

Zbornik radova Gradjevinskog fakulteta u Nišu
 N° 4 (1983),

RELATIVNA STIŠLJIVOST TLA I UTICAJ DIMENZIJA

STOPE NA NOSIVOST TLA ISPOD ŠIROKOG TEMELJA

Miroljub Samardaković

U radu se, na osnovu rezultata modelskih ispitiva-

nja i teorijskih analiza, pokazuje da sa povećavanjem širine stope plitkog temelja raste relativna stišljivost a smanjuje se čvrstoća na smicanje tla, tako da je priraštaj nosivosti tla sve manji i ona teži nekoj graničnoj veličini. Nasuprot tome, računaska nosivost određena konvencionalnim rešenjima povećava se linearno sa dimenzijama stope. Zbog toga se, pre svega za široke temelje, predlaže primena rešenja Brinch Hansen-Vesić, kojim se uvode faktori smanjenja računске nosivosti, nazvani faktorima stišljivosti. Ovo rešenje analizira se pomoću računskog programa i prikazuje se uticaj širine i oblika stope na smanjenje računске nosivosti nekoherentnog, mešovitog i koherentnog tla.

1. UVOD

Kako je poznato, računsko dozvoljeno opterećenje tla moralo bi biti određeno na dva načina: preko veličine graničnog opterećenja (nosivosti, opterećenja loma, graničnog otpora) tla u datim uslovima i odgovarajućeg faktora sigurnosti (jedininstvenog ili više parcijalnih, koji treba da bude posebno obrazložen) kao i na osnovu veličine dozvoljene deformacije (sleganja) tla i objekta.

Cilj ovog rada je da prikaže i prouči savremeno rešenje za određivanje računске nosivosti tla ispod plitkih temelja čija širina stope je veća od 2-3 m, uobičajenih za

temelje samce i trake. Njih ćemo nazvati širokim temeljima.

Pod plitkim temeljem podrazumeva se onaj čija dubina (D) nije veća od širine (B) (Terzaghi, 1943), odnosno manja je od 4B (naš "Pravilnik...", 1974).

Pod nosivošću tla praktično se podrazumeva krajnji intenzitet rastućeg opterećenja kome se u datim uslovima tlo može suprotstaviti, a da ne dodje do loma tla. Ako je to računsko opterećenje, kontinualno i jednako podeljeno po kontaktnoj površini između temelja i tla, njegova veličina (q_f) može se tražiti teorijski (strogim i približnim rešenjima) i eksperimentalno (u laboratoriji i in situ). Sigurno je da u dogledno vreme ne može biti nadjeno ni tačno ni rešenje opšteg tipa za nosivost tla ispod temelja, jer ono zavisi od mnogo faktora koji se mogu svrstati u sledeće grupe (Szechy, Varga, 1978):

- a) svojstva tla,
- b) karakteristike konstrukcije i temelja,
- c) efekti okolne sredine,
- d) karakteristike opterećenja,
- e) ostali faktori (dvo ili tro-dimenzionalan sistem napona i deformacija, promena napona smicanja duž površine loma, uslov loma i njegov oblik, tačnost pretpostavljenih površina loma i dr.).

U ovakvim uslovima, u praksi se za plitke temelje još uvek koristi klasično rešenje Terzaghi-ja (1943)

$$q_f = cN_c + qN_q + 0,5\gamma_2 B N_\gamma \quad (1)$$

sa izmenom koeficijenata uz prvi i treći član, zavisno od oblika stope. Iz grupe a) za horizontalno, homogeno tlo uzeti su u obzir zapreminska težina tla ispod temelja (γ_2), kohezija (c) i ugao unutrašnjeg trenja (ϕ) od koga zavise faktori nosivosti (N). Iz grupe b) uzeti su samo oblik stope, njena širina i dubina fundiranja (D) ($q = \gamma_1 D$) a stopa je horizontalna. Uti-caji iz grupe d) praktično nisu obuhvaćeni jer je rešenje izvedeno za vertikalno centrično, statičko opterećenje na horizontalnoj stopi.

Konvencionalno rešenje Brinch Hansen-a (1961, 1970) u vidu

$$q_f = cN_c S_c d_c i_c + qN_q S_q d_q i_q + 0,5\gamma_2 B N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (2)$$

čiji se drugačiji oblik predlaže i našim "Pravilnikom..." (1974), po obliku predstavlja nadgrađeno rešenje Terzaghi-ja, prošireno faktorima oblika stope (S), dubine fundiranja (d) i eksce-

ntriticeta i nagiba rezultante opterećenja (i). Faktori nosivosti rezlikuju se od onih iz jednačine (1).

Na isti način, uvođenjem odgovarajućih faktora korekcije u osnovnu jednačinu, mogu se uključiti i drugi uticaji. Tada se, međutim, postavljaju pitanja: koliko faktora se može uvesti u jednačinu, kolika će greška pri tom ostati i da li će greška biti na strani sigurnosti, kolika je greška dozvoljena? Vodeći autori ne daju odgovore na ovo pitanje već predlažu dalja istraživanja pojedinih uticaja, posebno uvođenjem elasto-plastičnog modela tla umesto kruto-idealno plastičnog.

Ovde će biti reči o uticaju dimenzija stope na nosivost tla ispod plitkog temelja, s obzirom da stvarna nosivost ne raste linearno sa širinom stope, kako se dobija standardnim proračunom, što je posebno interesantno kod širokih temelja.

2. UTICAJ ZBIJENOSTI-STIŠLJIVOSTI TLA I ŠIRINE STOPE NA NOSIVOST

Kako je na osnovu modelskih ispitivanja pokazao i sistematizovao Vesić (1973), u nekoherentnom tlu lom se može javiti u tri vida - opšti, lokalni i lom probijanjem (utiskivanjem) - zavisno od zbijenosti tla (iskazana indeksom gustine I_D) i od relativne dubine temelja (iskazana kao D/B , $B' = 2BL/(B+L)$, gde je L dužina stope).

Na isti način utvrđeno je da nosivost zavisi pre svega od vida loma i oblika i veličine površine smicanja u tlu. Ove zavisnosti prikazane su i u radu autora (1981).

Imajući u vidu da zbijenost i stišljivost utiču na veličinu nosivosti i da uključeni pokazatelji ϕ i C nekad čak ni kvalitativno ne odslikavaju stepen zbijenosti, Terzaghi je predložio da se j -na (1), izvedena uz pretpostavku kruto-idealnoplastičnog (nestišljivog) materijala, primenjuje uz uslov opšteg loma tj. za tlo u dobro zbijenom i praktično nestišljivom stanju. Za stišljivo tlo, u stanju manje zbijenosti tj. uz uslov lokalnog loma (koga nije kvantitativno odredio) on predlaže da se u j -nu (1) i sve odgovarajuće relacije umesto C i ϕ uvedu

$$C^* = KC \quad i \quad \phi^* = \arctg(k \cdot tg\phi) \quad (3)$$

gde je $K = 2/3$.

Ovakav skok veličine pokazatelja čvrstoće i nosivosti je neprirodan po Vesić (1973) predlaže

$$\begin{aligned} \text{za } 0 < I_D < 2/3 \quad K &= 2/3 + I_D - (3/4) I_D^2 \\ \text{za } I_D > 2/3 \quad K &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

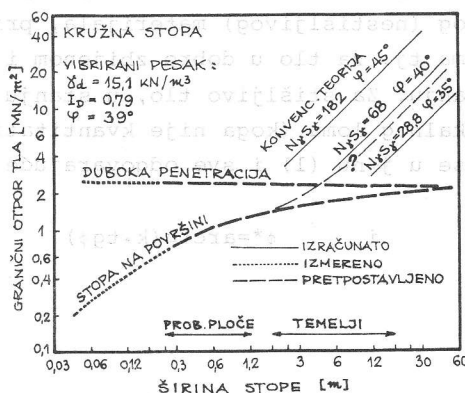
tj. od $K=2/3$ za stanje najmanje zbijenosti do $K=1$ za stanje dobre zbijenosti ($2/3 < I_D < 1$).

Novija istraživanja ukazuju da prosečna otpornost na smicanje, mobilisana duž površina klizanja ispod plitkog temelja, opada sa porastom dimenzija njegove stope. S obzirom na ovakvu čvrstoću tla, relativna stišljivost tla povećava se sa veličinom temelja. Ovo se može objasniti sledećim razlozima: (a) pri porastu širine stope povećava se dubina aktivnog klina tla ispod pa je normalan napon u površini loma veći ali ovakvom normalnom naponu ne odgovara proporcionalno uvećana čvrstoća na smicanje već nešto manja, s obzirom da je Mohr-ova anvelopa, koja se može prihvatiti kao realan uslov loma, zakrivljena za razliku od Coulomb-ove prave uzete u proračunu; (b) progresivan lom duž površine smicanja sada se događa po većoj površini; (c) zahvatanje slojeva ili zona slabijeg materijala povećavanjem površine smicanja.

Opitima opterećenja peska do loma, pločama čije su dimenzije povećavane (ali samo do 1 m), više autora ustanovilo je opadanje izmerene veličine faktora nosivosti N_γ , kao najmerodavnijeg za uticaj širine na nosivost, kao i moguću tendenciju da se ona smanjuje do nekog asimptotskog minimuma.

Takodje, na osnovu svojih ranijih modelskih i teorijskih istraživanja, Vesić (1969) prikazuje na sl.1 veličine nosivosti peska zavisno od prečnika kružne stope.

SL.1



Tačkastim linijama prikazane su izmerene veličine, crčkastim - pretpostavljene kao realne, a punim linijama veličine sračunate konvencionalnom teorijom (jednačina (2)). Kako se vidi, merenja na dubokim temeljima dala su skoro konstantnu veličinu nosivosti, koja malo i ravnomerno opada. Ako se uvede logična pretpostavka da za veće širine stope nosivost temelja na površini raste najviše do veličine nosivosti dubokog temelja jednake širine, u istom tlu, onda bi tok pretpostavljene krive za površinski temelj morao da bude kao na sl.1. Pošto je opitima pokazano da se ispod dubokih temelja događa lom u vidu probijanja (utiskivanja), uvedena pretpostavka dovodi do zaključka da se isti vid loma javlja i ispod širokih temelja. Ovo se može prihvatiti s obzirom da sa veličinom stope raste i relativna stišljivost tla, a da se lom probijanjem događa u slabo zbijenom materijalu.

Dakle, može se zaključiti da stvarna nosivost tla ispod svih temelja raste sa širinom stope ali teži nekoj graničnoj veličini koja je zavisna od zbijenosti tj. koeficijenta poroznosti tla pri lomu.

S druge strane, računaska nosivost prema konvencionalnoj teoriji (jednačina (2)) linearno raste sa dubinom, kako se vidi na sl.1.

S obzirom da nema šire afirmisane teorije nosivosti bazirane na realnijem modelu tla (napr. elasto-plastičnom sa ojačavanjem ili slabljenjem), potrebno bi bilo postojeću teoriju adaptirati, kako se predlaže u sledećem poglavlju.

3. RELATIVNA STIŠLJIVOST I REŠENJE BRINCH HANSEN-VESIĆ

Pretpostavivši da je pritisak potreban za proširenje "rupe" u tlu, jednak graničnom normalnom pritisku na stranama aktivnog klina istog tla ispod temelja i kombinujući to sa rešenjem za proširenje rupe u elasto-plastičnom neograničenom telu, Vesić je dobio faktore nosivosti koje je uporedio sa faktorima N po Prandtl-u i Brinch Hansen-u iz jednačine (2).

Na osnovu prednjeg, isti autor (1973) uvodi tzv. faktore stišljivosti tla (C_c, C_q i C_γ), analogno faktorima oblika, dubine ili nagiba rezultante opterećenja. Ovi faktori zavise od ugla unutrašnjeg trenja tla, oblika stope i relativne stišljivosti koju ovaj autor, za razliku od drugih, u svojim ranijim radovima i uz određene ograde, iskazuje kvantitativno - preko

tzv. indeksa krutosti:

$$I_R = G/C + q_B \tan \phi \quad (5)$$

gde su: G modul smicanja, C i ϕ parametri čvrstoće tla; q_B prosečan geostatički napon u zoni ekspanzije ispod temelja, a računa se kao napon na dubini $B/2$ ispod stope, tako da je

$$q_B = \gamma_2 (D + B/2) \quad (6)$$

Pošto je I_R uvedeno za idealno elasto-plastično tlo, za prosečnu zapreminsku dilataciju (Δ) u plastičnoj zoni predložena je korekcija I_R na veličinu

$$I_{RR} = I_R / (1 + I_R \Delta) \quad (7)$$

Indeks krutosti varira sa novoom i karakterom opterećenja. Ocenjuje se da je za veličinu I_{RR} preko 250 masa tla relativno nestišljiva dok je za male vrednosti, recimo 10, masa relativno stišljiva. Za sada ne postoji teorijska veza između indeksa krutosti i vida loma tla.

Veličine faktora stišljivosti, kojima se množe i redukuju vrednosti pojedinih članova desne strane jednačine (2), računaju se kao:

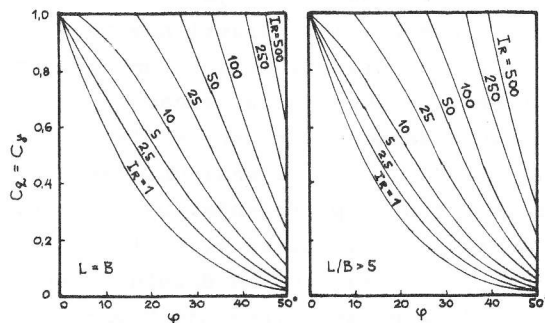
$$c_q = \exp[(-4,4 + 0,6B/L) \tan \phi + 3,07 \sin \phi (\log 2I_R) / (1 + \sin \phi)] \quad (8)$$

$$c_c = 0,32 + 0,12B/L + 0,6 \log I_R \quad \text{za } \phi = 0 \quad (9)$$

$$c_c = c_q - (1 - c_q) / (N_c \tan \phi) \quad \text{za } \phi > 0 \quad (10)$$

$$c_\gamma = c_q \quad (11)$$

Veličine faktora c_q Vesić je dao tabelarno i dijagramom na sl.2, samo za stope čije je $B=L$ i $L/B > 5$.



SL.2

U koliko je indeks krutosti I_R mase tla u datim uslovima veći od kritičnog indeksa

$$I_{Rcr} = 0,5 \exp[(3,3 - 0,45B/L) \operatorname{tg}(45 + \phi/2)] \quad (12)$$

smatra se da je tlo relativno nestišljivo. Tada su faktori stišljivosti jednaki jedinici i redukcija računske nosivosti se ne vrši jer se pretpostavlja mehanizam opšteg loma.

Veličine kritičnog indeksa krutosti za granične oblike stope daju se u tabeli 1.

Tabela 1. Veličine kritičnog indeksa krutosti tla

I_{Rcr}	Ugao unutrašnjeg trenja ϕ°										
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
$B=L$	8	11	15	20	30	44	70	120	225	486	1258
$B/L=0$	13	18	25	37	55	89	152	283	592	1442	4330

-Sažet prikaz ovakvog prilaza uticaju stišljivosti daju i Széchy i Varga (1978), a kod nas Stojadinović (1975).

S obzirom da su radovi Vesića (1973, 1975) vrlo dobro prihvaćeni i često citirani i da su u njima faktori oblika stope, nagiba rezultante i stišljivosti, kao i faktor nosivosti N , manje ili više korigovani u odnosu na najšire korišćeno rešenje Brinch Hansen-a (1961, 1970), ovde predlažemo rešenje za proračun nosivosti tla ispod plitkog temelja, koja smo slobodni da nazovemo rešenjem Brinch Hansen-Vesić:

$$q_{fc} = cN_c S_c d_i c_c + qN_q S_q d_i q_c + 0,5 \gamma B N_\gamma S_\gamma d_i \gamma_c \quad (13)$$

Ono obuhvata uticaj stišljivosti tla i trebalo bi ga primeniti pre svega za široke temelje.

Nosivost sračunatu iz j-ne (13), kada su faktori stišljivosti $c_c = c_q = c_\gamma = 1$, označićemo sa q_f .

Parametre čvrstoće (ϕ, c) treba odrediti laboratorijskim opitima na uzorcima tla opterećenim do loma u uslovima kojima se podražavaju uslovi in situ.

Kako iznosi Dembicki (1982), Biarez (1962) je izučavao nagib površine aktivnog klina tla ispod temelja (zbog pretpostavljenog različitog nagiba Prandtl i Terzaghi dobijaju različite veličine faktora nosivosti N_c i N_q) i, za tačno određeni nagib za koji je optor tla najmanji, pokazao je da su faktori nosivosti N_c i N_q identični vrednostima po Prandtl-u (1920).

Tako su u j-ni (13) faktori nosivosti:

$$N_q = \text{tg}^2(45 + \phi/2) \exp(\pi \text{tg} \phi) \quad (14)$$

$$N_c = (N_q - 1) \text{ctg} \phi \quad (15)$$

Prema Vesiću (1973), najrealnije vrednosti N_γ dobijaju se izrazom:

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \text{tg} \phi \quad (16)$$

U istom radu dati su dijagrami i tebele za odredjivanje veličina N_c , N_q i N_γ za svaki stepen ϕ .

Faktori oblika stope: $U_{50} = 50$							I Ror		
20	45	$S_c = 1 + (B/L) (N_q/N_c)$	25	30	15	10	0	(17)	
1258	488	$S_q = 1 + (B/L) \text{tg} \phi$	1258	30	20	15	11	8	(18)
4330	1442	$S_\gamma = 1 - 0,4 B/L$	283	89	25	20	18	13	(19)

Faktori dubine:

Za $D \leq B$ (1973) vrlo dobro

$$d_q = 1 + 2 \text{tg} \phi (1 - \sin \phi)^2 D/B \quad (20)$$

$$d_c = 1 + 0,4 D/B \quad \text{za } \phi = 0 \quad (21)$$

$$d_c = d_q - (1 - d_q)/(N_c \text{tg} \phi) \quad \text{za } \phi > 0 \quad (22)$$

$$d_\gamma = 1 \quad (23)$$

za $D > B$ trebaju izrazima za d_q i d_c D/B zameniti

sa $\arctg (D/B)$.

Elementi za proračun faktora nagiba i ekscentricite-

ta rezultante opterećenja, sa vertikalnom komponentom V i hori-

zontalnom H (zadatom preko H_B i H_L), prikazani su na sl. 3.

Nosivost računata iz j-ne (13) kada su faktori stis-

ljivosti $c = c_0 = 1$, označeno sa c_0 .

Dimenzije efektivne površine

stope:

$$B' = B - 2e_B \quad (e_B < 0,3B)$$

$$L' = (L/B) B - 2e_L \quad (e_L < 0,3L)$$

$$\theta = \arctg (H_B/H_L)$$

Sl. 3

Faktori nagiba rezultante:

$$m_B = (2+B/L)/(1+B/L) \quad (24)$$

$$m_L = (2+L/B)/(1+L/B) \quad (25)$$

$$m = m_L \cos^2 \theta + m_B \sin^2 \theta \quad (26)$$

$$i_q = [1 - H \tan \phi / (V + B' L' C)]^m \quad (27)$$

$$i_c = 1 - mH / (B' L' C N_c) \quad \text{za } \phi = 0 \quad (28)$$

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \tan \phi) \quad \text{za } \phi > 0 \quad (29)$$

$$i_y = [1 - H \tan \phi / (V + B' L' C)]^{m+1} \quad (30)$$

Faktori stišljivosti (C_c , C_q i C_y) uključuju se ako je indeks krutosti tla $I_R < I_{Rcr}$. Potrebne vrednosti dobijaju se iz jednačina (5)-(12).

Potrebna modul smicanja (G) može se sa dovoljnom tačnošću odrediti preko ϕ i modula stišljivosti M_v :

$$K_o = 1 - \sin \phi \quad (31)$$

$$v = K_o / (1 + K_o) = (1 - \sin \phi) / (2 - \sin \phi) \quad (32)$$

$$E = M_v (1 - v - 2v^2) / (1 - v) \quad (33)$$

$$G = 0,5E / (1 + v) \quad (34)$$

Kako je poznato, za slučaj ekscentričnog opterećenja dobijena nosivost q_f važi za efektivnu površinu stope ($B' L'$) i vertikalna sila loma tla ispod stope BL tada je

$$V_f = q_f B' L' \quad (35)$$

4. RAČUNSKI PROGRAM I ANALIZA REŠENJA BRINCH HANSEN-VESIĆ

Prihvatajući nužnost primene rešenja datog jednačinom (13), zajedno sa predloženim faktorima stišljivosti koji za sada predstavljaju jedini racionalan pristup uvođenju uticaja relativne stišljivosti u proračun nosivosti tla, posebno evidentan kod širokih temelja, u ovom radu će biti izvršena analiza: kako i koliko faktori stišljivosti umanjuju računsku nosivost pri promeni parametara čvrstoće (vrste tla) kao i širine i oblika stope. Na osnovu toga moglo bi se zaključiti od kojih širina i oblika stope u glavnim grupama tla treba izvršiti korekciju nosivosti, kao i približan procenat smanjenja nosivosti. Ovakav prilaz bio bi više u duhu klasičnog pristupa određivanju nosivosti, što bi bilo korisno s obzirom da inženjerski osećaj i iskustvo u vezi sa veličinom novog pojma -

- indeksa krutosti tla (I_R)- još nisu prisutni. Takodje, moglo bi se zaključivati i o mogućnosti uprošćavanja relativno složenog proračuna nosivosti prema rešenju Brinch Hansen-Vesić.

Pre svega u cilju analize ovog rešenja, autor je uradio računski program, instaliran u Računskom centru Gradjevin-skog fakulteta u Nišu, kojim se na osnovu svih napred navedenih jednačina rešenja Brinch Hansen-Vesić, za ulazne podatke $\gamma, \phi, C, M_v, \Delta, D, e_B, e_L, H_B, H_L$ i V , dobijaju tabele ili dijagrami: nosivosti q_f (bez uticaja relativne stišljivosti, sa jediničnim faktorima stišljivosti), nosivosti q_{fc} (sa faktorima stišljivosti) i koeficijenta $K=q_{fc}/q_f$ (koeficijent smanjenja ukupne računске nosivosti zbog prisustva faktora stišljivosti), u zavisnosti od oblika stope (L/B) i širine stope (B), koji se povećavaju od $L/B=1$ do 10 i od $B=0,5$ m do 30 m u dovoljno malim koracima. Po potrebi, mogu se dobiti i tabele svakog od tri člana desne strane jednačine (13), sa stvarnim ili jediničnim faktorima stišljivosti (C_c, C_q, C_γ).

S obzirom na veliki broj ulaznih podataka, analiza je izvršena za tipičan centrično opterećen (širi) temelj, bez horizontalnih sila, na dubini $D=3,50$ m, u tlu čije je $\gamma=20$ kN/m³ i $\Delta=0$. Kohezija je menjana od $C=0$ do 500 kN/m² a za svaku njenu vrednost dobijene su tabele nosivosti i odnosa q_{fc}/q_f za $\phi=0, 10, 20, 30$ i 40, pri čemu je odgovarajući modul stišljivosti bio $M_v=5, 8, 12, 25$ i 40 MN/m².

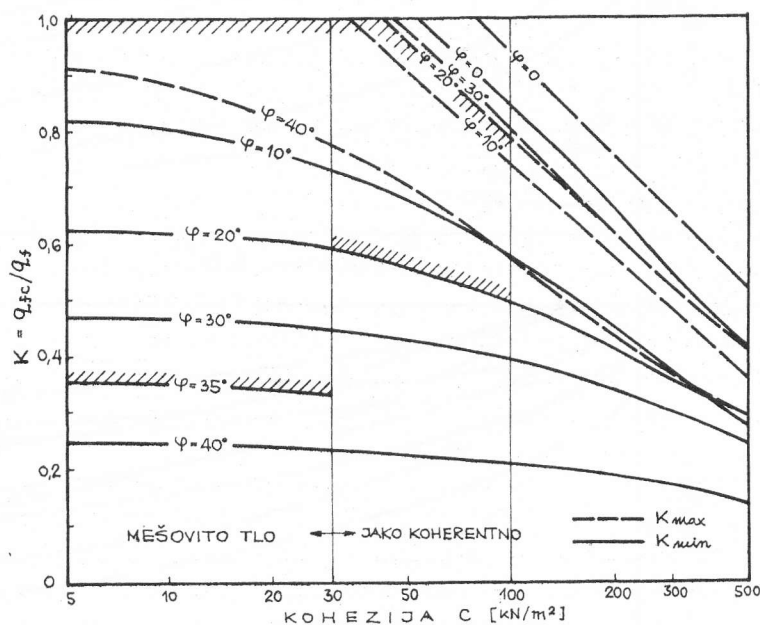
Pošto su svi parametri međusobno povezani i svi utiču i na indeks krutosti i na faktore stišljivosti (koji su međusobno različiti ($C_q \neq C_c$)), kao i na "osnovnu" nosivost q_f , analiziran je uticaj ϕ i C , B i L/B na ukupnu nosivost, što se najbolje vidi iz veličine koeficijenta K .

Opredelili smo se za prikaz rezultata dijagramima kakvi su dati na sl.4-7.

Na sl.4 prikazane su dobijene veličine najvećeg (K_{max}) i najmanjeg (K_{min}) koeficijenta smanjenja nosivosti u funkciji kohezije i ugla unutrašnjeg trenja tla. Ako sva tla uslovno podelimo na dve grupe (a) nekoherentna i mešovita, čije je $C=0$ do 30 kN/m² i $\phi=20$ do 35° i (b) jako koherentna, gde je $C=30$ do 100 kN/m², a $\phi=0$ do 20°, tada se na dijagramu šrafurom mogu izdvojiti dva odgovarajuća područja realnih materijala.

Za grupu (a) na veličinu K bitno utiče ϕ tako da je

za $\phi=20^\circ$ $K=0,62-1,00$, a za $\phi=35^\circ$ $k=0,35-1,00$, dok je promena kohezije praktično bez uticaja. Najmanje veličine (K_{min}) dobijene su za najveće širine stope trakastog oblika (K opada sa izduživanjem stope pri konstantnoj širini). Za dimenzije stope koje odgovaraju temeljima samcima i trakama ovde je $K=1$.

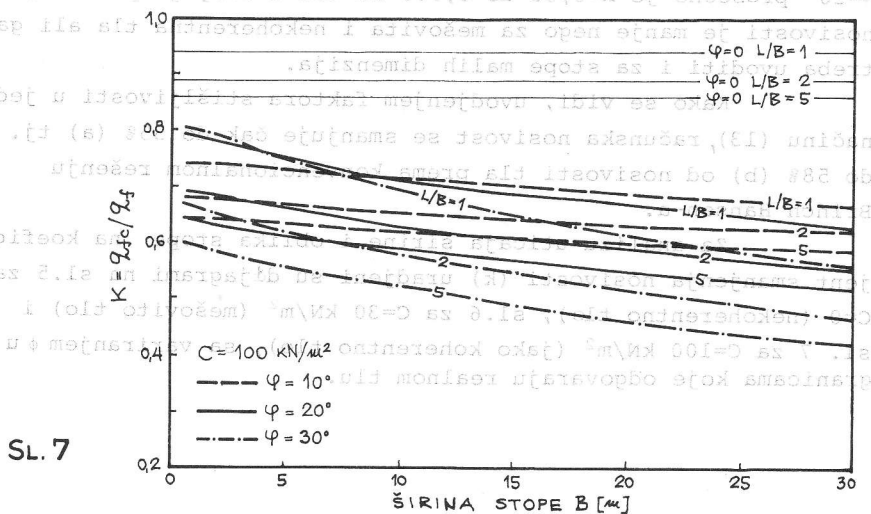
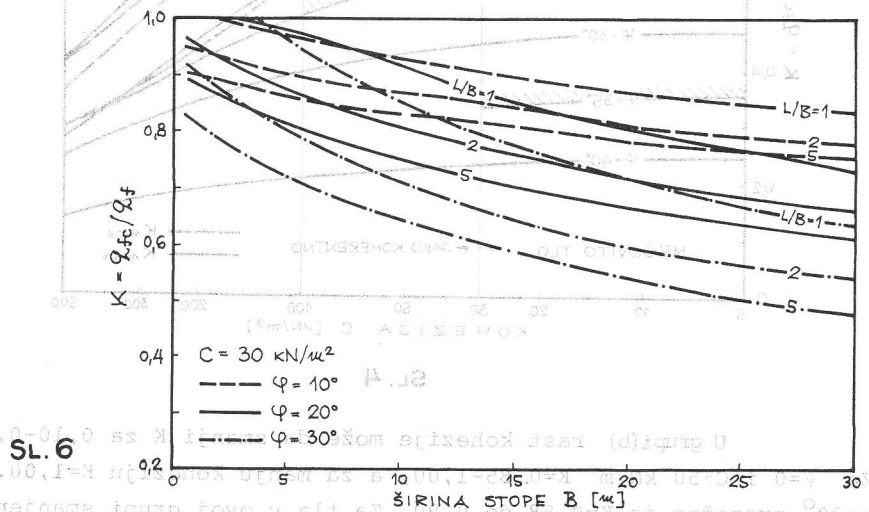
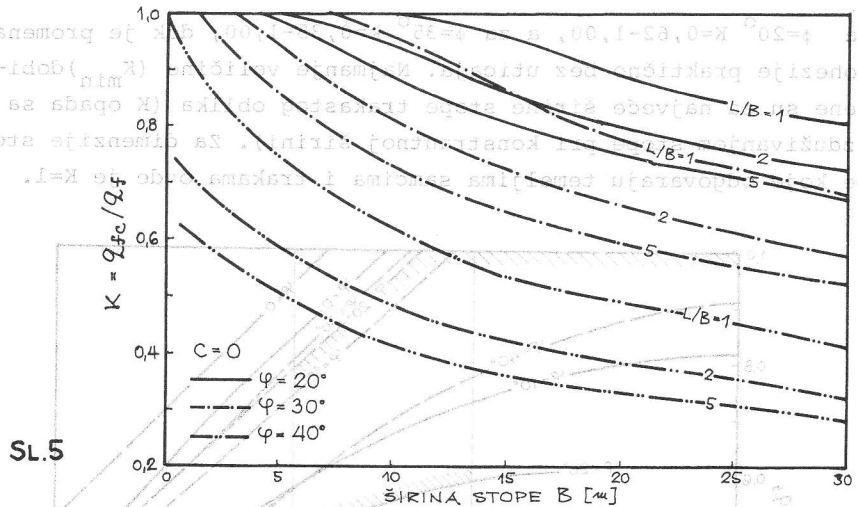


SL. 4

U grupi(b) rast kohezije može da smanji K za 0,10-0,15. Za $\phi=0$ i $C>50$ kN/m² $K=0,85-1,00$, a za manju koheziju $K=1,00$. Za $\phi=20^\circ$ prosečno je $K=0,58$ do 0,90. Za tla u ovoj grupi smanjenje nosivosti je manje nego za mešovita i nekoherentna tla ali ga treba uvoditi i za stope malih dimenzija.

Kako se vidi, uvodjenjem faktora stišljivosti u jedinačinu (13), računaska nosivost se smanjuje čak do 35% (a) tj. do 58% (b) od nosivosti tla prema konvencionalnom rešenju Brinch Hansen-a.

Za analizu uticaja širine i oblika stope na koeficijent smanjenja nosivosti (k) urađeni su dijagrami na sl.5 za $C=0$ (nekoherentno tlo), sl.6 za $C=30$ kN/m² (mešovito tlo) i sl. 7 za $C=100$ kN/m² (jako koherentno tlo), sa variranjem ϕ u granicama koje odgovaraju realnom tlu.



Sa ovih dijagrama može se oceniti veličina smanjenja računске nosivosti, širina i oblik stope za koje treba uvesti smanjenje i uticaj oblika na smanjenje nosivosti q_{fc} koja bi bila sračunata za kvadratnu stopu.

Kako se vidi, koeficijent (k) smanjenja nosivosti bitno je manji od jedinice za sve vrste tla. Kod nekoherentnog tla uticaj ϕ i B na K, koje se spušta i do 0,30, je veliki. Kritične širine stope u ovom tlu, posle kojih je $K < 1$ i mora se uzeti u obzir uticaj stišljivosti na nosivost, daju se u Tabeli 2.

Tabela 2. Kritične širine stope B [m] ($C=0$)

ϕ	20°	30°	35°	40°
L/B=1	10,0	7,5	3,5	0
2	5,0	3,0	1,0	0
5	3,5	1,5	0	0

Za koheziju veću od 30 kN/m² smanjenje nosivosti mora se vršiti za sve uglove trenja i sve širine stope.

Za jače koherentno tlo uticaj relativne stišljivosti je najveći. K se smanjuje do 0,40-0,50 ali što je kohezija veća uticaj B na K je manji. Tako se za $C=100$ kN/m², pri promeni širine od 1 do 30 m K smanji samo za 0,05 ($\phi=10^\circ$) tj. za 0,13 ($\phi=20^\circ$).

Pošto se za sve vrste tla uočava u glavnom paralelan tok krivih za $L/B=1,2$ i 5 pomoću tabele koeficijenata dobijenih za navedene tri granične vrste tla, deljenjem koeficijenta K_i za $L/B > 1$ sa K_1 za $L/B=1$ i menjajući B za svako ϕ dobijeni su koeficijenti oblika $K_L = K_i / K_1$ za $\phi=10, 20, 30$ i 40° i $B=1-30$ m. Ispostavilo se da K_L zavisi samo od oblika stope za dato ϕ , a ne i od kohezije i širine stope (greška je do 0,02).

Koeficijenti oblika (K_L) daju se u tabeli 3. koja važi za $K_1 < 1$.

Tabela 3. Koeficijenti oblika (K_L)

L/B	ϕ			
	10	20	30	40
1	1	1	1	1
1,5	0,95	0,93	0,89	0,84
2	0,93	0,90	0,84	0,77
2,5	0,92	0,88	0,81	0,74
3	0,91	0,86	0,79	0,71
4	0,90	0,85	0,76	0,68
5	0,89	0,84	0,75	0,66
10	0,88	0,81	0,73	0,63

To znači da se za stopu oblika L/B i širine B u tlu sa datim C i ϕ , može K naći određivanjem K_1 za stopu jednake širine i oblika $L/B=1$ u istom tlu i njegovim množenjem sa K_L za dato L/B i ϕ iz tabele 3, tj. $K=K_1K_L$.

Ovim načinom određivanja K mogao bi se pojednostaviti proračun nosivosti q_{fc} za stopu oblika L/B , s obzirom da je uticaj oblika na faktore stišljivosti značajan, da su izrazi za njihov proračun složeni, a dijagrami (sl.2) postoje samo za $C_q=C_\gamma$ i samo za $L/B=1$ i $L/B>5$.

Na osnovu prednjeg predlažemo skraćeni postupak da određivanje nosivosti q_{fc} za stopu date širine B i oblika $L/B \geq 1$, u kome bi se koristili samo dijagrami faktora stišljivosti C_c, C_q i C_γ za oblik $L/B=1$: (a) za stopu širine B i oblika $L/B=1$ odrediti nosivosti q_{f1} i q_{fc1} i koeficijent $K_1=q_{fc1}/q_{f1}$; (b) iz Tabele 3. za dato L/B i ϕ odrediti koef.oblika K_L i sračunati $K=K_1K_L$; (c) za datu stopu oblika L/B i širine B odrediti nosivost q_f , bez uticaja relativne stišljivosti; (d) sračunati nosivost za datu stopu oblika L/B i širine B kao $q_{fc}=Kq_f$.

Daljom analizom zaključujemo da se za mešovita (C, ϕ) tla korak (a) bitno skraćuje, bez većeg uticaja na tačnost rezultata, ako se za $L/B=1$ iz tabele - dijagrama očita C_c i C_q , a onda sračuna

$$K_1 \approx [2 C_c + (D+B/2)C_q] / (2+D+B/2)$$

Naravno, prednje važi uz ograničenja zadata ulaznim podacima za problem analiziran računskim programom, pa su predložene dopune i skraćena rešenja primenljiva onoliko koliko je analizirani temelj ($D=3,50$ m, $\gamma_1=20$ kN/m³) tipičan.

5. Z A K LJ U Č A K

Polazeći od činjenica da jedan materijal nije sam po sebi krut ili deformabilan nego može da bude u krutom ili deformabilnom stanju zavisno od stanja napona i deformacija u njegovim tačkama (napr. Gastev, 1966), masa tla ispod i pored temelja može da bude praktično kruta ili manje i više deformabilna i stišljiva zavisno od veličine i površine opterećenja i drugih uticaja (stepen zasićenja i uslovi dreniranja, brzina opterećenja, sastav i sklop terena i drugo).

Na osnovu ovoga i iznetih podataka da se stanje tla menja pri promeni uslova opterećenja tako da tzv. relativna stišljivost raste sa širinom temelja, može se prihvatiti da se sa povećanjem relativne stišljivosti mase tla menja i vid loma i to od opšteg loma preko lokalnog do loma probijanjem, s obzirom da su ova tri vida za sada evidentirana. Sa ovakvom promenom vida loma zbog povećanja relativne stišljivosti, pri porastu dimenzija stope priraštaj nosivosti je sve manji. Pošto je rešenje dato jednačinom (2) izvedeno za kruto-plastičan materijal, odnosno samo za slučaj opšteg loma, a za sada jedino indeks krutosti (I_R) kvantitativno iskazuje relativnu stišljivost kao stanje tla, u takvom pristupu (bez uvođenja realnijeg modela tla) preostaje prihvatanje jednačine (13) ovde nazvanog rešenja Brinch Hansen-Vesić, kao merodavnog i, reklo bi se, obaveznog.

U geomehantičkoj praksi javlja se primedba, često opravdana, da proračun nosivosti tla za dimenzionisanje temelja ne zasluži podjednaku pažnju kao određivanje dozvoljenog opterećenja na osnovu dozvoljene veličine sleganja. Međutim, kako dimenzionisanje samo na osnovu sledanja nije merodavno, proračun opterećenja loma (nosivosti) trêba vršiti i to u skladu sa mogućnostima koja nude savremena rešenja. Takodje, tvrdnju da su oštećenja i kolapsi objekata najčešće nastali zbog štetnih sleganja smatramo da bi trebalo poveriti odgovorom na pitanje: nisu li velika sleganja u stvari posledica lokalnog loma ili loma probijanjem usled nedozvoljeno velike relativne stišljivosti tla?

Tako se i ovde dolazi do zaključka da rešenja treba tražiti u kreiranju novih modela tla i korišćenju savremenih proračunskih metoda (npr. konačnih elemenata) kojima bi se premostio klasičan jaz izmedju problema stabilnosti i problema deformacije tla.

Instalirani računski program rešenja Brinch Hansen - Vesić bitno skraćuje vreme i popravljja preciznost proračuna a rezultati se dobijaju u vidu tabela i dijagrama za sve širine i oblike stope temelja koji može biti proizvoljno opterećen. Veličine i domeni uticaja pojedinih parametara na ukupnu nosivost (q_{fc}) su značajni i dati su u prethodnom poglavlju.

Pošto Vesić (1973,1975) daje tabele-dijagrame samo za faktor stišljivosti $C_q = C_r$ i to za dva granična oblika stope ($L/B=1$ i $L/B>5$), za primenu njegovog rešenja u praksi je korisno uraditi tabele-dijagrame svih faktora stišljivosti za najčešće oblike stopa.

Zbog većeg broja ovakvih tabela, autor članka upućuje na primenu predloženog skraćenog postupka za odredjivanje nosivosti q_{fc} za stopu proizvoljnog oblika, pomoću faktora stišljivosti za stopu oblika $L/B=1$ i novouvedenog koeficijenta oblika K_L .

Pomenute tabele - dijagrami i brojni primer, uradjen prema rešenju Briach Hansen-Vesić i skraćenim postupkom, dati su u drugom radu autora u ovom Zborniku.

6. BIBLIOGRAFIJA

- BIAREZ, J. (1962), *Contribution à l'étude des propriétés mécaniques des sols et des matériaux pulverulents*, These de Doctorat de Sciences, Faculté de Sciences de Grenoble.
- BRINCH HANSEN, J. (1961), A general formula for bearing capacity, Bull.No.11, Danish Geot.Inst., Copenhagen, pp.38-46.
- BRINCH HANSEN, J. (1970), A revised formula for bearing capacity, Bull. No.28, Danish Geot.Inst, Copenhagen, pp.5-11.
- DEMBICKI, E. (1982), Tlak, otpor i nosivost tla, Gradjevinski institut, Zagreb, str. 136-137.
- GASTEVIĆ, V.A. (1966), Kratki kurs otpornosti materijala, prevod sa ruskog, Gradjevinska knjiga, Beograd.
- ... Pravilnik o tehničkim normativima za projektovanje i izvođenje radova kod temeljenja gradjevinskih objekata (1974), Sl.list SFRJ, br.34-642/1974.
- PRANDTL, L. (1920), Über die Härte plastischer Körper, Nachrichten Kgl. Gesellschaft Wiss., Göttingen, Math. Phys.Klasse, Berlin, s. 74-85.
- SAMARDAKOVIĆ, M. (1981), Nosivost nekoherentnog sloja na koherentnom tlu male čvrstoće, Zbornik radova Gradjevinskog fakulteta, broj 2, Niš, str.111-123.
- STOJADINOVIĆ, R. (1975), Mehanika tla, IV deo, Gradjevinski fakultet, Beograd, str. 8-11, 141-142.
- SZÉCHY, K. and VARGA, L. (1978), Foundation engineering, Akadémiai Kiadó, Budapest, pp. 471-473.
- TERZAGHI, K. (1943), Teorijska mehanika tla, prevod sa engleskog, Naučna knjiga, Beograd, 1972.
- VESIĆ, A. (1969), Effects of scale and compressibility on bearing capacity of surface foundations, Proceedings, 7-th. Int.Conf.on Soil Mech. and Found Eng., Mexico City, 1969, Vol.III, pp.270-272.

- VESIĆ, A. (1973), Analysis of ultimate loads of shallow foundations, *Proceedings ASCE, Journal Soil Mech. Found. Div.*, 99, SMI, pp.45-73.
- VESIĆ, A. (1975), Bearing capacity of shallow foundations, Chap.3 in *Foundation Engineering Handbook* (editors Winterkorn, H.F. and Fang, H.-Y.), Van Nostrand Reinhold Comp., New York, pp.121-147.

A B S T R A C T

*The relative compressibility of soil and scale effects
on bearing capacity of wide shallow foundations*

Observations of failure loads of small footings and theoretical analysis suggest that the relative compressibility of soils increases with footing size and the average shear strength decreases. Because of this fact, the increase of bearing capacity decreases and it tends to a limit value.

Opposite, the conventional compute-solutions produce bearing capacity of shallow footings which increases with foundation size. In the paper one proposed the use of Brinch Hansen-Vesić solution with compressibility factors for reduction the ultimate load of wide footings before all.

This solution is with a compute-program analysed and influences of foundation shape and scale effects for non-cohesive, miscellaneous and cohesive soil are described.