

МОДУЛ РЕАКЦИЈЕ ТЛА ЗА ПРОРАЧУН ХОРИЗОНТАЛНО ОПТЕРЕЂЕНОГ ШИПА

Петар Сантрач¹

Жељко Бајић²

УДК: 624.154:624.024.1

DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014.125

Резиме: При димензионисању шипова који су доминантно оптерећени хоризонталним силама (марине, пристаништа, обални зидови, дубоки ископи), осим прорачуна по методи граничног стања носивости (ULS - према Eurocode), потребно је извршити и прорачун померања (SLS). Основни проблем код прорачуна померања је утврђивање параметара деформабилности тла, поготово када се ради о алувијалним седиментима (пескови, меке глине и сл.). У раду је приказан поступак прорачуна хоризонталних модула реакције тла дуж омотача шипа у песковима, на основу резултата опита статичке (CPT) или стандардне пенетрације (SPT). Прорачун хоризонталних померања се због хетерогености слоја по правилу врши нумерички, користећи методу коначних разлика или коначних елемената.

Кључне речи: Хоризонтално оптерен шип, хоризонтални модул реакције тла

1. UVOD

Pri dimenzionisanju temelja koji su opterećeni horizontalnom silom, merodavni kriterijum je uglavnom veličina horizontalnog pomeranja glave šipa/šipova. Ukoliko su pomeranja u dozvoljenim granicama, sigurnost u odnosu na graničnu silu protiv loma tla je gotovo uvek zadovoljena. Da bi se formirao računski model, pored opterećenja i geometrije, potrebne su materijalne karakteristike konstrukcije (beton, čelik i drvo) i temeljnog tla. Tačnost rezultata proračuna, pored računskog modela, uglavnom je funkcija pouzdanosti ulaznih podataka, među kojima je uvek najveći problem pouzdanost parametara tla.

Autori su pri radu na praktičnim problemima vezanim za temeljenje na šipovima, koristili različite proračunske modele i različite metode za određivanja mehaničkih parametara tla, pre svega parametara deformabilnosti. Za proračun temelja na šipovima, postojeće metode se generalno mogu svrstati u dve grupe: metode zasnovane na modulu reakcije tla i metode zasnovane na teoriji elastičnog kontinuuma. Prilikom primene na

¹ Проф др Петар Сантрач, дипл.грађ.инж., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: +381 24 554 300, email: santrac@gf.uns.ac.rs

² Жељко Бајић, дипл.грађ.инж., Универзитет у Новом Саду, Грађевински факултет Суботица, Козарачка 2а, Суботица, Србија, тел: +381 24 554 300,

praktične probleme, zbog složenosti, rešenja se uglavnom mogu dobiti samo primenom približnih, numeričkih postupaka, kao što su metoda konačnih razlika ili konačnih elemenata.

U predmetnom radu je prikazan model zasnovan na modulu reakcije tla, a proračun je izvršen numerički, metodom konačnih razlika. Opisani postupak je i praktično primenjen pri dimenzionisanju šipova za proširenje marine u Senti i šipova za objekat Ženski štrand na jezeru Palić. Parametri deformabilnosti slojeva tla su korelisani sa rezultatima opita statičke penetracije (CPT). Verifikacija postupka je izvršena na osnovu dokumentovanih primera horizontalnog probnog opterećenja šipova, publikovanih u literaturi.

2. PARAMETAR DEFORMABILNOSTI TLA

Model zasnovan na modulu reakcije tla, koji je originalno predložen od strane Winkler-a, 1867, karakteriše tlo kao seriju međusobno nepovezanih linearno-elastičnih opruga, zbog čega su deformacije samo na mestu gde postoji opterećenje. Očigledan nedostatak ovog modela je odsustvo kontinuiteta, a realno tlo se do određene mere može smatrati kontinualnom sredinom, u kojoj se uticaj opterećenja širi obrnuto proporcionalno nekom stepenu odstojanja. Drugi nedostatak modela je zavisnost modula reakcije tla od oblika i dimenzija opterećene površine. Sa teorijskog stanovišta, model elastičnog kontinuuma bolje opisuje ponašanje tla zbog kontinualne prirode tla. Međutim, uprkos pomenutim nedostacima, model zasnovan na modulu reakcije tla se u velikoj meri i dalje koristi za praktične proračune u fundiranju. Razlog tome leži u jednostavnoj analizi i mogućnosti uvođenja raznih faktora kao što su nelinearnost, promena krutosti sa dubinom, uslojenost. Osim toga, u postupku određivanju modula reakcije tla, stečeno je veliko iskustvo tokom višedecenijske primene na praktične probleme i postoji velik fond različitih korelacija za određivanje modula reakcije u funkciji rezultata standardnih geomehaničkih ispitivanja.

U radu je izvedena korelacija koja bazira na rezultatima statičke ili standardne penetracije i prvenstveno se odnosi na krupnozrne/nevezane materijale, kao što su čisti peskovi i pesak sa manjom primesom finih frakcija, odnosno prašine i gline.

Smatrajući da deformabilnost peska zavisi od efektivnog vertikalnog napona i zbijenosti, Terzaghi (1955)^[1] je predložio linearnu zavisnost između horizontalnog modula reakcije tla k_h i gradijenta modula reakcije n_h duž omotača šipa, u obliku:

$$k_h = n_h \left(\frac{z}{d} \right) \quad (1)$$

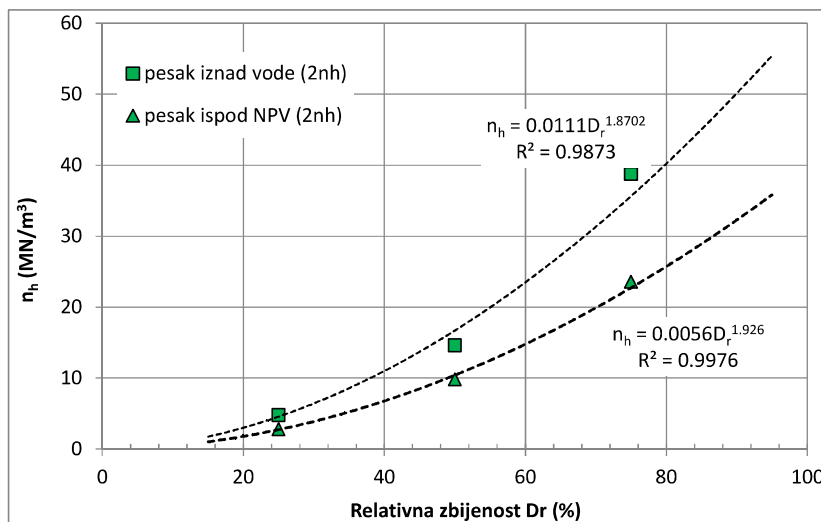
U gornjoj jednačini, z je dubina od površine terena u kojoj se traži modul reakcije tla a d je dimenzija upravno na pravac dejstva horizontalne sile. Za statička opterećenja Terzaghi je gradijent modula reakcije prikazao u funkciji relativne zbijenosti D_r peska, prema tabeli:

Табела 1. Варијација n_h у функцији релативне збијености (Terzaghi, 1955)

Релативна збијеност D_r (%)	Растресит (15-35%)	Средње збијен (35-65%)	Збијен (65-85%)
n_d (MN/m ³) за сув песак	2.5 (5)**	7.5 (15)	20.0 (40)
n_d (MN/m ³) за потопљен песак	1.5 (3)	5.0 (10)	12.5 (25)

Већи број аутора је на основу пробног оптерећења шипова хоризонталном силом, показао да су величине n_h које је предложио Terzaghi врло конзервативне и да се могу повећати за најмање 2, до чак 5 пута. R.F.Scott (1981)^[2], предлаже да се за прораčун хоризонтално оптерећених шипова, усвоје вредности модула реакције тла који су двоstrуко већи од оних које предлаже Terzaghi. На бази пробног оптерећења шипова у средње збијеном до збијеном потопљеном песку, Reese, Cox и Koop (1974)^[3] предлажу вредности које су 3 пута веће од Terzaghiјевих. **У табели 1 су у заградама приказане двоstrуке вредности.

У том смислу, на слици 1 је дат графички приказ зависности између удвоstrученог градијента модула реакције тла и релативне збијености. Интерполација између тачака је извршена степеном функцијом при чему су добијени врло високи коефицијенти корелације $R^2=0.9873-0.9976$.

Слика 1. Варијација n_h у функцији релативне збијености

Једначине интерполваних функција између модула реакције тла n_h и релативне збијености песка (Слика 1) изнад и испод нивоа подземне воде, гласе:

$$n_h = 0.0111D_r^{1.870} \quad , \quad n_h = 0.0056D_r^{1.926} \quad (2)$$

За практичну примену, потребно је одредити релативну збијеност песка дуж омотача шипа. У ту сврху се могу искористити постојеће корелације између релативне збијености и резултата

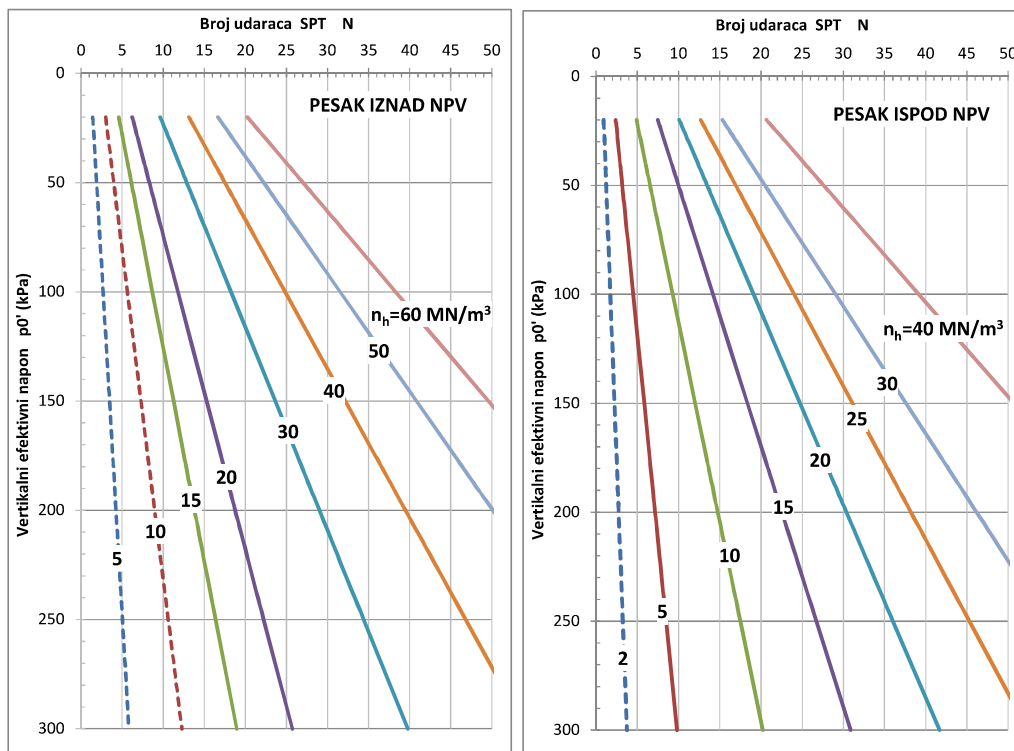
opita standardne (SPT) ili statičke penetracije (CPT). Relativna zbijenost peska (Gibbs i Holtz, 1979)^[4] u funkciji efektivnog vertikalnog napona p_0' i broja udaraca N , glasi:

$$D_r \approx 100 \left(\frac{N}{0.23p_0' + 16} \right)^{0.5} \quad (3)$$

Kada se jednačina (3) uvrsti u izraz za gradijent modula reakcije tla u funkciji relativne zbijenosti (2), za pesak iznad i ispod nivoa podzemne vode, dobija se sledeći izraz:

$$n_h \approx 61.1 \left(\frac{N}{0.23p_0' + 16} \right)^{0.935}, \quad n_h \approx 39.8 \left(\frac{N}{0.23p_0' + 16} \right)^{0.096} \quad (4)$$

Jednačina (4) se može grafički prikazati u sledećem parametarskom obliku (Slika 2) :



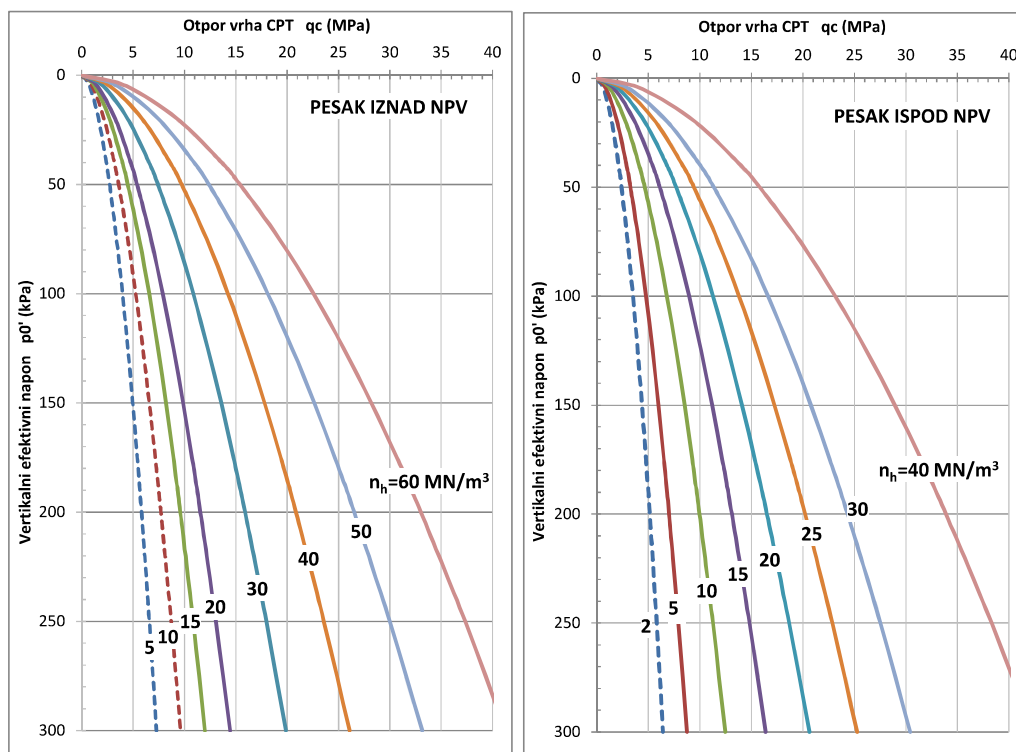
Slika 2. Varijacija n_h u funkciji SPT i efektivnog vertikalnog napona
 Relativna zbijenost peska (Bellotti i dr.1989, Lancellotta 1995)^[5] za efektivni vertikalni napon, koeficijenta bočnog pritiska K_0 i otpor konusa penetrometra q_c glasi:

$$D_r \approx 42 \cdot \ln \left(\frac{q_c}{248 (K_0 p_0')^{0.55}} \right) \quad (5)$$

Kada se jednačina (3) uvrsti u izraz za gradijent modula reakcije tla u funkciji relativne zbijenosti (2), za pesak iznad i ispod nivoa podzemne vode i ako se pretpostavi koeficijent bočnog pritiska $K_0 \approx 0.5$ (nema efekta zbijanja ili prekonsolidacije), dobija se sledeći izraz:

$$n_h \approx 12.1 \left[\ln \left(\frac{q_c}{169.4 p_0'^{0.55}} \right) \right]^{1.870}, \quad n_h \approx 7.5 \left[\ln \left(\frac{q_c}{169.4 p_0'^{0.55}} \right) \right]^{1.926} \quad (6)$$

Jednačina (6) se može grafički prikazati u sledećem parametarskom obliku (Slika 3):

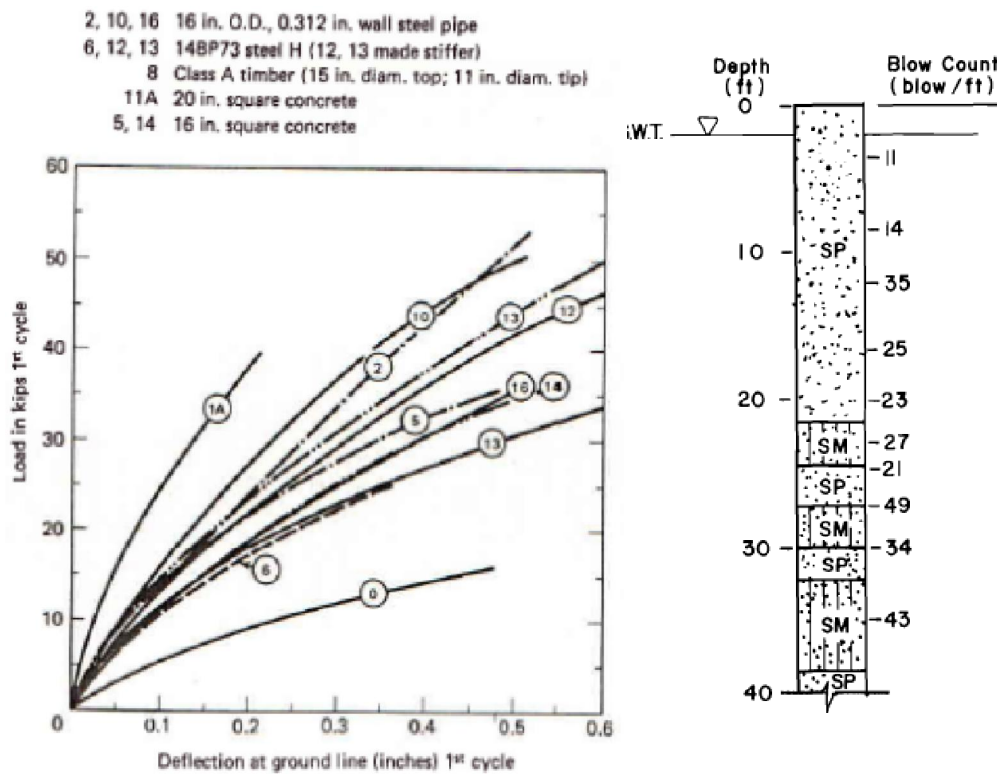


Slika 3. Varijacija n_h u funkciji CPT i efektivnog vertikalnog napona

Imajući u vidu uvedene pretpostavke i tačnost ulaznih podataka u jednačinama (4) i (6), dijagrami na slici 2 i 3 se mogu koristiti za približnu procenu gradijenta modula reakcije tla u funkciji rezultata penetracionih ispitivanja, a indirektno i modula reakcije tla duž omotača šipa.

3. TEST KORELACIJE NA PRIMERU PROBNOG OPTEREĆENJA

Uprkos činjenici da terenski opit probnog opterećenja daje najpouzdanije rezultate, njihov broj u stručnim publikacijama je relativno mali. Na slici 4. su prikazani rezultati ispitivanja horizontalnih probnih opterećenja šipova (Arkansas River tests, Barry J. Hezer and Lymon C. Reese, 1979)^[6]. U tabeli 2, su na osnovu prikazane metode i rezultata SPT izračunati gradijenti modula reakcije i modula reakcije tla po dubini.

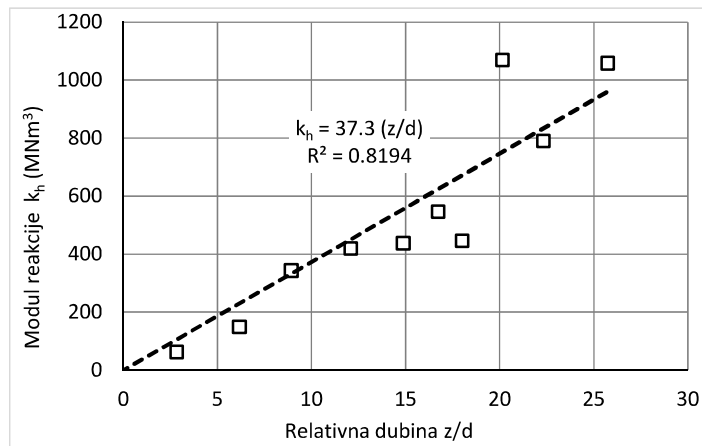


Slika 4. Rezultati horizontalnog probnog opterećenja šipova i geomehanički profil

Tabela 2. Varijacija računski određenog gradijenta modula u funkciji dubine

z (ft)	z (m)	N	p'_0 (kN/m ²)	n_h (MN/m ³)	k_h (MN/m ³)
3.8	1.2	11	18.2	22.2	39.6
8.3	2.5	14	31.8	24.4	94.9
12.0	3.7	25	43.0	38.5	216.9
16.0	5.0	25	55.8	34.7	264.7
20.0	6.1	23	67.1	29.5	276.6
22.5	6.9	27	74.7	32.7	344.8
24.2	7.4	21	79.8	24.8	281.5
27.1	8.3	49	88.6	53.1	674.8
30.0	9.2	34	97.3	35.4	498.8
34.6	10.6	43	111.2	41.1	667.8

Na osnovu promene modula reakcije tla po dubini (Slika 5), interpolacijom je određen prosečan gradijent modula reakcije tla, koji iznosi 37.3 MN/m^3 .

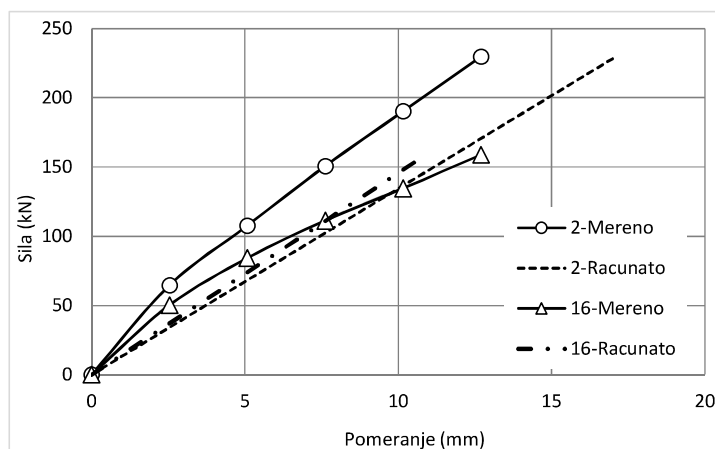


Slika 5. Određivanje prosečnog gradijenta modula reakcije tla

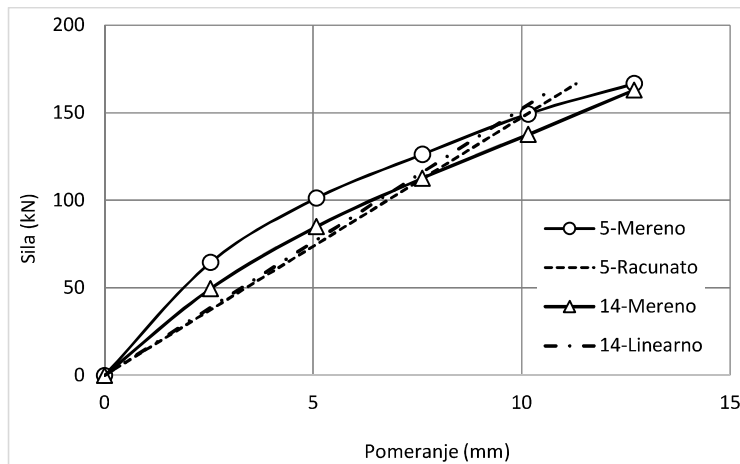
Na osnovu prosečnog gradijenta modula reakcije tla od 37.3 MN/m^3 i na osnovu podataka iz tabele 3, izvršen je proračun pomeranja šipa približnom/numeričkom metodom (metoda konačnih razlika), mada se zbog linearizovanosti funkcije $k_h(z)$, proračun može izvršiti i analitički (Barber, 1953)^[7]. Rezultati proračuna su prikazani grafički na slici 5 i 6.

Tabela 3. Geometrijski i materijalni podaci o ispitivanim šipovima

Ozn. šipa	Način ugradnje	Poprečni presek	Materijal šipa	e (m)	d (m)	L (m)	EI (MNm^2)	H (kN)
2	pobijeni	kružni	čelični	0.1	0.41/0.39	16.2	41.3	229.7
16	utisnuti	kružni	čelični	0	0.41/0.39	16.2	41.3	158.8
5	pobijeni	kvadratni	AB	0	0.41	15.6	49.5	166.6
14	pobijeni	kvadratni	AB	0	0.41	15.6	49.5	163.0



Slika 5. Izmerena i računska sleganja šipova 2 i 16



Slika 5. Slika 5. Izmerena i računska sleganja šipova 5 i 14

4. ZAKLJUČAK

Veličina horizontalnog pomeranja šipa u sloju krupnozrnog tla (čisti peskovi i peskovi sa manjom primesom prašinate i glinovite frakcije) može se relativno jednostavno odrediti na osnovu rezultata opita standardne ili statičke penetracije. Ovi opiti su deo obaveznih i standardnih ispitivanja peska u geomehanici. Treba imati u vidu da su prikazani rezultati proračuna kao i kod drugih jednostavnih metoda vrlo približni, a pošto se ispitivanjem ne mogu obuhvatiti kompleksne osobine tla, insistiranje na složenijim modelima je uglavnom neopravdano. Autori su prikazanu metodu koristili više puta, pre svega pri fundiranju na šipovima u jezerskim i rečnim sedimentima peska i muljevitog peska. Na žalost, probna opterećenja na osnovu kojih bi se ocenila tačnost proračuna nisu vršena, pa je u ovom radu ocena tačnosti prikazanog postupka izvršena na osnovu rezultata postojećih publikovanih ispitivanja.

LITERATURA

- [1] Terzaghi, K (1995). Evaluation of Coeff. of Sub-grade Reaction. *Geot.*, vol.5:297.
- [2] Ronald F.Scott, (1981). *Foundation Analysis*. Prentice-Hall, Inc., page 257, 314.
- [3] Reese, L.C., Cox, W.R., and F.D.Koop, (1974). Analysis of Laterally-Loaded Piles in Sand. *Proc. 6th Annual Offshore Tech. Conf.*, Paper OTC 2080, 473.
- [4] Gibbs H.J. and Holtz W.G. (1979). Discussion of SPT and relative Density in Coarse Sand. *Journal of Geotechnical Engineering Division*. ASCE, Vol.105. No.GT3, 439-441.
- [5] Belloti R., Ghiona V.N., Jamiolkowski M, Lancellotta R. and Roberston P.K. (1989). Shear Strenght of Sand from CPT. 12 Int Conf. On SMFE, Vol.1, Rio de Janeiro, Voll, 179-184.

- [6] Barry J. Hezer and Lymon C. Reese, (1979). Analysis of single Piles under Lateral Loading. Report No. FHWA/TX-79/38+244-1. Page 115-126.
- [7] Barber, E.S. (1953). Discussion to paper by S.M. Gleser. ASTM, STP 154:96-99.

SUBGRADE REACTION FOR THE DESIGN OF LATERALLY LOADED PILE

Summary: *When dimensioning piles predominantly loaded by horizontal forces (marinas, harbors, costal walls, deep excavations) it is necessary to perform a calculation of the displacement (SLS) in conjunction to calculations by limit state method (ULS – according to Eurocode). The main problem associated with calculation of displacement is determination of soil deformability parameter, particularly when the subject soil is made of aluvial sediments (sands, soft clay and like). This paper presents a calculation method for the determination of horizontal modulus of soil along the pile mantle, on the basis of the result of static (CPT) and standard penetration tests (SPT). Calculation of horizontal displacement due to the heterogeneity of the layers is typically performed numerically using the finite difference or finite element methods.*

Keywords: *laterally loaded pile, horizontal subgrade reaction*