

UDK 624.151.5.042
PREGLEDNI RAD

ODREĐIVANJE ZONE SMICANJA ISPOD PROIZVOLJNO OPTEREĆENOG PLITKOG TEMELJA

Miroljub Samardaković, dipl.inž.građ.

REZIME:

Pri izboru parametara čvrstoće za proračun opterećenja loma tla ispod plitkog temelja, naročito na višeslojnom tlu, treba odrediti položaj zone smicanja za usvojeni mehanizam loma. U radu se prikazuje teorijsko rešenje za opšti slučaj centričnog opterećenja i, na osnovu objavljenih rezultata modelskih ispitivanja, predlaže se za praksu pogodno analitičko rešenje za određivanje dubine zone smicanja ispod temelja sa nagnutom, ekscentričnom rezultantom opterećenja.

1. UVOD

U proračunu nosivosti (graničnog opterećenja loma) tla ispod plitkog temelja, računске pokazatelje (γ, c, φ) svojstava tla treba odrediti na osnovu učešća pojedinih slojeva tla u kliznom telu, odnosno dužina prostiranja računске klizne površine kroz pojedine slojeve (npr. DIN 4017, 1979).

Za Prandtl-ov mehanizam i Terzaghi-Mohr-Coulomb-ov uslov loma, koji se primenjuju u savremenim postupcima za proračun graničnog i dozvoljenog opterećenja u pogledu loma tla, klizna površina kojom se aproksimira zona smicanja u homogenom tlu ispod plitkog temelja (Sl.1) određena je u analitički zatvorenom obliku metodom karakteristika (linija klizanja) za koherentno tlo bez težine i bez kontaktnog trenja, rešenjima: za $\alpha=\delta=e=0$ i $\psi=\pi/4+\varphi/2$ (Prandtl,1920, npr. prema Chen,1975), za opštiji slučaj sa $\alpha=e=0$ (Smoltszyk,1960) i za najopštiji slučaj sa $e=0$ (Förster,1959, prema Türke,1984), koje sadrži prethodna rešenja kao specijalne slučajeve.

U slojevitom tlu, ova rešenja i rešenja za nosivost mogu se primeniti kao da je tlo homogeno, sa ekvivalentnim računskim pokazateljima svojstava tla određenim sukcesivnom aproksimacijom, pod uslovom da se uglovi unutrašnjeg trenja (φ) tla u zahvaćenim slojevima ne razlikuju od njihove aritmetičke sredine za više od 5° . Za početnu, procenjenu prosečnu veličinu ugla unutrašnjeg trenja konstruiše se klizna površina sračunate širine (x_f) i dubine (z_f) i na osnovu dužina njenog pružanja kroz slojeve odredi nova, bliža vrednost φ . Sa njom se postupak ponavlja, itd., dok promena φ ne bude manja od 3 %. Preko dužina pružanja poslednje površine kroz slojeve odredi se računska kohezija (c) a preko zapreminskog učešća slojeva u kliznom telu i njegova računska zapreminska težina (γ).

Za veću razliku u parametrima čvrstoće tla u slojevima, mora se primeniti drugačiji, odgovarajući mehanizam loma, što nije predmet ovog razmatranja. U takvom slučaju dvoslojnog temeljnog tla (šljunčani jastuk na glini, glina na steni i dr.), preko pomenutih rešenja za računsku dubinu klizne površine u tlu gornjeg sloja ocenjuje se njegovo učešće u mehanizmu loma i nosivosti sistema, određuje njegova potrebna debljina itd.

Za realno opterećenje kao na Sl.1, sa nagnutom i ekscentričnom rezultantom opterećenja ukopanog temelja, oblik i veličina klizne površine mogu se odrediti samo približno, na osnovu rezultata pre svega modelskih ispitivanja kakve su saopštili dosta citirani Myslivec i Kysela(1978), kao i Georgiadis(1989), koji predstavljaju osnovu za analizu i zaključivanje u ovom radu.

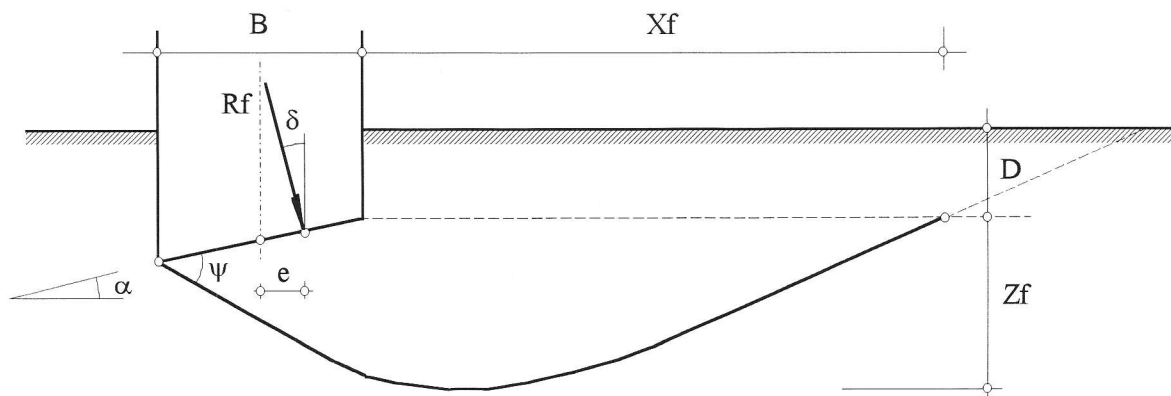
2. CILJ I METOD RADA

U odsustvu strogog matematičkog rešenja za opšti slučaj, cilj rada je odrediti i prikazati rešenje za dubinu zone smicanja ispod proizvoljno opterećenog plitkog temelja, pogodno za primenu u inženjerskoj praksi.

Rešenje je traženo kroz prikaz, analizu i upoređenje teorijskih i eksperimentalnih rezultata objavljenih za specijalne slučajeve i pojedinačne uticaje (dubine temeljenja, nagiba i ekscentriciteta rezultante) za horizontalnu kontaktnu površinu u homogenom tlu sa horizontalnom površinom terena. Pojedinačni uticaji, objavljeni u grafičkoj formi dijagrama, upoređeni su sa teorijskim rešenjima gde je to bilo moguće, objedinjeni su i dati u vidu jedinstvenog rešenja u analitičkom obliku, sa tačnošću praktično jednakom kao za izvorne podatke.

3. TEORIJSKO REŠENJE I UTICAJ NAGIBA REZULTANTE

Rešenje za najopštiji slučaj (Sl.1) sa centričnom rezultantom opterećenja ($e=0$) daje Förster(1959). Navodimo ga u nama pogodnoj analitičkoj formi, kako sledi, i na Sl.2.



Sl.1

Za $e = 0$:

$$\tan \psi = \frac{\sqrt{\tan \varphi - \tan(\delta - \alpha)}}{\sqrt{(1 + \tan^2 \varphi)[\tan \varphi + \tan(\delta - \alpha)] - \tan \varphi \sqrt{\tan \varphi - \tan(\delta - \alpha)}}}$$

$$\frac{x_f}{B} = \frac{\sin \psi}{\cos\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \cos \alpha} \exp\left[\left(\psi - \alpha + \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \tan \varphi\right]$$

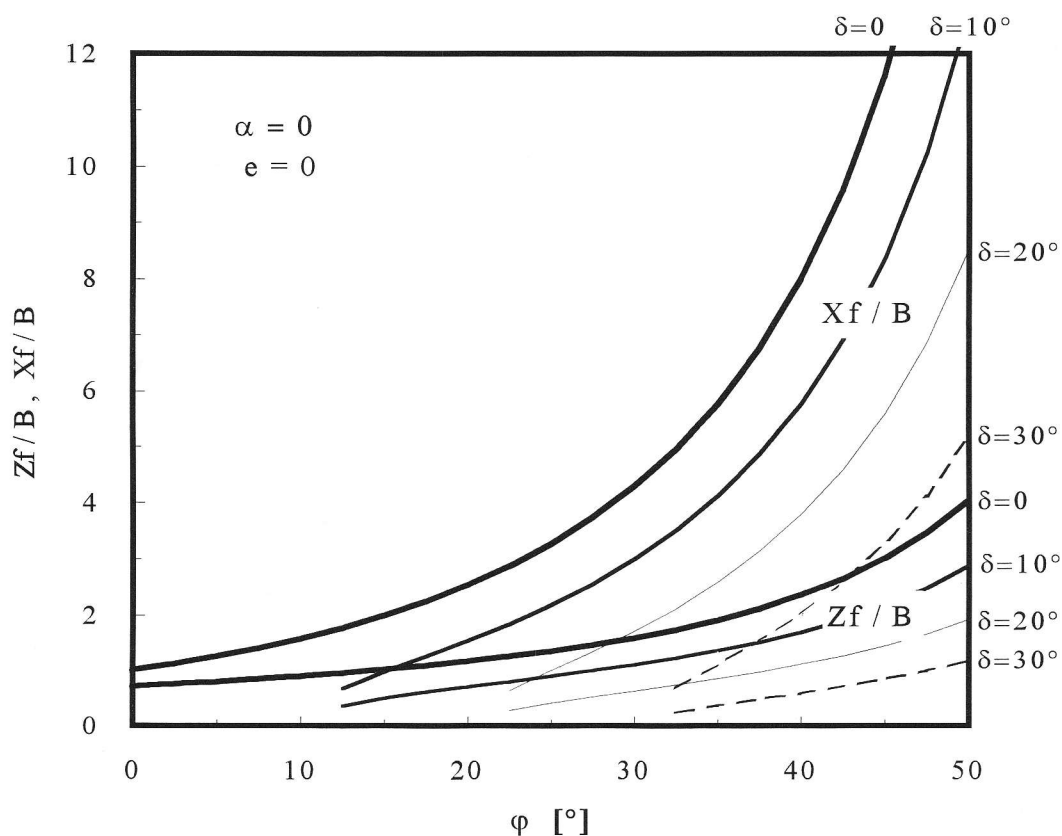
$$\frac{z_f}{B} = \frac{\sin \psi}{\cos \alpha} \exp[(\psi - \alpha) \tan \varphi] \quad (1)$$

Za $e = \alpha = \delta = 0$:

$$\psi = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}$$

$$\frac{x_{0f}}{B} = \tan \psi \exp\left(\frac{\pi}{2} \tan \varphi\right)$$

$$\frac{z_{0f}}{B} = \sin \psi \exp(\psi \tan \varphi) \quad (2)$$



Sl.2

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

4.1. Uticaj nagiba rezultante

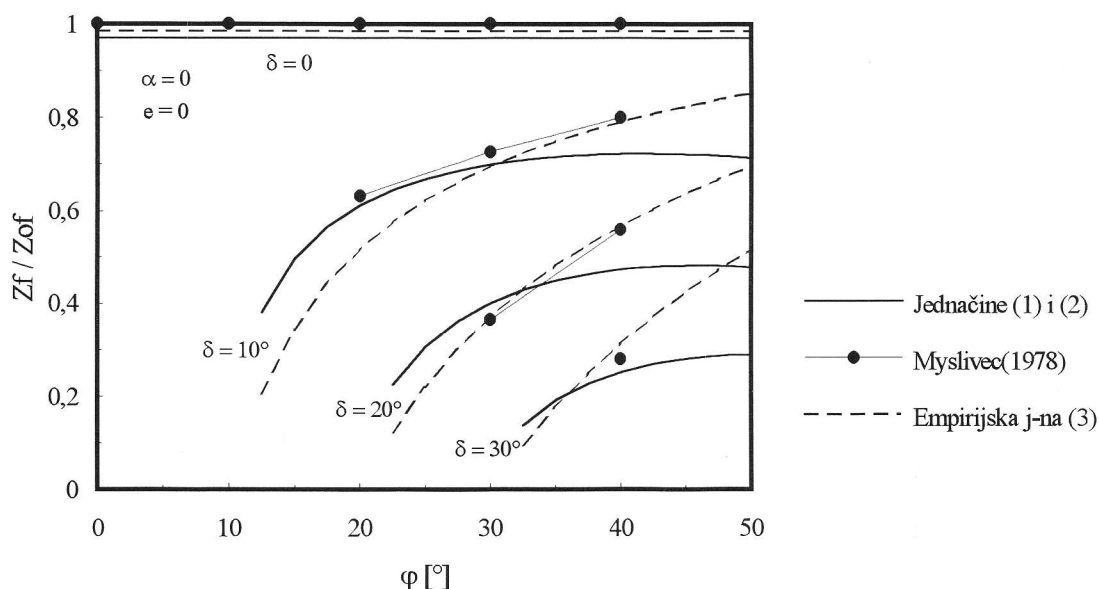
Uz rezultate modelskog ispitivanja nosivosti temelja na šljunčanom sloju preko koherentne osnove, Myslivec i Kysela(1978) prikazuju i uticaj φ i ugla nagiba (δ) rezultante u težištu ($e=0$) horizontalne kontaktne površine ($\alpha=0$), na relativnu dubinu (z_f/B) zone smicanja (Tabela 1).

Tabela 1.

δ [°]	φ [°]				
	0	10	20	30	40
0	0,70	0,80	0,95	1,10	1,25
10			0,60	0,80	1,00
20				0,40	0,70
30					0,35

Ako se veličine u ćelijama Tabele 1. podele veličinama iz prvog reda odgovarajuće kolone, dobijaju se eksperimentalni bezdimenzionalni odnosi (z_f/z_{0f}) u svakoj ćeliji, pogodni za dalju analizu, gde je z_f dubina za $\alpha=e=0$ a z_{0f} dubina za $\alpha=e=\delta=0$. Ovaj odnos (z_f/z_{0f}) prikazan je tačkastim markerima na Sl.3, gde je punim linijama dat isti odnos za teorijske vrednosti, dobijen deljenjem desnih strana jednačina (1) i (2). Tražeći jedinstvenu algebarsku zavisnost istog odnosa od φ i δ , na istom dijagramu isprekidanim linijama prikazane su vrednosti dobijene relacijom:

$$(z_f/z_{0f}) = 1 - \tan\delta/\tan\varphi \quad \text{za } e=0, 0 < D/B < 1 \quad (3)$$



Sl.3

4.2. Uticaj ekscentriciteta rezultante

Georgiadis(1989) saopštava rezultate ispitivanja zone smicanja u zbijenom pesku ($I_D=0,75$) granulacije 0,6-1,2 mm, sa $\varphi=46^\circ$, ispod modela temelja osnove 40×5 cm, ekscentrično opterećivanog na relativnim dubinama $D/B = 0, 0,5$ i 1 . Ispitivan je i napred izloženi uticaj nagiba rezultante.

Sa ukupno 26 rezultata, grafički prikazanih kao zavisnost (z_f/z_{of}) od relativnog ekscentriciteta u pravcu kraće strane stope (e/B), sa visokim stepenom korelacije daje jedinstvenu relaciju za sve relativne dubine stope ($D/B=0 \div 1$):

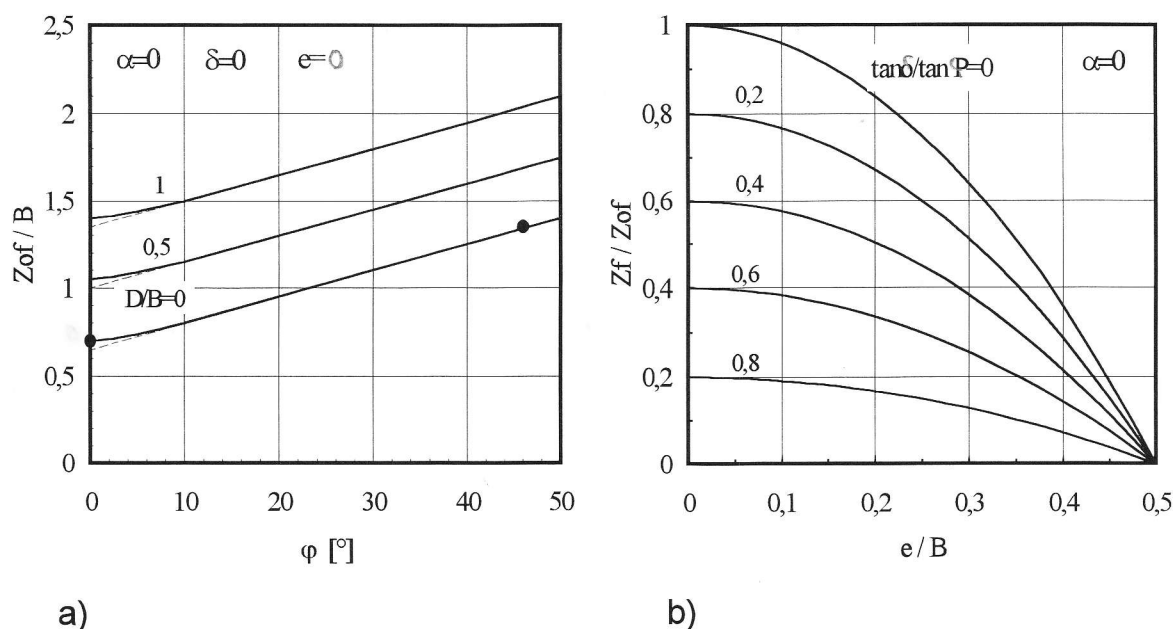
$$(z_f/z_{of}) = 1 - 4(e/B)^2 \quad \text{za } \delta=0 \text{ i } 0 < D/B < 1 \quad (4)$$

4.3. Ukupan uticaj nagiba i ekscentriciteta rezultante

Udružujući uticaje nagiba rezultante (3) i njenog ekscentriciteta (4), jedinstven empirijski korektivni koeficijent, kao odnos dubine smicanja (z_f) za kosu i ekscentričnu rezultantu i dubine (z_{of}) za $\delta=e=0$, može se iskazati kao

$$(z_f/z_{of}) = (1 - \tan\delta/\tan\varphi)[1 - 4(e/B)^2] \quad \text{za } 0 < D/B < 1 \quad (5)$$

grafički prikazan na Sl.4b.



Sl.4

4.4. Uticaj dubine temeljenja

Kombinujući svoje prethodno navedene rezultate sa podacima Myslivec-a (prvi red Tabele1), Georgiadis(1989) za $D/B=0$ formira polaznu, najnižu krivu na dijagramu zavisnosti (z_{of}/B) od φ i relativne dubine (D/B), za $\delta=e=0$ (puna

linija sa tačkama na Sl.4a). Empirijski utvrđuje da za $D/B > 0$ odgovarajuću veličinu (z_{of}/B) sa polazne krive treba uvećati za $0,7(D/B)$, kako su i formirane gornje dve krive ovog dijagrama.

4.5. Grafičko rešenje za opšti slučaj

Na osnovu izložene analize eksperimentalnih rezultata, dubina zone smicanja (z_f prema Sl.1) ispod proizvoljno opterećenog plitkog temelja sa $\alpha=0$ može se odrediti uz pomoć dijagrama na Sl.4. Za dato φ i D/B očita se (z_{of}/B) , za (e/B) i $(\tan\delta/\tan\varphi)$ očita se (z_f/z_{of}) , pa je

$$z_f/B = (z_{of}/B)(z_f/z_{of}) \quad (6)$$

4.6. Analitičko rešenje za opšti slučaj

Na Sl.4a vidi se da isprekidane linije, čije su jednačine dobijene postupkom linearne korelacije, praktično bez promene rezultata daju rešenje za opšti slučaj (Sl.1, $\alpha=0$) u analitičkom obliku za $0 < D/B < 1$:

$$z_f/B = [0,65 + 0,015\varphi^\circ + 0,7(D/B)](1 - \tan\delta/\tan\varphi)[1 - 4(e/B)^2] \quad (7)$$

5. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

Prema izloženoj analizi teorijskih i eksperimentalnih rezultata, postoje osnovni uslovi za ocenu realnosti izraza na desnoj strani rešenja za opšti slučaj (7).

Prvi član, koji iskazuje uticaj dubine temeljenja, izveden je vrlo saglasno sa rezultatima modelskih ispitivanja za različite veličine ugla unutrašnjeg trenja (razne vrste tj. stanja tla).

Kako se vidi sa Sl.3, srednji član izraza (7), uveden prema empirijskoj jednačini (3), realno uvodi uticaj nagiba rezultante za $\varphi \leq 40^\circ$, dokle se dovoljno slažu i teorijski sa eksperimentalnim rezultatima, pa se rešenje (7) može smatrati dovoljno odgovarajućim za realno tlo. Ovde je osnovni nedostatak relativno mali broj ispitivanja za pouzdanije ispitivanje, naročito za tla sa manjim uglom unutrašnjeg trenja.

Treći član izraza, za jednak broj ispitivanja kao i drugi, iskazuje visok stepen korelacije sa eksperimentalnim rezultatima.

Na osnovu svega izloženog, rešenje (7) za analitičko određivanje dubine zone smicanja ispod proizvoljno opterećenog plitkog temelja, prema Sl.1 za $\alpha=0$ i $0 < D/B < 1$, može se oceniti dovoljno saglasnim izloženom teorijskom rešenju i, u nedostatku obimnijih eksperimentalnih rezultata, pogodnim za jednostavnu primenu u geotehničkim proračunima.

6. LITERATURA

- Chen, W.-F. (1975): *Limit analysis and soil plasticity*, Elsevier, Amsterdam, 5, 129.
- ***DIN 4017 (1979), Teil 1, 9-11; Beiblatt 1 zu DIN 4017, Teil 2, 2, *Erd- und Grundbau Normen*, Beuth Verlag, Berlin, 1983.
- Förster, W. (1959): Zur Tragfähigkeit des Baugrundes bei geneigter Sohle und schrägem Lastangriff, *Bauplanung und Bautechnik*, 13, 516-519.
- Georgiadis, M. (1989): Depth of rupture surface beneath embedded footings, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No 3, Tokyo, 163-167.
- Myslivec, A., Kysela, Z. (1978): *The bearing capacity of building foundations*, Elsevier, Amsterdam, 136.
- Smoltczyk, U. (1960): *Ermittlung eingeschränkt plastischer Verformungen im Sand unter Flachfundamenten*, W. Ernst und Sohn, Berlin, 16-20.
- Türke, H. (1984): *Statik im Erdbau*, W. Ernst und Sohn, Berlin, 105.

DEPTH OF SHEARING ZONE BENEATH GENERAL CASE LOADED SHALLOW FOOTINGS

Miroljub Samardaković, dipl.civ.eng.

Abstract:

To choice of soil parameters for failure load evaluation, one should know form and dimensions of the rupture surface beneath footings, for layered soil profile specially. In general case load, rigorous mathematical solution for homogeneous soil don't exist too. On the bases of reported experimental results, the simple analytical solution for computing the depth of the rupture surface in general case is proposed.