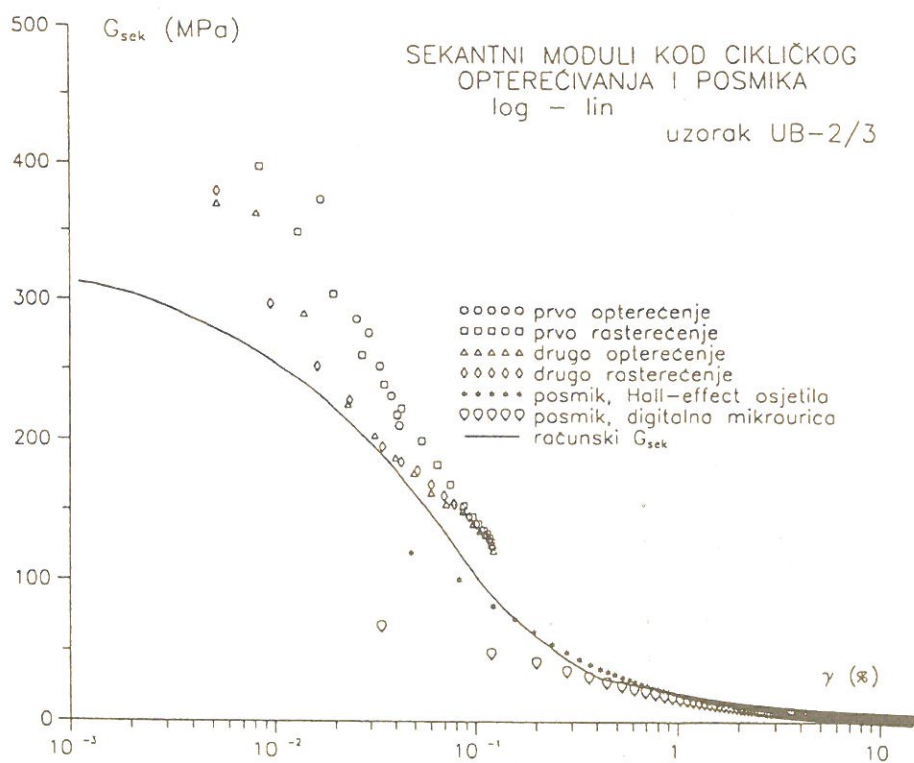
Normalizirana zakonitost redukcije posmičnog modula s posmičnom deformacijom nije mogla biti određena obzirom da sadašnji Hall-ovi mjeraci deformacija na uzorcima tla u troosnom uređaju Građevinskog fakulteta u Zagrebu ne mogu mjeriti posmične deformacije manje od oko $0,5 \times 10^{-2} \%$, što je veća deformacija od one potrebne za utvrđivanje elastičnog posmičnog modula G_0 . Iz tog razloga se pretpostavila valjanost prikazane normalizirane krivulje za Toyoura pijesak uz korištenje elastičnih posmičnih modula iz geofizičkih mjerenja i čvrstoće iz standardnih troosnih pokusa. Tipična usporedba tako dobijenog odnosa posmičnog modula i posmične deformacije s mjerenjima tog odnosa na neporemećenom uzorku polučvrste gline iz donjeg glinenog sloja (uz korištenje Hall-efekt

mjerača na uzorku tla) prikazana je na slici 10. Vidljivo je prilično dobro slaganje krivulje računskog sekantnog modula G_{sek} (puna linija) s mjerenim rezultatima.

(a)



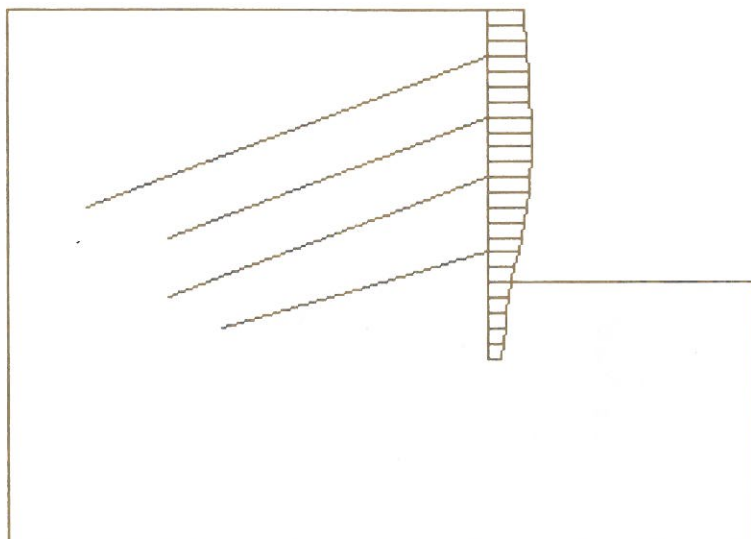
(b)



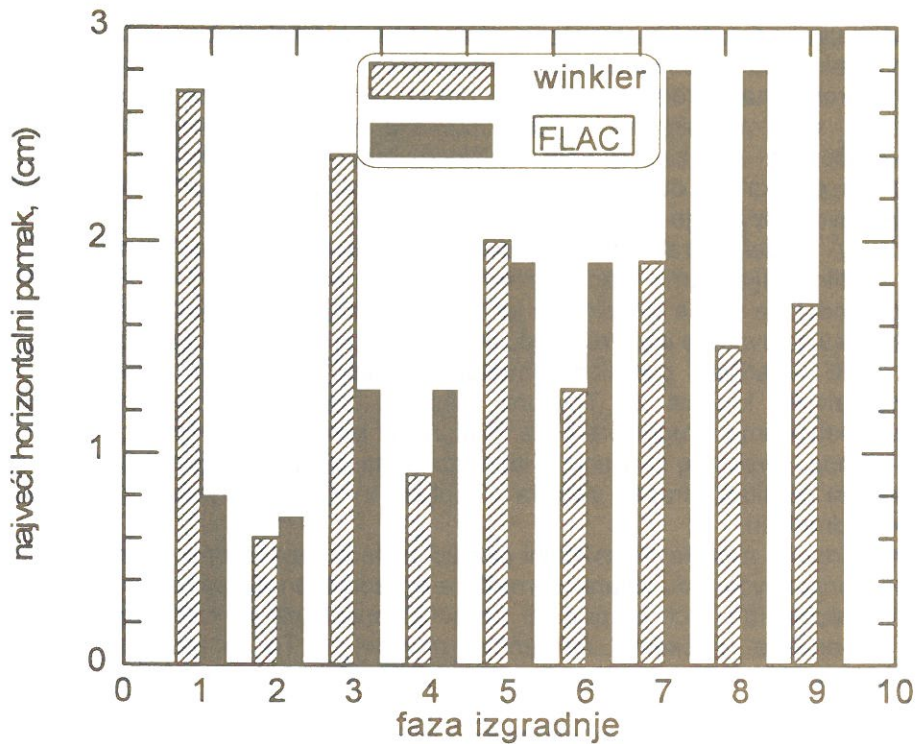
Slika 10 Profil brzina posmičnih valova u m/s mjerenih "down hole" postupkom u bušotini te računskih brzina korištenih u numeričkim analizama (a); usporedba računskog i mjerenih sekantnih posmičnih modula u ovisnosti o posmičnim deformacijama na donjoj polučvrstoj glini (b)

Dijagram proračunatih horizontalnih pomaka dijafragme nakon devete faze izgradnje prikazan je na slici 11. Veličine maksimalnih horizontalnih pomaka dijafragme i maksimalnih momenata savijanja po fazama izgradnje proračunate programom FLAC prikazane su na slikama 12 odnosno 13. Na istim slikama prikazane su i maksimalne veličine pomaka odnosno momenata savijanja dobijene usporednim proračunom po nelinearnom "winklerovom" modelu (nosač na elastoplastičnim oprugama). Mada prostor ne dozvoljava detaljniju analizu numeričke simulacije iskopa i zaštite građevne jame, glavna zapažanja je ipak vrijdno iznijeti.

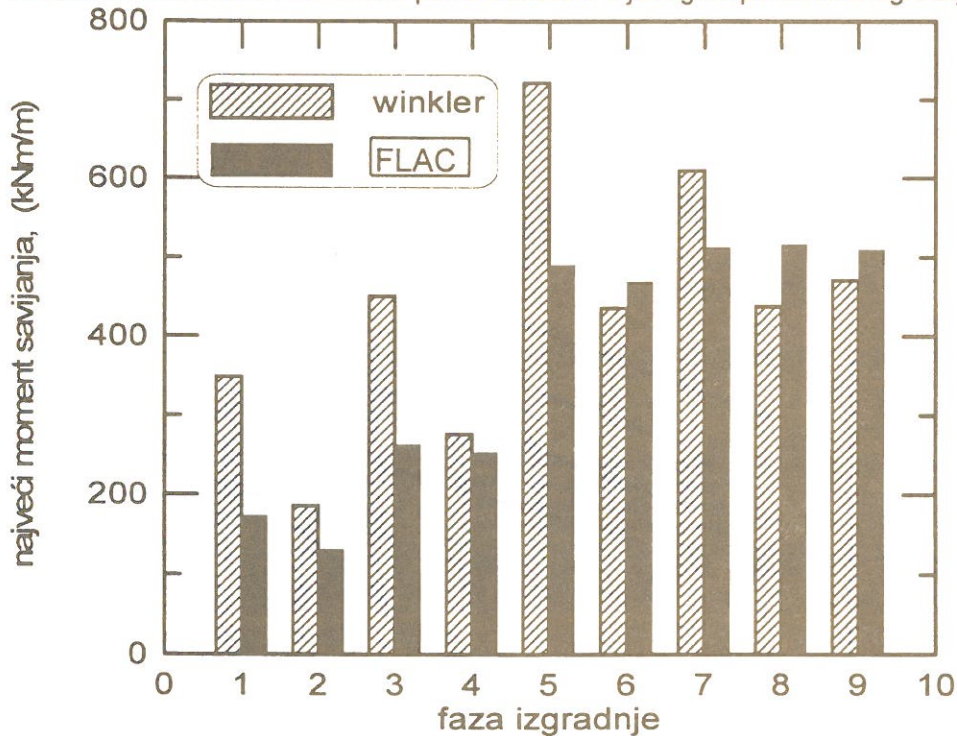
1. Mada "winklerov" model, atraktivan zbog svoje jednostavnosti, daje isti red veličina pomaka i momenata zaštitne dijafragme kao i proračun programom FLAC, izbor krutosti opruga "winklerovog" modela je vrlo je subjektivan jer nema racionalnog postupka kojim bi se one odredile na temelju krutosti tla uvrđene istražnim radovima. S druge strane, za proračun programom FLAC korišten je profil elastičnih posmičnih modula utvrđen geofizičkim "down-hole" postupkom, normalizirana krivulja krutosti za Toyoura pijesak, za koju se smatra da je vrlo slična normaliziranim krivuljama drugih vrsta tla (vidi raniji komentar), te profil čvrstoća tla utvrđen pokusima troosnog i direktnog smicanja u laboratoriju na neporemećenim uzorcima, dakle dobrim dijelom objektivni rezultati istražnih radova uklopljeni u racionalnu teoriju kontinuuma i opisanu konstitucijsku jednadžbu.
2. Dok kod "winklerovog" modela maksimalni pomaci između faza iskopa (neparne faze izgradnje) i faza prednapinjanja novog reda sidara (parne faze izgradnje) značajno osciliraju, to kod proračuna FLAC-om nije slučaj (na slici 12 pomaci označuju apsolutne pomake dijafragme mjerene od zamišljene nepomične vertikalne referentne ravnine). To je posljedica elastoplastičnog konstitucijskog modela u FLAC-u koji čini tlo u fazi prednapinjanja vrlo krutim (naprezanja se 5odmiču od stanja sloma). Ovakav rezultat je u skladu s dosadašnjim iskustvom na sličnoj dijafragmi u Zagrebu gdje pri prednaprezanju sidara nisu zabilježeni gotovo nikakvi pomaci dijafragme.



Slika 11 Slika izračunatih maksimalnih horizontalnih pomaka dijafragme pomoću programa FLAC nakon devete (završne) faze izgradnje



Slika 12 Proračunati maksimalni horizontalni pomaci zaštitne dijafragme po fazama izgradnje



Slika 13 Proračunati maksimalni momenti savijanja zaštitne dijafragme po fazama izgradnje

3. U proračunu s "winklerovim" modelom najveći pomaci dijafragme dobijeni su u prvoj fazi izgradnje (prvoj fazi iskopa) što nije u skladu s iskustvima na već izvedenoj sličnoj građevnoj jami u Zagrebu. Proračun FLAC-om opet je mnogo realniji, tu su najveći pomaci dijafragme izračunati u posljednoj fazi iskopa.

4. Momenti savijanja u dijafragmi po FLAC-u općenito su manji ili jednaki onima po "winkleru", bez obzira na nešto veće pomake u posljednjim fazama izgradnje. To je posljedica "glade" deformacijske linije dijafragme po FLAC-u od one po "winkleru", što je pak vjerojatno posljedica elastoplastičnog konstitucijskog modela u FLAC-u koji ne dozvoljava velike povratne pomake pri prednaprezanju sidara.

Na temelju provedenih analiza mogla bi se iznijeti još mnoga zanimljiva zapažanja. Međutim, provedena analiza tek će dobiti svoju provjeru kad se izvede planirana građevna jama.

UMJESTO ZAKLJUČKA

U ovom prikazu kratko su opisani glavni rezultati istraživanja krutosti tla u rasponu od vrlo malih do velikih deformacija u Odjelu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u zadnjih pet godina, kao i primjene tih rezultata u praksi. Postignuti rezultati se mogu smatrati samo početkom istraživanja jer su još mnogi problemi ostali nedovoljno istraženi, a predložena rješenja još nedovoljno znanstveno utemeljena. To se odnosi i na tehnologiju mjerenja malih deformacija na terenu i u laboratoriju i na teoretska istraživanja odgovarajućih konstitucijskih modela za tlo i na primjenu stečenih saznanja u praksi.

Prikazana istraživanja nebi bila ostvarena bez zalaganja i suradnje dr.sc. Predraga Kvasničke, dr.sc. Sonje Zlatović, mr.sc. Mehe-Saše Kovačevića i mr.sc. Lea Matešića pa im se ovom prilikom srdačno zahvaljujem. Također se zahvaljujem Ministarstvu znanosti i tehnologije Republike Hrvatske na novčanoj potpori za prikazana istraživanja.

LITERATURA

- (1) - (1993), FLAC, User's Manual, Itasca Consulting, U.S.A.
- (2) Addo, K.O., Robertson, P.K. (1992), Shear-wave velocity measurement of soils using Rayleigh waves, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No. 4, 558-568.
- (3) Anderson, D.G., Richart, Jr., F.E. (1976), Effects of Straining on Shear Modulus of Clays, ASCE Jour. Geotechnical Engineering Division, Vol. 102, No. GT9, str. 975-987.
- (4) Atkinson, J.H., Salfors, G., (1991), Experimental Determination of Stress-Strain-Time Characteristics in Laboratory and In Situ Tests, Proc. Tenth European Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Florence, 26-30 May, Balkema, Rotterdam, Vol. III, str. 915-956.
- (5) Burland, J.B. (1989) "Small is Beautiful"-the Stiffness of Soils at Small Strains, Canadian Geotechnical Jour., Vol. 26, str. 499-516.
- (6) Burland, J.B., Symes, M.J. (1982), A Simple Axial Displacement Gauge for Use in the Triaxial Apparatus, Géotechnique, Vol. 32, str. 62-65.
- (7) Clayton, C.R.I., Khatrush, S.A. (1986), A New Device for Measuring Local Axial Strains on Triaxial Specimens, Géotechnique, Vol. 36, str. 593-597.
- (8) Duncan, J.M., Chang, C.Y. (1970) Non-Linear Analysis of Stress and Strain in Soils, ASCE Jour. Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, str. 1629-1653.
- (9) Dyvik, R., Madshus, C. (1985), Lab Measurements of Gmax Using Bender Elements, Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions, Proc. ASCE Convention in Detroit, Michigan, str. 186-196.
- (10) Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S., Sato, T. (1991), A Simple Gauge for Local Strain Measurements in the Laboratory, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 1, str. 169-180.
- (11) Hiltunen, D.R., Gucunski, N. (1994), Annotated Bibliography on SASW. In: Geophysical Characterization of Sites, Ed.: Richard D. Woods, (Volume prepared by ISSMFE Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India), Balkema, Rotterdam, str. 27-34.
- (12) IGH, (1996), Importanne galleria Iblerov trg: Glavni građevinski projekt zaštite građevinske jame armiranobetonskom dijafragmom; projektant: R. Mavar; IGH, Zavod za geotehniku, J. Rakuše 1, Zagreb, ožujak 1996. 326 str. + prilozi.
- (13) Jardine, R.J., Potts, D.M., Fourie, A.B., Burland, J.B. (1986), Studies of the Influence of Non-Linear Stress-Strain Characteristics in Soil-Structure Interaction, Géotechnique, Vol. 36, str. 377-396.

- (14) Jardine, R.J., Symes, M.J., Burland, J.B. (1984), The Measurement of Soil Stiffness in the Triaxial Apparatus, *Géotechnique*, Vol. 34 str. 323-340.
- (15) Martin, W.O., McCoy, J.W., Hunt, D.D. (1986), Settlement of a Reactor on Sand, Proc. Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division in Conjunction with the ASCE Convention in Seattle, Washington, April 10, 1986. Geotechnical Special Publication No. 5; ed: W.O. Martin; ASCE, New York, str. 74-90.
- (16) Richart, Jr., F.E. (1977), Part 1 of "Soils Dynamics and Its Application to Foundation Engineering", by Y. Yoshimi, F.E. Richart, Jr., S. Prakash, D.D. Barkan, and V.A. Ilychev, Proc. IX Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol.2, str. 605-612.
- (17) Richart, Jr., F.E. (1978), Field and Laboratory Measurements of Dynamic Soil Properties, Proc. Int. Sym. Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, ed.: B. Prange, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, str. 3-36.
- (18) Richart, Jr., F.E. (1982), Discussion, Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri, ed.: S. Prakash, Vol. III, str. 914-915.
- (19) Simpson, B. (1992), Retaining Structures: Displacement and Design. *Géotechnique*, Vol. 42, str. 541-576.
- (20) Stokoe II, K.H., Wright, S.G., Bay, J.A., Roëset, J.M. (1994), Characterization of Geotechnical Sites by SASW Method. In: *Geophysical Characterization of Sites*, Ed.: Richard D. Woods, (Volume prepared by ISSMFE Technical Committee 10 for XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India), Balkema, Rotterdam, str. 15-25.
- (21) Szavits-Nossan, A., Kovačević, M.-S. (1995), A Kinematic Hardening Soil Model for wide Shear Strain Ranges, *International Journal for Engineering Modelling*, 7, 55-63.
- (22) Szavits-Nossan, A., Kovačević, M.-S. (1995a), Krutost tla pri malim deformacijama i njen značaj za temeljenje, 2. savjetovanje Hrvatskog društva za mehaniku tla i temeljenje: Geotehnički problemi u urbanim sredinama, Varaždin, 4.-6. listopada 1995., Izdavač: HDMTT, Urednik: R. Mavar, Knjiga 1, 407-418.
- (23) Tatsuoka, F., Kohata, Y. (1995), Stiffness of Hard Soils and Soft Rocks in Engineering Applications, Report of the Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol. 38, No. 5 (Serial No. 242), 140p.
- (24) Tatsuoka, F., Shibuya, S. (1991), Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests, Key Note Lecture for Session No. 1, Proc. 9-th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok
- (25) Zlatović, Sonja, Kvasnička, P., Matešić, L., Pavić, B. (1996), Precizna mjerenja malih deformacija tla na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, Razprave drugoga posvetovanja slovenskih geotehnikov, Rogla 96, Rogla, 3.-5. oktobra 1996, Slovensko geotehničko društvo, 1. knjiga, 43-50.