

Razvoj korelacije za procjenu maksimalne krutosti tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa (CPT)

Petra Žužul¹, prof. dr. sc. Meho Saša Kovačević²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, pzuzul@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, msk@grad.hr

Sažetak

Maksimalna krutost tla se u geotehnici najčešće izražava modulom smicanja kao odnos između posmičnog naprezanja i male relativne posmične deformacije. Za određivanje maksimalne krutosti tla najpogodnije su geofizičke metode kojima se mjere brzine širenja posmičnih valova. U radu je prikazan razvoj korelacije između maksimalne krutosti tla, dobivene višekanalnom analizom površinskih valova (MASW) i rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT). Korelacija je razvijena na temelju baze od 128 parova podataka na lokaciji za ispitivanje nosivosti pilota u Nizozemskoj.

Ključne riječi: CPT, geofizičke metode, maksimalna krutost tla, korelacija, neuronske mreže

Development of correlation for estimating maximum soil stiffness via cone penetration test (CPT)

Abstract

Maximum soil stiffness is most often expressed in geotechnics through shear modulus, as a relationship between shear stress and small relative shear deformation. Geophysical methods for measuring propagation of shear wave velocities are the most suitable for determining maximum soil stiffness. The paper presents development of correlation between the maximum soil stiffness, obtained by multichannel surface waves analysis (MASW), and cone penetration test (CPT) results. The correlation was developed based on a database of 128 data pairs at a pile capacity test site in the Netherlands.

Key words: CPT, geophysical methods, maximum soil stiffness, correlation, neural networks

1 Uvod

Određivanje krutosti tla kao odnosa naprezanja i deformacija u tlu predstavlja jednu od najvažnijih inženjerskih aktivnosti prilikom provođenja numeričkih analiza u mehanici tla. O pouzdanosti određivanja krutosti tla ovisi i pouzdanost predviđanja deformacija geotehničkih konstrukcija i tla. Proračun deformacija tla provodi se korištenjem konstitucijskih modela tla koji uzimajući u obzir činjenicu da se posmična krutost tla nelinearno smanjuje u području od malih deformacija do sloma tla. Praksa je pokazala da je procjena deformacija tla često nepouzdana i nedostatna za racionalno projektiranje građevinskih konstrukcija ili pak da zahtijeva primjenu skupih i složenih mjernih i računskih postupaka. U posljednje vrijeme pouzdanost predviđanja deformacija u tlu mijenja se nabolje iz više razloga. Među najvažnijim je razvoj potpuno novih mjernih postupaka, koji su omogućili znatno bolje razumijevanje mehaničkog ponašanja tla, te razvoj računskih strojeva, koji danas brzo obavljaju složene proračune nužne pri analizi deformacija tla [1].

U konstitucijskim modelima tla važnu ulogu ima maksimalna krutost tla, izražena modulom posmika pri malim deformacijama (G_0). Pod malim deformacijama razumijevaju se one do kojih je modul smicanja tla najveći i približno konstantan ($G = G_0$). Za mjerenje maksimalne posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode. One se temelje na mjerenju brzine širenja posmičnih valova (v_s), malih amplituda, koje u tlu izazivaju i male posmične deformacije. Modul smicanja računa se na temelju poznate gustoće tla (ρ_0), prema izrazu:

$$G_0 = \rho_0 \cdot v_s^2 \quad (1)$$

Ubrzani razvoj tehnologije dovodi do sve veće primjene terenskih geofizičkih metoda. One omogućavaju dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Metode su nedestruktivne, jer za njihovu primjenu nije potrebno provoditi skupa bušenja i vađenje neporemećenih uzoraka. Geofizičkim metodama se određuju prosječne brzine posmičnih valova za veće volumene tla nego što je moguće ispitivanje na ograničenom broju uzoraka u laboratoriju. Mjerenja su pouzdana jer se izbjegava poremećenje tla uslijed bušenja, vađenja uzoraka te ugradnje uzoraka u laboratorijske uređaje. Metode rješavaju neke od temeljnih problema površinske refrakcije jer mogu detektirati i izmjeriti krutost mekših slojeva koji se nalaze ispod krućih slojeva [2].

Najraširenije geofizičke metode za određivanje brzina širenja posmičnih valova su one koje se zasnivaju na analizi površinskih valova: kontinuirana analiza površinskih valova (Continuous Surface Wave, CSW), spektralna analiza površinskih valova (Spectral Analysis of Surface Waves, SASW) i višekanalna analiza površinskih valova (Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW). Metode se zasnivaju na dis-

perzivnim karakteristikama Rayleighevih valova, uzimajući u obzir činjenicu da se površinski Rayleighevi valovi različitih valnih duljina, odnosno frekvencija, šire do različitih dubina. Tako se valovi niže frekvencije, pa prema tome veće valne duljine, šire dublje u medij nego valovi visoke frekvencije, odnosno male valne duljine. U uslojenom mediju brzina širenja vala na površini ovisi o frekvenciji, odnosno valnoj duljini vala. Ta promjena brzine širenja vala na površini s valnom duljinom naziva se disperzija vala i u uskoj je povezanosti s krutosnim karakteristikama uslojenog medija kroz koji val prolazi. Krivulja disperzije predstavlja ovisnost brzine vala na površini i valne duljine odnosno frekvencije. Za uslojeni medij u kome krutost varira s dubinom, potreban je proces inverzije da bi se iz mjerene krivulje disperzije dobio profil brzina širenja posmičnih valova po dubini. Postupak se odvija tako da se najprije za pretpostavljeni profil brzina izračuna teoretska krivulja disperzije koja se zatim uspoređi s izmjenom krivuljom disperzije. Zbog nepoklapanja tih krivulja, postupak se ponavlja mijenjajući debljine te krutosne karakteristike pretpostavljenog profila. Kada se teoretska i izmjerena krivulja disperzije poklope s inženjerski zadovoljavajućom točnošću, pretpostavljeni profil smatra se rješenjem [3].

Za određivanje krutosti tla u području od malih deformacija do sloma potrebno je primijeniti nekoliko različitih laboratorijskih i terenskih tehnologija, ovisno o veličini deformacija koje se želi mjeriti. Za mjerenje posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode. Za područje srednjih deformacija razvijeno je nekoliko različitih laboratorijskih uređaja koji se montiraju na površinu uzorka tla, prije svega pri troosnom pokusu. Krutost tla pri velikim deformacijama mjeri se uobičajenim laboratorijskim pokusima kao što su edometar ili standardni troosni pokus. Vrlo uspješnu alternativu laboratorijskim pokusima za kontinuirano mjerenje krutosti tla pri malim i srednjim deformacijama predstavlja terenski statički penetracijski pokus CPT.

Statički penetracijski pokus je jednostavan, brz i ekonomičan pokus koji omogućuje dobivanje kontinuiranih podataka o tlu po dubini. Princip izvođenja statičkog penetracijskog pokusa ogleda se u utiskivanju posebne sonde u tlo određenom brzinom, uz konstantno mjerenje otpora utiskivanju na šiljku sonde (q_c), trenja na plaštu sonde (f_s) koje se aktivira prilikom utiskivanja sonde između plašta i okolnog tla te pornog tlaka (u_2). Iako je CPT ograničen ponajprije na mekana tla, sa suvremenom, većom opremom za bušenje i s čvršćim šiljcima na sondama, CPT se može primijeniti u krutim i vrlo krutim tlima, a u nekim slučajevima i u mekim stijenama. Oprema za provođenje CPT pokusa uključuje CPT sondu, opremu za potiskivanje te sustav za prikupljanje podataka. Osnovna primjena CPT-a u geotehnici uključuje: snimanje profila tla i identifikaciju pojedinih slojeva tla, određivanje mehaničkih karakteristika tla, određivanje parametara tečenja i konsolidacije tla te indicaciju osjetljivosti tla na likvefakciju. Prednosti CPT pokusa su: brzo i kontinuirano mjerenje, ponovljivost i pouzdanost mjerenja, ekonomičnost i produktivnost te jake teoretske osnove

za interpretaciju. U posljednje vrijeme provedena su opsežna istraživanja, posebno u inženjerstvu okoliša, koja su dovela do razvoja nove, vrlo sofisticirane opreme za penetracijska ispitivanja. U klasičnu sondu za penetracijska ispitivanja ugrađuju se različite vrste senzora kao što su: laseri, optički senzori, GPR antene visoke rezolucije te integrirani optoelektronički i kemijski senzori [4].

Do sada je CPT pokus uspješno korišten za određivanje krutosti tla pri srednjim i velikim deformacijama, sve do sloma tla. Povezivanjem brzine širenja valova, izmjerene geofizičkim metodama, s rezultatima CPT pokusa omogućilo bi se dobivanje maksimalne krutosti tla pri malim deformacijama. Na taj bi način CPT zamijenio nekoliko različitih laboratorijskih i terenskih tehnologija koje se danas primjenjuju za određivanje krutosti tla u području malih deformacija do sloma.

2 Postojeće korelacije između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa

Razvojem korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa istraživači širom svijeta se bave već približno 40 godina [5-11]. Osim izmjerenih vrijednosti otpora utiskivanju na šiljku sonde (q_c), trenja na plaštu sonde (f_s) i pornog tlaka (u_2), publicirane korelacije uključuju početno stanje naprezanja i geološku starost tla. Iako su neke korelacije obuhvaćale lokacije u različitim dijelovima svijeta, ne mogu se, bez odgovarajuće verifikacije, primijeniti na druge lokacije. Neke od najčešće citiranih korelacija opisane su u nastavku.

Andrus i dr. [5] su na temelju baze od 229 parova podataka na području SAD-a i Japana razvili korelaciju koja uključuje korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t u kPa), indeks tipa ponašanja tla (I_c), dubinu ispitivanja (d u m) i faktor starosti tla (SF^a):

$$v_s = 2.62 \cdot q_t^{0.395} \cdot I_c^{0.912} \cdot d^{0.124} \cdot SF^a \quad (2)$$

Korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t) računa se prema izrazu:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (3)$$

gdje je a – koeficijent neto površine šiljka dobiven kalibracijom u laboratoriju (0,70-0,85).

Indeks tipa ponašanja tla (I_c) računa se prema izrazu:

$$I_c = \sqrt{(3,47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1,22)^2} \quad (4)$$

gdje su Q_{tn} i F_r normalizirani otpor na šiljku i normalizirani koeficijent trenja koji se izračunavaju prema izrazima:

$$Q_{tn} = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \quad (5)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdje su:

σ_{vo} - vertikalno ukupno naprezanje u tlu,

σ'_{vo} - vertikalno efektivno naprezanje u tlu,

p_a - atmosferski tlak (100 kPa) i

n - eksponent naprezanja ovisan o tipu tla i veličini naprezanja koji može imati vrijednost između 0 i 1 i koji se izračunava prema izrazu:

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) - 0,15 \quad (7)$$

Faktor starosti tla (SF^a) iznosi 0,92 za tla holocenske starosti i 1,12 za tla pleistocenske starosti.

Hegazy i Mayne [6] su na temelju baze od 558 parova podataka na području SAD-a, Japana i Italije razvili korelaciju koja uključuje normalizirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (Q_{tn}), indeks tipa ponašanja tla (I_c), vertikalno efektivno naprezanje u tlu (σ'_{vo} u kPa) i atmosferski tlak (p_a u kPa):

$$v_s = 0,0831 \cdot Q_{tn} \cdot e^{1,786 I_c} \cdot \left(\frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right)^{0,25} \quad (8)$$

Robertson [7] je na temelju baze od 1035 parova podataka na području USA razvio korelaciju koja uključuje korigirani otpor utiskivanju na šiljku sonde (q_t u kPa), indeks tipa ponašanja tla (I_c), vertikalno ukupno naprezanje u tlu (σ_{vo} u kPa) i atmosferski tlak (p_a u kPa):

$$v_s = \left[10^{0,55 I_c + 1,68} \cdot \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{p_a} \right) \right]^{0,5} \quad (9)$$

McGann i dr. [8] su na temelju baze od 513 parova podataka na području Novog Zelanda razvili korelaciju koja uključuje otpor na šiljku sonde (q_c u kPa), trenje na plaštu sonde (f_s u kPa) i dubinu ispitivanja (d u m):

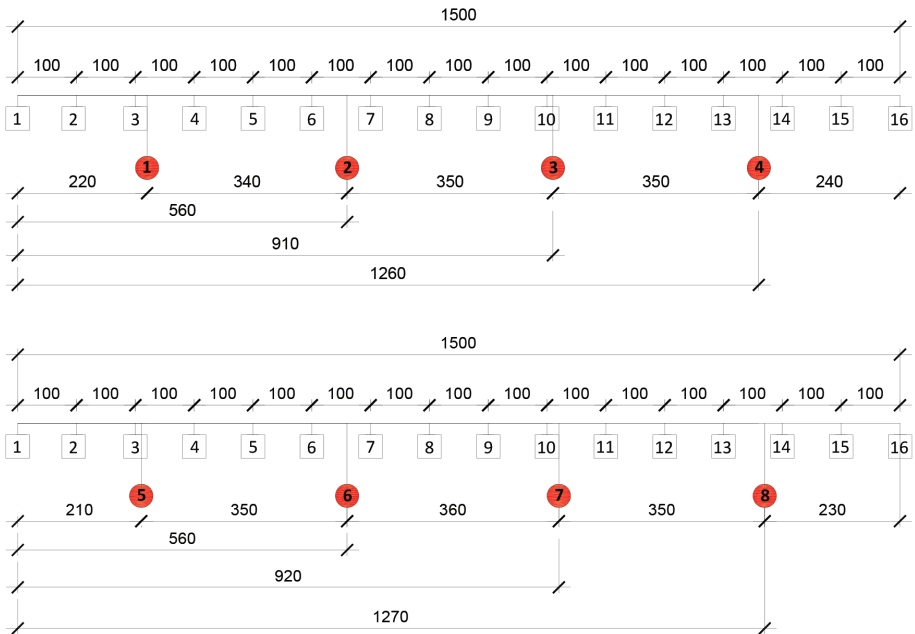
$$v_s = 18,4 \cdot q_c^{0,144} \cdot f_s^{0,0832} \cdot d^{0,278} \quad (10)$$

Za razvoj korelacije koja se predlaže u ovom radu, korišteni su isti parametri i isti oblik ovisnosti brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa kao u izrazu (10). Razlog za to leži u činjenici da su q_c (ili q_t), f_s i d izravno mjerene i neovisne veličine odnosno rezultati CPT pokusa, dok se pomoću njih izračunavaju I_c , Q_{tn} , σ'_{vo} i σ_{vo} , za koje je još dodatno potrebno pretpostaviti (ili izmjeriti na neki drugi način) jediničnu težinu tla (γ) i in situ porni tlak (u_o). Te pretpostavke unose dodatne pogreške ili nesigurnosti u procijenjene vrijednosti brzine širenja posmičnih valova, pa posredno i na maksimalnu krutost tla.

3 Prikaz provedenih terenskih ispitivanja

Istražni radovi, korišteni za potrebe razvoja korelacije između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa, izvedeni su za potrebe interpretacije nosivosti serije pilota izvedenih u općini Beemster u sjevernoj Nizozemskoj, koja je dio prometne regije Amsterdama. S obzirom na to da je tlo sastavljeno od slabo nosive gline, prije provedbe ispitivanja, gornja četiri metra glinovitog tla su zamijenjena zbijenim pijeskom. Na pozicijama budućih pilota na kojima će se ispitivati nosivost izvedeno je 8 CPT pokusa do dubine od 8 metara. Uzdužni razmak CPT pozicija ispitivanja iznosio je oko 3,5 m, a poprečni razmak oko 7 m. U neposrednoj blizini pozicija CPT pokusa izvedena su dva geofizička profila na kojima su metodom višekanalne analize površinskih valova (MASW) provedena dva profila duljine 15 m, s međurazmakom geofona od 1 m. Pozicije CPT pokusa i pozicije geofona su prikazane na slici 1. CPT pokus izvela je tvrtka Multiconsult, Vestiging Amsterdam, a geofizička ispitivanja je izveo Zavod za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Na slici 2. je prikazan detalj provedbe geofizičkih ispitivanja na profilu 1. Interpretacija rezultata ispitivanja brzine širenja valova napravljena je na svakih pola metara dubine, čime je na jednoj poziciji CPT pokusa dobiveno 16 rezultata ispitivanja. Pošto je ukupno izvedeno 8 CPT pokusa, stvorena je baza s ukupno 128 parova podataka. Rezultati CPT i MASW ispitivanja su prikazani na slici 3.

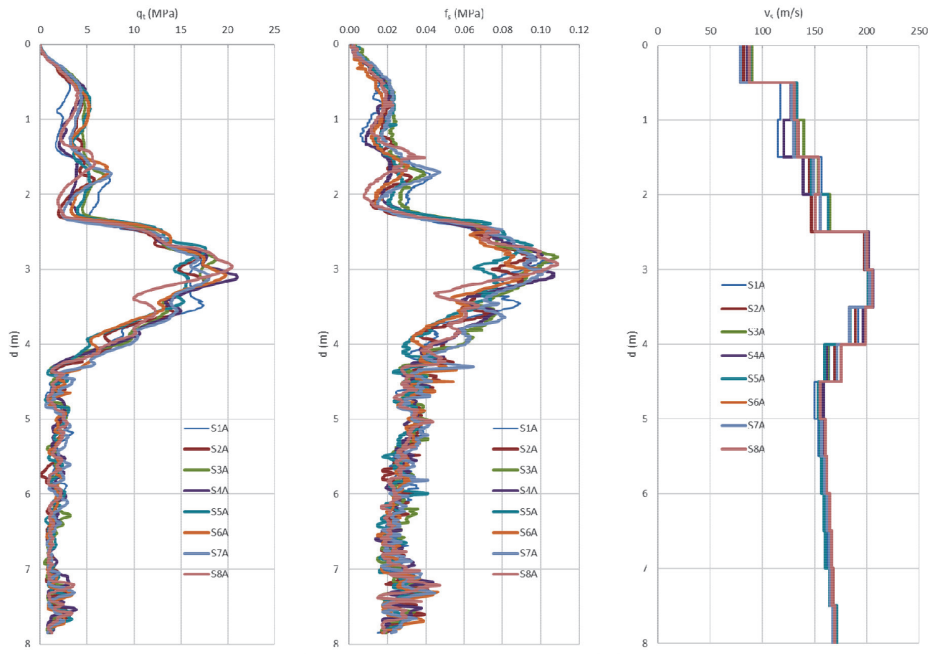
Razvoj korelacije za procjenu maksimalne krutosti tla pomoću statičkog penetracijskog pokusa (CPT)



Slika 1. Pozicije i raspored CPT i MASW ispitivanja



Slika 2. Detalj provedbe MASW ispitivanja



Slika 3. Rezultati CPT i MASW ispitivanja

4 Nova korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa

Regresijski model koji će se razviti u ovom radu ima oblik izraza (10), s tom razlikom što će se umjesto otpora utiskivanju na šiljku (q_c) koristiti korigirani otpor utiskivanju na šiljku (q_t):

$$v_s = c_0 \cdot q_t^{c_1} \cdot f_s^{c_2} \cdot d^{c_3} \quad (11)$$

gdje su c_0 , c_1 , c_2 i c_3 , parametri regresijskog modela.

Logaritmiranjem lijeve i desne strane izraza (11) transformira se postavljeni regresijski model:

$$\log v_s = \log c_0 + c_1 \cdot \log q_t + c_2 \cdot \log f_s + c_3 \cdot \log d \quad (12)$$

Tako transformirani regresijski model predstavlja linearni regresijski model koji se može pisati kao:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 \quad (13)$$

gdje je: $y = \log v_s$, $a_0 = \log c_0$, $a_1 = c_1$, $a_2 = c_2$, $a_3 = c_3$, $x_1 = \log q_t$, $x_2 = \log f_s$ i $x_3 = \log d$

Za (n) izmjerenih podataka parametri transformiranog regresijskog modela a_0 , a_1 , a_2 i a_3 mogu se odrediti metodom najmanjih kvadrata minimiziranjem sume kvadrata odstupanja izmjerenih od regresijskih vrijednosti:

$$\min \sum_{i=1}^n [y - (a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3)]^2 \quad (14)$$

U izrazu (14) parametri a_0 , a_1 , a_2 i a_3 su nepoznanice. Deriviranje izraza (14) po svakom od navedenih parametara rezultira sustavom od četiri algebarske jednadžbe s četiri nepoznanice. Njihovim rješavanjem dobivaju se traženi parametri transformiranog regresijskog modela: $a_0 = 1,59954$, $a_1 = 0,12445$, $a_2 = 0,04795$, $a_3 = 0,17979$. S obzirom na to da je $a_0 = \log c_0$, slijedi da je $c_0 = 10^{a_0} = 39,769$, $c_1 = a_1 = 0,124$, $c_2 = a_2 = 0,048$ i $c_3 = a_3 = 0,180$.

Nova korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa je:

$$v_s = 39,769 \cdot q_t^{0,124} \cdot f_s^{0,048} \cdot d^{0,180} \quad (15)$$

Ako se s $v_{s\text{-mjereno}}$ označe rezultati mjerenja brzine širenja posmičnih valova MASW metodom, a s $v_{s\text{-prognozirano}}$ označi brzina širenja posmičnih valova dobivena na temelju rezultata CPT pokusa pomoću izraza (15), može se ocijeniti reprezentativnost regresijskog modela. Za to je najprije potrebno izračunati prosječnu vrijednost izmjerenih brzina posmičnih valova ($v_{s\text{-prosijek}}$):

$$v_{s\text{-prosijek}} = \frac{\sum_{j=1}^{128} v_{s\text{-mjereno}_j}}{128} = 158,92 \quad (16)$$

Suma kvadrata odstupanja prognoziranih brzina širenja posmičnih valova od prosječne vrijednosti izmjerenih brzina posmičnih valova (SP) iznosi:

$$SP = \sum_{i=1}^{128} (v_{s\text{-prognozirano}_i} - v_{s\text{-prosijek}})^2 = 0,951 \quad (17)$$

Suma kvadrata odstupanja izmjerenih brzina širenja posmičnih valova od prosječne vrijednosti izmjerenih brzina posmičnih valova (SM) iznosi:

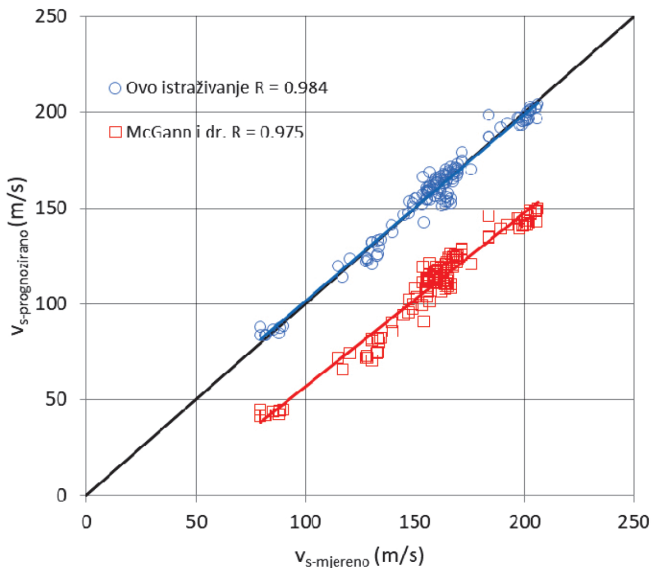
$$SM = \sum_{i=1}^{128} (v_{s\text{-mjereno}_i} - v_{s\text{-prosjeck}})^2 = 0,978 \quad (18)$$

Pokazatelj reprezentativnosti regresijskog modela je koeficijent determinacije (R^2) koji upućuje na to koliko je posto sume kvadrata odstupanja vrijednosti prognozirane brzine širenja posmičnih valova protumačeno regresijskim modelom:

$$R^2 = \frac{SP}{SM} = 0,972 \quad (19)$$

Visoka vrijednost koeficijenta determinacije ($0 \leq R^2 \leq 1$) potvrđuje reprezentativnost regresijskog modela.

Na slici 4. prikazana je usporedba primjene nove korelacije (izraz 15) i korelacije koju su objavili McGann i dr. [8] (izraz 10) na bazu podataka korištenu u ovom istraživanju.



Slika 4. Usporedba nove McGann i druge korelacije

Objekcije korelacije imaju vrlo visoke koeficijente determinacije kada se primijene na bazu podataka dobivenu za vrijeme ispitivanja nosivosti pilota u sjevernoj Nizozemskoj. Međutim, kao što se može vidjeti na slici 4, izraz McGannov i drugih [8] značajno podcjenjuje brzinu širenja posmičnih valova, ali relativno dobro opisuje trend relativnog povećanja brzina. To opravdava potrebu razvoja lokalnih korelacija. Nedostatak predložene korelacije je u tome što je razvijena na malom prostoru (150 m²). Za njenu primjenu u praksi trebalo bi zahvatiti znatno šire područje istraživanja.

5 Zaključak

Krutost tla se u geotehnici najčešće izražava modulom smicanja G kao odnosa između posmičnog naprezanja τ i relativne posmične deformacije γ . Modul smicanja je nužan parametar za svaku numeričku analizu i prognozu deformacija geotehničkih konstrukcija. Krutost tla se nelinearno smanjuje od malih deformacija, gdje je maksimalna, do sloma. Za mjerenje maksimalne posmične krutosti tla pri malim deformacijama najpogodnije su geofizičke metode koje se temelje na mjerenju brzine širenja posmičnih valova v_s , malih amplituda, koje u tlu izazivaju i male posmične deformacije. Za određivanje maksimalne krutosti tla pri malim deformacijama može se umjesto geofizičkih metoda koristiti terenski statički penetracijski pokus CPT, koji se najčešće primjenjuje u geotehničkoj praksi za kontinuirano određivanje mehaničkih karakteristika tla po dubini. U radu su korišteni rezultati terenskih istražnih radova izvedeni za potrebe interpretacije nosivosti serije pilota izvedenih u sjevernoj Nizozemskoj. Razvijena je korelacija između brzine širenja posmičnih valova i rezultata CPT pokusa. Usporedba s publiciranim korelacijama je pokazala opravdanost razvoja lokalnih korelacija.

Literatura

- [1] Kovačević, M.S., Bačić, M., Jurić Kačunić, D., Ivoš, G.: Some Innovative Technologies and Techniques in Geotechnical Engineering, Engineering power 13 (2018) 3, pp. 2-10.
- [2] Kovačević, M.S., Marčić, D., Gazdek, M.: Application of geophysical investigations in underground engineering, Tehnički vjesnik, 20 (2013) 6, pp. 1111-1117.
- [3] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L.: Potencijali primjene nerazornih metoda ispitivanja tla i stijene za potrebe sanacije strateških infrastrukturnih linijskih objekata, Stanje i budućnost tehničkih znanosti u Hrvatskoj u 21. stoljeću. Zagreb, pp. 141-156, 2017.
- [4] Librić, L., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M.S.: Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 1, pp. 11-20.
- [5] Andrus, R., Mohanan, N., Piratheepan, P., Ellis, B., Holzer, T.: Predicting shear-wave velocity from cone penetration resistance, Proceedings of the fourth international conference on earthquake geotechnical engineering, Thessaloniki, Paper no.1454, 2007.
- [6] Hegazy, Y., Mayne, P.: A global statistical correlation between shear wave velocity and cone penetration resistance, Proceedings of the GeoShanghai, site and geomaterial characterization (GSP 149), Reston, pp. 243-248.
- [7] Robertson, P.: Interpretation of cone penetration tests - a unified approach. Canadian Geotechnical Journal 46 (2009) 11, pp. 1337-1355.

- [8] McGann, C.R., Bradley, B.A., Taylor, M. L., Wotherspoon, L.M., Cubrinovski, M.: Applicability of existing empirical shear wave velocity correlations to seismic cone penetration test data in Christchurch, New Zealand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 75 (2015) pp. 76-86.
- [9] Sykora, D., Stokoe II, K.: Correlations of in-situ measurements in sands and shear wave velocity. Geotechnical engineering report GR83-33, The University of Texas at Austin, 1983.
- [10] Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.: Modulus of sands from CPTs and DMTs., *Proceedings of the 12th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Rio de Janeiro, pp. 165-170, 1989.
- [11] Mayne, P., Rix, G.: G_{max} – V_s relationships for clays, *Geotechnical Testing Journal*, 16 (1993) 1, pp. 54-60.