

UDK 624.131.542:624.151.5.042
ORIGINALAN NAUČNI RAD**EKVIVALENTNE ELASTIČNE KONSTANTE TLA I NJIHOVO
ODREĐIVANJE KONVENCIONALNIM GEOMEHANIČKIM OPITIMA**

Miroljub Samardaković, Nebojša Davidović

REZIME:

Uvođenjem linearno-elastičnog modela tla za područje priraštaja radnih napona, u proračunima sleganja i interakcije tla i temelja konačne krutosti omogućena je primena rešenja Teorije elastičnosti. U radu su definisane ekvivalentne *elastične konstante tla* i izvedene teorijske relacije za njihovo određivanje na osnovu modula deformacija izmerenih konvencionalnim opitima kompresije u triaksijalnom aparatu, edometru i pločom *in situ*. Njihove međusobne relacije i relativne veličine prikazane su analitički i grafički, u obliku pogodnom za primenu u geotehničkoj praksi.

1. UVOD

Kao *fizički nelinearan* materijal, za male kao i za konačne deformacije, građevinsko tlo nema konstantne veličine pokazatelja deformabilnosti i čvrstoće, pa ni fizičkih svojstava (gustine, vlažnosti). Posmatrajući fenomenološki, makro-pristupom sa stanovišta Mehanike kontinuuma, to znači da konstitutivne jednačine tla treba iznova postavljati za svaki proračun njegovog ponašanja, unoseći veličine pokazatelja mehaničkih svojstava (deformabilnosti, viskoznosti, čvrstoće) u skladu sa promenama stanja napona, deformacija i vremena. Ove veličine najbolje se dobijaju eksperimentalno, podražavajući promene kakve se očekuju *in situ*.

U konvencionalnim geomehničkim *proračunima deformacija* (npr. sleganja) ili u *analizi interakcije* tla i temelja konačne krutosti, nelinearna veza napona i deformacija tla aproksimira se u području rastućih radnih napona linearnom vezom i za nju primenjuje uopšteni Hooke-ov zakon, kao konstitutivan za izotropno-linearno-elastičan model homogenog realnog tla. Ovaj zakon povezuje napone (σ_{ij}) i deformacije (ε_{ij}) preko *dve elastične konstante* (od pet osnovnih, međusobno zavisnih), koje se za dati materijal moraju odrediti eksperimentalno. Najčešće su to "tehničke" elastične konstante, *Young-ov modul elastičnosti* (E) i *Poisson-ov koeficijent* (ν), koje su definisane kao odnosi zadatog glavnog normalnog napona i izmerenih glavnih linearnih deformacija za uslove jednoaksijalnog naprezanja sa slobodnim bočnim deformisanjem.

Pošto, zbog strukture materijala, takav opit za tlo praktično nije moguće izvesti pod uobičajenim radnim naponima a realnost rezultata proračuna bitno

zavisi od unetih pokazatelja deformabilnosti tla, indirektno treba odrediti veličine *sekantnih ekvivalentnih elastičnih konstanti* (E_s, ν_s), kakve bi se dobile sa krive jednoaksijalne kompresije (kada bi takav opit mogao biti izveden), za tetivu koja odgovara *očekivanom priraštaju radnih napona* u tlu čije deformacije će biti računate - u uslovima stepena zasićenja vodom i dreniranja kakvi se očekuju *in situ* (s obzirom na neizbežan *princip efektivnih napona* u tlu).

Konvencionalnim opitima za utvrđivanja veze napona i deformacija (bez "loma") vrše se probe sa ograničenim bočnim deformisanjem *uzoraka* (ograničenim delimično - zadatim bočnim pritiskom pri opitu *triaksijalne kompresije*, ili potpuno - u *edometru*), ili deformisanjem *tla in situ* (ograničenim delimično - bočnim otporom tla pri opitu *probnog opterećenja pločom*).

Sa nelinearnih veza na dijagramima naponi-deformacije tla, dobijenim ovim opitima (u različito zadatim uslovima bočnog deformisanja i dreniranja), za priraštaje radnih napona određuju se sekantni *moduli deformacija* (E_{tr}, E_{ed}, E_{pl}), analogno definiciji Young-ovog modula (E) za idealan linearno-elastičan materijal. "Poisson-ov" odnos horizontalnih i vertikalnih deformacija može, eventualno, da se odredi za uslove u opremljenijem triaksijalnom aparatu, u edometru je zadat ($\nu_{ed}=0$), dok se u tlu ispod ploče mere samo vertikalna pomeranja a jedinične deformacije nisu poznate.

Ekvivalentne elastične konstante (E_s, ν_s), potrebne za proračun sleganja ili interakcije, mogu biti određene na osnovu modula deformacija (E_{tr}, E_{ed}, E_{pl}) dobijenih konvencionalnim opitima za jednak priraštaj radnih napona, preko teorijskih relacija. Njihove osnove prikazuju Lambe i Whitman(1969), Lee i dr.(1983), uz opšte veze "konstanti" i modula za triaksijalni i edometarski opit koje navode i Stojadinović(1984) i dr. Costet i Sanglerat (1981), na primer, uvode i vezu sa modulom reakcije za poznato sleganje. Prvopotpisani autor(1990) izvodi opšte teorijske relacije i veze ekvivalentnih elastičnih konstanti sa odgovarajućim modulima deformacije iz triaksijalnog i edometarskog opita i, podstaknut uzgrednom idejom profesora i konstruktera (Milićević, 1989), proširuje ih na često rađeni opit kružnom pločom.

U ovom radu daju se teorijske relacije za sve navedene opite, uz precizno razdvajanje sekantnih ekvivalentnih elastičnih konstanti za *nedrenirane uslove* ($E_s=E_u, \nu_s=\nu_u$), pri brzom opterećivanju ili sprečenom istiskivanju vode iz opterećene zone slabije propusnog (sitnozrnog) tla, i *efektivnih konstanti za drenirane uslove* ($E_s=E', \nu_s=\nu'$) istog tla, kakvi praktično uvek vladaju u jače propusnom (čistom krupnozrnog) tlu. Može se očekivati da tlo u delimično (ne)zasićenom stanju ima veličine ekvivalentnih konstanti između graničnih vrednosti za uslove bez dreniranja i posle dreniranja. Ovde je korisno napomenuti da modul elastičnosti tla (E_d), određen sa krive rasterećenja (dekompresije), koji odgovara povratnom (elastičnom) delu ukupne deformacije i malo raste sa nivoom opterećenja, koji je blizu vrednosti

inicijalnog modula deformacije (E_i) prema Sl.1, nije od značaja za vrednost sekantnih ekvivalentnih konstanti jer se one koriste za analize primarne kompresije - pod rastućim statičkim opterećenjem.

Postupak za određivanje ekvivalentnih elastičnih konstanti na osnovu rezultata konvencionalnih opita i teorijskih relacija prikazanih u ovom radu smatramo vrlo podobnim, uz ograničenja koja važe i za same opite. Tako rezultati opita krutom kružnom pločom važe do dubine efektivnog dejstva ploče, koja se za idealan materijal može usvojiti kao 1,5 prečnik ploče (do koje doseže izobara vertikalnog napona jednakog 13% prosečnog kontaktnog pritiska - rešenje Schiffman, Aggarvala(1961), prema Poulos, Davis(1974)).

Postoje i razni empirijski postupci za indirektno određivanje "modula elastičnosti" tla (potrebni pre svega za nekoherentno tlo gde su najkorisniji standardni opiti penetracije), kao i tabele sa E i ν za razne vrste i stanja tla - po pravilu bez opisa postupaka kojim su dobijene tj. uslova za koje date veličine važe, što ovakve tabele čini neupouzdanim. Korisne tabele daju Bowles(1982), Lee i dr.(1983) ili Das(1985).

2. CILJ I METOD RADA

Pošto postoje *teorijske* relacije između sekantnih pokazatelja deformabilnosti tla u uslovima konvencionalnih geomehaničkih opita i odgovarajućih (računskih) ekvivalentnih "elastičnih konstanti" tla, kakve bi za odgovarajuću promenu naponskog stanja trebalo očekivati sa krive jednoaksijalne kompresije sa slobodnim bočnim širenjem (koju zbog prirode tla nije moguće direktno dobiti) - *cilj rada* je da se te relacije utvrde i prikažu analitički i grafički, kao bezdimenzionalni *odnosi* pojedinih modula "elastičnosti" i deformacija tla, pogodni za primenu u inženjerskim proračunima sleganja i interakcije tla i temelja konačne krutosti.

To je učinjeno nalaženjem međusobnih veza modula deformacija dobijenih opitima u triaksijalnom aparatu, edometru i opitom pločom, koristeći činjenicu da su za sva tri opita stanja napona i deformacija osnosimetrična, kao i za zamišljeni opit jednoaksijalnog naprezanja sa čijim pokazateljima se relacije i traže.

3. DEFINICIJE I TEORIJSKE RELACIJE

3.1. Elastične konstante za Couchy-jev materijal

Kako je poznato iz Teorije elastičnosti, kao specijalne teorije Mehanike kontinuuma, za idealan izotropan, linearno-elastičan materijal (Couchy-jev, koji može generisati energiju pri ciklusima opterećenje-rasterećenje, čime nisu uvaženi opšti zakoni termodinamike), uopšteni Hooke-ov zakon iskazan je preko poznatih napona, indeksnim tenzorskim obeležavanjem, za nulte tenzore početnih napona i deformacija (npr. Chen, Saleeb, 1982), kao

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (1)$$

gde je δ_{ij} Kronecker-delta simbol. Oдавde su, uz konvenciju da su za tlo *pozitivni* napon pritiska, skраćenje jedinične dužine i promena zapremine pri kompresiji, jedinične deformacije

$$\varepsilon_x = (1/E) [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = (1/E) [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad "$$

$$\varepsilon_z = (1/E) [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad "$$

$$\Delta V/V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = (1/E) (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) (1 - 2\nu) \quad (3)$$

Primenjeni Young-ov modul elastičnosti (E) i Poisson-ov koeficijent (ν) definisani su kao *elastične konstante* za uslove *jednoaksijalnog naprezanja*, sa zadatim glavnim normalnim naponima ($\sigma_1 > \sigma_3 = 0$) i u njihovim pravcima izmerenim glavnim linearnim deformacijama ($\varepsilon_1 > 0$, $\varepsilon_3 < 0$), kao

$$E = \sigma_1 / \varepsilon_1 \quad i \quad \nu = -\varepsilon_3 / \varepsilon_1 \quad (4)$$

Za *triaksijalno osnosimetrično stanje napona* ($\sigma_z \geq \sigma_x = \sigma_y$) i *deformacija* ($\varepsilon_z \geq \varepsilon_x = \varepsilon_y$) biće

$$\varepsilon_z = (1/E) (\sigma_z - 2\nu\sigma_x) \quad (5a)$$

$$\varepsilon_x = (1/E) [(1-\nu)\sigma_x - \nu\sigma_z] \quad (5b)$$

$$\Delta V/V = \varepsilon_z + 2\varepsilon_x = (1/E) (\sigma_z + 2\sigma_x) (1 - 2\nu) \quad (6)$$

odakle su elastične konstante, koje bi bile dobijene opitom aksijalnog naprezanja,

$$E = \frac{(\sigma_z + 2\sigma_x)(\sigma_z - \sigma_x)}{\sigma_x(\varepsilon_z - 2\varepsilon_x) + \sigma_z\varepsilon_z} = \frac{(\sigma_z + 2\sigma_x)(\sigma_z - \sigma_x)}{(\sigma_z + 2\sigma_x)\varepsilon_z - \sigma_x(\Delta V/V)} \quad (7)$$

$$\nu = \frac{\sigma_x\varepsilon_z - \sigma_z\varepsilon_x}{\sigma_x(\varepsilon_z - 2\varepsilon_x) + \sigma_z\varepsilon_z} = \frac{(\sigma_z + 2\sigma_x)\varepsilon_z - \sigma_z(\Delta V/V)}{2[(\sigma_z + 2\sigma_x)\varepsilon_z - \sigma_x(\Delta V/V)]}$$

$$\text{Za } \sigma_x=0: \quad E = \sigma_z / \varepsilon_z, \quad \nu = 0,5 [1 - (\Delta V/V) / \varepsilon_z] \quad (8)$$

$$\text{Za } \Delta V=0: \quad E = (\sigma_z - \sigma_x) / \varepsilon_z, \quad \nu = 0,5 \quad (9)$$

Ako je pri slobodnoj bočnoj deformaciji ($\sigma_x=0$) $\varepsilon_x=0$, iz (6) i (8) vidi se da takav idealan materijal ima $\nu=0$, kao i po definiciji (4).

Ako pri deformisanju nema promene zapremine, iz (9) se vidi da takav nestišljiv materijal ima $\nu=0,5$.

Na osnovu mnogih eksperimentalnih rezultata, za inženjerske materijale i treba očekivati $\nu=0-0,5$.

Neke vrste građevinskog tla (npr. zbijeno nekoherentno tlo ili prekonsolidovana glina), kao zrnasti materijali, pri deformisanju pod radnim naponima trpe relativna pomeranja susjednih zrna pri čemu mogu da povećavaju zapreminu (*dilatiraju*) tako da je, uz navedeno označavanje, $\Delta V < 0$ pa je za ovakvo tlo $\nu > 0,5$!

3.2. Ekvivalentne elastične konstante tla

Za navedena tri konvencionalna geomehnička opita, probe tla ili tlo *in situ* opterećuju se u osnosimetričnim uslovima tako da su pravci glavnih napona poznati (vertikalni $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$). U sistemu (x,y,z) sa vertikalnom z-osom, komponentalne napone i deformacije u (6)-(9) možemo zameniti glavnim, pri čemu sa linearizovanog dela krive naponi-deformacije radnim priraštajima glavnih napona ($\Delta\sigma_1 \geq \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$) odgovaraju njima kolinearni priraštaji deformacija ($\Delta\varepsilon_1 \geq \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3$).

Za tzv. *nedrenirane uslove*, u zasićenom nedreniranom tlu koje je praktično nestišljivo, za ostvareno $\Delta\varepsilon_{1u}$ pri $\Delta V = 0$, iz (9) se dobijaju tzv. *nedrenirane ekvivalentne elastične konstante* tla:

$$E_u = (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) / \Delta\varepsilon_{1u}, \quad \nu_u = 0,5. \quad (10)$$

Za *drenirane uslove*, posle konsolidacije tla pod jednakim priraštajima totalnih napona ($\Delta\sigma_1 \geq \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$) koji su u celini preneti na skelet tla pa su efektivni naponi ($\Delta\sigma'$) postali jednaki totalnim ($\Delta\sigma$), biće ostvareni veći priraštaji deformacija ($\Delta\varepsilon_1' \geq \Delta\varepsilon_2' = \Delta\varepsilon_3'$) i odgovarajuće *efektivne ekvivalentne elastične konstante* tla:

$$E' = \frac{(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')(\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3')}{\Delta\sigma_3'(\Delta\varepsilon_1' - 2\Delta\varepsilon_3') + \Delta\sigma_1'\Delta\varepsilon_1'} = \frac{(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')(\Delta\sigma_1' - \Delta\sigma_3')}{(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')\Delta\varepsilon_1' - \Delta\sigma_3'(\Delta V/V)'} \quad (11a)$$

$$\nu' = \frac{\Delta\sigma_3'\Delta\varepsilon_1' - \Delta\sigma_1'\Delta\varepsilon_3'}{\Delta\sigma_3'(\Delta\varepsilon_1' - 2\Delta\varepsilon_3') + \Delta\sigma_1'\Delta\varepsilon_1'} = \frac{(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')\Delta\varepsilon_1' - \Delta\sigma_1'(\Delta V/V)'}{2[(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')\Delta\varepsilon_1' - \Delta\sigma_3'(\Delta V/V)']} \quad (11b)$$

$$(\Delta V/V)' = \Delta\varepsilon_1' + 2\Delta\varepsilon_3' = (1/E')(\Delta\sigma_1' + 2\Delta\sigma_3')(1 - 2\nu') \quad (12)$$

Međusobna zavisnost nedreniranih i dreniranih ekvivalentnih elastičnih konstanti tla iskazuje se (Lambe, Whitman, 1969), (Habib, 1983), kao:

$$(1 + \nu_u) / E_u = (1 + \nu') / E' \quad \text{tj.} \quad E_u / E' = 1,5 / (1 + \nu') \quad (13)$$

odakle se vidi da je za $\nu \leq 0,5$ $E_u / E' \geq 1$.

4. ODREĐIVANJE E_u, ν_u (E', ν') NA OSNOVU REZULTATA KONVENCIONALNIH GEOMEHANIČKIH OPITA

Konvencionalnim opitima kompresije (u triaksijalnom aparatu, edometru ili opitom kružnom pločom), u osnosimetričnim uslovima, za dati priraštaj

pritiska (napona) čeka se *konsolidacija* i dobijaju odgovarajući, međusobno različiti *moduli deformacija* (E_{tr}' , E_{ed}' , E_{pl}' - kao odnosi priraštaja vertikalnih napona i deformacija) i njima odgovarajući "*Poisson-ovi*" *koeficijenti* (ν_{tr}' , ν_{ed}' , ν_{pl}' - kao odnosi priraštaja horizontalnih i vertikalnih deformacija) za *drenirane uslove*

$$E'_{tr,ed,pl} = \Delta\sigma_z' / \Delta\varepsilon_z' = \Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1', \quad \nu'_{tr,ed,pl} = -\Delta\varepsilon_3' / \Delta\varepsilon_1' \quad (14)$$

sem za UU i CU triaksijalan opit, gde u fazi rasta devijatora ($\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_1' - \sigma_3'$) nije dozvoljena disipacija priraštaja pornih pritisaka pa zasićeno tlo karakterišu za takve, *nedrenirane uslove*

$$E_{tru} = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_{1u}, \quad \nu_{tru} = 0,5. \quad (15)$$

Iz jednačina (10)-(13), za opitima zadate i izmerene veličine dobijaju se ekvivalentne elastične konstante E_u , ν_u i E' , ν' ispitanog tla za primenjeni priraštaj napona, koje se mogu uporediti sa modulima deformacija određenim iz (14) i (15).

4.1. Opit kompresije u triaksijalnom aparatu

Posle nanošenja hidrostatičkog opterećenja ($\sigma_1 = \sigma_3$), bez konsolidacije (opit UU) ili posle nje (opiti CU, CD), vertikalni pritisak (σ_1) raste za vrednost devijatora ($\sigma_1 - \sigma_3$) pri $\sigma_3 = \text{const.}$, pri sprečenom dreniranju (opiti UU, CU) ili uz dreniranje probe (opit CD), pri čemu se meri $\Delta\varepsilon_1$ i ΔV ili direktno $\Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3$.

Za uslove *bez dreniranja* (opiti UU, CU) u fazi rasta devijatora, pri $\Delta V = 0$, za $\sigma_1 = \text{const.}$ i $\Delta\sigma_3 = 0$ biće

$$\text{iz (15)} \quad E_{tru} = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_{1u}, \quad \nu_{tru} = 0,5 \quad (16)$$

$$\text{iz (10)} \quad E_u = \Delta\sigma_1 / \Delta\varepsilon_{1u} = E_{tru}, \quad \nu_u = 0,5 = \nu_{tru}.$$

Za uslove *po izvršenom dreniranju* za zadati priraštaj devijatora (opit CD), biće uz $\Delta\sigma_3' = 0$

$$\text{iz (14)} \quad E_{tr}' = \Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1', \quad \nu_{tr}' = -\Delta\varepsilon_3' / \Delta\varepsilon_1' \quad (17)$$

$$\text{iz (11)} \quad E' = \Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1' = E_{tr}', \quad \nu' = -\Delta\varepsilon_3' / \Delta\varepsilon_1' = \nu_{tr}'.$$

Kako se vidi, konvencionalnim opitima triaksijalne kompresije dobijaju se direktno sekantne ekvivalentne elastične konstante tla u nedreniranim i dreniranim uslovima, za primenjeni priraštaj vertikalnog pritiska. Odnosi ovih pokazatelja su:

$$E_u / E_{tru} = E' / E_{tr}' = 1 \quad (18a)$$

$$\text{iz (13)} \quad E_u / E' = E_{tru} / E_{tr}' = 1,5 / (1 + \nu'). \quad (18b)$$

Uočava se da je za $\nu' \leq 0,5$ $E_u / E' \geq 1$.

4.2. Opit kompresije u edometru

U uslovima sprečene bočne deformacije ($\varepsilon_3=0$), čeka se konsolidacija za svaki stupanj rastućeg vertikalnog opterećenja ($\sigma_1=\sigma_1'$) i meri vertikalna deformacija (ε_1'). Zadatim priraštaju $\Delta\sigma_1=\Delta\sigma_1'$ odgovara $\Delta\varepsilon_1'$ pri $\Delta\varepsilon_3'=0$ pa je *modul stišljivosti* za primenjene uslove sa dreniranjem:

$$\text{iz (14)} \quad E_{ed}' = M_v = \Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1'.$$

Pošto se u ovom opitu $\Delta\sigma_3' > 0$ ne može izmeriti, njegovu vrednost potražimo iz uslova da nema bočne deformacije:

$$\begin{aligned} \text{iz (5b)} \quad \Delta\varepsilon_3' &= (1/E')[(1-\nu')\Delta\sigma_3' - \nu'\Delta\sigma_1'] = 0 \\ \Delta\sigma_3' &= [\nu'/(1-\nu')]\Delta\sigma_1' \end{aligned} \quad (19)$$

gde je $k_0 = \nu'/(1-\nu')$ *koeficijent (bočnog) pritiska u miru* (pri $\varepsilon_{hor}=0$ ispod horizontalne površine terena), koji je približno (Eurocode 7, 1992)

$$k_0 = (1 - \sin\varphi') \sqrt{OCR} \quad (20)$$

gde je *OCR koeficijent prekonsolidacije*.

Otuda, za uslove u edometru,

$$\nu' = \Delta\sigma_3' / (\Delta\sigma_1' + \Delta\sigma_3') = k_0 / (1 + k_0) \quad (21)$$

Ako iz (19) $\Delta\sigma_3'$ izrazimo preko ν' , iz (5a) je

$$\begin{aligned} E' &= [(1-\nu'-2\nu'^2)/(1-\nu')](\Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1') \\ E' &= [(1-\nu'-2\nu'^2)/(1-\nu')]M_v \end{aligned} \quad (22)$$

Odavde i iz (13) dobijaju se odnosi:

$$E'/M_v = (1-\nu'-2\nu'^2)/(1-\nu') = (1+\nu')(1-2\nu')/(1-\nu') \quad (23a)$$

$$E_u/M_v = (E_u/E')(E'/M_v) = 1,5(1-2\nu')/(1-\nu'). \quad (23b)$$

4.3. Opit kružnom pločom

Prema švajcarskom i jugoslovenskom standardu (JUS U.B1.046), krutom kružnom pločom prečnika D tlo se opterećuje *in situ* i posle konsolidacije pod svakim stupnjem rastućeg pritiska ($p \cong \sigma_1 = \sigma_1'$) meri sleganje (s). Za željeni priraštaj pritiska ($\Delta p \cong \Delta\sigma_1'$) registruje se priraštaj sleganja (Δs) i računa *modul stišljivosti* (za uslove sa dreniranjem):

$$E_{pl}' = M_s = (\Delta p / \Delta s) D = \Delta\sigma_1' / (\Delta s' / D) \cong \Delta\sigma_1' / \Delta\varepsilon_1' \quad 0 < z < D \quad (24)$$

Pošto pri ovom opitu nisu poznate veličine $\Delta\sigma_3'$ i $\Delta\varepsilon_3'$, kao ni prosečno $\Delta\varepsilon_1'$, ne mogu se primeniti jednačine (11). Ako se primeni rešenje Boussinesq-ovog problema (npr. Rašković, 1985), kruta ploča utiskuje se u konturu polubeskrajnog elastičnog tela za

$$s = (\pi/4) [(1-\nu'^2)/E] p D.$$

Odavde, za linearizovano ponašanje u dreniranim uslovima, kakvi su pri opitu pločom,

$$E' = (\pi/4)(1-\nu'^2)(\Delta p/\Delta s) D = (\pi/4)(1-\nu'^2) M_s \quad (25)$$

$$E'/M_s = (\pi/4)(1-\nu'^2) \quad (26a)$$

$$E_u/M_s = (3\pi/8)(1-\nu') \quad (26b)$$

Izjednačivši E' iz (22) i (25) dobija se odnos *modula stišljivosti* u edometru (M_v) i izmerenog *in situ* krutom pločom (M_s) za *jednaku promenu vertikalnog pritiska*

$$M_v/M_s = (\pi/4)(1-\nu')^2/(1-2\nu') \quad (27)$$

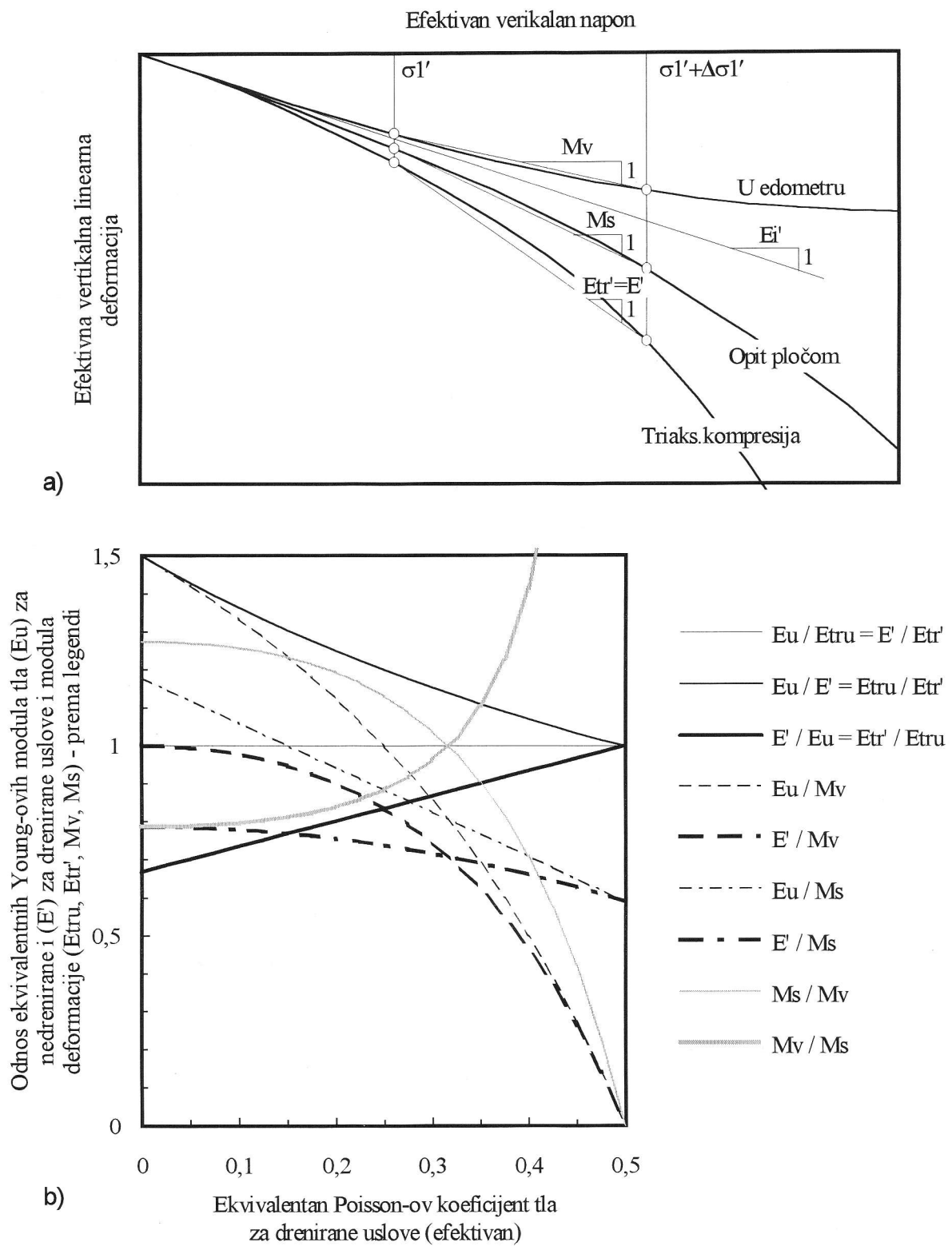
Kako se vidi, za $\nu' = 0,2-0,3$ (šljunak, pesak) je $M_v/M_s = 0,84-0,96$.

5. GRAFIČKI PRIKAZ REZULTATA I ZAKLJUČAK

Izvedene teorijske relacije (18), (23), (26) i (27) između sekantnih *ekvivalentnih elastičnih konstanti* tla za *nedrenirane* (E_u, ν_u) i *drenirane* uslove (E', ν') i *modula deformacija* pri kompresiji u *triaksijalnom* aparatu ($E_{tru} = E_u, E_{tr}' = E'$), *edometru* (M_v) i *opitom pločom* (M_s), važeće za jednak priraštaj vertikalnog pritiska (prema Sl.1a), prikazane su skupno grafički (Sl.1b), u zavisnosti od odgovarajućeg sekantnog *efektivnog ekvivalentnog Poisson-ovog koeficijenta* za *drenirane uslove* (ν').

Pošto se ovaj koeficijent (ν') neposredno ne može direktno odrediti konvencionalnim opitima (ni triaksijalnim, osim uz dodatnu opremu aparata), njegova veličina se u praksi najčešće određuje preko k_0 (20) ili iz napred pomenutih tabela za dati sastav i stanje tla.

Uz opisane uslove, za poznatu veličinu jednog od navedenih modula deformacije, sa Sl.1b dobijaju se i veličine svih ostalih. Sa iste slike lako se uočavaju relativne veličine (odnosi) pojedinih pokazatelja, kao i područja bitnog uticaja veličine ν' na prikazane odnose - što može korisno poslužiti u geotehničkoj praksi.



Sl. 1

6. LITERATURA

- Bowles, J.E. (1982): *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill, Singapore, 66-70.
- Chen, W.-F., Saleeb, A.T. (1982): *Constitutive equations for engineering materials*, Vol. 1: Elasticity and modeling, John Wiley and Sons, New York, 151-160.
- Costet, J., Sanglerat, G. (1981): *Cours pratique de mécanique des sols*, 1: Plasticité et calcul des tassements, Dunod, Paris, 113-119.
- Das, B.M. (1985): *Advanced soil mechanics*, McGraw-Hill, New York, 355-362.
- Eurocode 7 (1992): *Geotechnical design*, General rules, Ch.8 - Retaining structures, 8.5.2.
- Habib, P. (1983): *An outline of soil and rock mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 20.
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1969): *Soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 153, 157, 435, 456.
- Lee, I.K., White, W., Ingles, O.G. (1983): *Geotechnical engineering*, Pitman, Boston, 116-118, 128, 200-201, 375.
- Milićević, M. (1989): *Privatan stručan razgovor*.
- Poulos, H.G., Davis, E.H. (1974): *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 169.
- Rašković, D. (1985): *Teorija elastičnosti*, Naučna knjiga, Beograd, 262.
- Samardaković, M. (1990): Modul reakcije, ekvivalentne elastične konstante i moduli deformacije tla - određivanje, međusobne veze i primena, *Dokumentacija seminara za kadrove u geotehnici*, RO "Geoistrage", Niš, 1-31.
- Stojadinović, R. (1984): *Mehanika tla I*, Građevinski fakultet i Građevinska knjiga, Beograd, 572-574.