

UDK 624.131.54(045)
STRUČNI RAD**DIMENZIONISANJE PLITKIH TEMELJA (II):
SLEGANJE I ROTACIJA TEMELJA**

Miroljub Samardaković

REZIME

U okviru originalnog programskog sistema *GeoData2* za geomehaničke proračune ponašanja tla (kompatibilnog sa sistemom *GeoData1* za određivanje geomehaničkih svojstava tla) razvijeni su praktični postupci za proračun i prikaz konsolidacije tla, sleganja i rotacije temelja, prikazani u ovom delu članka. Izjednačivanjem sleganja datog temelja na slojevitom tlu, sračunatog metodom integracije napona (uz dejstvo susednih temelja), i rešenja po metodi integracije pomeranja, dobijaju se ekvivalentne elastične konstante tla i jedinstveni dijagrami za direktno određivanje sleganja i rotacija krutih temelja proizvoljnih dimenzija i opterećenja na datom tlu. Teorijska tabelarna rešenja za određivanje sleganja i rotacije krutog temelja (Gorbunov-Posadov i dr., 1984) ovde su za ekvivalentan elastičan poluprostor data u analitičkom i grafičkom obliku, pogodnom za dimenzionisanje temelja na osnovu dozvoljenih pomeranja i za analizu pojedinih uticaja.

UVOD

Sa ciljem da se konstrukteru građevinskog objekta u vidu geomehaničkim podlogama daju stvarno potrebni i dovoljni geotehnički uslovi temeljenja tako da on vrši izbor načina temeljenja i dimenzionisanje temelja bez aproksimacija ili dopunskih geomehaničkih proračuna (koji mu, po pravilu, nisu bliski i čime preuzima kompetencije ali i odgovornost geomehaničara), programskim sistemom *GeoData2* za geomehaničke *proračune ponašanja tla* (ispod temelja, u kosinama, iza potpornih konstrukcija) omogućena je izrada *jedinstvenih dijagrama za dimenzionisanje temelja* za odabrane vrednosti faktora sigurnosti u pogledu loma datog tla, kao i za veličine dozvoljenih sleganja i rotacija temelja željenog oblika, za opterećenja dobijena statičkim proračunom.

Izbor karakteristika konstitutivnih modela datog temeljnog tla vrši se na osnovu terenskih i laboratorijskih ispitivanja koja se obrađuju kompatibilnim programskim sistemom *GeoData1* za određivanje i prikaz geomehaničkih *pokazatelja svojstava tla*. Oba sistema uspešno se primenjuju u praksi a razvija ih i sažeto prikazuje autor (1996^a).

Ovakvim postupcima omogućeno je da geomehanički elaborat, ekspertiza ili studija sadrži sažet grafički prikaz mnoštva geomehaničkih ispitivanja i proračuna na osnovu kojih se može izvršiti izbor optimalnog *načina* temeljenja i racionalno *dimenzionisanje* svih temelja pojedinačno za jednake vrednosti faktora sigurnosti u pogledu loma tla i za ujednačena očekivana sleganja i rotacije temelja.

Posle prikaza postupka dimenzionisanja osnova temelja *u pogledu loma tla* (u delu I rada autora, 1996^b), u ovom delu (II) rada opisuju se izrada i primena jedinstvenih dijagrama za dimenzionisanje proizvoljno opterećenih krutih plitkih temelja *u pogledu dozvoljenog sleganja i rotacije* temelja u datom tlu tj. na ekvivalentnom elastičnom poluprostoru.

Kako se može videti, sistemom *GeoData2* prvo se vrši proračun konsolidacionog sleganja datog temelja (uz sadejstvo susednih) metodom integracije napona (dilatacija) u slojevima tla, kao i izrada dijagrama konsolidacije koji se može koristiti za bilo koje vreme građenja. Izjednačenjem sračunatog sleganja jednog temelja, poželjno je tipičnog, sa rešenjem za sleganje metodom integracije pomeranja, dobija se karakteristika ekvivalentnog elastičnog poluprostora za koji se kreiraju jedinstveni *dijagrami za određivanje sleganja i rotacije svih temelja* (proizvoljno zadatih dimenzija i opterećenja) na datom tlu. Obrnuto, za odabrane veličine dozvoljenih sleganja i rotacija, ovim dijagramima može se vršiti dimenzionisanje temelja željenog oblika i datog opterećenja.

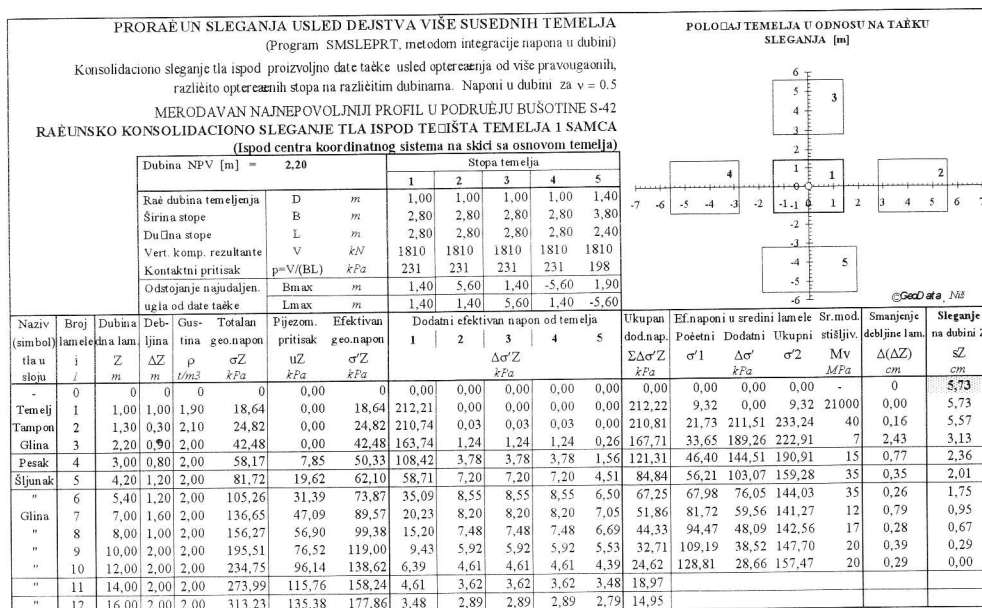
Vertikalni naponi od opterećenja temeljima računaju se prema klasičnom rešenju Boussinesq-a i postupku Steinbrenner-a, proširenom za proračun u proizvoljnoj tački (ispod ili pored temelja). Za proračun sleganja krutih temelja, kakvi su praktično svi temelji samci dužine do 4 m, primenjeno je tabelarno rešenje Gorbunov-Posadov i dr. (1984) koje je upoređeno sa starijim teorijskim rešenjima po metodi integracije pomeranja i prikazano u pogodnijem analitičkom i grafičkom obliku (približnom, sa visokim koeficijentom korelacije). Na osnovu ovih analitičkih relacija dobijaju se dijagrami direktne zavisnosti sleganja i rotacija krutih temelja (proizvoljnog oblika i dimenzija na elastičnom poluprostoru ekvivalentnom datom tlu) od opterećenja dobijenog statičkim proračunom objekta.

PRORAČUN SLEGANJA DATOG TEMELJA METODOM INTEGRACIJE NAPONA I KONSOLIDACIJA TLA

Rezultati proračuna sleganja datog temelja metodom integracije napona u dubini i proračuna konsolidacije temeljnog tla prikazani su na Sl.1 i 2.

Zbog sadejstva međusobno bliskih temelja, uz opterećenje datog temelja uveden je i uticaj četiri susedna temelja ili opterećenja, kao da su fleksibilni, sa različitim kontaktnim pritiscima i na različitim dubinama. Mogu se, po potrebi, uvesti i uticaji većeg broja temelja ili opterećenja ali oni su najčešće zanemarljivi zbog veće udaljenosti od tačke čije se sleganje traži. Naponi od datih opterećenja računaju se prema rešenjima Boussinesq-a i Steinbrenner-a tj. Holl-a (1940) (npr. Poulos, Davis, 1974), ovde proširenom za proizvoljnu tačku ispod ili pored pravougaone stope.

Geometrija problema određena je unošenjem dubine i dimenzija osnove svakog temelja i koordinatama njegovog ugla koji je najudaljeniji od tačke čije se sleganje traži. Opterećenje se unosi veličinom vertikalne komponente rezultante ili srednjeg jednakopodeljenog pritiska a naponi se računaju usled dejstva dodatnog (neto) pritiska u nivou dna temelja.

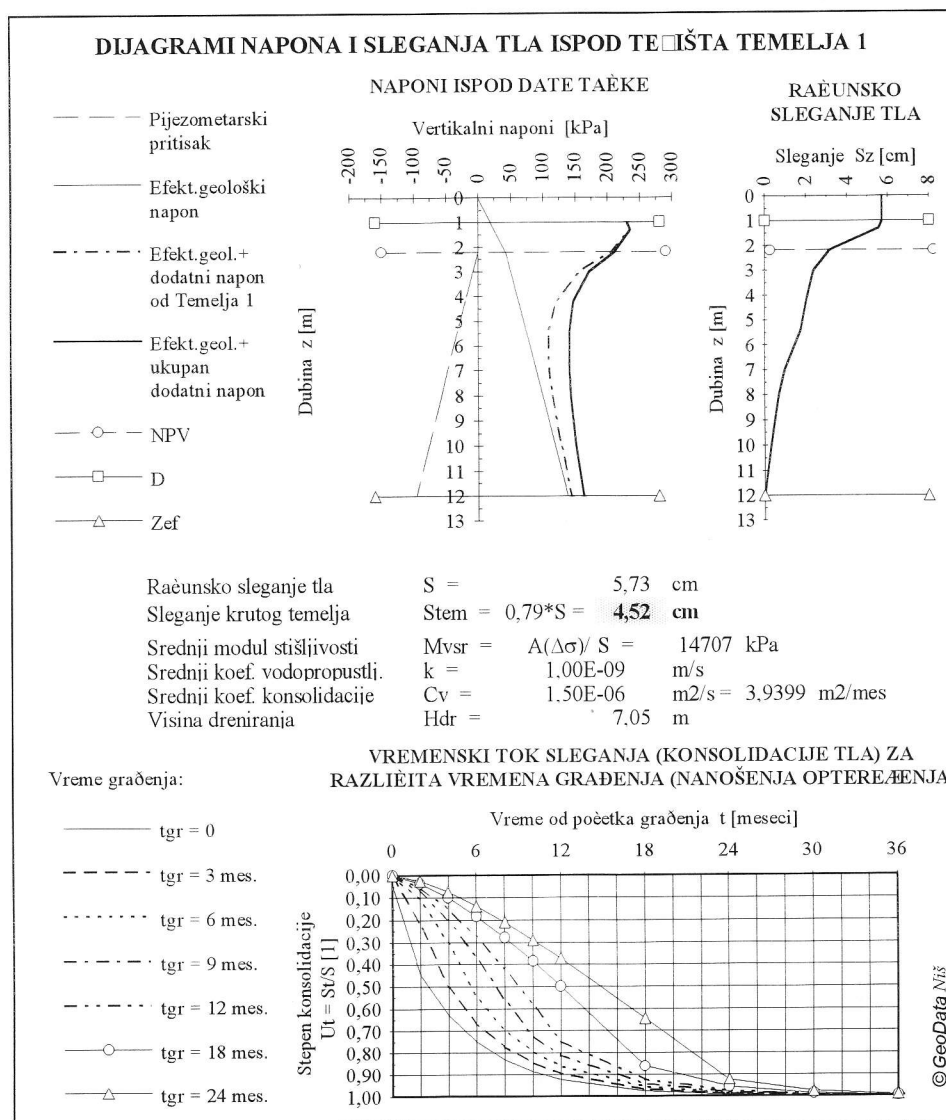


Sl.1 Ulazni podaci i rezultati proračuna sleganja proizvoljne (težišne) tačke datog temelja i tla do dubine efektivnog dejstva, metodom integracije napona

Program automatski određuje dubinu efektivnog dejstva takvih uticaja, na kojoj ukupan dodatni napon od opterećenja postaje manji od 15 % efektivnog početnog (geostatičkog) napona, i za nju računa sleganje posmatrane tačke u nivou dna datog temelja kao zbir sleganja slojeva (lamela) čije debljine su unete po želji. Teren može biti sa proizvoljnim nivoom podzemne vode, sa različitim gustinama slojeva i modulima deformacije tla (stišljivosti u edometru) koji se unose na osnovu programom prikazanih početnih i ukupnih efektivnih napona u lamelama.

Prikazuju se naponi i *sleganja tla* po dubini (tabelarno i grafički), očekivano *sleganje temelja* ako bi on bio krut, kao i prosečan modul stišljivosti tla do dubine efektivnog dejstva opterećenja (sračunat preko sleganja i površine dijagrama napona).

Za visinu dreniranja, određenu preko dubine efektivnog dejstva, i prosečnu vrednost koeficijenta konsolidacije (koja se unosi direktno ili računa za prosečan modul stišljivosti i uneti koeficijent vodopropustljivosti), preko numeričkog rešenja Terzaghi-jeve teorije jednodimenzionalne konsolidacije (npr. Olson, 1986) dobija se dijagram sa krivama konsolidacije tla za različita vremena ravnomernog nanošenja opterećenja i time *vremenski tok sleganja temelja* praktično za bilo koje očekivano ili ostvareno vreme građenja objekta (Sl.2). U vezi sa ovim zadatkom, u sistemu GeoData1 detaljno je razrađen postupak automatskog određivanja koeficijenta konsolidacije opitom koji se standardno izvodi u edometru.



SI.2 Dijagrami napona i sleganja sračunatih metodom integracije napona, sleganje datog krutog temelja i dijagram konsolidacije tla ispod njega

TEORIJSKA REŠENJA ZA SLEGANJE I ROTACIJU KRUTOG TEMELJA METODOM INTEGRACIJE POMERANJA

Ako je moguće zanemariti horizontalno pomeranje usled dejstva horizontalne komponente kose i ekscentrične rezultante opterećenja tla temeljem, kakav je najčešći slučaj, pomeranje temelja je zbir njegovog sleganja i rotacije.

Metodom integracije pomeranja posmatrane tačke usled dejstva niza koncentrisanih sila kojima se, principom superpozicije, zamenjuje dejstvo podeljenog opterećenja od temelja, dobija se rešenje za sleganje te tačke kao da je temelj idealno savitljiv. Uz uslov da su sleganja svih tačaka temelja jednaka, odgovarajućim postupcima dobijaju se rešenja za sleganje i rotaciju krutog temelja. Ova rešenja su složena i za najjednostavnije uslove i daju se tabelarno.

Na osnovu šireg uvida u literaturu uočava se da je, posle klasičnog rešenja Schleicher-a (1926) za sleganje tačaka temelja na elastičnom izotropnom *poluprostoru*, Egorov (1958) dao najstarije rešenje za sleganje karakterističnih tačaka fleksibilnog temelja i sleganje krutog temelja na elastičnom izotropnom *sloju konačne debljine* sa krutom podlogom - bez trenja na kontaktu temelj-tlo i bez trenja ili sa maksimalnim trenjem (bez pomeranja) duž kontakta elastičnog sloja sa krutom podlogom. Ovo rešenje navodi Harr (1966), koga zatim citira, retko uz pominjanje prvog autora, većina anglosaksonskih autora (npr. Lee i dr., 1983). Umesto koeficijenata sleganja Egorov-a sa trenjem između elastičnog sloja i krute podloge i bez trenja, koji se za male dubine razlikuju do 20 %, Winterkorn i Fang (1975) preporučuju za primenu njihovu srednju vrednost. Korisnu sistematizaciju i tumačenje rešenja za navedene i složenije slučajeve daje Feda (1978) a širom sveta citiraju se rešenja iz monografija Poulos, Davis (1974) i akademika Milovića (1974), sa originalnim izvođenjem rešenja.

Pošto su plitki AB-temelji samci najčešće pravougaone osnove dužine do 4 m, kada se mogu smatrati krutim, u odgovarajućem delu programskog sistema *GeoData2* primenjena su teorijska rešenja Gorbunov-Posadov i dr. (1984) za sleganje i rotaciju krutih temelja. Ovaj eminentan autor nova rešenja dobija preciznije nego ranije i prikazuje ih putem formula i tabele koeficijenata sleganja (k_1) i rotacije (k_2 , k_3) oko osa pravouganika. Ova rešenja preoblikovana su i prikazana na Sl.3 u formi pogodnijoj za primenu u sistemu *GeoData2*, kao i za upoređenje sa starijim rešenjima.

Sleganje (s) krutog temelja sa pravougaonom osnovom ivica B i L ($B \leq L$) i njegovi *uglovi rotacije* (α_L) oko 'kraće' ose (usled momenta M_L oko ose paralelne sa kraćom ivicom B , u ravni simetrije paralelnoj pravcu L) i (α_B) oko 'duže' ose (usled M_B oko ose paralelne sa dužom ivicom L), iskazani su kao:

$$s = \frac{1-\nu^2}{E} pBI_s \quad \tan \alpha_L = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{M_L}{B^3} I_{\alpha L} \quad \tan \alpha_B = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{M_B}{B^3} I_{\alpha B}$$

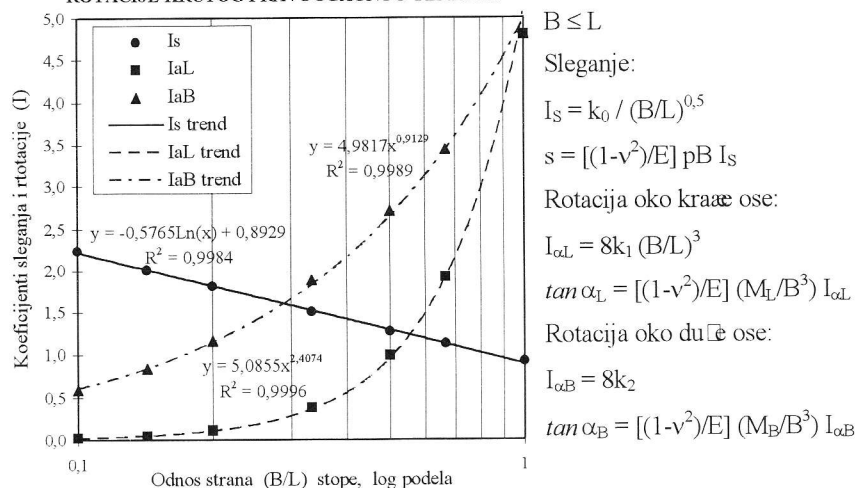
gde su: ν , E tzv. elastične konstante tla, p prosečan kontaktni pritisak, I_s , $I_{\alpha L}$, $I_{\alpha B}$ koeficijenti sleganja i rotacije zavisni od oblika (odnosa B/L) osnove temelja. Na Sl.3 su uz ove koeficijente prikazane i jednačine njihovog trenda, odabrane pogodnim tipom regresije sa visokim vrednostima koeficijenta korelacije:

$$\begin{aligned} I_s &= -0,5765 \ln(B/L) + 0,8929 & R^2 &= 0,9984 \\ I_{\alpha L} &= 5,0855(B/L)^{2,4074} & R^2 &= 0,9996 \\ I_{\alpha B} &= 4,9817(B/L)^{0,9129} & R^2 &= 0,9989. \end{aligned}$$

SLEGANJE I ROTACIJA KRUTOG PRAVOUGAONOG TEMELJA

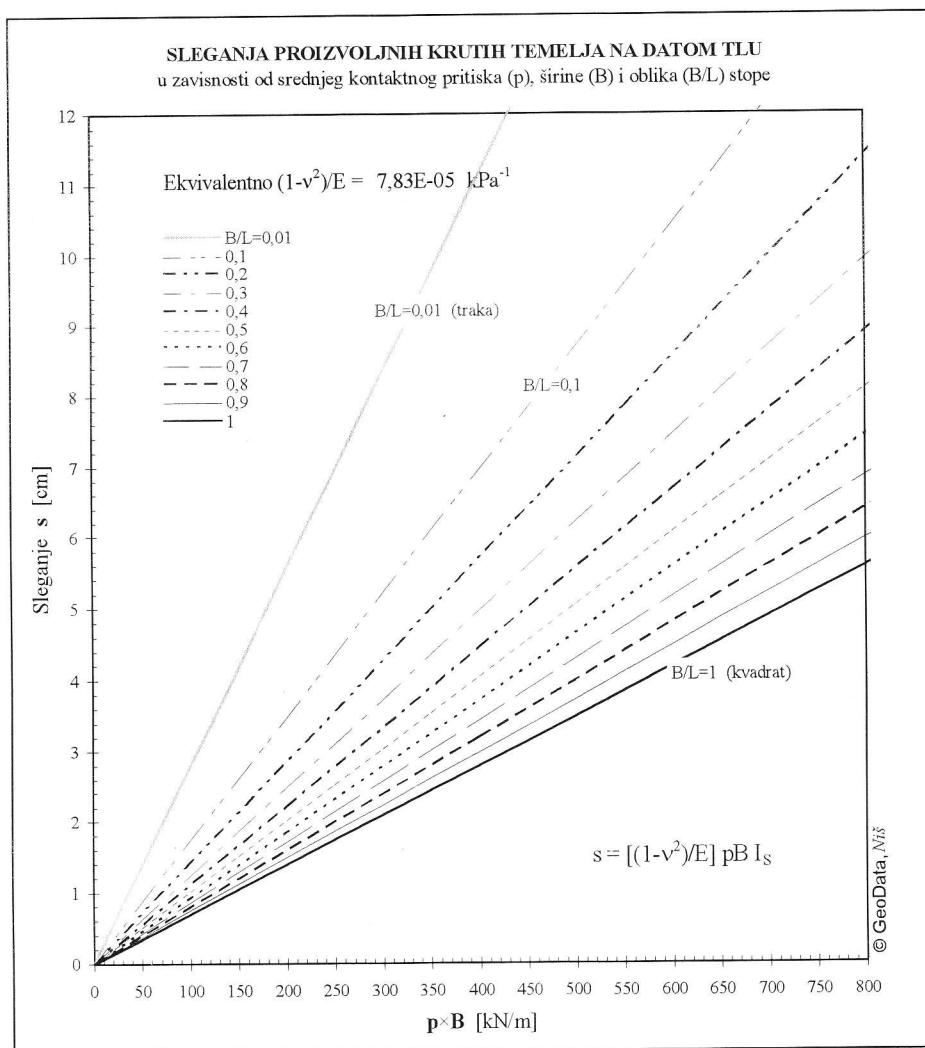
Na ekvivalentnom elastičnom poluprostoru, izvedeno iz rešenja Gorbunov-Posadov i dr.(1984)

L/B	B/L	k ₀	k ₁	k ₂	I _S	I _{αL}	I _{αB}
10	0,10	0,710	2,370	0,074	2,245	0,019	0,592
7	0,14	0,760	2,000	0,105	2,011	0,047	0,840
5	0,20	0,810	1,700	0,145	1,811	0,109	1,160
3	0,33	0,870	1,280	0,236	1,507	0,379	1,888
2	0,50	0,900	0,990	0,339	1,273	0,990	2,712
1,5	0,67	0,920	0,810	0,430	1,127	1,920	3,440
1	1,00	0,920	0,600	0,600	0,920	4,800	4,800

DIJAGRAM KOEFICIJENATA SLEGANJA I
ROTACIJE KRUTOG PRAVOUGAONOG TEMELJA

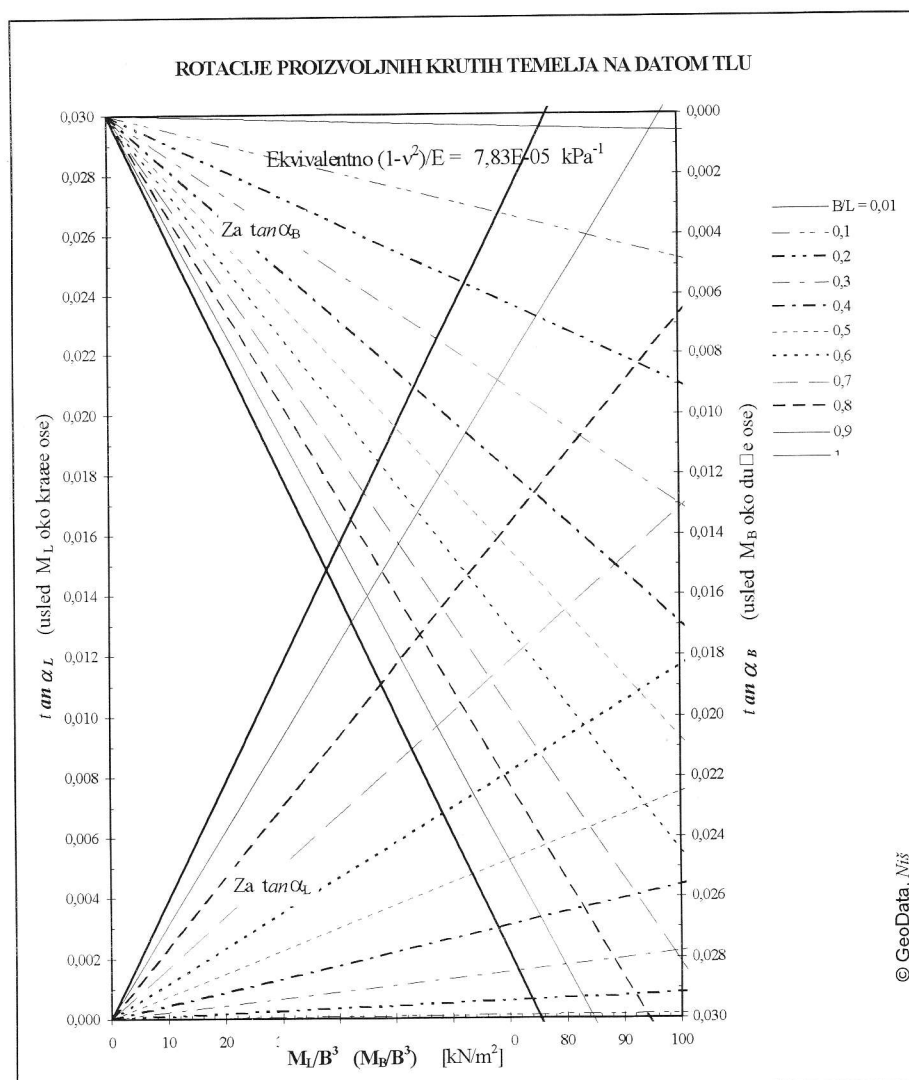
SI.3 Teorijsko rešenje za sleganje i rotaciju krutog temelja na površini elastičnog izotropnog poluprostora, izvedeno iz Gorbunov-Posadov i dr.(1984)

Kao što je poznato, za razliku od elastične sredine za koju su izvedena navedena rešenja, tlo se samo u području *radnih* napona *in situ* ili u laboratorijskim uslovima može smatrati linearno-deformabilnim, pri čemu ga karakterišu za te napone *izmerene vrednosti* modula (aksijalne) deformacije i odnosa bočne i vertikalne dilatacije (npr. u edometru $E_{ed}=M_v=\Delta\sigma_1'/\Delta\varepsilon_1$ i $\nu_{ed}=-\Delta\varepsilon_3/\Delta\varepsilon_1=0$). Za te vrednosti, preko poznatih teorijskih relacija (npr. Samardaković, 1995), trebalo bi odrediti *ekvivalentne elastične konstante*, (E_u , ν_u) za uslove bez dreniranja - za totalne napone ili (E' , ν') posle dreniranja - za efektivne napone u datom tlu, koje se unose u navedene jednačine za sleganje i rotaciju temelja. Za zasićenu glinu, kao slabo propusnu, za tzv. nedrenirane konstante dobija se inicijalno (distorziono) sleganje a za drenirane konstante ukupno sleganje krutog temelja.



Sl.4 Dijagram za određivanje sleganja (ili dimenzionisanje) proizvoljnih krutih temelja na elastičnom homogenom poluprostoru ekvivalentnom datom tlu

Pri proračunu ekvivalentnog modula elastičnosti (E) vrednost Poissonovog koeficijenta (ν) se mora pretpostaviti (od $\nu=0$ za očekivano sleganje bez bočne deformacije do 0,5 za nestišljivu nedreniranu glinu). Analizom uticaja ν na vrednost $(1-\nu^2)/E$, i time na sleganje, može se videti da se usvajanjem vrednosti $\nu=0,35$ umesto očekivanog 0,25 za nezasićenu ili 0,45 za zasićenu glinu dobija sleganje različito za 7-9 % a usvajanjem iste (srednje) vrednosti umesto $\nu=0$ ili 0,5 dobija se sleganje sa najvećom greškom od 14 %.



Sl.5 Dijagram za određivanje rotacija (ili dimenzionisanje) proizvoljnih krutih temelja na elastičnom homogenom poluprostoru ekvivalentnom datum tlu

Prikazano rešenje Gorbunov-Posadov i dr.(1984) daje do 3 % manje *sleganje* krutog temelja nego po Egorovu (1958), približno jednako kao dosta citirano rešenje Whitman, Richart (1967, prema Poulos, Davis, 1974), 5 % veće od rešenja Citovića (1983) i 5-10 % veće nego po Fischer-u (1965, prema Schultze, 1980). Rešenje za *rotaciju* daje 15-20 % veće vrednosti $\tan \alpha$ nego po starijem rešenju istog autora (Gorbunov-Posadov, 1973), koje je bilo saglasno sa Whitman, Richart (1963, prema Poulos, Davis, 1974, ili prema Lee i dr., 1983).

ODREĐIVANJE SLEGANJA I ROTACIJE PROIZVOLJNIH TEMELJA NA DATOM TLU KAO EKVIVALENTNOM POLUPROSTORU

Izjednačivanjem sleganja datog (poželjno tipičnog) krutog temelja na datom tlu, sračunatog prethodno opisanim postupkom integracije napona, sa rešenjem za sleganje istog temelja na elastičnom poluprostoru, u sistemu *GeoData2* dobija se vrednost $(1-\nu^2)/E$ ekvivalentnog poluprostora, koja sadrži sve uticaje unete u proračun sleganja (dubine temeljenja, susednih temelja i dr.). Za ovu vrednost, preko prikazanih oblika teorijskih rešenja Gorbunov-Posadov i dr. (1984) automatski se dobijaju *dijagram za određivanje sleganja* proizvoljnih krutih temelja (Sl.4) i *dijagram za određivanje rotacija* oko obe ose osnove ovih temelja (Sl.5) na elastičnom izotropnom poluprostoru ekvivalentnom datom temeljnom tlu.

Tako se na osnovu sračunatog sleganja jednog temelja (Sl.1 i 2) dobijaju dijagrami za određivanje sleganja (Sl.4) i rotacija (Sl.5) krutih temelja proizvoljnih dimenzija (B , L) i opterećenja ($p_B = V/L$, M_L i M_B). Unazad, za opterećenje dobijeno statičkim proračunom i pretpostavljenu jednu dimenziju stope ($p_B = V/L$ ili M/B^3), ovim dijagramima može se odrediti druga dimenzija stope tako da sleganje ili rotacija budu jednaki odabranim dozvoljenim vrednostima.

Zaključne napomene date uz prvi deo (I) ovog rada važe i ovde.

LITERATURA

- Цытович, Н.А. (1983): *Механика грунтов*, Высшая школа, Москва, стр.176.
- Егоров, К.Е. (1958): К вопросу о деформации основания конечной толщины, Сборник трудов НИИ оснований *Механика грунтов*, Но.34, Госстройиздат, Москва.
- Горбунов-Посадов, М.И. и др. (1984): *Расчет конструкций на упругом основании*, Стройиздат, Москва, стр.392-399.
- Harr, M.E. (1966): *Foundations of theoretical soil mechanics*, McGraw-Hill, New York.
- Holl, D.L. (1940): Stress transmission i earths, *Proc.High.Res.Board*, Vol.20, str.709-721.
- Lee, I.K., White, W., Ingles, O.G. (1983): *Geotechnical engineering*, Pitman, Boston, str.221-223.
- Milović, D.M. (1974): *Analiza napona i deformacija u Mehanici tla*, Institut za građevinarstvo SAP Vojvodine, Subotica.
- Olson, R.E. (1986): State of the art: Consolidation testing, in Yong, R.N., Townsend, F.C. (editors), *Consolidation of soils - testing and evaluation*, ASTM, STP 892, Philadelphia, str.11.
- Poulos, H.G., Davis, E.H. (1974): *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, John Wiley and Sons, New York, str.54, 168-169.
- Samardaković, M. (1995): Ekvivalentne elastične konstante tla i njihovo određivanje konvencionalnim geomehaničkim opitima, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, Niš, br.15-16, 1994/95, str.173-182.

- Samardaković,M.(1996^a): Geomehantički programski sistemi *GeoData1* i *GeoData2*, Zbornik radova, Međunarodni naučni skup *Pravci razvoja geotehnike*, Beograd, 18-19.novembar 1996., Rudarsko-geološki fakultet i Sava centar, Beograd, str.395-404.
- Samardaković,M.(1996^b): Dimenzionisanje plitkih temelja (I): Dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla i šljunčanog jastuka, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, Niš, br.17.
- Schleicher,F.(1926): Zur Theorie des Baugrundes, *Der Bauingenieur*, No.48,49.
- Schultze,E.(1980): Setzungen, u Smoltczyk,U.(herausgeber), *Grundbau Taschenbuch*, Teil 1, W.Ernst und Sohn, Berlin, str.417-419.
- Winterkorn,H.F.,Fang,H-Y.(1975): *Foundation engineering handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, str.149-151.