

Primljen / Received: 24.9.2025.

Ispravljen / Corrected: 23.5.2026.

Prihvaćen / Accepted: 22.6.2026.

Dostupno online / Available online: 10.8.2026.

Eksperimentalno istraživanje ekscentrično opterećenog trakastog temelja u blizini postojećeg temelja u pijesku

Autori:



Prof.dr.sc. **Abdelmadjid Abdi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Alžir
Fakultet znanosti i tehnologije
Odjel za građevinarstvo
abdelmadjid.abdi@univ-tebessa.dz
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **Rafik Boufarh**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Alžir
Fakultet znanosti i tehnologije
Odjel za građevinarstvo
Laboratorij za primijenjeno građevinarstvo (LGCA)
rafik.boufarh@univ-tebessa.dz



Prof.dr.sc. **Hsaine Chabbi**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Badji Mokhtar Annaba, Alžir
Tehnološki fakultet
Odjel za građevinarstvo
Laboratorij za tlo i hidrauliku
hsain.chabbi@univ-annaba.dz

Prethodno priopćenje

Abdelmadjid Abdi, Rafik Boufarh, Hsaine Chabbi

Eksperimentalno istraživanje ekscentrično opterećenog trakastog temelja u blizini postojećeg temelja u pijesku

U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja utjecaja postojećeg temelja na ponašanje novoizgrađenog trakastog temelja podvrgnutog ekscentričnom opterećenju u pijesku. Modelska ispitivanja provedena su u laboratorijskom spremniku, koristeći suhi jednoliki pijesak pripremljen metodom pluvijacije. Novi temelj ispitan je pri centričnom i ekscentričnom opterećenju za različite omjere ekscentričnosti (e/B) i razmake između temelja izražene omjerom (x/B) u odnosu na postojeći temelj. Analizirani su odnos opterećenja i slijeganja, nosivost te utjecaj smjera ekscentričnosti. Rezultati pokazuju da se nosivost smanjuje s porastom ekscentričnosti i razmaka između temelja, a međudjelovanje tla i konstrukcije postaje zanemarivo pri $x/B \geq 3$ kada se temelj ponaša neovisno o susjednom temelju. Nosivost je dosljedno bila veća kada je ekscentričnost bila usmjerena prema postojećem temelju. Uveden je faktor međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$), čija je najveća vrijednost iznosila 1,40 pri $x/B = 0,5$ za male vrijednosti omjera e/B . Utvrđena su dva karakteristična mehanizma sloma, što pruža vrijedne spoznaje za projektiranje gusto raspoređenih trakastih temelja pod ekscentričnim opterećenjem.

Ključne riječi:

trakasti temelj, ekscentričnost, postojeći temelj, eksperimentalno istraživanje, razmak, međudjelovanje

Research Paper

Abdelmadjid Abdi, Rafik Boufarh, Hsaine Chabbi

Experimental investigation of eccentric strip footing near existing foundation in sand

This paper reports on an experimental study of the effect of an existing foundation on the behaviour of a newly constructed strip footing subjected to eccentric loading in sand. Model tests were conducted in a laboratory tank using dry uniform sand prepared by pluviation. The new footing was tested under centric and eccentric loadings at different eccentricity ratios (e/B) and spacing ratios (x/B) relative to the existing footing. The load–settlement response, ultimate bearing capacity, and influence of the eccentricity direction were evaluated. The results indicate that the bearing capacity decreases with increasing eccentricity and spacing, whereas the soil–structure interaction becomes negligible at $x/B \geq 3$, wherein the footing behaves independently. The bearing capacity was consistently higher when the eccentricity was directed towards the existing footing. An eccentric interaction factor ($E\zeta$) was introduced, with a maximum value of 1.40 at $x/B = 0.5$ for small e/B . Two failure modes were identified, providing valuable insight into the design of closely spaced strip footings under eccentric loading.

Key words:

strip footing, eccentric, existing, experimental, spacing, interference

1. Uvod

Brza urbanizacija velikih gradskih područja diljem svijeta povećala je potrebu za učinkovitim korištenjem raspoloživog prostora te nametnula izgradnju novih građevina u neposrednoj blizini postojećih objekata [1, 2]. U gusto naseljenim urbanim sredinama, gdje je raspoloživo građevinsko zemljište ograničeno, geotehničari se često susreću sa situacijama u kojima se temelji planirane građevine moraju projektirati unutar zone utjecaja postojećih temelja. Takvo prostorno preklapanje stvara složena međudjelovanja tla i konstrukcije koja mogu značajno utjecati na nosivost, slijeganje i mehanizam sloma novoizgrađenog temelja te predstavljaju složen problem koji se ne može pouzdano riješiti primjenom konvencionalnih metoda proračuna [2–4].

Klasična teorija nosivosti tla, koju je razvio Terzaghi [5], proširio Meyerhof [6], a dodatno generalizirao De Beer [7], temelji se na trima idealizirajućim pretpostavkama: izoliranosti temelja, simetričnoj raspodjeli naprezanja oko osi opterećenja te homogenom poluprostoru. U okviru te teorije ekscentrično opterećenje uzima se u obzir primjenom koncepta efektivne širine, pri čemu ekscentričnost "e" smanjuje nazivnu širinu temelja "B" na efektivnu širinu $B' = B - 2e$, a nosivost se određuje za tako reduciranu širinu uz pretpostavku centrično djelujućeg opterećenja [6]. Kontrolirana laboratorijska istraživanja Prakasha i Sarana [8], Sadoglua i sur. [9] te Dasa i Maheshwarija [10] potvrdila su da se nosivost izoliranog trakastog temelja monotono smanjuje s porastom omjera ekscentričnosti (e/B), što je posljedica postupnog smanjenja efektivne kontaktne površine i povećanja momenta koji se prenosi na tlo. Iako su ova rješenja dobro utemeljena i uključena u međunarodne norme za projektiranje, ona u osnovi pretpostavljaju simetrično i neporemećeno polje naprezanja, što nije ispunjeno u slučaju susjednog opterećenog temelja.

Međudjelovanje blisko raspoređenih trakastih temelja istražuje se još od rada Stuarda [11], koji je prvi pokazao da dva istodobno opterećena temelja na zbijenom pijesku mogu ostvariti veću nosivost od ekvivalentnog izoliranog temelja ako je njihov međusobni razmak manji od određene kritične vrijednosti. Ovaj povoljni učinak međudjelovanja uobičajeno se opisuje faktorom međudjelovanja ζ , definiranim kao omjer nosivosti temelja u prisutnosti susjednog temelja i nosivosti ekvivalentnog izoliranog temelja pri centričnom opterećenju, pri čemu vrijednosti $\zeta > 1$ označavaju povoljno, a $\zeta < 1$ nepovoljno međudjelovanje. Fizikalni mehanizam koji uzrokuje povećanje nosivosti temelji se na međusobnom ograničavanju preklapajućih pasivnih Rankineovih zona ispod susjednih temelja, čime se smanjuju bočna pomicanja tla, produbljuje ploha sloma i povećava mobilizirani kut trenja u zbijenim pijescima sklonima dilataciji. [12, 13]. Kumar i Bhoi [14] eksperimentalno su potvrdili navedeni mehanizam te pokazali da se vršna nosivost ostvaruje pri kritičnom omjeru razmaka, nakon čega se faktor međudjelovanja postupno približava vrijednosti jedan. Mabrouki i sur. [15] numerički su reproducirali isto ponašanje metodom konačnih elemenata te utvrdili da se najveće povećanje

nosivosti kod temelja s hrapavom osnovicom postiže pri omjeru razmaka (x/B) između 0,1 i 0,5. Gupta i Sitharam [16] izvijestili su o najvećoj vrijednosti faktora međudjelovanja od približno $\zeta \approx 1,25$ za dva kvadratna temelja u zbijenom pijesku, a Ghosh i Kumar [17] pokazali su da se povoljno međudjelovanje javlja i u različitim slojevitim nekoherentnim tlima.

S druge strane, u literaturi su zabilježeni i slučajevi nepovoljnog međudjelovanja. Ghazavi i Dehkordi [18] pokazali su da do smanjenja nosivosti dolazi kada razmak između temelja padne ispod druge kritične vrijednosti, manje od one pri kojoj se postiže vršna nosivost, pri čemu odziv prelazi iz povećanja nosivosti pri srednjim razmacima u njezino smanjenje pri vrlo malim razmacima. Ekbote i Nainegali [19] ovo ponašanje pripisuju preranom spajanju ploha sloma unutar tla između temelja, čime se onemogućuje razvoj Prandtlova mehanizma sloma i dolazi do sloma duž kinematički nepovoljnije putanje. Naizgled proturječni rezultati o povoljnom i nepovoljnom međudjelovanju mogu se objasniti činjenicom da ono ovisi o međusobnom djelovanju relativne zbijenosti tla, razmaka između temelja, kuta unutarnjeg trenja tla i razine opterećenja postojećeg temelja [2, 11, 15]. U zbijenim pijescima sklonima dilataciji očvršćivanje uslijed deformiranja i volumno širenje pasivne zone pogoduju povećanju nosivosti, a u rahlim pijescima volumni kolaps i rano spajanje posmičnih zona uzrokuju njezino smanjenje. Kouzer i Kumar [20] pokazali su da se pri razini opterećenja postojećeg temelja većoj od približno 50 % graničnog opterećenja ($0,5q_u$) nepovoljni učinci mogu pojaviti čak i pri kutovima unutarnjeg trenja koji bi inače pogodovali povoljnom međudjelovanju.

Posebno značajna konfiguracija u praksi jest problem novog temelja u blizini postojećeg temelja, koji nastaje kada se novi temelj gradi uz postojeći temelj koji je već opterećen poznatim radnim opterećenjem. Ovakva situacija inherentno je asimetrična jer postojeće polje naprezanja koje stvara prethodno opterećeni temelj bitno mijenja stanje tla prije izgradnje novog temelja, pa se međudjelovanje ne može modelirati kao simetričan problem istodobno opterećenih temelja. Kouzer i Kumar [20] numerički su istražili ovu konfiguraciju za trakaste temelje jednake širine u srednje zbijenom pijesku te utvrdili izrazito nemonoton odziv nosivosti pri većim kutovima unutarnjeg trenja, osjetljiv na razinu opterećenja postojećeg temelja. Nainegali i sur. [21] metodom konačnih elemenata analizirali su međudjelovanje planiranog i postojećeg temelja na nelinearno elastičnom nekoherentnom tlu. Rezultati su pokazali da međudjelovanje značajno utječe i na nosivost i na slijeganje, pri čemu intenzitet utjecaja ovisi o razmaku između temelja i gustoći tla. Utvrđen je optimalni razmak pri kojem je učinak međudjelovanja najveći, a odziv sustava pokazao se asimetričnim kada je postojeći temelj prethodno opterećen. Nadalje, pokazano je da su zbijena tla osjetljivija s obzirom na nosivost, a rahla tla pokazuju veće promjene slijeganja, čime je naglašena zajednička važnost stanja tla i redoslijeda opterećivanja. Schmüdderich i sur. [22] primijenili su graničnu analizu metodom konačnih elemenata kako bi istražili zajednički utjecaj omjera širina temelja, razmaka, kuta unutarnjeg trenja i razine opterećenja postojećeg temelja

te su pokazali da se najveća nosivost novog temelja postiže pri omjeru razmaka koji ovisi i o kutu unutarnjeg trenja i o razini opterećenja postojećeg temelja. Ova istraživanja potvrđuju da problem novog temelja u blizini postojećeg temelja predstavlja zasebnu klasu međudjelovanja tla i konstrukcije koja zahtijeva posebnu eksperimentalnu i analitičku obradu.

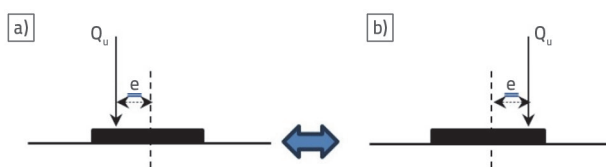
Unatoč brojnim numeričkim istraživanjima i dalje postoji značajan eksperimentalni nedostatak jer nijedno prethodno istraživanje nije sustavno ispitalo zajednički utjecaj ekscentričnog opterećenja i prisutnosti prethodno opterećenog postojećeg temelja na nosivost i mehanizam sloma novog trakastog temelja. Ovaj nedostatak ima izravne praktične posljedice jer je ekscentrično opterećenje uobičajeno u temeljenju građevina, nastaje uslijed djelovanja vjetrova i potresa, nejednakih reakcija stupova, opterećenja od mosnih dizalica i izvedbenih odstupanja te se često javlja kod temelja smještenih uz postojeće građevine. Kada se ekscentričnost nadoveže na već asimetrično polje naprezanja koje stvara susjedni opterećeni temelj, mehanizam prijenosa opterećenja i kinematika sloma ne mogu se pouzdano predvidjeti jednostavnom kombinacijom koncepta efektivne širine i faktora međudjelovanja ζ . Smjer ekscentričnosti u odnosu na postojeći temelj uvodi dodatnu geometrijsku asimetriju: ekscentričnost usmjerena prema susjednom temelju povećava koncentraciju naprezanja u ograničenom klinu tla između temelja, a ekscentričnost usmjerena od susjednog temelja pomiče plohu sloma na suprotnu stranu, što dovodi do kvalitativno različitih promjena nosivosti i mehanizma sloma. Važeće norme za projektiranje, uključujući Eurokod 7 [23] i pripadajuće smjernice [24], ne razmatraju ovaj kombinirani slučaj, zbog čega projektanti nemaju pouzdanu osnovu za dimenzioniranje te postoji mogućnost nesigurnih projektnih rješenja. Stoga su eksperimentalni podaci nužni kako bi se ovaj problem kvantitativno opisao i osigurala validirana baza podataka za buduća numerička i analitička istraživanja.

Cilj ovog istraživanja bio je eksperimentalno ispitati ponašanje trakastog temelja izvedenog u blizini prethodno opterećenog postojećeg temelja pri ekscentričnom opterećenju u suhom pijesku. Za razliku od dosadašnjih istraživanja, koja su se pretežno bavila međudjelovanjem izoliranih temelja pri centričnom ili ekscentričnom opterećenju, zajednički utjecaj ekscentričnosti opterećenja i međudjelovanja temelja do sada nije bio eksperimentalno istražen. Glavni doprinos ovoga rada stoga je pružanje sveobuhvatnog eksperimentalnog skupa podataka koji obuhvaća povezani utjecaj omjera razmaka, veličine i smjera ekscentričnosti te razine opterećenja postojećeg temelja na nosivost, odnos opterećenja i slijeganja te mehanizme sloma. Nadalje, u radu se sustavno analizira utjecaj razmaka između temelja, veličine i smjera ekscentričnosti na nosivost, ponašanje pri slijeganju i mehanizam sloma gusto raspoređenih trakastih temelja te se uvodi faktor međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$) kao jedinstveni bezdimenzijski parametar za kvantificiranje zajedničkog utjecaja geometrijskog međudjelovanja i ekscentričnog opterećenja.

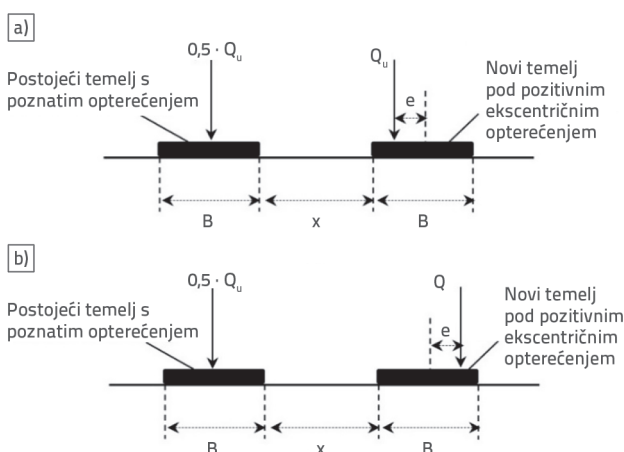
2. Opis problema

Ponašanje izoliranog trakastog temelja pri ekscentričnom opterećenju bilo je predmet brojnih istraživanja [6, 8, 25, 26]. Opterećenje pri slomu i raspodjela naprezanja ispod trakastog temelja simetrični su u odnosu na os temelja, neovisno o tome je li ekscentričnost opterećenja usmjerena ulijevo ili udesno (slika 1.). Međutim, ta se simetrija gubi kada se temelj nalazi u blizini postojećeg temelja jer međudjelovanje između dvaju temelja mijenja mehanizam prijenosa opterećenja kroz tlo (slika 2.). U ovom istraživanju razmatrana su dva karakteristična slučaja koja proizlaze iz gubitka navedene simetrije, pri čemu je ekscentričnost opterećenja usmjerena prema postojećem temelju odnosno od postojećeg temelja.

U nastavku rada ekscentričnost se smatra pozitivnom kada je usmjerena prema postojećem temelju odnosno negativnom kada je usmjerena od postojećeg temelja (slike 2.a i 2.b).



Slika 1. Izolirani temelj izložen ekscentričnom opterećenju: a) opterećenje pomaknuto ulijevo od osi temelja; b) opterećenje pomaknuto udesno

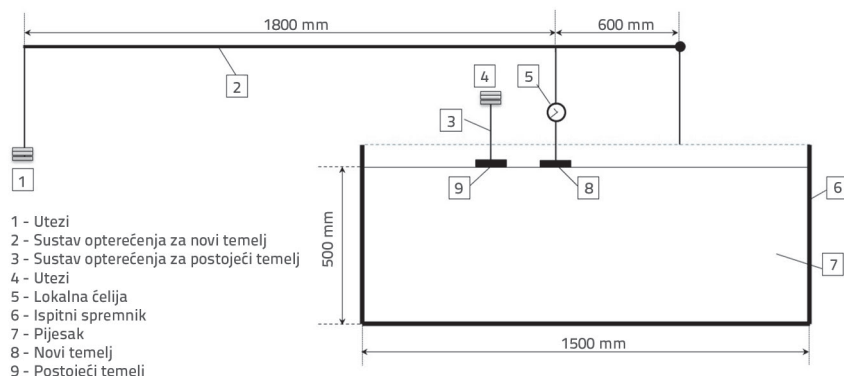


Slika 2. Novi temelj izložen ekscentričnom opterećenju uz postojeći temelj: a) pozitivna ekscentričnost (prema postojećem temelju); b) negativna ekscentričnost (od postojećeg temelja)

3. Eksperimentalno modeliranje

3.1. Oprema za ispitivanje

Modelska ispitivanja provedena su u krutom čeličnom spremniku unutarnjih dimenzija $1,50 \times 0,50$ m (u tlocrtu) i dubine 0,60 m. Jedna bočna stranica spremnika izrađena je od pleksiglasa debljine 10 mm kako bi se omogućila kontrola ugradnje i zbijanja sloja tla te promatranje mehanizma sloma temelja. Bočne plohe



Slika 3. Shematski prikaz modelskog ispitnog spremnika i opreme za nanošenje opterećenja

modelskih temelja zaglađene su radi smanjenja trenja između temelja i unutarnjih stijenki spremnika te ublažavanja rubnih učinaka.



Slika 4. Slijed opterećenja primijenjenog na dva temelja: a) primjena opterećenja na postojeći temelj; b) opterećenje novog temelja 1 h nakon opterećenja postojećeg temelja

Modelski temelji izrađeni su od krutog čelika, širine 100 mm i duljine 498 mm. U svim ispitivanjima oba su temelja postavljena izravno na pripremljenu površinu tla. Na donju plohu obaju temelja pričvršćen je brusni papir kako bi se simulirali uvjeti hrapavog kontakta između temelja i tla te spriječilo proklizavanje. Sustav za opterećivanje sastojao se od dviju zasebnih cjelina. Prva je bila namijenjena izravnom opterećivanju postojećeg temelja, a druga se sastojala od krute čelične grede duljine

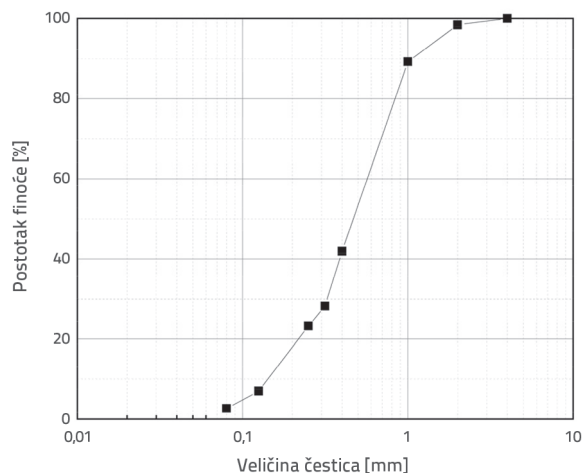
2,4 m kojom se novi trakasti temelj opterećivao u inkrementima od 10 kg (slike 3. i 4.). Primijenjeno opterećenje mjereno je na mjestu djelovanja pomoću mjerne čelije nosivosti 15 kN. Slijeganje novog temelja mjerilo se mehaničkim mjernim satom mjernog područja 100 mm, postavljenim u točki djelovanja opterećenja.

3.2. Tlo korišteno u modelskim ispitivanjima

U modelskim ispitivanjima korišten je srednjezrnati pijesak prikupljen na području Tébesse u sjeveroistočnom Alžiru. Prije ispitivanja pijesak je osušen u laboratorijskoj sušionici te prosijan radi uklanjanja krupnijih čestica i nečistoća. Na temelju standardne analize granulometrijskog sastava (slika 5.), prema Jedinstvenom sustavu klasifikacije tala (USCS) [27], klasificiran je kao SW, odnosno dobro građuirani pijesak.

Pijesak je pokazivao zanemarivu plastičnost, tako da je njegovo mehaničko ponašanje bilo gotovo u potpunosti određeno trenjem između čestica. Odabran je zbog svoje ujednačenosti i jednostavne pripreme, što ga čini pogodnim za kontrolirana laboratorijska ispitivanja.

Pijesak je ugrađivan u ispitni spremnik metodom pluvijacije s konstantne visine te zbijan u uzastopnim slojevima debljine 5 cm sve dok nije postignuta ciljna visina nasipa od 50 cm, čime je osigurana jednolika gustoća u cijelom tlu. Jedinična težina pijeska, određena u skladu s normom ASTM [27], iznosila je približno $16,36 \text{ kN/m}^3$, što je karakteristično za kvarcne pijeske. Kut unutarnjeg trenja koji odgovara toj volumnoj težini određen je ispitivanjem izravnog smicanja te je iznosio 37° . Osnovna svojstva korištenog pijeska sažeto su prikazana u tablici 1.



Slika 5. Krivulja raspodjele veličine zrna pijeska korištenog u modelskim ispitivanjima

Tablica 1. Parametri tla

Parametri	Vrijednost
Koeficijent ujednačenosti, C_u	3,73
Koeficijent zakrivljenosti, C_c	1,42
Specifična težina	2,72
Jedinična težina, γ [kN/m ³] pri $D_r = 60\%$	16,36
Maksimalna suha jedinična težina [kN/m ³]	19,35
Minimalna suha jedinična težina [kN/m ³]	13,96
D ₁₀ [mm]	0,15
D ₃₀ [mm]	0,34
D ₆₀ [mm]	0,56
Efektivna kohezija, c' [kPa]	0,0
Efektivni kut trenja, ϕ' [°]	37,00

3.3. Utjecaj mjerila i primjenjivost rezultata modelskih ispitivanja

Ovo istraživanje temelji se na malom fizičkom modelu provedenom pri gravitacijskom ubrzanju 1g u suhom pijesku, stoga je potrebno uzeti u obzir utjecaj mjerila te ograničenja pri ekstrapolaciji dobivenih rezultata na stvarne uvjete. U uvjetima gravitacijskog ubrzanja 1g početno efektivno vertikalno naprezanje na razini temeljne plohe vrlo je malo ($\sigma'_v \approx \gamma D \approx 0$ kPa za plitke temelje izvedene na površini terena), zbog čega za odziv tla u uvjetovan niskim bočnim naprezanjima. U takvim uvjetima kut unutarnjeg trenja ovisi o razini naprezanja te može biti veći od onoga koji se mobilizira pri stvarnim naprezanjima u terenu, što može dovesti do precjenjivanja nosivosti.

Tablica 2. Program ispitivanja i parametri

Test N°	x/B							e/B			
1	Izolirani temelj							0			
2-3-4-5-6-7-8	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	0			
9-10-11-12	0.5							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
13-14-15-16	1							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
17-18-19-20	1.5							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
21-22-23-24	2							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
25-26-27-28	3							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
29-30-31-32	4							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
33-34-35-36	5							-0.2	-0.15	-0.1	-0.05
37-38-39-40	0.5							0.05	0.1	0.15	0.2
41-42-43-44	1							0.05	0.1	0.15	0.2
45-46-47-48	15							0.05	0.1	0.15	0.2
49-50-51-52	2							0.05	0.1	0.15	0.2
53-54-55-56	3							0.05	0.1	0.15	0.2
57-58-59-60	4							0.05	0.1	0.15	0.2
61-62-63-64	5							0.05	0.1	0.15	0.2

Osim toga, dubina zone utjecaja naprezanja razmjerna je širini temelja ($B = 100$ mm) te se pri većim omjerima razmaka između temelja ($x/B \geq 3$) može približiti stijenama ispitnog spremnika širine 500 mm. Međutim, odabirom odgovarajućih dimenzija spremnika i primjenom zaglađenih bočnih stijenki nastojalo se svesti rubne učinke na najmanju moguću mjeru.

Unatoč navedenim ograničenjima, primjena bezdimenzijskih parametara (x/B , e/B i E_c) omogućuje poludimenzionalni okvir, čime se poboljšava interpretacija rezultata i njihova djelomična prenosivost na stvarne uvjete, pod pretpostavkom usporedivih vrijednosti kuta unutarnjeg trenja tla.

Slična ograničenja prepoznata su i u prethodnim eksperimentalnim istraživanjima međudjelovanja temelja u pijesku [3, 14, 16], koja su također provedena u uvjetima gravitacijskog ubrzanja 1g te su ukazala na usporediva ograničenja povezana s utjecajem mjerila. Time se potvrđuje da je ovo istraživanje u skladu s ustaljenim eksperimentalnim pristupom u ovom području te da su njegov opseg i metodološka ograničenja usporedivi s dosadašnjim istraživanjima.

4. Postav i program ispitivanja

Eksperimentalni program osmišljen je radi istraživanja ponašanja novog temelja podvrgnutog ekscentričnom opterećenju u blizini postojećeg temelja. U tu je svrhu provedena serija modelskih ispitivanja u malom mjerilu u krutom čeličnom spremniku, u kontroliranim laboratorijskim uvjetima.

Kako bi se procijenio utjecaj ekscentričnosti opterećenja i međudjelovanja susjednih temelja, pažljivo su praćeni slijeganja i mehanizmi sloma. Postupak ispitivanja obuhvaćao je pripremu homogenog sloja pijeska, postavljanje krutih modelskih temelja te postupno nanošenje opterećenja primjenom posebno konstruiranog sustava za opterećivanje.

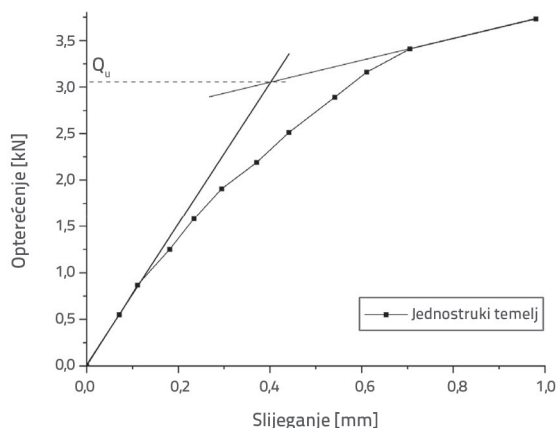
Postojeći temelj opterećen je vertikalnim opterećenjem jednakim $m \times Pu$, pri čemu Pu označava nosivost izoliranog temelja jednake geometrije i u istim uvjetima tla, a m je faktor razine opterećenja čija se vrijednost kreće između 0 i 1. U prethodnim istraživanjima najčešće su primjenjivane vrijednosti $m = 0,33$ i $m = 0,67$, koje odgovaraju radnim opterećenjima uz približne faktore sigurnosti od 3,0 odnosno 1,5 [20–22]. U ovom je istraživanju odabrana vrijednost $m = 0,5$ kako bi se omogućila izravna usporedba s eksperimentalnim rezultatima Schmüddericha i Lavasana [22], pri čemu ta vrijednost odgovara srednjem stupnju opterećenja.

Međusobni razmak temelja (x) i ekscentričnost opterećenja (e) izraženi su u bezdimenzijskom obliku radi lakše usporedbe rezultata za temelje različitih dimenzija. To je postignuto dijeljenjem obje veličine širinom temelja (B), čime su dobiveni omjeri x/B i e/B . Primjena ovih normiranih parametara omogućuje općenitiju interpretaciju rezultata i njihovu primjenu na različite konfiguracije temelja. Program provedenih ispitivanja prikazan je u tablici 2.

5. Rezultati i rasprava

Rezultati modalnih ispitivanja interpretirani su na temelju krivulja opterećenje-slijeganje. Analiza je usmjerena na utvrđivanje utjecaja postojećeg opterećenog temelja na odnos opterećenja i slijeganja te na nosivost novog temelja, uzimajući u obzir utjecaj međusobnog razmaka temelja (x) i ekscentričnosti opterećenja u odnosu na položaj postojećeg temelja.

U ovom istraživanju nosivost je određena metodom sjecišta tangenti, koja je potvrđena brojnim eksperimentalnim istraživanjima te se osobito uspješno primjenjuje za zrnata tla. Ova metoda posebno je prikladna za tla kod kojih odnos opterećenja i slijeganja postupno prelazi iz elastičnog u plastično područje bez jasno izraženog vršnog opterećenja [28]. Zbog svoje pouzdanosti i jednostavne primjene metoda sjecišta tangenti široko je prihvaćena u geotehničkoj praksi te predstavlja standardni postupak preporučan u brojnim međunarodnim normama i smjernicama za projektiranje temelja [29].



Slika 6. Metoda sjecišta tangenti za određivanje graničnog opterećenja (Q_u)

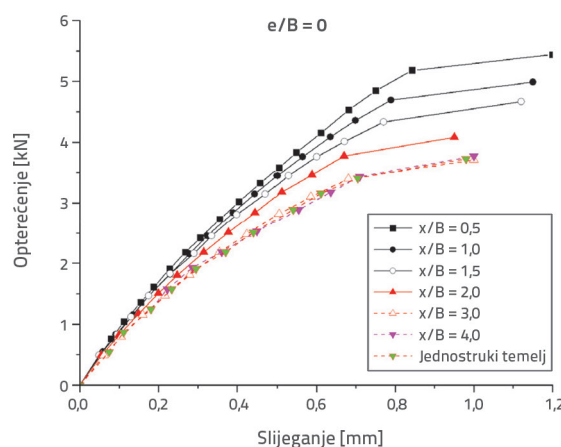
Metoda se temelji na konstruiranju dviju tangenti na krivulju opterećenje-slijeganje. Prva tangenta povlači se kroz početni linearni dio krivulje i predstavlja elastični odziv sustava tlo-temelj. Druga tangenta određuje se na dijelu krivulje s najvećim nagibom u nelinearnom području, u kojem plastične deformacije postaju dominantne [28]. Sjecište tih dviju tangenti određuje nosivost temelja te predstavlja objektivan i dosljedan kriterij za njezino određivanje (slika 6.).

5.1. Krivulje opterećenje-slijeganje

Odziv temelja opisan krivuljama opterećenje-slijeganje dobiven je analizom ukupno 64 modelska ispitivanja kako bi se procijenilo ponašanje temelja pri postupnom povećavanju opterećenja. Na slici 7. prikazani su rezultati za novi temelj opterećen centrično pri različitim normiranim omjerima svijetlog razmaka između temelja (x/B) u odnosu na postojeći temelj.

Rezultati pokazuju da se nosivost povećava sa smanjenjem omjera razmaka x/B , što upućuje na to da blizina postojećeg temelja povećava nosivost novog temelja zbog povoljnog učinka međudjelovanja između temelja. Najveća vrijednost graničnog opterećenja od 5,44 kN ostvarena je pri $x/B = 0,5$. Krivulje opterećenje-slijeganje za $x/B = 3$ i $x/B = 4$ gotovo se podudaraju s krivuljom izoliranog trakastog temelja, što pokazuje da je pri tim razmacima utjecaj postojećeg temelja na ponašanje novog temelja zanemariv. Drugim riječima, pri navedenim razmacima novi se temelj ponaša kao izolirani temelj. Dobiveni rezultati vrlo su dobro u skladu s rezultatima Schmüddericha i Lavasana [22] te Boufarha i Abbechea [3], koji su također pokazali da se granično opterećenje smanjuje s povećanjem međusobnog razmaka između temelja.

U svim modelskim ispitivanjima za svaki promatrani omjer x/B novi je temelj ispitivan pri različitim vrijednostima ekscentričnosti opterećenja ($e/B = 0, 0,05, 0,10, 0,15$ i $0,20$), kako je prikazano na slici 8.



Slika 7. Krivulje opterećenja i slijeganja novog temelja pod centričnim opterećenjem pri različitim omjerima svijetlog razmaka (x/B)

U ovom istraživanju postojeći je temelj opterećen prije novog temelja, što je uzrokovalo prethodno zbijanje okolnog tla.

Pri malim vrijednostima omjera x/B zona naprezanja ispod novog temelja u značajnoj se mjeri preklapala s prethodno opterećenom zonom koju je stvorio postojeći temelj. Takvo preklapanje povećava bočna naprezanja i krutost tla, zbog čega su pri jednakom primijenjenom opterećenju ostvarena manja slijezanja, što je vidljivo na slici 7. Povećanjem omjera razmaka postupno se smanjuje preklapanje zona naprezanja, čime slabi povoljan učinak prethodno zbijenog tla. Posljedično, ponašanje novog temelja postupno se približava ponašanju izoliranog temelja, uz istodobno povećanje slijezanja [3, 21].

Sa slike 8. vidljivo je da se nosivost novog temelja smanjuje s povećanjem ekscentričnosti opterećenja, što je u skladu s općeprihvaćenim načelima temeljenja građevina [6, 25]. Nadalje, nosivost opada s povećanjem omjera razmaka između temelja, i pri centričnom, i pri ekscentričnom opterećenju. Konkretno, najveće granično opterećenje od 5,44 kN ostvareno je pri $x/B = 0,5$, zatim se smanjilo na 4,69 kN pri $x/B = 1$, a najmanja je vrijednost od 3,71 kN zabilježena pri $x/B = 3$.

Za slučajeve ekscentričnog opterećenja rezultati pokazuju da je nosivost pri pozitivnoj ekscentričnosti veća nego pri negativnoj ekscentričnosti. Na slici 8.a, za $x/B = 0,5$, prikazano je da je granično opterećenje pri ekscentričnom opterećenju iznosilo 5,15 kN za $e/B = +0,05$ u usporedbi s 5,02 kN za $e/B = -0,05$; 4,82 kN za $e/B = +0,10$ u odnosu na 4,35 kN za $e/B = -0,10$; 4,08 kN za $e/B = +0,15$ u odnosu na 3,86 kN za $e/B = -0,15$; te 3,26 kN za $e/B = +0,20$ u usporedbi s 2,88 kN za $e/B = -0,20$.

Rezultati prikazani na slici 8.b, za $x/B = 1$, potvrđuju da se nosivost nastavlja smanjivati s povećanjem razmaka između temelja. Utjecaj smjera ekscentričnosti i dalje je jasno izražen, pri čemu su veće vrijednosti graničnog opterećenja zabilježene kada je

ekscentričnost usmjerena prema postojećem temelju za $e/B = 0,05, 0,10$ i $0,15$. Međutim, krivulje opterećenje-slijezanje za $e/B = +0,20$ i $e/B = -0,20$ gotovo se potpuno podudaraju, što upućuje na to da je pri $x/B > 1$ i $e/B \geq 0,20$ utjecaj postojećeg temelja praktično nestao.

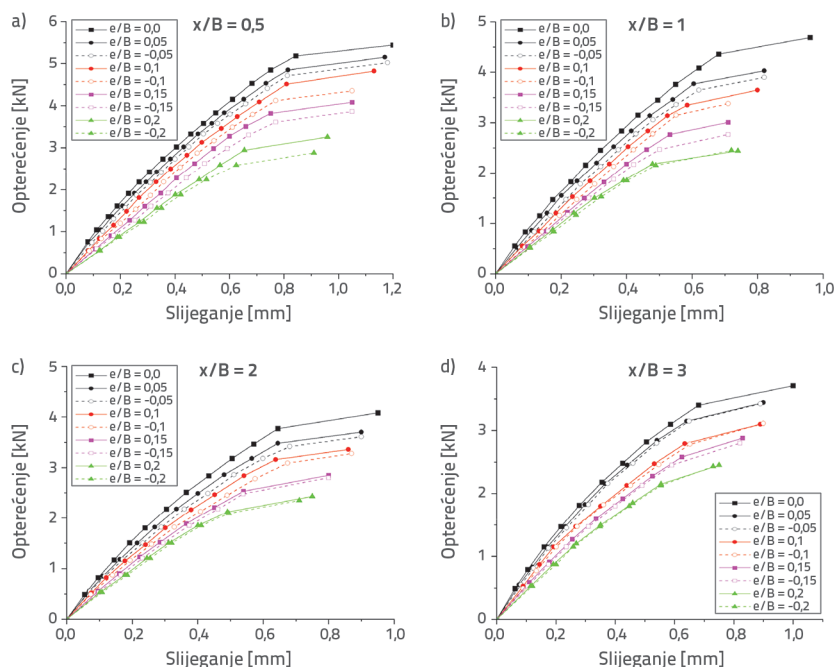
Na slici 8.c, koja odgovara omjeru $x/B = 2$, može se uočiti da se nosivost i dalje smanjuje s povećanjem veličine ekscentričnosti. Razlika između pozitivne i negativne ekscentričnosti još je uvijek uočljiva za $e/B = 0,05$ i $0,10$, ali postaje znatno manje izražena pri većim vrijednostima ekscentričnosti. Krivulje koje odgovaraju vrijednostima $e/B = \pm 0,15$ i $e/B = \pm 0,20$ gotovo se podudaraju, što ukazuje na to da je pri ovom razmaku utjecaj postojećeg temelja znatno oslabljen.

Na kraju, rezultati prikazani na slici 8.d, za $x/B = 3$, pokazuju da su krivulje opterećenje-slijezanje za pozitivnu i negativnu ekscentričnost praktički identične za sve promatrane vrijednosti omjera e/B . Time se potvrđuje da pri većim međusobnim razmacima utjecaj postojećeg temelja na novi temelj postaje zanemariv te se novi temelj ponaša kao izolirani temelj.

5.2. Utjecaj omjera razmaka x/B

Parametar x/B , definiran kao svijetli razmak između dvaju temelja normiran širinom temelja, određuje intenzitet međudjelovanja između temelja. Za kvantificiranje tog međudjelovanja uveden je faktor međudjelovanja (ζ), definiran izrazom (1):

$$\zeta = \frac{Q_u \left(\begin{array}{c} \text{nosivost novog centrično opterećenog temelja} \\ \text{smještenog uz postojeći centrično opterećeni temelj} \end{array} \right)}{Q_u \left(\text{nosivost pojedinačnog izoliranog centrično opterećenog temelja} \right)} \quad (1)$$

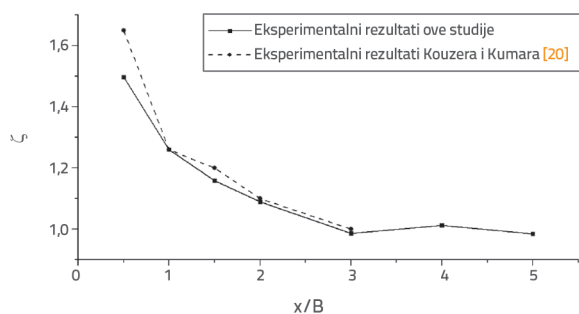


Slika 8. Krivulje opterećenja i slijezanja novog temelja pod ekscentričnim opterećenjem pri različitim omjerima svijetlog razmaka (x/B): a) $x/B = 0,5$; b) $x/B = 1$; c) $x/B = 2$; d) $x/B = 3$

Taj faktor predstavlja omjer nosivosti novog centrično opterećenog temelja smještenog uz postojeći centrično opterećeni temelj i nosivosti pojedinačnog izoliranog centrično opterećenog temelja [20, 21]:

Na slici 9. prikazana je ovisnost faktora međudjelovanja (ζ) o omjeru svijetlog razmaka između temelja (x/B) za slučaj centričnog opterećenja, zajedno s rezultatima koje su objavili Kouzer i Kumar [20]. Rezultati pokazuju da se faktor međudjelovanja smanjuje s povećanjem omjera x/B . Pri vrijednostima $x/B > 3$ faktor ζ postaje gotovo konstantan i približava se vrijednosti 1, što znači da je nosivost novog temelja smještenog uz postojeći temelj jednaka nosivosti izoliranog temelja. Drugim riječima, pri $x/B > 3$ utjecaj postojećeg temelja na ponašanje novog temelja praktički nestaje.

Usporedba eksperimentalnih rezultata dobivenih u ovom istraživanju s rezultatima Kouzera i Kumara [20] pokazuje dobro podudaranje. Ipak, vrijednosti koje su dobili Kouzer i Kumar [20] nešto su veće od vrijednosti izmjerenih u ovom istraživanju pri manjim omjerima razmaka između temelja (primjerice pri $x/B = 0,5$). Ova se razlika može objasniti činjenicom da numeričke analize u pravilu daju nešto veće vrijednosti od eksperimentalnih ispitivanja zbog idealiziranih rubnih uvjeta i izostanka eksperimentalnih nesigurnosti.



Slika 9. Varijacija faktora međudjelovanja (ζ) u odnosu na x/B pod centričnim opterećenjem

U ovom istraživanju uveden je i novi faktor međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$), definiran izrazom (2). Ovaj faktor predstavlja omjer nosivosti novog ekscentrično opterećenog temelja smještenog uz postojeći centrično opterećeni temelj i nosivosti pojedinačnog izoliranog centrično opterećenog temelja:

$$E\zeta = \frac{Q_u \left(\text{nosivost novog ekscentrično opterećenog temelja smještenog uz postojeći centrično opt. temelj} \right)}{Q_u \left(\text{nosivost pojedinačnog izoliranog centrično opterećenog temelja} \right)} \quad (2)$$

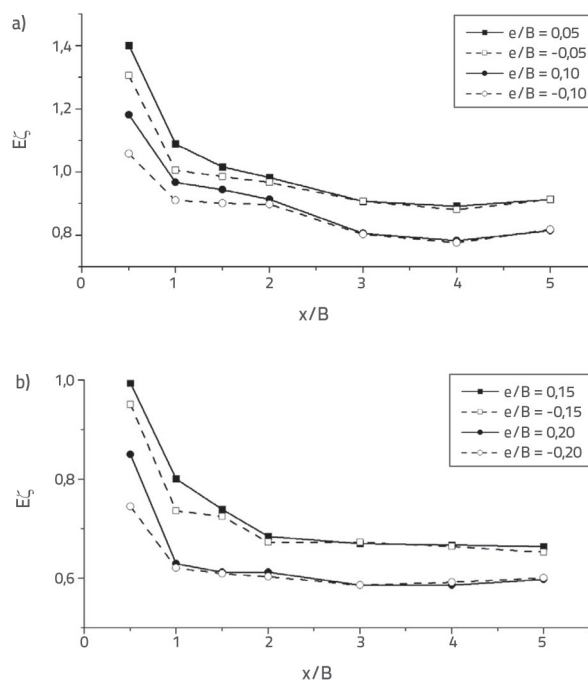
Na slici 10. prikazano je da se vrijednost faktora međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$) smanjuje s povećanjem omjera razmaka x/B , neovisno o tome je li ekscentričnost pozitivna ili negativna.

Za male omjere ekscentričnosti ($e/B \leq 0,10$) vrijednost $E\zeta$ veća je od 1 (slika 10.a), pri čemu su najveće vrijednosti ostvarene pri $x/B = 0,5$ i iznose 1,40 za $e/B = +0,05$, 1,30 za $e/B = -0,05$, 1,18 za $e/B = +0,10$ te 1,05 za $e/B = -0,10$. To pokazuje da je pri malim međusobnim razmacima između temelja nosivost ekscentrično opterećenog trakastog temelja smještenog uz postojeći temelj jednake širine veća od nosivosti izoliranog temelja opterećenog centrično, osobito za male vrijednosti omjera ekscentričnosti ($e/B \leq 0,10$).

Rezultati također pokazuju da je nosivost veća kada je ekscentričnost usmjerena prema postojećem temelju, nego kada je usmjerena od njega. Nadalje, pri $x/B > 3$ vrijednosti $E\zeta$ za pozitivnu i negativnu ekscentričnost postaju gotovo jednake, što potvrđuje da pri većim međusobnim razmacima ponašanje novog temelja više nije pod utjecajem postojećeg temelja, osobito za male vrijednosti omjera ekscentričnosti ($e/B \leq 0,10$).

Na slici 10.b može se uočiti da za omjere ekscentričnosti između 0,15 i 0,20 faktor $E\zeta$ pokazuje isti trend smanjenja s povećanjem omjera razmaka x/B , neovisno o smjeru ekscentričnosti. Međutim, u tom području vrijedi $E\zeta < 1$, a vrijednosti za pozitivnu i negativnu ekscentričnost postaju gotovo jednake već pri $x/B \geq 1,5$. To upućuje na zaključak da pri tim razmacima utjecaj postojećeg temelja postaje zanemariv te se ekscentrično opterećeni temelj za $0,15 \leq e/B \leq 0,20$ u osnovi ponaša kao izolirani temelj.

Utjecaj smjera ekscentričnosti (prema postojećem temelju ili od njega) i dalje je uočljiv pri $x/B \leq 1,5$ za $e/B = 0,15$ odnosno pri $x/B \leq 1$ za $e/B = 0,20$.

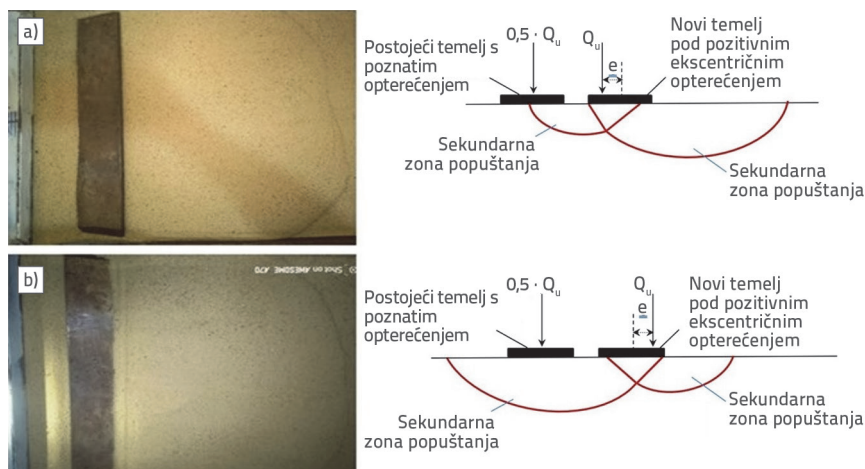


Slika 10. Varijacija faktora međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$) s x/B

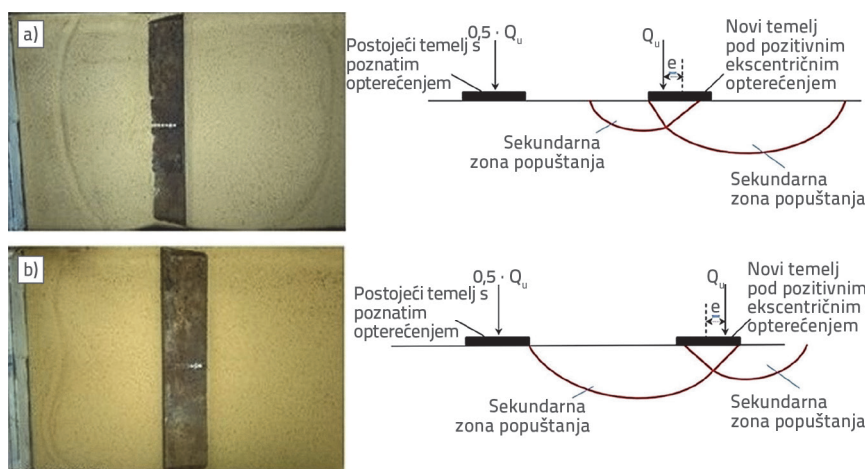
5.3. Mehanizam sloma

U slučaju novog temelja izvedenog u blizini postojećeg temelja, pri malim međusobnim razmacima primarna ploha sloma prostirala se ispod postojećeg temelja, pri čemu je posmično međudjelovanje između temelja bilo izrazito izraženo. Međutim, povećanjem međusobnog razmaka, primjerice pri $x/B = 3$, mehanizam sloma postupno poprima gotovo simetričan oblik, karakterističan za izolirani temelj [22]. Pri ekscentričnom opterećenju plohe sloma postaju asimetrične zbog naginjanja temelja prema strani na kojoj djeluje ekscentričnost. Posljedično se razvija primarna ploha sloma na strani djelovanja ekscentričnosti te sekundarna ploha sloma na suprotnoj strani [5, 6, 8, 9, 26].

U ovom istraživanju, pri malom omjeru razmaka ($x/B = 0,5$; slika 11), kada je ekscentrično opterećenje bilo usmjereno prema postojećem temelju (slika 11(a), $e/B = +0,10$), primarna zona



Slika 11. Mehanizam sloma tla ispod trakastih temelja pod ekscentričnim opterećenjem za relativni razmak $x/B = 0,5$: a) Mehanizam tipa A+ ($e/B = 0,1$); b) Mehanizam tipa A- ($e/B = -0,1$)



Slika 12. Mehanizam sloma tla ispod trakastih temelja pod ekscentričnim opterećenjem za relativni razmak $x/B = 3$: a) Mehanizam tipa B+ ($e/B = +0,1$); b) Mehanizam tipa B- ($e/B = -0,1$)

sloma prostirala se ispod postojećeg temelja, a sekundarna zona sloma razvila se na suprotnoj strani (mehanizam tipa A+). Nasuprot tome, za $e/B = -0,10$ (slika 11.b) primarna zona sloma pomaknula se na stranu udaljeniju od postojećeg temelja, a sekundarna zona razvila se ispod postojećeg temelja (mehanizam tipa A-).

Dobiveni rezultati jasno pokazuju da je smjer ekscentričnosti opterećenja ključan čimbenik koji određuje način prijenosa opterećenja i razvoj mehanizma sloma. Pozitivna ekscentričnost (tip A+) pojačava međudjelovanje s postojećim temeljem te rezultira većim vrijednostima faktora međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$), a negativna ekscentričnost (tip A-) smanjuje intenzitet tog međudjelovanja.

Povećanjem međusobnog razmaka temelja primarna zona sloma više se nije prostirala ispod postojećeg temelja. Umjesto toga bila je gotovo u potpunosti ograničena na područje ispod novoizvedenog temelja te se pružala samo do neposredne

blizine postojećeg temelja, pri čemu je preklapanje zona sloma bilo zanemarivo. Takva promjena mehanizma sloma upućuje na to da je pri tom razmaku izravno međudjelovanje između temelja gotovo u potpunosti nestalo.

Sekundarna zona sloma, koja je pri manjim razmacima ($x/B = 0,5$) bila jasno izražena, pri $x/B = 3$ postala je znatno manja i više se nije razvijala ispod postojećeg temelja. Time se potvrđuje značajno smanjenje učinka međudjelovanja između temelja, odnosno da su prijenos opterećenja i preraspodjela naprezanja između temelja postali vrlo mali.

Posljedično se faktor međudjelovanja približio vrijednosti 1, što pokazuje da su nosivost i odnos opterećenja i slijezanja novog temelja gotovo jednaki onima koje bi imao temelj izveden bez utjecaja susjednog postojećeg temelja.

U takvim uvjetima mehanizam prijenosa opterećenja gotovo je identičan mehanizmu izoliranog temelja, pri čemu je utjecaj prethodno izvedenog temelja zanemariv.

Može se zaključiti da povećanje omjera razmaka s $x/B = 0,5$ na $x/B = 3$ dovodi do jasne promjene mehanizma sloma. Pri malim razmacima prevladava mehanizam tipa A+ kada je ekscentričnost usmjerena prema postojećem temelju odnosno mehanizam tipa A- kada je usmjerena od postojećeg temelja. Povećanjem razmaka do $x/B = 3$ ovi mehanizmi postupno prelaze u tip B+ i tip B-, pri čemu učinak međudjelovanja postaje

zanemariv, a novi se temelj ponaša gotovo jednako kao izolirani temelj.

6. Zaključak

U radu je eksperimentalno istraženo ponašanje ekscentrično opterećenih trakastih temelja izvedenih u blizini postojećih temelja na temelju 64 modelska ispitivanja, pri čemu je analiziran utjecaj omjera razmaka između temelja (x/B) i omjera ekscentričnosti opterećenja (e/B). Na temelju dobivenih rezultata mogu se izvesti sljedeći zaključci:

- Nosivost novog temelja značajno je pod utjecajem susjednog temelja pri malim omjerima razmaka ($x/B \leq 1$), osobito kada je ekscentričnost opterećenja usmjerena prema postojećem temelju. U tim uvjetima međudjelovanje između temelja povećava nosivost, pri čemu je najveće granično opterećenje od 5,44 kN ostvareno pri $x/B = 0,5$.

- Utjecaj međudjelovanja postupno se smanjuje s povećanjem međusobnog razmaka između temelja te postaje zanemariv pri $x/B \geq 3$, kada se novi temelj ponaša kao izolirani temelj.
- Faktor međudjelovanja uslijed ekscentričnosti ($E\zeta$) smanjuje se s povećanjem omjera razmaka te se pri većim razmacima približava vrijednosti 1. Za male omjere ekscentričnosti ($e/B \leq 0,10$) i mali međusobni razmak ($x/B = 0,5$) vrijednost $E\zeta$ veća je od 1, pri čemu doseže 1,40 za pozitivnu odnosno 1,30 za negativnu ekscentričnost.
- Utvrđena su dva karakteristična mehanizma sloma: mehanizam u kojem prevladava međudjelovanje između temelja pri malim razmacima ($x/B \leq 1$) te neovisni mehanizam sloma pri većim razmacima ($x/B \geq 3$).
- Smjer ekscentričnosti opterećenja značajno utječe na ponašanje temelja. Kada je ekscentričnost usmjerena prema postojećem temelju, ostvaruje se veća nosivost nego u slučaju kada je usmjerena od postojećeg temelja.
- Dobiveni rezultati jasno ukazuju na potrebu uzimanja u obzir međudjelovanja između temelja i ekscentričnosti opterećenja pri projektiranju blisko raspoređenih plitkih temelja.
- Iako ovo istraživanje pruža vrijedne eksperimentalne spoznaje o međudjelovanju između susjednih temelja, potrebno je istaknuti određena ograničenja. Istraživanje se temelji isključivo na eksperimentalnim ispitivanjima, bez dodatne potvrde rezultata numeričkim analizama. Premda rezultati pouzdano opisuju ukupni odnos opterećenja i slijeganja, numeričko modeliranje omogućilo bi detaljniju analizu mehanizama raspodjele naprezanja i deformacija u tlu.
- Buduća istraživanja trebala bi stoga uključiti primjenu naprednih numeričkih metoda, poput metode konačnih elemenata ili metode konačnih razlika (primjerice u programu PLAXIS 3D), radi reprodukcije i potvrde eksperimentalnih rezultata. Takve analize omogućile bi detaljniju vizualizaciju raspodjele naprezanja i deformacija u tlu te pružile dublji uvid u mehanizme međudjelovanja između temelja. Nadalje, preporučuje se provedba proširenih parametarskih analiza kojima bi se ispitao utjecaj dubine temeljenja, šireg raspona gustoće tla te različitih razina opterećenja postojećeg temelja. Navedeni čimbenici predstavljaju važne smjernice za daljnji razvoj i proširenje ovog istraživanja.

LITERATURA

- [1] Chandrawanshi, S., Garg, V.: Effect of adjacent structures on footing settlement for different multi-building arrangements, *Open Engineering*, 14 (2024) 1, <https://doi.org/10.1515/eng-2024-0092>.
- [2] Das, B.M., Larbi-Cherif, S.: Bearing Capacity of Two Closely-Spaced Shallow Foundations on Sand, *Soils and Foundations*, 23 (1983) 1, pp. 1–7, <https://doi.org/10.3208/sandf1972.23.1>.
- [3] Boufarh, R., Abbeche, K., Abdi, A.: Experimental Investigation of Interference Between Adjacent Footings on Layered Cohesionless Soil, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 56 (2019), pp. 128–135, <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09580-z>.
- [4] Folić, R., Bonić, Z.: Punching of column footings – comparison of experimental and calculation results, *GRAĐEVINAR*, 65 (2013) 10, pp. 887–899, <https://doi.org/10.14256/JCE.916.2013>.
- [5] Terzaghi, K.: *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1943, <https://doi.org/10.1002/9780470172766>.
- [6] Meyerhof, G.G.: Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, 1 (1963), pp. 16–26, <https://doi.org/10.1139/T63-003>.
- [7] De Beer, E.E.: Experimental Determination of the Shape Factors and the Bearing Capacity Factors of Sand, *Géotechnique*, 20 (1970) 4, pp. 387–411, <https://doi.org/10.1680/geot.1970.20.4.387>.
- [8] Prakash, S., Saran, S.: Bearing Capacity of Eccentrically Loaded Footings, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 97 (1971), pp. 95–117, <https://doi.org/10.1061/JSEFAQ.0001544>.
- [9] Sadoglu, E., Cure, E., Moroglu, B., Uzuner, B.A.: Ultimate Loads for Eccentrically Loaded Model Shallow Strip Footings on Geotextile-Reinforced Sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 27 (2009), pp. 176–182, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.11.002>.
- [10] Das, S., Maheshwari, B.K.: Bearing Capacity of Strip Footings on Slopes Under Eccentric and Inclined Loads, *Geotechnical and Geological Engineering*, 2025, <https://doi.org/10.1007/s10706-024-03053-3>.
- [11] Stuart, J.G.: Interference Between Foundations, with Special Reference to Surface Footings in Sand, *Géotechnique*, 12 (1962) 1, pp. 15–22, <https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.1.15>.
- [12] Trask, P.D.: Soil Mechanics in Engineering Practice by Karl Terzaghi and Ralph B. Peck, *The Journal of Geology*, 57 (1949), pp. 622–623, <https://doi.org/10.1086/625679>.
- [13] Nainegali, L., Ekbote, A. G.: Interference of Two Nearby Footings Resting on Clay Medium, *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Singapore, 2018, pp. 59–67, https://doi.org/10.1007/978-981-13-0368-5_7.
- [14] Kumar, J., Bhoi, M.K.: Interference of Two Closely Spaced Strip Footings on Sand Using Model Tests, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135 (2009) 4, pp. 595–604, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:4\(595\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:4(595)).
- [15] Mabrouki, A., Benmeddour, D., Frank, R., Mellas, M.: Numerical Study of the Bearing Capacity for Two Interfering Strip Footings on Sands, *Computers and Geotechnics*, 37 (2010), pp. 431–439, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.12.007>.
- [16] Gupta, A., Sitharam, T.G.: Experimental and Numerical Investigations on Interference of Closely Spaced Square Footings on Sand, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 14 (2018), pp. 142–150, <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1454386>.
- [17] Ghosh, P., Kumar, S.: Interference Effect of Two Nearby Strip Surface Footings on Cohesionless Layered Soil, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5 (2011), pp. 87–94, <https://doi.org/10.3328/IJGE.2011.05.01.87-94>.

- [18] Ghazavi, M., Fazeli Dehkordi, P.: Interference Influence on Behavior of Shallow Footings Constructed on Soils, Past Studies to Future Forecast: A State-of-the-Art Review, *Transportation Geotechnics*, 27 (2021), Article 100502, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100502>.
- [19] Ekbote, A.G., Nainegali, L.: Interference of Two Closely Spaced Strip Footings Embedded in Cohesionless Fibre-Reinforced Foundation Soil Bed, *Geo-Congress 2019, American Society of Civil Engineers, Reston*, 2019, pp. 454–464, <https://doi.org/10.1061/9780784482094.041>.
- [20] Kouzer, K.M., Kumar, J.: Ultimate Bearing Capacity of a Footing Considering the Interference of an Existing Footing on Sand, *Geotechnical and Geological Engineering*, 28 (2010), pp. 457–470, <https://doi.org/10.1007/s10706-010-9305-9>.
- [21] Nainegali, L., Basudhar, P.K., Ghosh, P.: Interference of Proposed Footing with an Existing Footing Resting on Non-Linearly Elastic Dense and Loose Cohesionless Soil Bed, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25 (2021), pp. 2574–2591, <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1638311>.
- [22] Schmüdderich, C., Lavasan, A.A., Tschuchnigg, F., Wichtmann, T.: Bearing Capacity of a Strip Footing Placed Next to an Existing Footing on Frictional Soil, *Soils and Foundations*, 60 (2020), pp. 229–238, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.03.002>.
- [23] British Standards Institution: Eurocode 7: Geotechnical Design – Geotechnical Structures, BSI, London, <https://doi.org/10.3403/30402003U>.
- [24] Frank, R., Bauduin, C., Driscoll, R., Kavvas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B.: *Designers' Guide to EN 1997-1 Eurocode 7: Geotechnical Design – General Rules*, Thomas Telford Publishing, London, 2005, <https://doi.org/10.1680/dgte7.31548>.
- [25] Pantelidis, L., Meddah, A.: The Effect of Loading Inclination and Eccentricity on the Bearing Capacity of Shallow Foundations: A Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 31 (2024), pp. 4189–4208, <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10113-7>.
- [26] Kaya, N., Örnek, M., Türedi, Y.: Ultimate Loads for Eccentrically Loaded Skirted Strip Footings on Sand, *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, ICE Publishing, 2015, pp. 3413–3418, <https://doi.org/10.1680/ecsmge.60678.vol6.535>.
- [27] ASTM International: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM D2487-17, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, <https://doi.org/10.1520/D2487-17>.
- [28] Trautmann, C.H., Kulhawy, F.H.: Uplift Load-Displacement Behavior of Spread Foundations, *Journal of Geotechnical Engineering*, 114 (1988) 2, pp. 168–184, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:2\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:2(168)).
- [29] Das, B.M.: *Uplift Capacity of Shallow Foundations*, u: *Shallow Foundations*, CRC Press, Boca Raton, 1999, pp. 465–498, <https://doi.org/10.1201/9781482271305-18>.