

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

Ivana Lukić Kristić

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, dipl. ing. građ., ivana.lukic@gf.sum.ba

Maja Prskalo

Sveučilište u Mostaru, Građevinski fakultet, prof. dr. sc., maja.prskalo@gf.sum.ba

Vlasta Szavits-Nossan

Umirovljena sa Sveučilišta u Zagrebu, Građevinski fakultet, prof. dr. sc., svlasta@grad.hr

Sažetak: Numerička i empirijska metoda za proračun nelinearnih krivulja opterećenje-slijeganje za plitke temelje na pijesku ispitane su i primijenjene u novoj metodologiji. Obje metode imaju prednosti i nedostatke. Nedostaci su prevladani metodologijom predloženom i provjerenom u ovom radu. Ovom metodologijom kombiniraju se prednosti svake metode. U tu svrhu predlaže se promjena empirijske metode kojom se uzima u obzir konačna početna krutost tla pri vrlo malim deformacijama. Računalni programi sa složenim nelinearnim odnosima naprezanje-deformacija, kao što je Hardening Soil Small u Plaxisu 2D, koji su svestrani u rješavanju složenih problema s temeljima, mogu obuhvatiti deformacije od vrlo malih do velikih. Kad je temeljno tlo slojevito, predlaže se takvu numeričku krivulju opterećenje-slijeganje podesiti prema prilagođenom empirijskom odnosu za svaki sloj pijeska zasebno. To zahtijeva statičke penetracijske pokuse, mjerenja brzine posmičnih valova i osnovne laboratorijske pokuse. Metodologija je opisana i primijenjena na dvije lokacije na kojima su provedena probna opterećenja na temeljima. Na jednoj lokaciji nalazio se gornji sloj gline, što je također uzeto u obzir. Rezultati primjene predložene metodologije su vrlo dobri.

Ključne riječi: plitki temelji, slijeganja, poluempirijska metoda, krutost tla, numeričko modeliranje, male deformacije

Numerical modeling of settlements for shallow foundations on layered soils

Abstract: A numerical and an empirical method for calculating nonlinear load-settlement curves for shallow foundations on sand are examined and used in a new methodology. Both methods have merits and drawbacks. The drawbacks are overcome by the methodology proposed and verified in the paper. This methodology combines the merits of each method. For this purpose, a modification of the empirical method is proposed that accounts for the finite initial soil stiffness at very small strains. Computer programs with sophisticated nonlinear stress-strain relationships, such as Hardening Soil Small in Plaxis 2D, which are versatile in solving complex foundation problems, can cover strains from very small to large. When the foundation soil is layered, it is proposed to fit such a numerical load-settlement curve against the modified empirical relationship for each sand layer separately. This requires cone penetration tests, measurements of the shear wave velocity, and basic laboratory tests. The methodology is described and applied at two locations where load tests on footings were carried out. At one location there was a top layer of clay, which was also taken into account. The results of the application of the proposed methodology are very good.

Key words: shallow foundations, settlements, semi-empirical method, soil stiffness, numerical modeling, small strains

1. UVOD

Krivulje opterećenje-slijeganje plitkih temelja, koje obuhvaćaju raspon od vrlo malih opterećenja do onih koja izazivaju lom tla, su nelinearne. Postojeće metode za proračun ovog nelinearnog odnosa, i numeričke i empirijske, se preispituju i o njima se raspravlja. U radu se kombinira jedna numerička (Benz 2007.) i jedna empirijska (Mayne i sur. 2012.) metoda kako bi se dvije krivulje opterećenje-slijeganje poklopile podešavanjem parametra predopterećenja u numeričkoj analizi za svaki sloj pijeska zasebno. Tada se može provesti složena numerička analiza interakcije tla i konstrukcije sa slojevitim temeljnim tlom uključujući slojeve gline. Kako bi se uključilo ponašanje zrnatog tla pri vrlo malim deformacijama, u ovom radu je prilagođena metoda Maynea i sur. (2012.). U geotehničkom inženjerstvu velika krutost tla pri vrlo malim deformacijama se dugo smatrala ključnom za dobivanje pouzdanih predviđanja deformacija tla (npr. Burland 1989.). U tu svrhu potrebno je poznavati modul smicanja tla pri vrlo malim deformacijama, koji se može lako odrediti iz mjerenja brzine posmičnih valova u temeljnom tlu. Jedini drugi parametar koji je potreban je otpor na šiljku iz statičkog penetracijskog pokusa (CPT).

Za numeričko modeliranje s konstitutivnim (naprezanje-deformacija) odnosom Hardening Soil Small (HSSmall), koji je razvio Benz (2007.), u ovom istraživanju korišten je komercijalni računalni program za konačne elemente Plaxis 2D (Brinkgreve i sur. 2011.). HSSmall model omogućava modeliranje odgovarajućeg smanjenja krutosti pri deformiranju tla od vrlo malih deformacija do velikih deformacija pri lomu. Potrebni parametar tla je referentni modul smicanja pri vrlo malim deformacijama ($\varepsilon < 10^{-6}$), koji je jednak maksimalnom modulu smicanja pri atmosferskom bočnom tlaku. Ostali parametri pijeska se mogu odrediti iz korelacija s relativnom gustoćom pijeska (Brinkgreve i sur. 2010.), a relativna gustoća se pak određuje iz korelacije s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa (Jamiolkowski i sur. 1985.). Parametri za glinu se mogu dobiti iz korelacija s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa (Mayne i Rix 1993.; Sanglerat 1972.).

U drugom koraku, parametar predopterećenja se podešava za svaki sloj pijeska prilagođavanjem numeričke krivulje opterećenje-slijeganje za model koji se sastoji samo od materijala u tom sloju prema modificiranoj krivulji Maynea i sur. (2012.). Koristi se temelj veličine slične onoj iz baze podataka koju su koristili Mayne i sur. (2012.), recimo, 2 m.

Predložena metodologija je provjerena na dvije lokacije s probnim opterećenjima temelja na slojevitim temeljnim tlima. Prva lokacija je bila Green Cove Springs, na Floridi (Anderson i sur. 2007.), a druga lokacija je bila Alvin (East), u Texasu (Tand i sur. 1994.). Na drugoj lokaciji bio je gornji sloj gline. U nedostatku mjerenja brzine posmičnih valova na obje lokacije, određena je krutost pijeska pri vrlo malim deformacijama. Primjena predložene metodologije je dala vrlo dobre rezultate kad se izmjerena slijeganja usporede s rezultatima numeričkih analiza za slojevita temeljna tla.

2. NUMERIČKE I EMPIRIJSKE METODE ZA PREDVIĐANJE KRIVULJA OPTEREĆENJE-SLIJEGANJE PLITKIH TEMELJA

1.1 Numeričke metode

Općenito se nelinearne krivulje opterećenje-slijeganje mogu predvidjeti u nekoliko koraka. Oni su sljedeći: dobivanje dovoljnog broja kvalitetnih neporemećenih uzoraka reprezentativnih za temeljno tlo, ispitivanje naprezanja i deformacija tih uzoraka u laboratoriju, tumačenje rezultata ispitivanja kako bi se dobili parametri za odgovarajući

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

konstitutivni model tla i korištenje tih parametara za izvršavanje računalnog programa za konačne elemente koji uključuje ovaj konstitutivni model. Ovaj postupak se može koristiti za rješavanje temeljnih problema nelinearnih rubnih vrijednosti za postupno povećavanje opterećenja temelja. Međutim, on se jako oslanja na reprezentativne neporemećene uzorke tla koje je teško dobiti i postaviti u laboratorijski instrument kad je temeljno tlo krupnozrnasti materijal koji se sastoji od čestica poput pijeska.

Alternativni pristup je dovesti parametre konstitutivnog modela u korelaciju s *in situ* pokusima. U tom pogledu, Byrne i sur. (1987.) su koristili hiperbolički konstitutivni model Kondnera (1963.) i Duncana i Changa (1970.). Byrne i sur. (1987.) su parametre ovog modela doveli u korelaciju s relativnom gustoćom pijeska i rezultatima terenskih penetracijskih pokusa [standardni penetracijski pokus (SPT) i CPT] dobivenim u ovom pijesku. Korelacije su se temeljile na ispitivanju laboratorijskih i terenskih mjerenja dostupnih u literaturi. Ispitani laboratorijski troosni pokusi su provedeni na poremećenim uzorcima pijeska pri različitim relativnim gustoćama. Zatim su istraživači pomoću konačnih elemenata proveli numeričke povratne analize terenskih promatranja slijeganja temelja na pijesku kako bi provjerili jesu li rezultati laboratorijskih pokusa reprezentativni za terenske uvjete. Zaključili su da su parametri krutosti dobiveni iz troosnih pokusa prikladni za predviđanje slijeganja prema hiperboličkom zakonu pri maloj relativnoj gustoći pijeska, dok je krutost pijeska znatno podcijenjena pri velikim relativnim gustoćama. Stoga se pokazalo da taj postupak nije prikladan za predviđanje slijeganja temelja pri većim relativnim gustoćama.

Dvadeset godina kasnije, Benz (2007.) je opisao sličan ali mnogo napredniji pristup. Razvio je elasto-plastični konstitutivni model očvršćavanja, nazvan HSSmall, koji uzima u obzir značajno smanjenje velike početne krutosti pijeska za oko 70% kada se deformira od vrlo malih deformacija (u rasponu od 0,0001%) do malih deformacija od oko 0,1 %. Ova velika krutost i njezino veliko smanjenje s deformiranjem postala je očita u laboratorijskim pokusima tek kad su razvijene odgovarajuće tehnike i mjerači deformacija kojima su objašnjena prethodna sustavna precjenjivanja deformacija na terenu na temelju standardnog laboratorijskog ispitivanja krutih i srednje krutih tala (Burland 1989.). HSSmall modelom također se može predstaviti i očvršćavanje tla uzrokovano predopterećenjem (opterećenjem i rasterećenjem), na taj način simulirajući prekonsolidirano tlo.

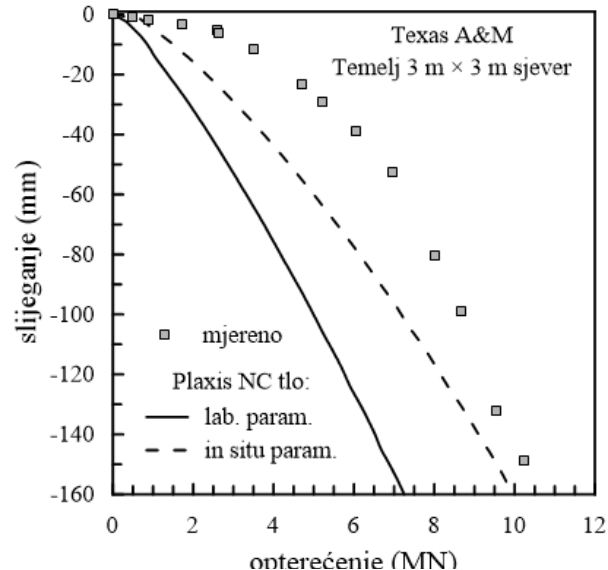
Kako bi potvrdio svoj konstitutivni model, koji je ugrađen u računalni program za konačne elemente Plaxis 2D, među ostalim konstrukcijama, Benz (2007.) je analizirao krivulju opterećenje-slijeganje jednog od pokusnih kvadratnih temelja na pijesku ispitanih na lokaciji sveučilišta Texas A&M (Briaud i Gibbens 1994.; 1997.). Pet probnih opterećenja je izvedeno na kvadratnim temeljima veličine u rasponu od 1 m do 3 m, ukopanim 0,76 m u 11 m debeo sloj srednje gustog, prilično ujednačenog prašnog sitnog kvarcnog pijeska ispod kojeg se nalazila kruta glina. Za svaki temelj probna opterećenja su provedena dok slijeganje tla nije doseglo 15 cm. Na pokusnoj lokaciji provedena su opsežna ispitivanja, uključujući mjerenja brzine posmičnih valova i otpornosti na prodiranje statičkim penetracijskim pokusom, kao i opsežna laboratorijska ispitivanja na uzorcima prikupljenim s lokacije, uključujući troosni pokus i pokus rezonantnim stupom (Briaud i Gibbens 1997.). Tijekom probnih opterećenja mjerena su slijeganja temelja.

Benz (2007.) je odredio brojne parametre tla za HSSmall model iz rezultata troosnog pokusa i pokusa rezonantnim stupom na uzorcima dovedenim na terensku gustoću pijeska. Referentni modul smicanja pri vrlo malim deformacijama je određen i pokusom rezonantnim stupom (laboratorijski parametri) i kao znatno veća vrijednost za uvjete *in situ* (*in situ* parametri). Koristeći program Plaxis 2D za modeliranje kvadratnog temelja sjever 3 m × 3 m kao ekvivalentnog kružnog temelja, Benz je izračunao krivulje opterećenje-slijeganje za obje vrijednosti modula smicanja pri vrlo malim deformacijama. Pretpostavio je da je pijesak na pokusnoj lokaciji bio normalno konsolidiran (NC), tj. da u svojoj geološkoj povijesti nikad nije bio podvrgnut ciklusu opterećenja i rasterećenja. Na slici 1 dana je usporedba obiju novoizračunatih krivulja s Benzovim parametrima i izmjerenih podataka opterećenje-

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

slijeganje. Mada je krivulja izračunata korištenjem *in situ* uvjeta bliža izmjerenim podacima, ona još uvijek znatno precjenjuje izmjerena slijeganja.



Slika 1. Izmjerena i izračunata slijeganja temelja sjever 3 m × 3 m s lokacije Texas A&M. Za izračunata slijeganja korištene su laboratorijske i *in situ* vrijednosti modula smicanja pri vrlo malim deformacijama. Pretpostavlja se da je tlo normalno konsolidirano (NC). Izmjerena slijeganja iz Briaud i Gibbens (1997.)

Kako bi postigao slaganje s izmjerenim podacima, Benz (2007.) je pretpostavio da je pijesak na lokaciji bio privremeno predopterećen, tj. opterećen a zatim rasterećen istim jednolikim površinskim tlakom, čime je pijesak postao predopterećen (OC). Predopterećivanje pijeska je očito bilo samo pretpostavka, pošto nije postojao način da se to neovisno dokaže. Benz je bio neodređen ne navodeći vrijednost predopterećenja. Zbog toga su u svrhu ovog istraživanja krivulje opterećenje-slijeganje ponovno izračunate programom Plaxis 2D koristeći Benzove parametre. Za novoizračunate krivulje korišteno je predopterećenje od 160 kPa kako bi se temeljno tlo učinilo prekonsolidiranim. Međutim, naglašava se da je vrijednost predopterećenja tla u preračunatim numeričkim analizama postignuta metodom pokušaja i pogreški dok se nije postiglo dobro slaganje između novoizračunatih i Benzovih krivulja opterećenje-slijeganje.

Krivulje opterećenje-slijeganje sada izračunate pomoću Plaxisa 2D, korištenjem istih parametara HSSmall modela kao što su Benzovi (modul smicanja *in situ* pri vrlo malim deformacijama) i predopterećenja od 160 kPa, su prikazane na slici 2 sljedećeg pododjeljka za svih pet pokusnih temelja na A&M-u.

U ovom pododjeljku se vidi kako primjeri Byrnea i sur. (1987.) i Benza (2007.) pokazuju da su predviđanja krivulja opterećenje-slijeganje temelja na pijesku na temelju laboratorijskih ispitivanja uzoraka pijeska nepouzdana.

2.1 Empirijske metode

Akbas i Kulhawy (2009a; 2009b) su predložili potpuno drukčiji pristup predviđanju krivulja opterećenje-slijeganje temelja na pijesku. Oni su koristili izmjerene krivulje opterećenje-slijeganje 167 prototipa temelja na 37 lokacija s homogenim pijeskom kao temeljnim tlom. Prototipi temelja su bili kvadratni ili pravokutni s omjerom širine i duljine blizu 1. Akbas i

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

Kulhawy (2009a) su izveli hiperboličku vrstu odnosa opterećenje-slijeganje za temelje na pijesku s jednim parametrom vezanim za nosivost temeljnog pijeska kojeg je dao Vesić (1975.). Nosivost je vezana za kut trenja pijeska, koji se pak mora odrediti iz odgovarajuće korelacije s rezultatima nekih *in situ* pokusa. Prednost ove metode je u izbjegavanju potrebe za laboratorijskim ispitivanjem uzoraka pijeska.

Idući linijom izbjegavanja potrebe za laboratorijskim ispitivanjem pijeska, Mayne i sur. (2012.) su razvili jednostavan izraz koji se odnosi na nelinearnu krivulju opterećenje-slijeganje kvadratnog temelja na pijesku i prosječni otpor na šiljku standardnog statičkog penetracijskog pokusa izvedenog na lokaciji temelja. Mayne i sur. (2012.) su analizirali probna opterećenja punih razmjera na 31 kvadratnom ili gotovo kvadratnom temelju sa širinama $0.5 \text{ m} \leq B \leq 6 \text{ m}$ smještenim na 13 lokacija kvarcnog-silicij-dioksidnog pijeska i za krivulje opterećenje-slijeganje izveli jednostavnu funkciju eksponencijalnog zakona s jednim parametrom. Oni su parametar ove funkcije doveli u izravnu korelaciju s prosječnim otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa na svim lokacijama temelja i dobili sljedeći odnos između prosječnog primijenjenog tlaka temelja p , slijeganja temelja s , veličine kvadratnog temelja B i prosječnog otpora na šiljku q_c :

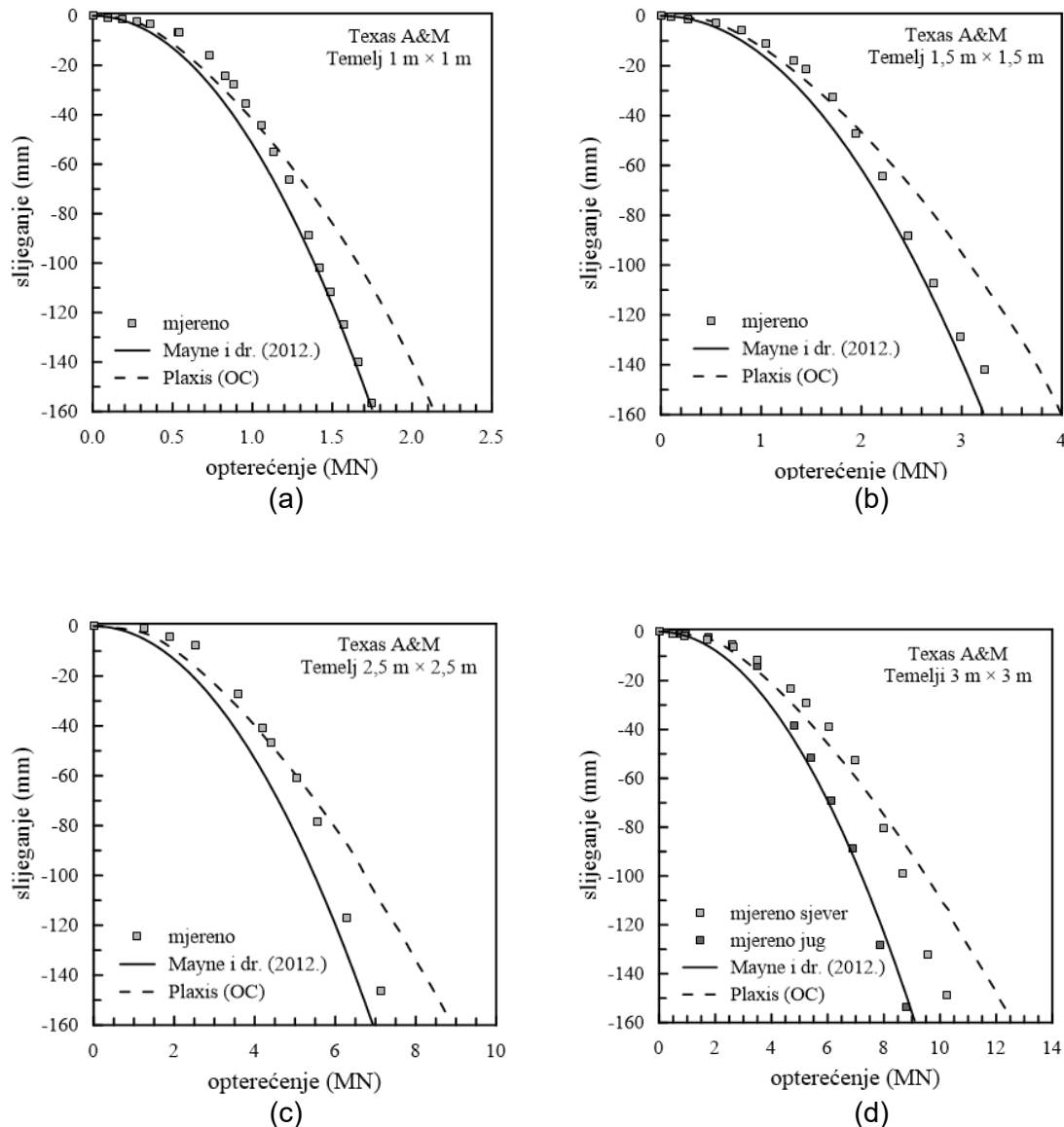
$$p = 0.585 q_c \sqrt{s/B} \quad (1)$$

s koeficijentom determinacije $r^2 = 0,933$. Preporučili su da se vrijednost q_c koja se koristi u jednadžbi (1) odredi kao prosječni otpor tla pri prodiranju šiljka ispod temelja i niz razmak $2B$. Na slici 2 prikazana je usporedba krivulja opterećenje-slijeganje izračunatih pomoću jednadžbe (1) s izmjerenim podacima za pet eksperimentalnih temelja pokusne lokacije A&M, koja ima prosječni otpor na šiljku $q_c = 7,5 \text{ MPa}$, kako su uzeli Mayne i sur. (2012.). Ova usporedba pokazuje razinu točnosti koja se može očekivati pri korištenju jednadžbe (1) u predviđanju krivulja opterećenje-slijeganje za temelje na pijesku, i ona je vrlo dobra. Na slici 2 također su prikazani i proračuni Plaxisa nakon što je temeljno tlo prethodno opterećeno sa 160 kPa (OC), s parametrima istim kao oni koje je Benz (2007.) koristio za temelj sjever $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (vrijednost *in situ* maksimalnog modula smicanja).

Unatoč očite prednosti korištenja izravne korelacije između krivulje opterećenje-slijeganje i rezultata uobičajenog terenskog pokusa u izbjegavanju laboratorijskih pokusa, ovaj pristup nije prikladan za slučajeve sa slojevitim tlima ili fleksibilnim proširenim temeljima koji zahtijevaju numeričko modeliranje interakcije tlo-konstrukcija. Nadalje, jednadžba (1) podrazumijeva beskonačnu krutost tla koja započinje pri nultom opterećenju. To je nedostatak ako se koristi u numeričkim povratnim analizama radi usklađivanja s analitičkom krivuljom, jer pijesak pokazuje ograničenu krutost pri vrlo malim deformacijama, skupa s velikim smanjenjima krutosti u rasponu malih deformacija, kao u slučaju HSSmall modela razmatranog u prethodnom pododjeljku. Kako bi se prevladao ovaj nedostatak, u sljedećem odjeljku predložena je modificirana funkcija opterećenje-slijeganje koja predstavlja proširenje Mayne i sur. (2012.).

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima



Slika 2. Izmjerena i proračunata slijeganja za sve temelje na Texas A&M-u; izmjerena slijeganja iz Briaud i Gibbens (1997.); izračunata iz jednadžbe (1) s prosječnim otporom na šiljku $q_c = 7,5$ MPa, i ponovo izračunata Plaxisom 2D s vrijednošću početne krutosti tla *in situ* i predopterećenjem od 160 kPa (prekonsolidirano)

3. MODIFICIRANA EMPIRIJSKA METODA

3.1 Razvoj funkcije opterećenje-slijeganje

Pri vrlo malim deformacijama, pijesak se ponaša kao elastični materijal. Stoga se ovdje predlaže proširenje jednadžbe (1) Maynea i sur. (2012.) kako bi se uzela u obzir velika krutost temeljnog tla pri vrlo malim deformacijama.

Elastično slijeganje s^e krutog kvadratnog temelja veličine B opterećenog ravnomjernim tlakom p , ukopanog do dubine D_f u homogeni elastični sloj debljine h ispod osnove temelja,

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

maksimalni Youngov modul E_0 stalan s dubinom i Poissonov koeficijent ν se mogu izračunati iz sljedećeg izraza kojeg su predložili Mayne i Poulos (1999.):

$$\frac{s^c}{B} = \frac{pI}{E_0} \quad (2)$$

gdje je:

$$I = \frac{\sqrt{\pi}}{2} I_G I_E (1 - \nu^2) \quad (3)$$

I_E i I_G su faktori korekcije za ukopavanje temelja, odnosno debljinu sloja, i dani su sa

$$I_E = 1 - \frac{1}{3.95 \left(\frac{B}{D_f} + 1.42 \right) \exp(1.22\nu - 0.4)} \quad (4)$$

$$I_G = \frac{1.42 \frac{h}{B}}{1 + 1.42 \frac{h}{B}} \quad (5)$$

S povećavanjem opterećenja počinju se razvijati plastične deformacije. Za dodatna slijeganja uslijed plastičnih deformacija, jednadžbi (2) dodaje se eksponencijalni zakon sličan zakonu jednadžbe (1):

$$\frac{s}{B} = \frac{pI}{E_0} + a \left(\frac{p}{p_L} \right)^b \quad (6)$$

gdje je p_L vrijednost tlaka p pri $s/B = 0,1$, tj., to je prosječni kontaktni tlak koji se spominje kao nosivost (npr. Briaud i Gibbens 1997.).

Parametar a se može odrediti uvođenjem $p = p_L$ u jednadžbu (6), što daje

$$\frac{s}{B} = \frac{pI}{E_0} + \left[0.1 - \frac{p_L I}{E_0} \right] \left(\frac{p}{p_L} \right)^b \quad (7)$$

Parametri b i p_L se određuju linearnom regresijskom analizom parova tlak-normalizirano slijeganje, izmjerenih tijekom svakog od 16 probnih opterećenja provedenih na četiri lokacije pijeska, kako je navedeno u literaturi. Zatim se parametar b određuje kao prosječna vrijednost za ovih 16 temelja, i postavlja se korelacija između p_L za sve temelje i otpora na šiljku statičkog penetracijskog pokusa na četiri lokacije, kao što je prikazano u sljedećem pododjeljku.

3.2 Baza podataka 16 probnih opterećenja na četiri lokacije i statistička analiza

Četiri lokacije probnih opterećenja odabrane su za određivanje parametara b i p_L (Lukić Kristić i dr. 2019.). Na ovim lokacijama ukupno je probno opterećeno 16 temelja. Svi temelji su bili izrađeni od armiranog betona. Ove četiri pokusne lokacije su uključene u analizu Maynea i sur. (2012.). Međutim, na ove četiri lokacije krutost obuhvaća raspon za 12 od 13 pijesaka koje su koristili Mayne i sur.

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

Iz regresijske analize svih izmjerenih podataka na četiri lokacije dobiveno je 16 parova vrijednosti p_L i b (Lukić Kristić i dr., 2019.). Prosječna vrijednost je $b = 2,14$. Ova vrijednost je vrlo bliska eksponentu koji su koristili Mayne i sur. (2012.), koji je bio $b = 2$. Na slici 3 prikazano je 16 parova vrijednosti p_L i odgovarajućih q_c za četiri pokusne lokacije. Linija najbolje podudarnosti na slici 3 daje $p_L = 0,18 q_c$, s koeficijentom determinacije $r^2 = 0,956$.

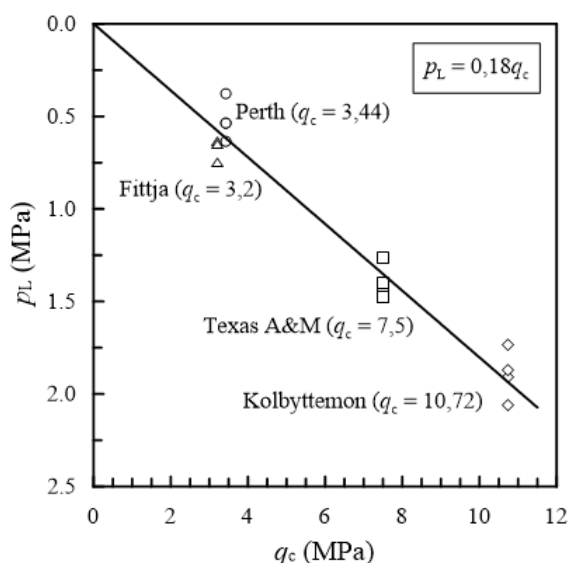
Konačni oblik jednadžbe za modificiranu empirijsku metodu je

$$\frac{s}{B} = \frac{pI}{E_0} + \left[0,1 - \frac{0,18 q_c I}{E_0} \right] \left(\frac{p}{0,18 q_c} \right)^{2,14} \quad (8)$$

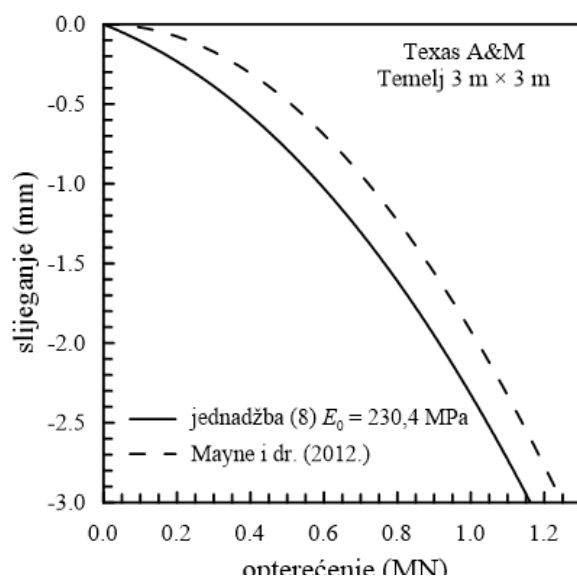
Korelacija između p_L i q_c je ista kao ona u Mayne i sur. (2012.). Prema tome, očekuje se da predložena krivulja opterećenje-slijeganje jednadžbe (8) da rezultate vrlo slične onima dobivenim jednadžbom (1). Ovo je provjereno za četiri ovdje korištene lokacije i pokazalo se da je ispravno. Međutim, razlike između ovih dviju metoda pojavljuju se u području vrlo malih i malih deformacija.

Na slici 4 prikazane su razlike između ovih dviju metoda u području normaliziranog slijeganja s/B do 0,001 za temelj $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ na Texas A&M-u, što odgovara malim deformacijama. Za ostala tri temelja na ovoj eksperimentalnoj lokaciji uočeni su vrlo slični oblici i udaljenosti između ovih dviju krivulja. Maksimalni Youngov modul E_0 određen je iz profila brzine posmičnih valova na eksperimentalnoj lokaciji iz $G_0 = \rho v_s^2$, gdje je G_0 maksimalni modul smicanja, ρ je gustoća tla, a v_s je prosječna brzina posmičnih valova. Zatim, $E_0 = 2G_0(1+\nu)$.

Na slici 4 postoji pravilan nagib tangente na krivulju pri nultom opterećenju izračunatu predloženom metodom. Ovaj nagib odgovara krutosti pijeska pri vrlo malim deformacijama, E_0 . S druge strane, tangenta na krivulju koju su izračunali Mayne i sur. (2012.) je horizontalna, što ukazuje na beskonačnu krutost tla pri vrlo malim deformacijama. Dodatak elastičnog odgovora temeljnog pijeska za vrlo mala opterećenja, u skladu s jednadžbom (8), je poželjan kada se krivulja koristi kao mjerilo u povratnim analizama koje je potrebno izvesti numeričkim modeliranjem koje obuhvaća ponašanje pijeska pri vrlo malim i malim deformacijama, kao što je opisano u sljedećem odjeljku.



Slika 3. p_L i q_c za svih 16 temelja (vrijednosti q_c uzete iz Mayne i sur. 2012.)



Slika 4. Slijeganje prema primijenjenom opterećenju temelja pri vrlo malim i malim deformacijama do $s/B = 0,001$

4. PREDLOŽENA METODOLOGIJA ZA IZRAČUNAVANJE KRIVULJA OPTEREĆENJE-SLIJEGANJE

Kao što je objašnjeno u prethodnim odjeljcima, za složene plitke temelje na slojevitom tlu ne može se pouzdano primijeniti nijedna prethodno objavljena metoda proračuna krivulje opterećenje-slijeganje. Metoda Maynea i sur. (2012.) funkcionira vrlo dobro za krute kvadratne temelje dimenzija u rasponu od 0,5 m do 6 m na relativno homogenom sloju pijeska. Jedini parametar potreban za ovu metodu je prosječni otpor temeljnog tla pri prodiranju šiljka statičkog penetracijskog pokusa. Ako se krivulja opterećenje-slijeganje mora predvidjeti za slične temelje ili slične uvjete tla, ni predložena modificirana krivulja opterećenje-slijeganje ni sofisticirano numeričko modeliranje ne bi poboljšali predviđanja. Međutim, ako tlo sadrži slojeve pijeska izrazito različite krutosti ili čak sadrži slojeve sitnozrnastog tla ili je dubina ispod temelja do vrlo krutog sloja manja od dvostruke širine temelja ili je prošireni temelj fleksibilan (kao što su temeljne ploče koje zahtijevaju numeričku analizu interakcije tla i konstrukcije), izravne empirijske metode za predviđanje krivulja opterećenje-slijeganje kao što su one opisane u ovom radu su od male koristi. Na sličan način, numeričke metode s konačnim elementima ili slične, sa složenim konstitutivnim modelima za tla, unatoč tome što su moćni alati za modeliranje, imaju nedostatke u slučaju nekoherentnih tala zbog problema u dobivanju neporemećenih uzoraka tla i rukovanju njima u laboratoriji.

Nadalje, za slaganje s izmjerenim podacima pokazalo se da je potrebno unaprijed nepoznato predopterećenje temeljnog tla. Ovaj članak zagovara treći pristup koji kombinira prednosti numeričkog modeliranja s modificiranom metodom Maynea i sur. (2012.) opisanom jednadžbom (8). Za krupnozrnaste slojeve tla nisu potrebna nikakva laboratorijska ispitivanja naprezanja-deformacije. U slučaju sitnozrnastih slojeva tla, za laboratorijsko ispitivanje naprezanja-deformacije potrebno je dobiti neporemećene uzorke. U nedostatku laboratorijskih ispitivanja, mogu se koristiti korelacije s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa. Jedina dva *in situ* ispitivanja koja bi trebalo provesti su statički penetracijski pokus (CPT) i geofizička mjerenja brzine posmičnih valova. Predloženi pristup za pouzdanu numeričku analizu interakcije tla i konstrukcije zahtijeva sljedeće korake:

1. Izvršiti terenski statički penetracijski pokus i mjerenje brzine posmičnih valova na budućoj lokaciji temeljenja. Odrediti slojeve u profilu tla.
2. Pomoću vrijednosti profila brzina posmičnih valova odrediti modul smicanja pri vrlo malim deformacijama za numeričko modeliranje svakog sloja tla i za uporabu u jednadžbi (8) za pijesak. Ova jednadžba se predlaže ako konstitutivni model koji se koristi u numeričkoj analizi ima mogućnost obuhvaćanja nelinearnog ponašanja naprezanje-deformacija u opsegu od vrlo malih do velikih deformacija (kao što je HSSmall programa Plaxis). Pomoću korelacija s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa odrediti druge potrebne parametre za numeričko modeliranje.
3. Za svaki krupnozrnasti sloj u profilu tla, numerički izračunati krivulju opterećenje-slijeganje za imaginarni kruti kvadratni ili ekvivalentni kružni temelj, veličine slične onima opisanim ovdje, koji leži na temeljnom tlu koje je u cijelosti homogeni sloj istog tla. Prilagoditi ulazni parametar predopterećenja kako bi se za svaki krupnozrnasti sloj tla podesila krivulja opterećenje-slijeganje izračunata iz jednadžbe (8).
4. Za svaki sloj tla koristiti parametre modela određene u 2. i 3. koraku, i provesti numeričku analizu na složenom problemu interakcije tla i konstrukcije ili analizu slijeganja za slojeviti profil tla.

5. PROVJERA

Za provjeru predložene metodologije odabrane su dvije lokacije s jednostavnim konfiguracijama temelja i slojevitim temeljnim tlima, na kojima su izvedena probna opterećenja. Prva lokacija je Green Cove Springs, na Floridi (Anderson i sur. 2007.), a druga lokacija je Alvin (East), u Texasu (Tand i sur. 1994.). Na prvoj lokaciji slijeganja su mjerena do 4 mm, tj. samo u rasponu malih deformacija, tako da se mogao istražiti utjecaj elastičnih deformacija u jednadžbi (8). Na drugoj lokaciji postoji gornji sloj gline za koju su parametri određeni kroz korelacije s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa. Statički penetracijski pokusi provedeni *in situ* dali su vrijednosti otpora na šiljku za svaki sloj na ove dvije lokacije. Ni na jednoj lokaciji nisu izvedena mjerenja brzine posmičnih valova, tako da se modul smicanja pri vrlo malim deformacijama za svaki sloj morao odrediti kroz korelacije s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa. Ova dva primjera služe kao ilustracija mogućnosti predložene metodologije. Kad su raspoloživa mjerenja brzine posmičnih valova, metodologija postaje prilično jednostavna.

Plaxis 2D s konstitutivnim modelom HSSmall (Brinkgrave i sur. 2011.) je korišten u svim numeričkim simulacijama.

Za krupnozrnasto tlo sa $c' = 0$, G_0 i G_0^{ref} su povezani preko

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{\sigma_3'}{p^{\text{ref}}} \right)^m \quad (9)$$

gdje je σ_3' malo glavno naprezanje i p^{ref} je referentni tlak, koji se obično uzima kao atmosferski tlak (100 kPa). Sličan odnos vrijedi za sve navedene referentne vrijednosti.

Kad se brzine posmičnih valova v_s mjere kroz cijeli profil temeljnog tla, moguće je odrediti profil G_0 , a zatim G_0^{ref} iz jednadžbe (9) za svaki posebni sloj. To je polazišna točka za povratnu numeričku analizu. U nedostatku mjerenja v_s na dvije analizirane lokacije, prvo su korištene korelacije između G_0 i q_c . Schnaid i sur. (2004.) (prema Schnaid 2009.) dali su sljedeću korelaciju za pijesak:

$$G_0 = \alpha \sqrt[3]{q_c \sigma_{v0}' p_a} \quad (10)$$

gdje je σ_{v0}' vertikalno efektivno naprezanje *in situ* relevantno za otpor na šiljku statičkog penetracijskog pokusa u sloju, a p_a je atmosferski tlak jednak 100 kPa. Koeficijent α se kreće od 110 do 800, pri čemu je vrijednost 110 donja granica za necementirani pijesak, a vrijednost 800 gornja granica za cementirani pijesak. U nedostatku bilo kakve bitne naznake o tome koju vrijednost α koristiti, u ovoj je studiji usvojena je vrijednost $\alpha = 400$ za sve slojeve pijeska na lokaciji Green Cove Springs, a $\alpha = 250$ za sve slojeve pijeska na lokaciji Alvin (East).

Kao q_{c1} uzete su vrijednosti q_c koje su za svaki sloj pijeska dali Anderson i sur. (2007.) i Tand i sur. (1994.). Vertikalna efektivna naprezanja *in situ* su izračunata u srednjoj točki svakog sloja u slojevitom temeljnom tlu. Zatim je pretpostavljeno da se za debelo homogeno temeljno tlo koje se sastoji od pijeska u jednom sloju, otpor na šiljku statičkog penetracijskog pokusa mijenja s dubinom. Iz jednadžbi (9) i (10), može se izvesti da

$$q_{c2} = q_{c1} \left(\frac{\sigma_{v02}'}{\sigma_{v01}'} \right)^{3m-1} \quad (11)$$

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

gdje je σ_{v02}' vertikalno efektivno naprezanje *in situ* u debelom homogenom sloju na dubini ($D_f + B$), gdje je D_f dubina ukopavanja temelja. Vrijednosti q_{c2} i σ_{v02}' su korištene za izračunavanje relevantnog G_0 iz jednadžbe (10), a zatim E_0 za uporabu u jednadžbi (8) za modificiranu metodu Maynea i sur. (2012.).

Mayne i Rix (1993.) su dali sljedeću korelaciju za glinu:

$$G_0 = 2.87 q_c^{1.335} \quad (12)$$

gdje su G_0 i q_c u kPa. Ova korelacija je korištena za sloj gline na lokaciji Alvin.

Kako bi se odredili nepoznati parametri za HSSsmall (osim G_0^{ref} kad je profil v_s poznat), prvo je za svaki sloj pijeska određena relativna gustoća D_r (%) iz korelacije koju su dali Jamiolkowski i sur. (1985.):

$$D_r = -98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{(\sigma_{v0}')^{0.5}} \quad (13)$$

gdje su q_c i σ_{v0}' u t/m^2 , σ_{v0}' je uzet u središnjoj točki pojedinog sloja u slojevitom profilu tla, a $q_c = q_{c1}$.

Brinkgreve i sur. (2010.) su predložili da se HSSsmall parametri dovedu u korelaciju s relativnom gustoćom pijeska:

$$\begin{aligned} E_{50}^{\text{ref}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} &= 60000 \frac{D_r}{100} \text{ (kPa)} & E_{\text{ur}}^{\text{ref}} &= 3E_{50}^{\text{ref}} \\ G_0^{\text{ref}} &= 60000 + 68000 \frac{D_r}{100} \text{ (kPa)} & \psi &= \varphi' - 30^\circ \end{aligned} \quad (14)$$

Za slojeve pijeska $\gamma_{\text{uns}} = \gamma_{\text{sat}}$.

Za sloj pijeska, pretpostavljajući stalnu brzinu posmičnih valova s dubinom, $m = 0$ tako da $G_0^{\text{ref}} = G_0$, a G_0 se određuje iz jednadžbe (12). Modul stižljivosti $E_{\text{oed}}^{\text{ref}} = E_{\text{oed}}$ je dobiven iz sljedeće korelacije (Sanglerat 1992., prema Schnaid 2009.):

$$E_{\text{oed}} = \alpha_m q_c \quad \text{for } 0.7 < q_c < 2 \text{ MPa} \quad 2 < \alpha_m < 5 \quad (15)$$

E_{50}^{ref} i $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 3 E_{50}^{\text{ref}}$ su prilagođeni s $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ prema Plaxisovim prijedlozima tako da je jednadžba (15) zadovoljena.

Nakon što se odrede parametri za numeričke analize svih vrsta tla, svaki sloj pijeska se modelira kao da se cijelo temeljno tlo sastoji od materijala tog sloja. Dva temelja su modelirana s dimenzijama jednakim onima koje su korištene u probnim opterećenjima. Veličine kvadratnih temelja ekvivalentne površine osnove su u rasponu vrijednosti koje su analizirali Mayne i sur. (2012.). Materijal temelja je armirani beton.

U pododjeljku o numeričkom modeliranju navedeno je da je Benz (2007.) morao koristiti predopterećivanje temeljnog pijeska kako bi ga učinio prekonsolidiranim i uskladio numeričke i izmjerene podatke. Postavljanje prethodnog pokrovnog tlaka (eng. *pre-overburden pressure*, POP) među ulaznim podacima za početno stanje na vrijednost predopterećenja korištenog u analizi ima isti učinak kao opterećenje i rasterećenje tla za tu vrijednost prije simuliranja probnog opterećenja. POP ima stalnu vrijednost za određeno tlo, i dan je sa (Brinkgreve i sur. 2011.)

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

$$\text{POP} = \left| \sigma_p' - \sigma_{v0}' \right| \quad (16)$$

gdje je σ_p' tlak predkonsolidacije.

Ako je POP postavljen na nulu, tlo je normalno konsolidirano, a plastične deformacije počinju od početka proračuna. Ako je POP postavljen na vrijednost različitu od nule, prema HSSmall modelu, pri vrlo malim deformacijama postoje elastične deformacije.

Sada se proračunava analitička krivulja opterećenje-slijeganje prema jednadžbi (8), a POP se podešava u Plaxisu tako da se ove dvije krivulje najbolje podudaraju. Međutim, ovaj korak se može koristiti samo kad su vrijednosti G_0^{ref} za svaki sloj određene iz brzina posmičnih valova. Pošto se u ovoj studiji ne koriste mjerenja v_s , moraju se poduzeti dodatni koraci.

Svaki put kad se vrijednost POP mijenja za određeni homogeni temeljni pijesak, horizontalna efektivna naprezanja u početnom stanju se također mijenjaju. Stoga se za svaku novu vrijednost POP horizontalno efektivno naprezanje na dubini ($D_f + B$) očitava s Plaxisovog prikaza početnog stanja. Zatim se za tekući proračun G_0^{ref} dobiva iz jednadžbe (9), gdje se vrijednost G_0 uzima kao ona koja je prethodno određena na dubini ($D_f + B$) za korištenje E_0 u analitičkoj jednadžbi (8).

Kad se postupak podešavanja dovrši za sve slojeve pijeska, i definiraju parametri za sloj gline na lokaciji Alvin, postavljeni su svi parametri za Plaxis analizu slojevitog temeljnog tla, uključujući POP za svaki sloj pijeska.

5.1 Green Cove Springs

S promjerom 1,8 m, debljinom 0,6 m i ukopan 0,6 m u zemlju, armirano-betonski temelj je probno opterećen do 222 kPa u Green Cove Springsu, na Floridi (Anderson i sur. 2007.). Razina podzemne vode je bila na 1,7 m od površine tla. Kružni temelj promjera 1,8 m je uzet kao kvadratni temelj jednake površine s veličinom 1,6 m za analitički izraz, i numerički je modeliran kao osno simetričan temelj.

Opis četiri sloja temeljnog tla i njihove odgovarajuće parametre dali su Anderson i sur. 2007., skupa s relativnim gustoćama izračunatim iz jednadžbe (13). Za četvrti sloj, jednadžba (13) daje relativnu gustoću 0. Tako je usvojena vrijednost 0,1 kako bi se izračunali parametri za Plaxis.

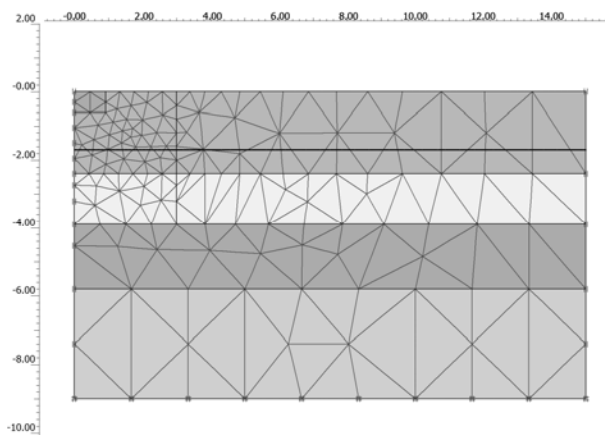
Na slici 5 prikazana je mreža konačnih elemenata za slojevito temeljno tlo. Izvršeni su proračuni kontrolirani deformacijama.

Na slici 6 prikazani su izmjereni podaci (Anderson i sur. 2007.) i svi izračunati rezultati. Puna crna krivulja je rezultat Plaxisovog proračuna slijeganja za slojevito temeljno tlo. Ona se jako dobro podudara s izmjerenim podacima. Puna sive krivulje su rezultat proračuna slijeganja jednadžbom (8) za modificiranu metodu Maynea i sur. (2012.) za cijelo temeljno tlo koje se sastoji od materijala svakog sloja zasebno, a isprekidane krivulje su Plaxisovo najbolje slaganje s jednadžbom (8) za iste uvjete temeljnog tla kao za jednadžbu (8).

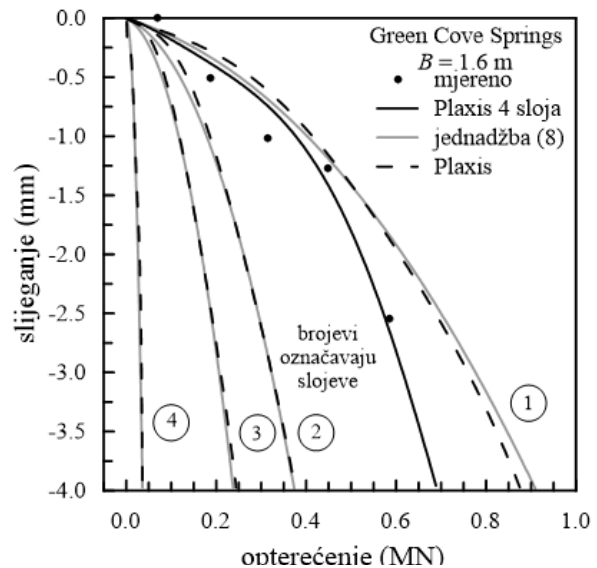
Plaxisovo podudaranje za jednadžbu (8) je vrlo dobro za sva četiri sloja pijeska. To se postiže odabirom G_0^{ref} kroz gore opisani postupak u nedostatku mjerenja v_s . Zatim se podešava POP za najbolje slaganje. U ovom analiziranom slučaju, očita je prednost korištenja modificirane metode Maynea i sur. (2012.) za pravilno predviđanje ponašanja tla pri vrlo malim i malim deformacijama, pošto su slijeganja izmjerena u ovom rasponu deformacija. Podešavanje proračuna Plaxisa za svaki sloj pijeska prema krivulji Maynea i sur. bi dalo različite rezultate, jer je tangenta na njihovu krivulju horizontalna pri vrlo malim deformacijama.

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima



Slika 5. Mreža konačnih elemenata za slojevito temeljno tlo za Green Cove Springs



Slika 6. Izmjereni podaci (Anderson i sur. 2007.), Plaxisovi rezultati za slojevito temeljno tlo i Plaxisovo najbolje podudaranje za jednadžbu (8)

Dubina $2B = 3,2$ m je unutar drugog sloja. Na taj način, 1. i 2. sloj imaju najveći utjecaj na konačnu krivulju Plaxisa za slojevito tlo. Konačni rezultat je obećavajući u pogledu predložene metodologije. Za ovu lokaciju bi bilo dovoljno koristiti metodu Maynea i sur. (2012.) danu jednadžbom (1), ali ovo je jednostavan primjer u kojem je izvedeno probno opterećenje tako da se konačan rezultat mogao usporediti s izmjerenim podacima za slojevito temeljno tlo. Predložena metoda je prikladna za predviđanje krivulja opterećenje-slijeganje u geotehničkim problemima u kojima nije prihvatljivo koristiti jednostavnu metodu Maynea i suradnika. K tome, ona pruža smjer za učinkovitije numeričko modeliranje plitkih temelja.

5.2 Alvin (East)

Još jedan jednostavan ilustrativan primjer primjene predložene metodologije je primjer četiri probna opterećenja izvedena u Alvinu, Texas (Tand i sur. 1994.), koji u biti obuhvaća dva temelja. Četiri zvonasta temelja od armiranog betona su probno opterećena na dvije odvojene lokacije (istok/zapad). Pomoću bušaće opreme montirane na dizalicu, na svakoj lokaciji ugrađena su po dva temelja na razmaku od 2,7 m. Na svakoj lokaciji gornjih 2,7 m je prvenstveno kruta pjeskovita glina (CL) do glina (CH). U podlozi gline leži debela naslaga srednje gustog do gustog pijeska (SM/SP) do dubine veće od 15 m. Razina podzemne vode je na 1,9 m ispod površine tla.

U ovoj studiji odabrana je lokacija istok (East). Ovdje predstavljena analiza obuhvaća oba temelja na lokaciji East s jednim modelom. Dva temelja na ovoj lokaciji imaju prosječni promjer osnove 1,95 m, što odgovara kvadratnom temelju $B = 1,7$ m jednake površine. Temelji su ukopani 2,2 m, što je jednako njihovoj debljini. Zbog toga postoji sloj gline debljine 0,5 m ispod osnova temelja. Opis četiri sloja temeljnog tla i njihove odgovarajuće parametre dali su Tand i sur. 1994. Prvi sloj sačinjen od gline je numerički modeliran u nedreniranom stanju, s nedreniranom čvrstoćom na smicanje c_u kao ulaznim parametrom za karakteristike čvrstoće ($\rho_u = 1^\circ$ iz numeričkih razloga).

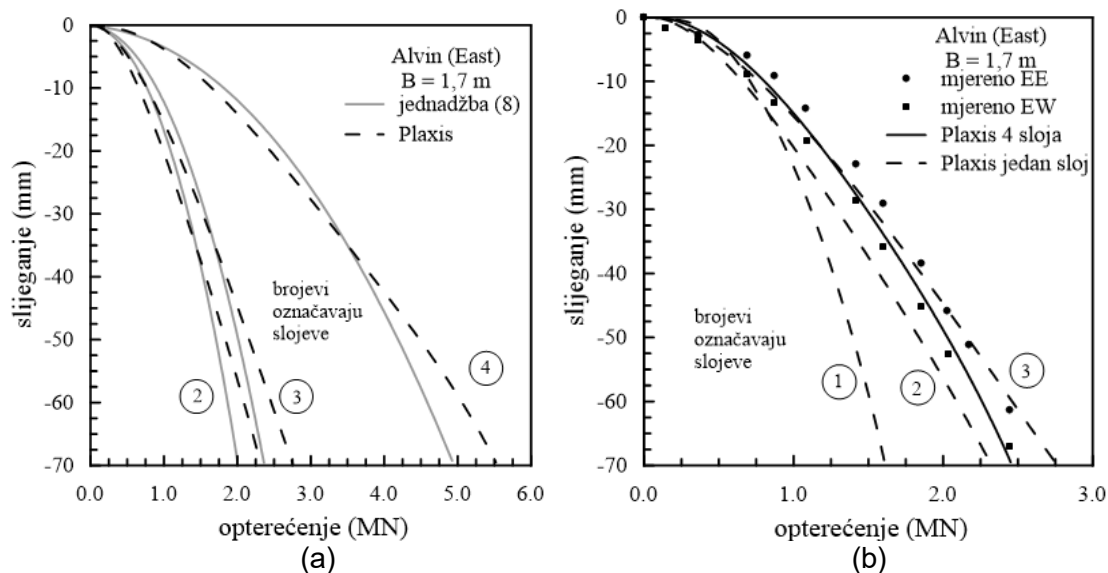
Na slici 7(a) prikazani su rezultati Plaxisovog podešavanja za jednadžbu (8) za svaki sloj pijeska, ponovo prilagođavanjem POP-a. U ovom slučaju, dvije krivulje za zasebne slojeve se ne

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

poklapaju dobro kao u prethodnom slučaju jer su slijeganja proračunata do 70 mm, dok su za lokaciju Green Cove Springs proračunata do 4 mm. Na slici 7(b) prikazani su izmjereni podaci (Tand i sur. 1994.) i konačni proračun Plaxisa za slojevito temeljno tlo (puna crna krivulja). Ova krivulja se izuzetno dobro podudara s izmjerenim podacima. Krivulje Plaxisa su reproducirane za 2. i 3. sloj, a na slici 7(b) za usporedbu je dodana krivulja Plaxisa za glinu. Dubina $2B = 4,4$ m je unutar trećeg sloja.

Ovaj primjer također pokazuje da pristup sugeriran u predloženoj metodologiji može pružiti dobre rezultate. To je osobito obećavajuće za numeričko modeliranje plitkih temelja zbog uobičajenih problema s određivanjem brojnih ulaznih parametara koji, prema predloženom postupku, zahtijevaju statički penetracijski pokus i mjerenja brzine posmičnih valova *in situ* i samo standardne pokuse u laboratoriju (npr. izravno smicanje i određivanje osnovnih karakteristika tla). To je dodatno ohrabrujuće jer se problem sustavnog precjenjivanja slijeganja na pijesku numeričkim modeliranjem može riješiti podešavanjem POP-a ili na sličan način određivanjem prekonsolidacije u drugim računalnim programima prema analitičkom proračunu danom jednadžbom (8) za modificiranu metodu Maynea i sur. (2012.).



Slika 7. (a) Jednadžba (8) i Plaxisovo najbolje podudaranje za jednadžbu (8), (b) izmjereni podaci (Tand i sur. 1994.), proračun Plaxisa za slojevito tlo, i proračun Plaxisa za prva tri sloja odvojeno

6. ZAKLJUČCI

Nelinearna krivulja opterećenje-slijeganje za jednostavan temelj na debelom, prilično homogenom sloju pijeska najbolje se može predvidjeti empirijskim metodama koje je dovode u izravnu korelaciju s rezultatima nekih *in situ* pokusa. Metoda Maynea i sur. (2012.) koristi otpor na šiljku standardnog statičkog penetracijskog pokusa kao jedinstveni parametar tla i čini se da ona predstavlja najjednostavnije i najprikladnije rješenje. Ova metoda nije primjenjiva za složenije proširene temelje ili slojeve tla koji se ne mogu smatrati dubokim i homogenim. Metoda konačnih elemenata ili slične numeričke metode, zajedno s odgovarajućim konstitutivnim modelima za tla, koji imaju potencijal za modeliranje ovih geometrijski složenijih problema, imaju nedostatke. Parametri konstitutivnih modela korišteni u numeričkoj analizi, ako se odrede iz neizbježno poremećenih uzoraka pijeska koji se ispituju u laboratoriju, nisu dovoljno pouzdani (Benz 2007.). Osim toga, Benz je uveo

hipotetičko predopterećenje temeljnog pijeska kako bi se uskladila numerički proračunata i izmjerena slijeganja pokusnog temelja.

Za ublažavanje opisanih nedostataka, u radu je predložena metodologija koja kombinira prednosti i empirijskog i numeričkog pristupa u predviđanju krivulja opterećenje-slijeganje za plitke temelje. Predložena metodologija se može koristiti za slojevito temeljno tlo koje također sadrži sitnozrnaste slojeve tla, ili kad se zahtijeva pouzdana nelinearna analiza interakcije tla i konstrukcije. U predloženoj metodologiji, predlaže se odrediti maksimalni modul smicanja iz mjerenja brzine posmičnih valova na terenu, i provesti statički penetracijski pokus. Zatim se iz korelacija s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa, za svaki sloj iz profila tla zasebno i obuhvaćanjem cijelog temeljnog tla, mogu odrediti parametri tla za numerički model tla. Za svaki model pijeska izračunata je krivulja opterećenje-slijeganje pomoću predložene modificirane metode Maynea i sur. (2012.), koja uzima u obzir konačnu krutost tla pri vrlo malim deformacijama. Numerička krivulja opterećenje-slijeganje prilagođava se tako da odgovara ovoj izračunatoj krivulji podešavanjem parametra prekonsolidacije.

Modificirana krivulja opterećenje-slijeganje ima dva parametra koja su određena statističkom analizom 16 temelja na četiri lokacije. Četiri odabrane lokacije obuhvaćaju raspon za 12 od 13 vrijednosti krutosti tla korištenih u Mayne i sur. (2012.). Krivulje opterećenje-slijeganje izračunate metodom Maynea i sur. i predloženom modificiranom metodom su vrlo slične kada se iscrtaju do loma, ali se razlikuju kod vrlo malih i malih normaliziranih slijeganja (do $s/B = 0,1\%$).

Predložena metodologija je provjerena na dvije lokacije na kojima su izvedena probna opterećenja jednostavnih temelja koja leže na nehomogenom temeljnom tlu: Green Cove Springs (Anderson i sur. 2007.) i Alvin (East) (Tand i sur. 1994.). Ova dva primjera su korištena kako bi se pokazao potencijal metodologije, iako ni na jednoj lokaciji nije bilo mjerenja brzine posmičnih valova. Modul smicanja pri vrlo malim deformacijama je procijenjen iz korelacija s otporom na šiljku statičkog penetracijskog pokusa. Konačni rezultati na obje lokacije su pokazali vrlo dobro slaganje između izmjerenih slijeganja i onih izračunatih numerički za temelj na slojevitom tlu. Ovo je vrlo obećavajuće zbog problema na koje se nailazi kad se moraju odrediti parametri tla za složen konstitutivni model i zbog sustavnog precjenjivanja slijeganja na pijesku standardnim numeričkim modeliranjem.

LITERATURA

1. Akbas, S.O., Kulhawy, F.H.: Axial compression of footings in cohesionless soils I: Load-settlement behaviour, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009a, 135(11), 1562–1574.
2. Akbas, S.O., Kulhawy, F.H.: Axial compression of footings in cohesionless soils II: Bearing capacity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009b, 135(11), 1575–1582.
3. Anderson J.B., Townsend F.C., Rahelison L.: Load testing and settlement prediction of shallow foundation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(12), 1494–1502.
4. Benz, T.: Small strain stiffness of soil and its numerical consequences, Ph.D. thesis, Institut für Geotechnik, University of Stuttgart, 2007.
5. Bergdahl, U., Hult, G., Ottosson, E.: Calculation of Settlement of Footings in Sand, *In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985, 4, 2167–2170.
6. Briaud, J.-L., Gibbens, R.M.: Predicted and measured behavior of five spread footings on sand, *Geotechnical Special Publication*, No. 41, American Society of Civil Engineers, New York, 1994.

Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.

Numeričko modeliranje slijeganja za plitke temelje na slojevitim tlima

7. Briaud, J.-L., Gibbens, R.M.: Large scale load tests and data base of spread footings on sand, Publication No. FHWA-RD-97-068 US, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1997.
8. Brinkgreve, R.B.J., Engin, E., Engin, H.K.: Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands, *In Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 2010, Taylor & Francis Group, London, 137–142.
9. Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., Engin, E.: Plaxis Manual 2D 2011, Netherlands, 2011.
10. Burland, J.B.: Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: “Small is beautiful”—The stiffness of soils at small strains, *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, 26(4), 499–516.
11. Byrne, P. M., Cheung, H., Yan, L.: Soil parameters for deformation analysis of sand masse, *Canadian Geotechnical Journal*, 1987, 24(3), 366–376.
12. Duncan, J.M., Chang, C.Y.: Nonlinear analysis of stress-strain in soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 1970, 96(SM5), 1629–1653.
13. Jamiolkowski, M., Lad, C.C., Germaine, J.T., Lancellotta, R.: New developments in field and laboratory testing of soils, *In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1985, San Francisco, 1, 57–153.
14. Kondner, R.L.: Hyperbolic stress-strain response: Cohesive soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, American Society of Civil Engineers*, 1963, 89(SM1), 115–143.
15. Lehane, B.M., Doherty, J.P., Schneider, J.A.: Settlement prediction for footings on sand, *In the Proceedings of the Fourth International Symposium on Deformational Characteristics of Geomaterials*, IOS Millpress, Rotterdam, 2008, 1, 133–150.
16. Lukić Kristić, I., Prskalo, M., Szavits-Nossan, V.: Kalibracija numerickog modela i nova direktna metoda za proračun slijeganja plitkih temelja na pijesku, *e-Zbornik, Elektronički zbornik radova Građevinskog fakulteta*, 2019, 17, 1-16.
17. Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M.: Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic & Professional, London, 1997.
18. Mayne, P.W., Poulos, H.G.: Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers*, 1999, 125(6), 453–460.
19. Mayne, P.W., Rix, G.J.: G_{\max} - q_c relationships for clays, *Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials*, 1993, 16(1), 54–60.
20. Mayne, P.W., Uzielli, M., Illingworth, F.: Shallow footing response on sands using a direct method based on cone penetration tests, *In Full Scale Testing and Foundation Design, Honoring Bengt H. Fellenius, GeoCongress 2012*, 2012, 664–679.
21. Sanglerat, G.: The penetrometer and soil exploration. Elsevier, Amsterdam, 1972.
22. Schnaid, F.: In situ testing in geomechanics: The main tests, Taylor & Francis Group, London, 2009.
23. Schnaid, F., Lehane, B.M., Fahey, M.: In situ test characterization of unusual geomaterials, *In Proceedings of the Second International Conference on Site Characterization*, Millpress, Rotterdam, 2004, 1, 49–74.
24. Tand, K., Funegard, E., Warden, P.E.: Footing load tests on sand, *In American Society of Civil Engineers Conference Proceedings: Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments*, 1994, 40, 164–178.
25. Vesić, A.S.: Bearing Capacity of Shallow Foundations, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1975.