

Maciej STĘCZNIIEWSKI, Kazimierz GWIZADAŁA
Politechnika Gdańska

OBLICZANIE NOŚNOŚCI I OSIADANIA PALI POJEDYNCZYCH NA PODSTAWIE BADAŃ SONDĄ STATYCZNĄ CPT

Streszczenie. Omówiono metodę obliczania nośności i osiadania pali z uwzględnieniem bezpośredniego wykorzystania wyników badań sondą statyczną CPT. Dla oceny krzywej osiadania zastosowano funkcje transformacyjne.

Przedstawiono analizę wykorzystując wyniki próbnych obciążeń statycznych pali. Zaproponowane korelacje zostały zweryfikowane przy wykorzystaniu procedury weryfikacji hipotez statystycznych.

CALCULATION OF BEARING CAPACITY AND SETTLEMENTS OF SINGLE PILES BASED ON CPT TESTS

Summary. The method of calculation of bearing capacity and settlements of piles on the basis of direct use of CPT test results is presented. For the determination of load-settlement curve, up to ultimate load, the load-transfer functions' method is used.

The filed investigations covered loading tests and CPT testing made in the area of piling. The correlations obtained were next verified using verification procedure for statistical hypotheses.

1. Wstęp

Coraz częściej do oceny warunków geotechnicznych w podłożu gruntowym wykorzystywana jest sonda CPT (tzw. test statycznego sondowania lub test statycznej penetracji). Możliwe jest głębokie rozpoznanie cech podłoża, co ma szczególne znaczenie w przypadku fundamentów posadowionych na palach. Sonda statyczna pozwala na bezpośredni pomiar oporu pod stożkiem q_c oraz tarcia na pobocznicę tulei czarnej f_s . Analiza i interpretacja uzyskanych wyników badań jest podstawą do opracowania korelacji pozwalających na wyznaczenie parametrów wytrzymałościowych gruntu oraz nośności i odkształcalności podłoża [1].

Możliwe jest również opracowanie empirycznych korelacji, pozwalających wyznaczyć graniczny opór pod podstawą pala i na jego pobocznicę [2, 3, 4, 5].

W artykule scharakteryzowano metodę służącą do określania nośności pali na podstawie wyników z badań sondą CPT. Pozwala ona na wyznaczenie nośności granicznej na pobocznicę i pod podstawą pala oraz zbudowanie pełnej krzywej osiadania pala przy wykorzystaniu odpowiednio dobranych funkcji transformacyjnych.

Proponowana metoda została opracowana na podstawie terenowych badań pali, które obejmowały próbne obciążenia w skali naturalnej oraz sondowania sondą CPT wykonane w miejscu ich planowanego posadowienia. Wykorzystano badania dla 94 pali Vibro-Fundex, Vibrex i wierconych wielkośrednicowych posadowionych w zróżnicowanych warunkach gruntowych.

Wyniki badań, na podstawie których ustalono założenia do metody, zostały poddane wnioskowaniu statystycznemu [6, 7]. Obejmowało ono dwie zasadnicze procedury: estymację parametrów oraz weryfikację hipotez statystycznych.

Estymację parametrów, czyli szacowanie wartości oczekiwanej, wariancji i odchylenia standardowego przeprowadzono metodą przedziałów ufności przy deklarowanym prawdopodobieństwie (poziomie ufności).

Uzyskane w metodzie korelacje zostały zweryfikowane przy wykorzystaniu procedury weryfikacji hipotez statystycznych. Obejmowała ona sprawdzenie założeń o poziome badanych parametrów (hipotezy parametryczne) oraz kształcie rozkładów (hipotezy nieparametryczne). Weryfikację hipotez przeprowadzono za pomocą testów istotności oraz testów zgodności przy deklarowanym prawdopodobieństwie (poziomie istotności).

Szacowanie parametrów liniowych i nieliniowych funkcji regresji przeprowadzono wykorzystując analizę regresji. W celu ustalenia wpływu istotnych czynników na parametry funkcji transformacyjnych przeprowadzono analizę regresji wielokrotnej (budując macierze współczynników korelacji par oraz macierze korelacji cząstkowych).

2. Określanie nośności granicznej pali

Proponowana metoda obliczeń nośności pojedynczego pala wykorzystuje statyczny wzór na nośność graniczną pala. Do bezpośredniego określenia nośności granicznej wykorzystuje się opór q_c pod stożkiem sondy statycznej CPT (rys. 1).

$$R_u = R_{bu} + R_{su} = A_b \cdot q_{bu} + \sum A_{si} \cdot q_{sui} \quad [\text{MN}] \quad (1)$$

$$q_{bu} = \psi_1 \cdot \bar{q}_c \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

$$q_{sui} = \frac{\bar{q}_{csi}}{\psi_{2i}} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

gdzie:

R_u – obciążenie graniczne w głowicy pala [MN], odpowiadające umownemu osiadanu podstawy pala,

R_{bu} – graniczny opór gruntu pod podstawą pala [MN],

R_{su} – graniczny opór gruntu na poboczniczy pala [MN],

q_{bu} – jednostkowy, graniczny opór gruntu pod podstawą pala [MPa],

\bar{q}_c – uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w strefie przy podstawie pala [MPa], rys. 1,

q_{sui} – jednostkowy, graniczny opór gruntu na poboczniczy pala w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [MPa],

\bar{q}_{csi} – uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej [MPa], rys. 1,

A_b – powierzchnia podstawy pala [m^2],

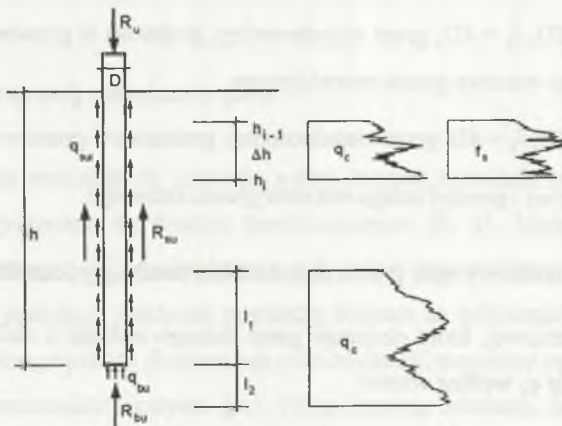
A_s – powierzchnia poboczniczy pala [m^2],

ψ_1 – współczynnik nośności podstawy,

ψ_{2i} – współczynnik nośności poboczniczy w i-tej warstwie,

Δh – miąższość warstwy obliczeniowej [m], rys. 1,

h – zagłębienie pala w gruncie [m], rys. 1.



Rys. 1. Założenia do obliczeń nośności pala na podstawie badań sondą statyczną CPT
Fig. 1. Calculation scheme of pile bearing capacity based on CPT test

Wyznaczenie nośności granicznej według wzoru (1) sprowadza się do określenia jednostkowego, granicznego oporu pod podstawą pała na podstawie empirycznej korelacji pomiędzy wartościami q_{bu} i \bar{q}_c oraz do określenia jednostkowego oporu na pobocznicę pała przy wykorzystaniu empirycznej korelacji pomiędzy wartościami q_{sui} i \bar{q}_{csi} .

2.1. Jednostkowe, graniczne opory gruntu

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy w strefie przy podstawie pała \bar{q}_c , określany jest według wzoru:

$$\bar{q}_c = \frac{1}{l_1 + l_2} \int_{h-l_1}^{h+l_2} q_c(h) dh \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Zasięg stref l_1 i l_2 (rys. 1) określany jest w proponowanej metodzie na podstawie schematów zależnych od ułożenia warstw gruntu w okolicy podstawy pała. Wyróżniono trzy schematy:

– I schemat: $l_1 = 4D$, $l_2 = 1D$;

Ia – grunt jednorodny,

Ib – grunt niejednorodny, podstawa w gruncie mocniejszym, powyżej zalega warstwa gruntu słabszego,

Ic – przypadek szczególny schematu I: podstawa w gruncie mocnym, powyżej zalega warstwa gruntu nienośnego (namuł, torf). W takim przypadku zasięg strefy l_1 nie obejmuje gruntu nienośnego.

– II schemat: $l_1 = 2D$, $l_2 = 4D$; grunt niejednorodny, podstawa w gruncie słabszym, powyżej zalega warstwa gruntu mocniejszego.

– III schemat: $l_1 = 4D$, $l_2 = 4D$; grunt niejednorodny, podstawa w gruncie mocniejszym, powyżej i poniżej zalega warstwa gruntu słabszego.

Uśredniony, jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy \bar{q}_{csi} , określa się w obrębie i-tej warstwy obliczeniowej, która obejmuje grunt jednego rodzaju o zbliżonych wartościach oporów stożka sondy q_c według wzoru:

$$\bar{q}_{csi} = \frac{1}{\Delta h} \int_{h_{i-1}}^{h_i} q_c(h) \cdot dh \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

2.2. Współczynnik nośności podstawy

Współczynnik nośności podstawy ψ_1 dla pali Vibro-Fundex i Vibrex określony jest za pomocą funkcji (ψ_1 od \bar{q}_c), którą przyjęto na podstawie doboru odpowiedniego modelu funkcji regresji. Rozpatrzono liniową funkcję regresji prostej oraz nieliniowe funkcje regresji prostej, które bezpośrednio lub poprzez logarytmowanie mogą być transformowane w postaci liniowej funkcji regresji prostej. Przyjęto funkcję potęgową, która miała najwyższy współczynnik korelacji, najwyższy poziom determinacji oraz najmniejszą funkcję straty (przyjętą w postaci sumy kwadratów odchyłeń reszt).

W przypadku pali Vibrex współczynnik ψ_1 wyznaczony na podstawie wspólnej zależności dla pali Vibro-Fundex i Vibrex należy dodatkowo zwiększyć o 10%, co wynika z nieco innej technologii wykonania pala i potwierdzone zostało na podstawie analizy weryfikacyjnej przy wykorzystaniu współczynników zgodności, określających stosunek wartości obliczonych do pomierzonych.

2.3. Współczynnik nośności poboczniczy

Współczynniki nośności poboczniczy ψ_2 przyjęto w postaci liniowych funkcji regresji prostej (ψ_2 od \bar{q}_{cs}) w zależności od rodzaju pala i gruntu.

W celu oceny statystycznej istotności współczynnika regresji i wyrazu wolnego przeprowadzono szacowanie parametrów liniowej funkcji regresji przy wykorzystaniu krytycznego poziomu istotności ustalonego na podstawie statystyki t-Studenta.

3. Określanie krzywej osiadania pala

W proponowanej metodzie do ustalenia pełnej krzywej osiadania pala w zależności od obciążenia wykorzystywane są funkcje transformacyjne [8, 9]. Mają one zastosowanie w przypadku sprężystego pala posadowionego w dowolnie uwarstwionym gruncie. Są to krzywoliniowe funkcje opisujące zależność pomiędzy oporem na poboczniczy pala a przemieszczeniem jego dowolnego punktu (krzywa t - z) oraz zależność pomiędzy oporem pod podstawą pala a jej przemieszczeniem (krzywa q - z). Pełną krzywą osiadania można zbudować na podstawie znajomości funkcji t - z i q - z oraz odkształcalności własnej pala.

Dla pobocznicy pała przyjęto funkcję potęgową:

$$t = q_m \cdot \left(\frac{z}{z_v} \right)^\alpha, \text{ dla } z \leq z_v \quad (6)$$

gdzie:

t – opór pobocznicy,

z – przemieszczenie pobocznicy,

z_v – przemieszczenie pała, przy którym następuje mobilizacja maksymalnych oporów tarcia na pobocznicy (określone jako procent średnicy trzonu pała).

Współczynnik α , będący wykładnikiem funkcji potęgowej t - z dla pobocznicy, ustalono wstępnie w funkcji rodzaju pała i gruntu. Po wydzieleniu grup pali, dla których pobocznica posadowiona była w zbliżonych warunkach gruntowych, ustalono wartości średnie współczynników α . W celu ustalenia, czy różnice między wartościami średnimi dla grup wynikają z różnego rodzaju pali i warunków gruntowych, czy też spowodowane są czynnikiem losowym przeprowadzono procedurę weryfikacji hipotez parametrycznych. Przeprowadzono ocenę istotności wartości średnich za pomocą testu t-Studenta oraz ocenę istotności wariancji za pomocą testu Fishera-Snedecora.

W celu zwiększenia dokładności metody (poprzez zmniejszenie rozrzutu wokół wartości średniej) ustalono wpływ istotnych czynników na wartość α przy wykorzystaniu regresji wielokrotnej. Ważny był dobór zmiennych objaśniających, które powinny być statystycznie istotnie powiązane ze zmienną objaśnianą, którą w tym przypadku był współczynnik α i jednocześnie nie powinny być statystycznie istotnie powiązane ze sobą. W związku z tym budowano macierze współczynników korelacji par zmiennych i eliminowano te zmienne objaśniające, których współczynniki korelacji były nieistotne dla powiązań ze zmienną objaśnianą (współczynnikiem α) oraz istotne dla powiązań między zmiennymi objaśniającymi (w przypadku budowy funkcji regresji wielorakiej).

Ponieważ współczynniki korelacji będące miarą współzmienności nie zawsze są miarą rzeczywistej zależności pomiędzy zmiennymi, dodatkowo budowano macierze korelacji cząstkowych, pozwalające wykryć ukryte zależności pomiędzy zmiennymi oraz wykazać zależności pozorne (korelacje cząstkowe wyznaczają korelacje pomiędzy parami zmiennych przy kontrolowaniu pozostałych zmiennych).

Do analizy, jako czynniki mogące mieć istotny wpływ na α , przyjmowano parametry łatwo dostępne na etapie projektowania. Dla poszczególnych grup pali (wydzielonych w

funkcji rodzaju pala i warunków gruntowych posadowienia poboczniczy), pod uwagę brane były parametry geometryczne pali i ich kombinacje oraz nośności graniczne pali (uzyskane na podstawie wyników z badania sondą CPT) i ich kombinacje.

Dla podstawy pala przyjęto funkcję potęgową:

$$q = q_{bv} \cdot \left(\frac{z}{z_f} \right)^\beta, \text{ dla } z \leq z_f \quad (7)$$

gdzie:

- q – opór podstawy,
- z – przemieszczenie podstawy,
- z_f – przemieszczenie podstawy pala, przy którym następuje maksymalna mobilizacja oporów pod podstawą (określone jako procent średnicy podstawy pala).

Współczynnik β , będący wykładnikiem funkcji potęgowej q - z dla podstawy, ustalono w taki sposób, jak współczynnik α (przy uwzględnieniu w regresji wielokrotnej odpowiednich dla podstawy czynników mogących mieć istotny wpływ na β).

4. Praktyczne wykorzystanie metody do określania krzywej osiadania pali

Możliwość wykorzystania proponowanej metody do określenia nośności granicznej na podstawie wyników z badań sondą CPT oraz do prognozowania krzywej osiadania pali przedstawiono na rys. 2 do 5.

Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu programu PALOS [8, 10]. Uwzględniając rodzaj i stan gruntu oraz odkształcalność pala wyznaczono pełną zależność osiadania pala w zależności od obciążenia aż do obciążenia granicznego. Procedura obliczeń zakłada podzielenie pala na skończoną liczbę sprężystych, cylindrycznych elementów. Każdy element opisuje geometrię oraz materiał pala. Elementy pala współpracują w węzłach z gruntem poprzez krzywoliniowe funkcje t - z i q - z . Podział pala na elementy w przypadku funkcji t - z powinien uwzględniać zmiany średnicy pala, zmianę modułu odkształcenia pala na jego długości, uwarstwienie gruntu oraz zmianę oporów tarcia wraz z głębokością. Funkcja q - z powinna uwzględniać wpływ uwarstwienia gruntu w okolicy podstawy pala.

W celu zilustrowania metody przedstawiono przykładowe 4 pale (Vibro-Fundex i Vibrex), z uwzględnieniem różnych schematów uśredniania wyników oporów gruntu pod stożkiem sondy q_c .

Uśrednienie według schematu I:

- pal Vibro-Fundex długości 10.0 m, średnicy trzonu 0.457 m i średnicy podstawy 0.65 m, rys. 2,
- pal Vibrex długości 18.3 m, średnicy trzonu 0.457 m i średnicy podstawy 0.65 m, rys. 3,

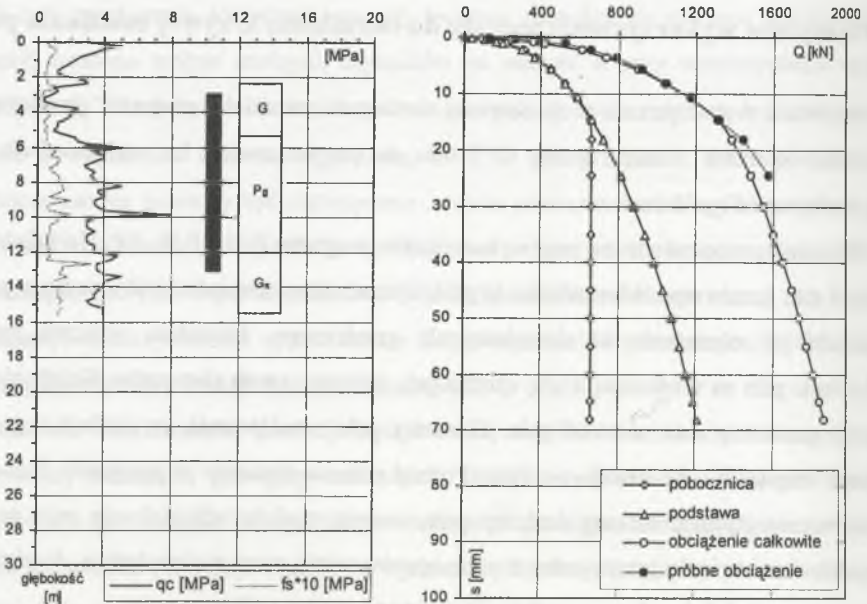
Uśrednienie według schematu II:

- pal Vibro-Fundex długości 22.0 m, średnicy trzonu 0.508 m i średnicy podstawy 0.65 m, rys. 4,

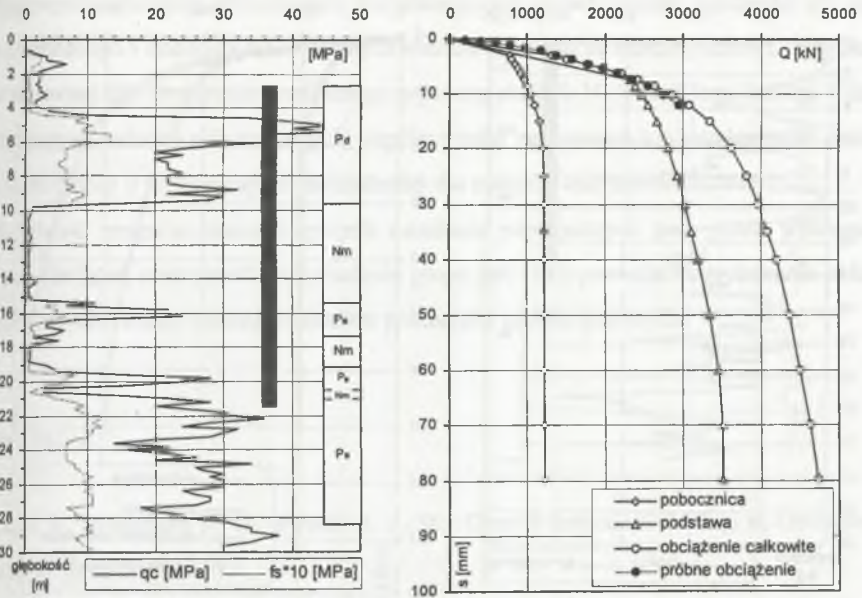
Uśrednienie według schematu III:

- pal Vibrex długości 13.0 m, średnicy trzonu 0.508 m i średnicy podstawy 0.62 m, rys. 5.

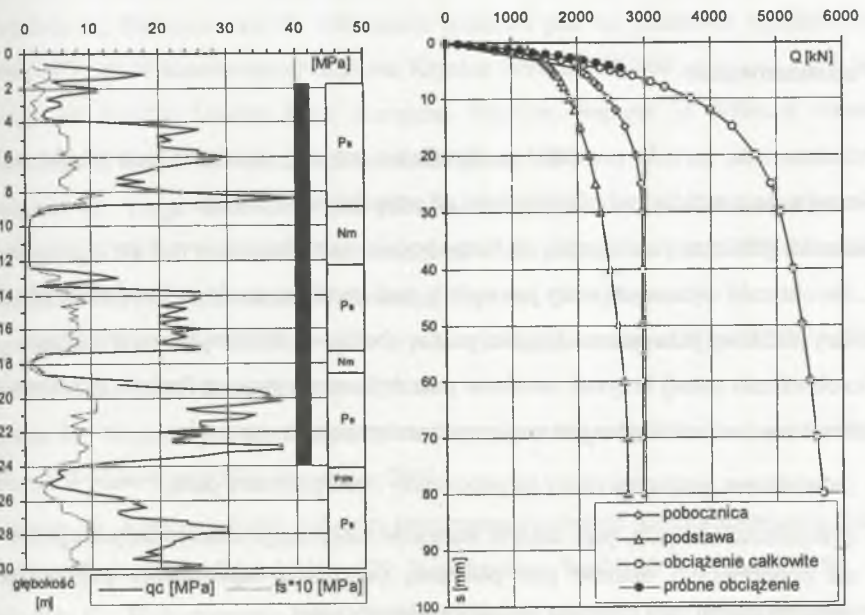
Na rysunkach, obok prognozowanej krzywej osiadania pala oraz rozdziału nośności na pobocznicy i podstawę pala, przedstawiono rzeczywistą krzywą osiadania uzyskaną na podstawie wyników próbnego obciążenia.



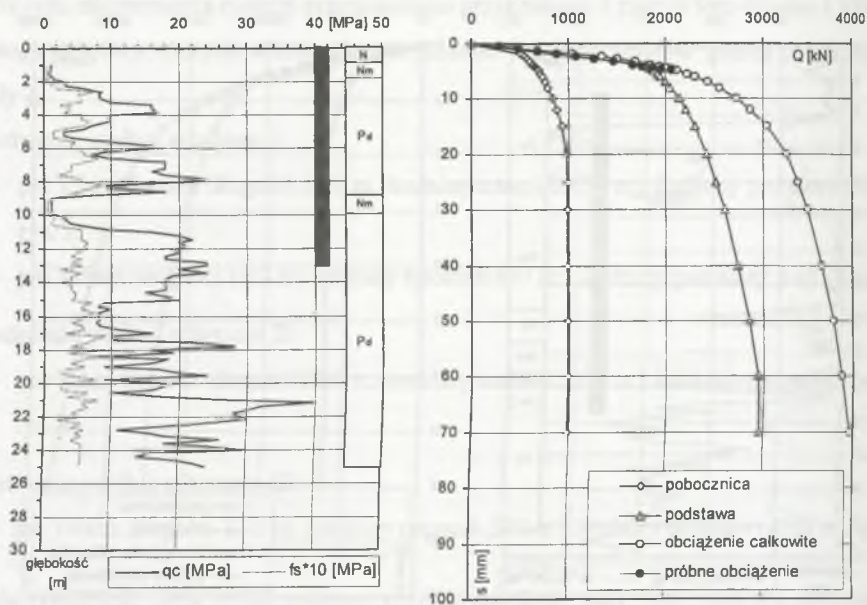
Rys. 2. Pal Vibro-Fundex, schemat I
Fig. 2. Vibro-Fundex pile, scheme I



Rys. 3. Pal Vibrex, schemat I
Fig. 3. Vibrex pile, scheme I



Rys. 4. Pal Vibro-Fundex, schemat II
Fig. 4. Vibro-Fundex pile, scheme II



Rys. 5. Pal Vibrex, schemat III

Fig. 5. Vibrex pile, scheme III

5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda pozwala na określenie krzywej osiadania pała aż do nośności granicznej wraz z możliwymi odchyleniami od wartości oczekiwanej.

Nośność graniczną pała określa się bezpośrednio na podstawie wyników z badania sondą CPT. Do obliczeń wykorzystywany jest opór q_c pod stożkiem sondy, odpowiednio uśredniony w okolicy podstawy pała oraz na długości pała w obrębie wydzielonych warstw gruntu.

Do określenia pełnej krzywej osiadania pała wykorzystywane są funkcje transformacyjne. Do ich wyznaczenia niezbędna jest znajomość następujących wartości:

- jednostkowe, graniczne opory na poboczniczy i pod podstawą pała,
- przemieszczenia pała, przy których następuje mobilizacja maksymalnych oporów tarcia na poboczniczy i oporów pod podstawą (określane odpowiednio poprzez procent średnicy trzonu pała i procent średnicy podstawy pała),
- wykładniki transformacyjnych funkcji potęgowych α i β (odpowiednie zależności korelacyjne, wykorzystujące wyniki badań sondą statyczną CPT, zostaną przedstawione w innej pracy).

W przeprowadzonych obliczeniach weryfikacyjnych współczynniki zgodności dla obciążenia granicznego i obciążeń dla wybranych wartości osiadań są bliskie jedności. Współczynniki zmienności dla obciążenia granicznego wynoszą około 0.10 (pale Vibro-Fundex Vibrex). Dla wybranych osiadań roboczych pali współczynniki zmienności nie przekroczyły wartości 0.20, co świadczy o wystarczającej dokładności dla obliczeń inżynierskich.

Możliwość prognozowania krzywych osiadania pojedynczych pali przed wykonaniem próbnych obciążeń oraz określenie osiadania grupy pali [11], pozwala na wykonanie obliczeń na etapie projektowania z uwzględnieniem podatności podpór palowych.

LITERATURA

1. Lunne T., Robertson P. K., Powell J. J. M.: Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Spon Press, 1997.
2. Gwizdała K., Stęczniewski M.: Charakterystyka metod określania nośności pali przy wykorzystaniu sondy statycznej CPT. Inżynieria Morska i Geotechnika. 1998, nr 6, s. 302-307.
3. Gwizdała K., Stęczniewski M.: Obliczanie nośności pali na podstawie wyników badań sondą CPT. XLIV Konferencja Naukowa, Krynica 1998, s. 153-160.
4. Design of Axially Loaded Piles European Practice, Reports of different countries. Proceedings of the ERTC3 seminar Brussels/Belgium, 1997.
5. Gwizdała K.: Large diameter bored piles in non-cohesive soils. Determination of the bearing capacity and settlement from results of static penetration test (CPT) and standard penetration test (SPT), Swedish Geotechnical Institute, 1984, Report No 26.
6. Luszniwicz A., Słaby T.: Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA. Teoria i zastosowania. C. H. Beck, Warszawa 2001.
7. Dobosz M.: Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
8. Gwizdała K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, nr 532, Budownictwo Wodne Nr 41, Gdańsk 1996.
9. Gwizdała K.: Wykorzystanie badań in situ do oceny nośności pali wielkośrednicowych. Konf. Naukowo-Techniczna, Mosty w drodze do XXI wieku, Gdańsk-Jurata 1997, s. 205-214.

10. Stęczniewski M.: Analiza nośności pali Vibro-Fundex posadowionych w gruntach spoiстых. I Krajowa Konf. Młodych Geotechników. Przegląd Naukowy, nr 20, SGGW, Warszawa 2001, s. 175-178.
11. Gwizdała K., Dyka I., Stęczniewski M.: Sondowanie statyczne w projektowaniu fundamentów palowych. XLVIII Konferencja Naukowa, Krynica 2002.

Recenzent: Prof. zw. dr hab. inż. Bohdan ZADROGA

Abstract

A method implementing CPT test results for the determination of pile's bearing capacity and settlements is presented. In the method proposed the shaft and base bearing capacities contribute to the determination of whole load-settlement curve making use of respectively chosen load-transfer functions.

The method has been elaborated on the basis of filed measurements of piles, which covered loading tests as well as CPT testing made in the area of piling. The analysis concerned Vibro-Fundex and Vibrex piles installed in diversified soil conditions.

The test results, which were used for the assumptions of the method proposed, have been elaborated statistically by estimation of method's parameters and verification of various statistical hypotheses.

The correlations obtained were next verified using verification procedure for statistical hypotheses. The procedure covered the examination of the assumptions regarding the levels of the parameters investigated (parametrical hypotheses) as well as the characters of its distributions (non-parametrical hypotheses). Estimations of the linear parameters and non-linear regression functions were carried out using regression analysis.

To determine the influence of most important factors on the parameters of load-transfer functions a multi-regression analysis was made (constructing the matrices of pairwise correlation coefficients together with matrices of partial correlations).