

## PROCENA DUBINE EFEKTIVNOG DEJSTVA I KRUTOSTI PLITKIH TEMELJA

Miroljub Samardaković<sup>1</sup>

### Rezime

*Za planiranje obima dubinskih istraživanja, ispitivanja i za proračune stabilnosti i sleganja temelja treba proceniti veličinu zone efektivnog dejstva temelja – kako za konvencionalne geomehaničke proračune graničnog stanja loma tla i graničnog stanja upotrebljivosti (sleganja) konstrukcije, tako i za modernije postupke (primenom FEM ili dr.). U ranijem radu autora (1995) izvedeno je praktično analitičko rešenje za određivanje računске **zone smicanja** tla ispod proizvoljno opterećenog temelja. Za analize sleganja, za razliku od grubih preporuka u domaćoj i ino-literaturi, u ovom radu predlažu se dijagrami za tačniju procenu **dubine efektivnog dejstva** ( $z_{ef}$ ) temelja u zavisnosti od gustine tla, dubine, dimenzija i opterećenja temelja i željenog odnosa dodatnih i početnih napona ispod koga se (prema stručnoj regulativi) dejstvo temelja zanemaruje. Dijagrami omogućavaju i uvid u domene navedenih uticaja. Opisuje se i jednostavan način za dimenzionisanje temelja željene **krutosti** na osnovnim vrstama tla.*

**Ključne reči:** *Plitki temelji, dubina efektivnog dejstva, krutost temelja.*

### 1. UVOD

Za geomehaničke proračune stabilnosti (nosivosti) tla treba primeniti računске parametre čvrstoće duž računске *zone smicanja* čiji oblik, dubina ( $z_i$ ) i širina ( $l_i$ ) zavise od dimenzija temelja, rasporeda opterećenja i svojstava tla. Na osnovu teorijskog rešenja za opšti slučaj centričnog opterećenja i rezultata modelskih ispitivanja stranih autora, u radu autora (1995a) predloženo je za praksu pogodno analitičko

---

<sup>1</sup> Miroljub Samardaković, dipl.inž.građ., Odeljenje za geotehniku Instituta GAF u Nišu

rešenje za određivanje dubine zone smicanja ispod temelja sa nagnutom i ekscentričnom rezultantom opterećenja. Tako prosečni računski parametri čvrstoće slojevitog tla mogu da se odaberu na osnovu dužine pružanja zone smicanja kroz pojedine slojeve (kako je predloženo npr. prema DIN i nekim inim autorima).

Za proračune sleganja teren bi trebalo istražiti i računski model usvojiti za slojeve tla do *dubine efektivnog dejstva* ( $z_{ef}$ ) temelja (aktivne zone kompresije). Ona zavisi od svojstava tla, dubine i dimenzija (širine i oblika) stope, krutosti temelja, kontaktnog trenja, veličine i rasporeda opterećenja i dr. i teorijski je neograničena. Za praksu se, kako je poznato, predlažu dubine do ravni u kojoj je odnos dodatnog vertikalnog napona ( $\Delta\sigma$ ) usled  $p_0 = p - \gamma D$  temelja i početnog efektivnog vertikalnog napona ( $\sigma_1'$ ) dovoljno mali ( $k = \Delta\sigma/\sigma_1' = 0,1-0,2$  a za jako široke temelje i 0,5) – ispod koje se kompresija tla može zanemariti. U tom smislu, jugoslovenski Pravilnik (1990) nalaže dubinu istražnog bušenja min 6 m ispod planiranog dna temelja ili veću ako tako proizađe iz linearnih zavisnosti od kontaktnog pritiska i širine stope.

Na osnovu teorijskih rešenja za proračun napona u elastičnom poluprostoru brojni autori tražili su pojednostavljena rešenja za određivanje tih napona, odakle potiču i razni predlozi za dubinu efektivnog dejstva opterećenja na površini.

Terzaghi procenjuje da  $z_{ef}$  može biti usvojeno na najnižoj tački izobare  $\sigma_z = 0,2p_0$  tj. za traku širine  $B$  na  $3B$  a za kružnu stopu širine  $D$  na  $1,25D$ . Prema npr. Costet, Sanglerat (1981) ova tačka je za kvadratnu stopu na  $1,4B$ , za pravougaonu oblika  $B/L = 0,5$  na  $2B$  a za traku na  $3,2B$ .

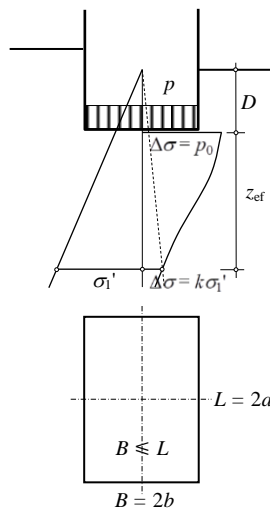
Najjednostavniju aproksimaciju je dao Jáky (1944, prema Széchy, Varga, 1978), po kojoj ispod jednakopodeljenog opterećenja *trake* širine  $B$  vertikalni naponi linearno opadaju do nule na dubini  $(\pi/2)B$  – zaokruženo na  $2B$  (pri čemu je raspodela napona ispod  $1,5B$  grubo različita od raspodele po teoriji elastičnosti) – što je za *pravougaonu* stopu dužine  $L$  prošireno na  $2B(1-0,5B/L)$ .

Türke (1984) daje tabelu za određivanje  $z_{ef}$  u zavisnosti od nekoliko češćih vrednosti  $B$ ,  $B/L$  i  $p_0$  na dubini  $D$  u tlu sa  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ .

Najsloženijim postupkom moglo bi se smatrati određivanje  $z_{ef}$  preko linearnoelastičnog sloja ekvivalentnog datom (homogenom ili slojevitom) tlu, čija debljina i sleganje se računaju primenom rešenja teorije elastičnosti metodom integracije pomeranja tzv. metodom ekvivalentnog sloja (Цытович, npr.1983) koja se kod nas sve manje koristi.

## 2. PRIKAZ I ANALIZA DUBINE EFEKTIVNOG DEJSTVA TEMELJA

Ako se primeni preporuka da je dubina efektivnog dejstva ispod težišta plitkog temelja do ravnini u kojoj je  $k = \Delta\sigma/\sigma_1' = 0,1-0,2$  (Slika 1), u okviru programskog sistema *GeoData2* autora (1996) proširena je ideja Gudehus-a (1981) pa je, računajući dodatne napone prema konvencionalnom rešenju u dole navedenoj formi (Steinbrenner, 1936 prema Harr, 1966), dobijeno rešenje kako sledi.



Slika 1

Za željeno  $k = \Delta\sigma/\sigma_1'$  ispod težišta pravougaone stope temelja treba da bude:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= k\sigma_1' = k\gamma(D + z_{ef}) \\ \Delta\sigma &= p_0 4I_{z_{ef}} = (p - \gamma D)4I_{z_{ef}} \\ (p - \gamma D)4I_{z_{ef}} &= k\gamma(D + z_{ef}) \quad (a) \end{aligned}$$

Svodeći (a) na bezdimenzionalne veličine dobija se:

$$\begin{aligned} \left(\frac{p}{\gamma B} - \frac{D}{B}\right) \frac{4}{k} I_{z_{ef}} &= \frac{D}{B} + \frac{z_{ef}}{B} \\ \frac{z_{ef}}{B} &= \frac{4I_{z_{ef}}}{k} \frac{p}{\gamma B} - \left(1 + \frac{4I_{z_{ef}}}{k}\right) \frac{D}{B} \quad (b) \end{aligned}$$

gde je

$$I_{z_{ef}} = \frac{1}{2\pi} \left[ \arcsin \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + n^2}} + \frac{mn(1 + m^2 + 2n^2)}{(m^2 + n^2)(1 + n^2)\sqrt{1 + m^2 + n^2}} \right]$$

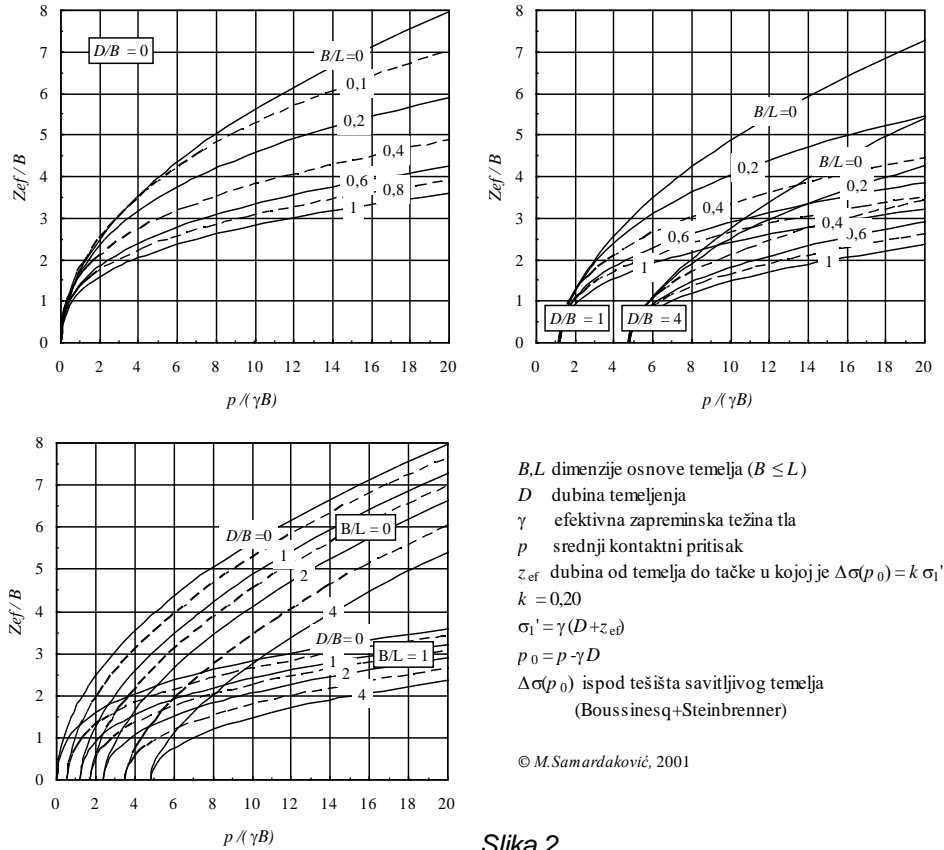
$$m = a/b = 1/(B/L) \quad n = z_{ef}/b = 2(z_{ef}/B)$$

Za poznati neto kontaktni pritisak ( $p_0$ ) rešenje je jednostavnije:

$$\frac{z_{ef}}{B} = \frac{4I_{z_{ef}}}{k} \frac{p_0}{\gamma B} - \frac{D}{B} \quad (b')$$

Kako se vidi, jednačinom (b) je analitički implicitno određeno  $z_{ef}$  u zavisnosti od  $\gamma$ ,  $p$ ,  $B$ ,  $L$  i  $D$  stope a zavisnost  $z_{ef}/B$  od bezdimenzionalnih veličina  $B/L$ ,  $D/B$  i  $p/\gamma B$  omogućava njen pogodan *grafički* prikaz (Slika 2), *vizuelnu* procenu značajnijih domena pojedinačnih uticaja i *praktičnu primenu* dijagrama u procenivanju  $z_{ef}$  za uobičajene veličine tih uticaja.

**DUBINA EFEKTIVNOG DEJSTVA  
PLITKIH PRAVOUGAONIH SAVITLJIVIH TEMELJA U HOMOGENOM TLU**



Slika 2

Gornja dva dijagrama pokazuju uticaj oblika ( $B/L$ ) stope za tri karakteristične dubine plitkog temelja, na površini poluprostora i na graničnim dubinama (teorijskoj  $D/B = 1$  i praktičnoj  $D/B = 4$ ), a donji dijagram uticaj dubine ( $D/B$ ) temelja za stope oblika idealne trake i kvadrata ( $B/L = 0$  i  $1$ ). Kako se vidi, za uobičajene vrednosti  $p/(\gamma B) = 5 \div 10$  veći kontaktni pritisak ( $p$ , čiji se uticaj obično previđa a ovi dijagrami omogućavaju njegovo uvođenje) daje  $30 \div 50\%$  veće  $z_{ef}$ , što je izraženije kod stopa izduženije osnove.

Rešenje je izvedeno za savitljiv temelj u homogenom tlu (sa proračunom vertikalnih napona bez uticaja deformacija, prema Boussinesq-u), kakvo se u praksi (pre)često primenjuje i za izrazitije uslojeno tlo. Detaljnije uvođenje uticaja krutosti temelja i proračun napona npr. ispod karakteristične tačke krutog temelja dalo bi manju vrednost  $z_{ef}$  što, s obzirom na potrebe njenog određivanja, ne ide u prilog sigurnije procene graničnog stanja upotrebljivosti objekta.

### 3. PROCENA KRUTOSTI TEMELJA

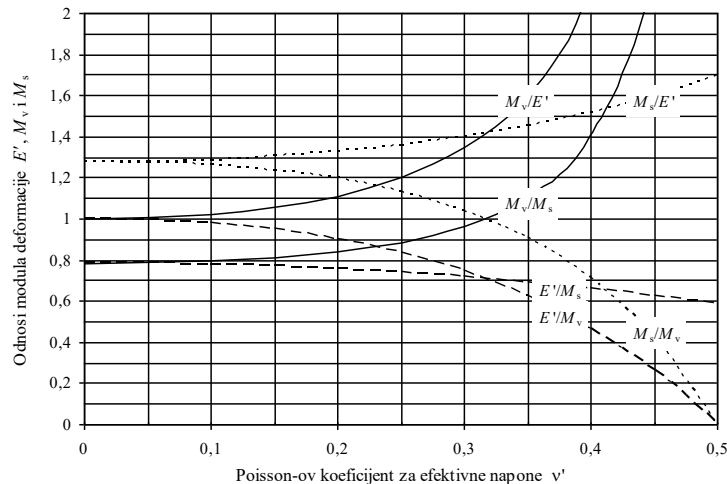
Prema Pravilniku(1990) i njegovoj prethodnoj verziji, temeljna konstrukcija konstantne krutosti po celoj dužini ( $L$ ) pravougaone ili kružne osnove, merodavne visine ( $d$ ) i modula deformacije  $E_b$ , na tlu modula deformacije  $E$  može se smatrati *idealno krutom* kada je njen koeficijent apsolutne krutosti

$$K = \frac{E_b}{12E} \left( \frac{d}{L} \right)^3 \geq 0,4 \quad (c)$$

Modul deformacije ( $E$ ) tla predstavlja *ekvivalentnu elastičnu konstantu* koja za dato tlo zavisi od stepena zasićenosti vodom i uslova dreniranja (vremena konsolidacije pod opterećenjem temelja) i, kako je poznato, može se odrediti kao  $E'$  za uslove *posle konsolidacije* sitnog tla – preko edometarskog modula stišljivosti ( $M_v$ ) ili preko modula stišljivosti ( $M_s$ ) izmerenog opitom kružnom pločom – ili kao  $E_u$  za uslove *bez dreniranja* zasićenog tla, iz teorijskih relacija

$$E' = \frac{1 - \nu' - 2\nu'^2}{1 - \nu'} M_v \quad E' = \frac{\pi}{4} (1 - \nu'^2) M_s \quad E_u = \frac{1,5}{1 + \nu'} E'$$

prikazanih na sledećem dijagramu (Samardaković,1995b), ako  $M_v$  i  $M_s$  iskazuju deformabilnost tla do dubine efektivnog dejstva temelja ( $z_{ef}$ ):



Slika 3

Ako se u (ne)jednačinu (c) unese uobičajena veličina za beton temelja  $E_b = 21000$  MPa, za željeno  $K d/L = 0,0832(KE')^{1/3}$  pa će na osnovnim vrstama tla temelj biti *krut* ( $K \geq 0,4$ ) pri  $d/L \geq 0,0613E'^{1/3}$  ili pri

$$\begin{aligned} d/L \geq 0,10-0,13 \approx 0,1 & \text{ na peskovitoj glini sa } E' = 4\div 10 \text{ MPa,} \\ d/L \geq 0,18-0,21 \approx 0,2 & \text{ na pesku/šljunkku sa } E' = 25\div 40 \text{ MPa.} \end{aligned}$$

#### 4. ZAKLJUČAK

Prikazani originalni dijagrami za određivanje dubine efektivnog dejstva ( $z_{ef}$ ) plitkih temelja predstavljaju znatno naprednije rešenje od raznih formula i tabela u domaćoj i inoj literaturi, pogodniji su za *praktičnu primenu* i omogućavaju *vizuelnu* procenu značajnijih domena pojedinačnih uticaja. Može se uočiti da *preporuke za određivanje  $z_{ef}$  bez uticaja  $p$  nije opravdano koristiti* i npr. da je, u skladu sa teorijskom analizom i bez obzira na ostale uticaje, relativna efektivna dubina ( $z_{ef}/B$ ) za *traku* dvostruko veća nego za *kvadrat* jednake širine.

Opisana zavisnost dimenzija temelja od željene krutosti upućuje na preporuku da za jednake dužine i krutosti temelja njihova debljina treba da bude 1,5÷2 puta veća na šljunku nego na glini. Temelji će biti kruti ( $K \geq 0,4$ ) ako je debljina temelja na glini veća od 1/10 dužine  $a$  na šljunku veća od 1/5 dužine stope tj.  $d/L$  dvostruko veće nego na glini. Ovo je u saglasnosti sa analizama interakcije temelja i tla i prikazima sa rešenjima autora (1999) za određivanje modula reakcije ( $k_s$ ) različitih vrsta tla ispod temelja konačne krutosti.

#### 5. REFERENCE

- Costet,J.,Sanglerat,G.(1981): *Cours pratique de mécanique des sols*,1, Dunod, Paris, 106-107.
- Gudehus,G.(1981): *Bodenmechanik*, Enke Verlag, Stuttgart, 81.
- Harr,M.E.(1966): *Foundations of Theoretical soil mechanics*, McGraw-Hill, New York (ruski prevod, SI, Moskva, 1971, 73).
- \*\*\* *Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata* (1990), Službeni list SFRJ, br.15, 654, 661.
- Samardaković,M.(1995a): Određivanje zone smicanja ispod proizvoljno opterećenog plitkog temelja, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, Niš, br.15-16, 1994/95, 165-172.
- Samardaković,M.(1995b): Ekvivalentne elastične konstante tla i njihovo određivanje konvencionalnim geomehaničkim opitima, *Zbornik radova Građevinskog fakulteta*, Niš, br. 15-16, 1994/95, 173-182.
- Samardaković,M.(1996):Geomehanički programski sistemi *GeoData1* i *GeoData2*, Zbornik radova Međunarodnog naučnog skupa *Pravci razvoja geotehnike*, Rudarsko-geološki fakultet i Sava centar, Beograd, 395-404.
- Samardaković,M.(1999): Određivanje pokazatelja deformabilnosti tla za analizu interakcije sa plitkim temeljima (II) - Modul reakcije tla, *Zbornik radova XXI kongresa JUDIMK*, JUDIMK, Beograd, 205-210.
- Széchy,K.,Varga,L.(1978): *Foundation engineering*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 234-235.
- Türke,H.(1984): *Statik im Erdbau*, Ernst&Sohn, Berlin, 68.
- Цытович,Н.А.(1983): *Механика грунтов*, Высшая школа, Москва, 212-217.