

Samardaković, M., Samardaković, S. (2011): Procena dubine efektivnog dejstva i krutosti plitkih temelja, *Zbornik radova IV naučno-stručnog savetovanja „Geotehnički aspekti građevinarstva“*, SGIS i dr., Zlatibor, str.69-74.

## ПРОЦЕНА ДУБИНЕ ЕФЕКТИВНОГ ДЕЈСТВА И КРУТОСТИ ПЛИТКИХ ТЕМЕЉА

Мирољуб Самардаковић\*, Слободан Самардаковић\*

\* "GeoSol" ДОО за грађ. геотехнику, Б. Крсмановића 29, Нови, geosolnis@yahoo.com

**РЕЗИМЕ:** За планирање неопходног обима дубинских истраживања и испитивања и за прорачуне слегања темеља – како за конвенционалне геомеханичке прорачуне тако и за модерније анализе применом МКЕ или др. – треба проценити дубину зоне ефикасног дејства темеља. За разлику од грубих препорука у домаћој и ино-литератури, у раду се за праксу предлажу бездимензионални дијаграми за тачнију процену дубине ефикасног дејства ( $z_{ef}$ ) темеља у зависности од густине тла, дубине, димензија и оптерећења темеља и жељеног односа додатних и почетних напона (испод кога се, према техничкој регулативи, дејство темеља занемарује). Дијаграми омогућавају и увид у домене наведених утицаја. Изведен је и једноставан критеријум за процену крутости темеља на ситнозрном и крупнозрном тлу.

**КЉУЧНЕ РЕЧИ:** Плитки темељи, дубина ефикасног дејства, крутост темеља.

## ESTIMATION OF DEPTH OF EFFECTIVE ACTION AND RIGIDITY OF SHALLOW FOUNDATIONS

**ABSTRACT:** To plan the necessary scope and depth of subsurface exploration and settlement analysis – both for the conventional geomechanical calculations and for the modern procedures by the application of FEM or else – one should estimate the depth of effective action of shallow foundations. In contrast to the rough recommendations in the domestic and foreign literature, this paper proposes the practice of non-dimensional diagrams for more accurate assessment of the depth of the effective action ( $z_{ef}$ ) depending on the soil density, dimension and load of the foundations and the desired relationship of additional and initial stress (below whose value, according to the regulations, the action of the foundations is neglected). The charts also provide insight into the domain of these influences. It is derived and a simple criterion for assessing the rigidity of the foundation on coarse-grained and fine-grained soil.

**KEYWORDS:** Shallow foundations, depth of effective action, rigidity of the foundation.

### УВОД

За геомеханичке прорачуне *стабилности* (носивости) тла треба применити рачунске параметре чврстоће дуж рачунске *зоне смицања* чији облик, дубина ( $z_f$ ) и ширина ( $l_f$ ) зависе од димензија темеља, распореда оптерећења и својстава тла. На основу теоријског решења за општи случај центричног оптерећења и резултата моделских испитивања страних аутора, у раду аутора (1995а) предложено је за праксу погодан аналитичко решење за одређивање дубине зоне смицања испод темеља са нагнутом и ексцентричном резултантом оптерећења. Тако просечни рачунски параметри чврстоће слојевитог тла могу да се одаберу на основу дужине пружања зоне смицања кроз поједине слојеве (како је предложено нпр. према DIN и неким иним ауторима).

За прорачуне *слегања* терен би требало истражити и рачунски модел усвојити за слојеве тла до дубине *ефективног дејства* ( $z_{ef}$ ) темеља (активне зоне компресије). Она зависи од својстава тла, дубине и димензија (ширине и облика) стопе, крутости темеља, контактнoг трења, величине и распореда оптерећања и др. и теоријски је неограничена. За праксу се, како је познато, предлажу дубине до хоризонталне равни у којој је однос додатног вертикалног напона ( $\Delta\sigma$ ) услед  $p_0 = p - \gamma D$  темеља и почетног ефективног вертикалног напона ( $\sigma_1'$ ) довољно мали ( $k = \Delta\sigma/\sigma_1' = 0,1-0,2$  а за јако широке темеље и  $0,5$ ) – испод које се компресија тла може занемарити. У том смислу, југословенски Правилник (1990) налаже дубину истражног бушења најмање  $6\text{ m}$  испод планираног дна темеља или већу ако тако произађе из наведених линеарних зависности од контактнoг притиска и ширине стопе.

На основу теоријских решења за прорачун напона у еластичном полупростору бројни аутори тражили су поједностављена решења за одређивање тих напона, одакле потичу и разни предлози за дубину ефективног дејства оптерећења на површини.

Terzaghi процењује да  $z_{ef}$  може бити усвојено на најнижој тачки изобаре  $\sigma_z = 0,2p_0$ , која је за траку ширине  $B$  на  $3B$  а за кружну стопу пречника  $D$  на  $1,25D$  испод темеља. Према нпр. Costet, Sanglerat (1981) ова тачка је за квадратну стопу на  $1,4B$ , за правоугаону облика  $B/L = 0,5$  на  $2B$  а за идеалну траку на  $3,2B$ . Најједноставнију апроксимацију је дао Jáky (1944, према Széchy, Varga, 1978), по којој испод једнакоподељеног оптерећења *траке* ширине  $B$  вертикални напони линеарно опадају до нуле на дубини  $(\pi/2)B$  – заокружено на  $2B$  (при чему је расподела напона испод  $1,5B$  грубо различита од расподеле по теорији еластичности) – што је за *правоугаону* стопу дужине  $L$  проширено на  $2B(1-0,5B/L)$ . Türke (1984) нуди табелу за детаљније одређивање  $z_{ef}$  у зависности од неколико чешћих вредности  $B$ ,  $B/L$  и  $p_0$  на дубини  $D$  у тлу са  $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$ . Најсложенијим поступком могло би се сматрати одређивање  $z_{ef}$  преко линеарноеластичног слоја еквивалентног датом (хомогеном или слојевитом) тлу, чија дебљина и слегање се рачунају применом теорије еластичности и метода интеграције померања контактне тачке на површини полупростора, тзв. методом еквивалентног слоја (Цытович, нпр. 1983), која се све мање користи.

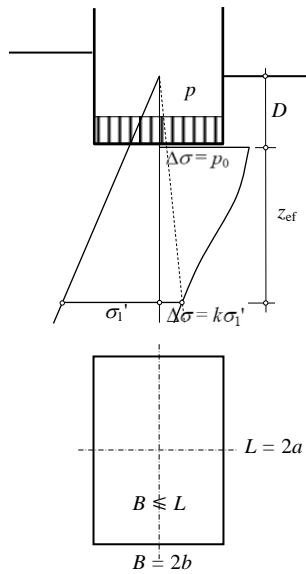
У овоме раду се предлажу бездимензионални дијаграми за тачнију процену дубине ефективног дејства ( $z_{ef}$ ) плитких темеља самаца и трака у зависности од густине тла, дубине, димензија и оптерећења темеља и жељеног односа додатних и почетних напона (довољно малог, испод кога се, према техничкој регулативи, дејство темеља занемарује). Дијаграми се предлажу, пре свега, за примену приликом планирања дубинских истраживања и испитивања терена, свесни бољих могућности које нуди савремена рачунска техника али и домаће праксе у којој се жалосно често не примењује ни прописана одредба о истраживању најмање  $6\text{ m}$  испод дна темеља.

За широке темеље и темељне плоче у терену сложене грађе, примењивало би се прелиминарно па детаљно истраживање, до дубине која зависи од подобности тла и спратности објекта (нпр. Coduto, 2001), што овде није предмет анализе.

У наставку, анализом крутости темеља на основним групама тла показано је да, за једнаку крутост, дебљина темељне стопе на крупнозрном тлу мора бити двоструко већа него на ситнозрном тлу.

## ПРИКАЗ И АНАЛИЗА ДУБИНЕ ЕФЕКТИВНОГ ДЕЈСТВА ТЕМЕЉА

Ако се примени препорука да је тражена *дубина ефективног дејства* ( $z_{ef}$ ) плитког темеља једнака дубини хоризонталне равни у којој је однос вертикалног додатног и почетног напона испод тежишта темеља  $k = \Delta\sigma/\sigma_1' = 0,1-0,2$  (Сл.1), у оквиру програмског система *GeoData2* аутора (1996) проширена је идеја Gudenus-а (1981) па је, рачунајући додатне напоне према конвенционалном решењу у доле наведеној форми (Steinbrenner, 1936 према Harr, 1966), изведено решење за аналитичко и графичко одређивање  $z_{ef}$  како следи.



Сл.1. Ознаке утицаја  
Fig.1. Definitions of symbols

За жељено  $k = \Delta\sigma/\sigma_1'$  испод тежишта правоугаоне стопе темеља је:

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

Сводећи (a) на погодне бездимензионалне величине добија се:

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

где је

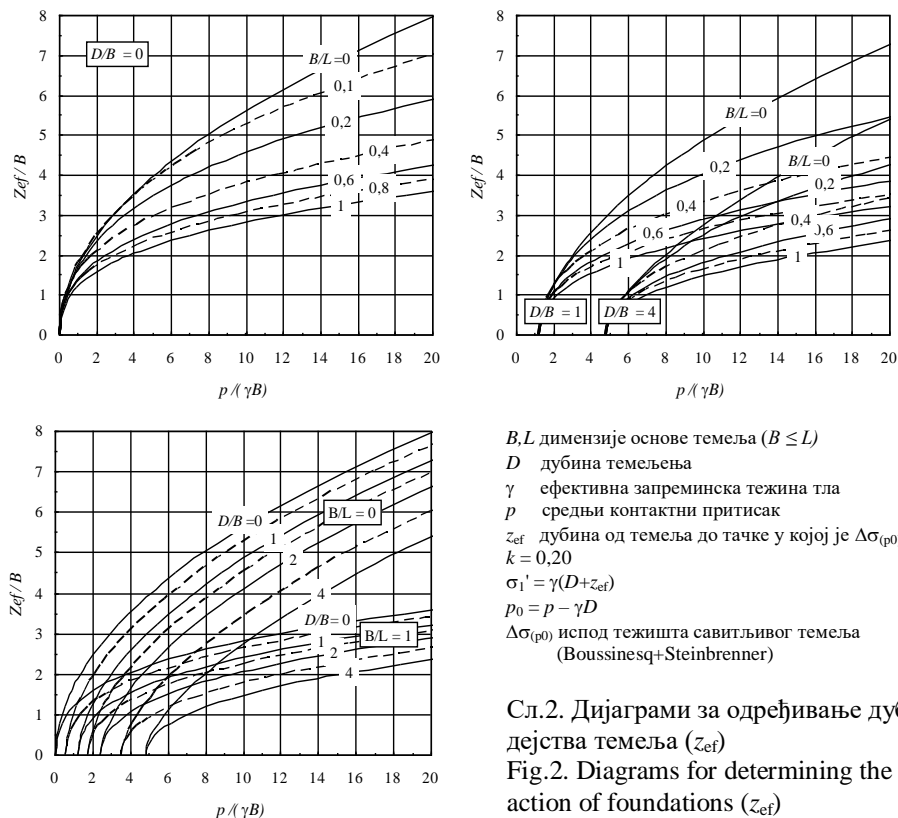
$$\begin{aligned} I_{z_{ef}} &= \frac{1}{2\pi} \left[ \arcsin \frac{m}{\sqrt{m^2 + n^2}} \sqrt{1 + n^2} + \frac{mn(1 + m^2 + 2n^2)}{(m^2 + n^2)(1 + n^2)\sqrt{1 + m^2 + n^2}} \right] \\ m &= a/b = 1/(B/L) \quad n = z_{ef}/b = 2(z_{ef}/B) \end{aligned}$$

За познати нето контактни притисак ( $p_0$ ) решење је једноставније:

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

Како се види, једначином (b) је аналитички имплицитно одређено  $z_{ef}$  у зависности од  $\gamma$ ,  $p$ ,  $B$ ,  $L$  и  $D$  стопе а зависност  $z_{ef}/B$  од бездимензионалних величина  $B/L$ ,  $D/B$  и  $p/\gamma B$  омогућава њен погодан графички приказ (Сл.2), визуелну процену значајнијих домена појединачних утицаја и практичну примену дијаграма у процењивању  $z_{ef}$  за уобичајене величине тих утицаја.

#### ДУБИНА ЕФЕКТИВНОГ ДЕЈСТВА ПЛИТКИХ ПРАВОУГАОНИХ ТЕМЕЉА У ХОМОГЕНОМ ТЛУ



- $B, L$  димензије основе темеља ( $B \leq L$ )
- $D$  дубина темељења
- $\gamma$  ефективна запреминска тежина тла
- $p$  средњи контактни притисак
- $z_{ef}$  дубина од темеља до тачке у којој је  $\Delta\sigma_{(p_0)} = k\sigma_1'$
- $k = 0,20$
- $\sigma_1' = \gamma(D + z_{ef})$
- $p_0 = p - \gamma D$
- $\Delta\sigma_{(p_0)}$  испод тежишта савитљивог темеља (Boussinesq+Steinbrenner)

Сл.2. Дијаграми за одређивање дубине ефективног дејства темеља ( $z_{ef}$ )  
Fig.2. Diagrams for determining the depth of effective action of foundations ( $z_{ef}$ )

Горња два дијаграма показују утицај облика ( $B/L$ ) стопе на површини полупростора и за две карактеристичне дубине тзв. плитког темеља (теоријској  $D/B = 1$  и највећој практичној  $D/B = 4$ ) – према којима се, логично, дубина ефективног дејства смањује са смањивањем издужења стопе и порастом дубине темеља – а доњи дијаграм приказује утицај дубине ( $D/B$ ) темеља за стопе облика идеалне траке и квадрата ( $B/L = 0$  и  $1$ ).

Како се може видети за уобичајене релативне дубине  $D/B = 1 \div 2$ , пораст контактнoг притиска ( $p$ , чији се утицај обично превиђа а ови дијаграми омогућавају његово увођење) у уобичајеном распону  $p/(\gamma B) = 5 \div 10$  даје око 30÷50% веће  $z_{ef}$ , што је израженије код стопа издуженије основе и веће релативне дубине.

Решење је изведено за хомогено тло – са прорачуном вертикалних напона испод савитљивог темеља без утицаја деформација тла, према Boussinesq-у, какав се у пракси (пре)често примењује и за изразито услојено тло.

Детаљније увођење утицаја крутости темеља и прорачун напона нпр. испод карактеристичне тачке крутог темеља (као за прорачун његовог слегања) дало би мању вредност  $z_{ef}$  што, с обзиром на потребе одређивања ове дубине, не иде у прилог сигурније процене граничног стања употребљивости објекта.

## ПРОЦЕНА КРУТОСТИ ТЕМЕЉА

Како је познато, у складу са домаћом техничком регулативом, плитки темељи стубова и зидова могу се у пракси сматрати крутим ако им је стопа димензија  $L = 3-4$  m у деформабилнијем попречном пресеку, што се примењује за све врсте тла.

Према Правилнику(1990), као и његовој претходној верзији, темељна конструкција константне крутости по целој дужини ( $L$ ) правоугаоне или кружне основе, меродавне висине ( $d$ ) и модула деформације  $E_b$ , на тлу модула деформације  $E$  може се сматрати *идеално крутом* када је њен *коэффициент апсолутне крутости*

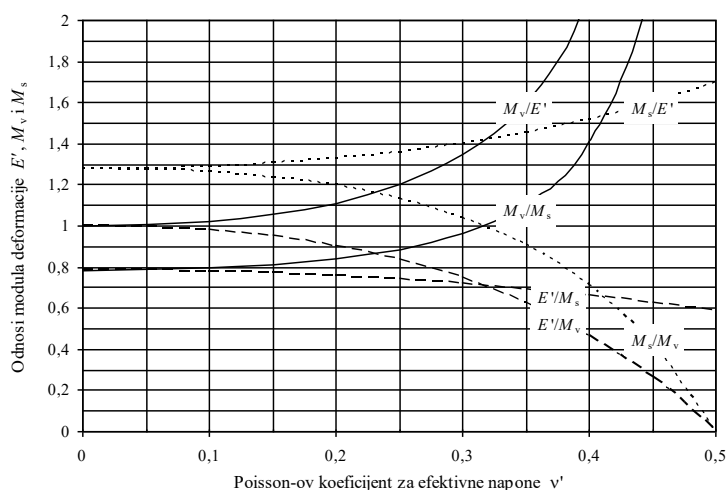
$$K = \frac{E_b}{12E} \left( \frac{d}{L} \right)^3 \geq 0,4 \quad (c)$$

док је за  $K < 0,4$  темељ *коначне крутости*, за кога се интеракција са тлом и распоред контактних притисака анализирају преко еластичних константи ( $E$  и претпостављено  $\nu$ ) или одговарајућег модула реакције тла ( $k_s$ ) а за  $K \rightarrow 0$  темељ би био *идеално савитљив*.

Модул деформације ( $E$ ) тла представља *еквивалентну еластичну константу* (за услове слободног бочног ширења) која за дато тло зависи од степена zasiћености водом и услова дренарања (времена консолидације под оптерећењем темеља) и, како је познато, за хомогено тло се може одредити – као *ефективан модул*  $E'$  за ефективне напоне (*после консолидације* ситнозрног тла или у крупнозрном тлу) или као *модул*  $E_u$  *за услове без дренарања* zasiћеног тла – преко едометарског модула стишљивости ( $M_v$ ) или преко модула стишљивости ( $M_s$ ) измереног опитом кружном плочом, из теоријских релација

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

приказаних дијаграмима на *Сл.3* (Самардаковић,1995b), при чему би за одређивање коефицијента крутости  $M_v$  и  $M_s$  требало да исказују просечну деформабилност тла до дубине ефективног дејства датог темеља ( $z_{ef}$ ).



Сл.3. Дијаграм међусобних односа модула  $E'$ ,  $M_v$  и  $M_s$   
 Fig.3. Diagram of interrelations module  $E'$ ,  $M_v$  and  $M_s$

Ако се у неједначину (с) унесе уобичајена величина за бетон темеља  $E_b = 21000$  МПа, за жељено  $K$  постаје  $d/L = 0,0832(KE')^{1/3}$  па ће на основним врстама тла темељ бити *крут* ( $K \geq 0,4$ ) ако је  $d/L \geq 0,0613E'^{1/3}$  или када је, за две основне групе тла,

$$d/L \geq 0,10-0,13 \approx \mathbf{0,1} \quad \text{на песковитој глини са уобичајеним } E' = 4 \div 10 \text{ МПа,}$$

$$d/L \geq 0,18-0,21 \approx \mathbf{0,2} \quad \text{на песку-шљунку са уобичајеним } E' = 25 \div 40 \text{ МПа.}$$

Из наведеног следи да би за једнаку крутост, под једнаким осталим условима, дебљина стопе плитког темеља на крупнозрном тлу требало да буде двоструко већа него на ситнозрном тлу.

За уобичајене меродавне ширине (дужине) стопе  $L = 2 \div 4$  m, за које се у пракси стопа сматра крутом, дебљина стопе би требало да буде  $d = 0,20 \div 0,40$  m на ситнозрном тлу (какав је случај у пракси, коју потврђује претходна анализа) или  $d = 0,40 \div 0,80$  m на крупнозрном тлу (што би у пракси, на основу наведеног, требало примењивати).

Имајући у виду познату различиту расподелу контактних притисака на влажном ситнозрном и на крупнозрном тлу, наведени критеријуми крутости темеља на овим материјалима би, на основу детаљнијих анализа, могли постати уједначенији од наведених.

## ЗАКЉУЧАК

Приказани оригинални дијаграми за одређивање дубине ефективног дејства ( $z_{ef}$ ) плитких темеља представљају знатно напредније решење од разних формула и табела у домаћој и иној литератури, погоднији су за *практичну примену* и омогућавају *визуелну* процену значајнијих домена појединачних утицаја. Може се уочити да *препоруче за одређивање  $z_{ef}$  без утицаја  $p$  није оправдано користити* и нпр. да је, у складу са теоријском анализом и без обзира на остале утицаје, релативна ефективна дубина ( $z_{ef}/B$ ) за *траку* двоструко већа него за *квадрат* једнаке ширине.

Описана зависност димензија темеља од жељене крутости упућује на препоруку да за једнаке дужине и крутости темеља њихова дебљина треба да буде  $1,5 \div 2$  пута већа на шљунку него на глини. Темељи ће бити *крути* ( $K \geq 0,4$ ) ако је дебљина стопе на глини већа од  $1/10$  дужине а на шљунку већа од  $1/5$  дужине стопе тј.  $d/L$  двоструко веће него на глини. Ово је у сагласности са анализама интеракције темеља и тла и приказима са решењима аутора (1999) за одређивање модула реакције ( $k_s$ ) различитих врста тла испод темеља коначне крутости.

## РЕФЕРЕНЦЕ

- Coduto,D.P.(2001): *Foundation Design – Principles and Practices*, Prentice-Hall, New Jersey, 109.
- 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), SI.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.