

Bogumił Wrana*, Bartłomiej Czado*

ZASTOSOWANIE WYNIKÓW TESTU CPT DO OCENY NOŚNOŚCI PAŁA

1. Wstęp

Sonda statyczna wciskana CPT (*Cone Penetration Test*) lub CPTU (*Cone Penetration Undrained*) jest przydatna w projektowaniu fundamentów pałowych. Parametry mierzone w czasie testu mogą być wykorzystane:

- pośrednio; na podstawie oporu q_c ustalamy inny parametr wskaźnikowy, np. stopień zagęszczenia I_D lub stopień plastyczności I_L , a następnie pośrednie korelacje pozwalają na ocenę oporów pod podstawą i oporu pobocznic pała;
- bezpośrednio; ustalamy bezpośrednie korelacje i zależności dla oporu pod podstawą i oporu pobocznic w funkcji mierzonych parametrów w teście statycznego sondowania.

Nośność pała zależy od wielu czynników, w tym:

- 1) od parametrów geometrycznych takich jak długość pała, przekrój i kształt;
- 2) od parametrów geotechnicznych gruntu oraz
- 3) od metody wykonania pała.

Metody wyznaczania nośności pała na siłę osiową można podzielić na trzy grupy:

- 1) Test statyczny nośności pała *in situ*. Test ten określa nośność pała na podstawie krzywej obciążenia–osiadania i dokładnie określa nośność pojedynczego pała. Wadą tego testu jest duży koszt wykonania i jest on rzadko wykonywany przed procesem projektowania obiektów budowlanych.
- 2) Metody obliczeń na podstawie badań laboratoryjnych. Metody te obarczone są dużym błędem, zatem są rzadko stosowane.
- 3) Metody obliczeń na podstawie badań polowych. Z pośród wielu metod badań polowych, w artykule rozważane są wyniki pomiarów sondą CPT i CPTU.

* Instytut Mechaniki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, Kraków

2. Oszacowanie nośności pali na podstawie wyników sondy CPT

Nośność graniczna pala jest sumą nośności głowicy pala Q_{base} (end-bearing capacity) oraz nośności poboczniczy Q_{shaft} (friction capacity):

$$Q_{ult} = Q_{base} + Q_{shaft} \quad (1)$$

$$Q_{base} = q_{base} A_{base} \quad (2)$$

$$Q_{shaft} = \sum_{i=1}^n q_{shaft,i} A_{shaft,i} \quad (3)$$

gdzie:

- q_{base} — jednostkowy opór podstawy pala [kPa],
- A_{base} — pole powierzchni podstawy pala [m²],
- $q_{shaft,i}$ — jednostkowy opór na poboczniczy pala w warstwie i -tej [kPa],
- $A_{shaft,i}$ — pole powierzchni poboczniczy w warstwie i -tej [m²].

Badania wykazały dużą zgodność wyników badań sondą CPT z nośnością pala w szczególności oporu na stożku q_c z nośnością podstawy pala oraz tarcie na tulei ciernej f_s z tarcie pala na poboczniczy (Salgado 2008). Sonda CPT może być traktowana jako sztywny pal w małej skali. Główną różnicą między sondą a palem jest obszar gruntu współdziałający z palem i sondą. Ogólne równania określające jednostkowy opór podstawy pala q_{base} oraz jednostkowy opór poboczniczy pala q_{shaft} na podstawie wyników badań sondą CPT można określić jako:

$$q_{base} = c_b q_{cb} \quad (4)$$

$$q_{shaft,i} = c_s q_{cs,i} \quad (5)$$

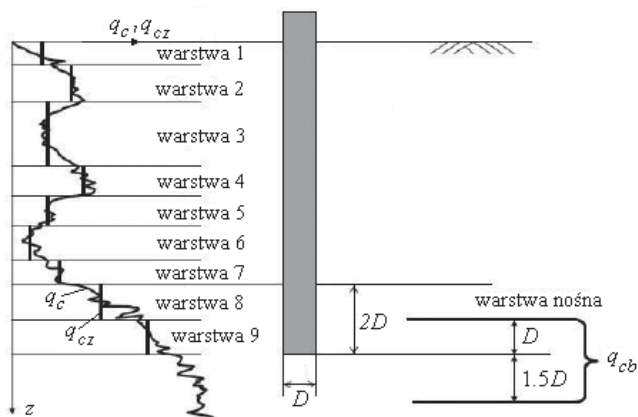
gdzie c_b oraz c_s są stałymi współczynnikami dla ustalonego rodzaju gruntu i technologii wykonywania pala. Wartości q_{cb} w równaniu (4) i q_{cs} w równaniu (5) są odpowiednie do głębokości pala.

Wartość q_{cb} w równaniu (4) jest wartością średnią w zakresie 1,0 D powyżej poziomu podstawy pala oraz 1,5 D poniżej poziomu podstawy pala (por. rys. 1) [1].

Profil gruntu powinien być podzielony na warstwy o podobnych właściwościach i wartościach pomierzonych CPT. Wartości współczynników oporu podstawy pala c_b przedsta-

TABELA 1
Wartości współczynników c_b oporu podstawy pala dla piasków [1]

| Typ pala | c_b | Autor |
|------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Pale przemieszczeniowe oraz H-pale | 0,35 do 0,5 0,4 0,51 ID do 1,02 | Chow (1997) Randolph (2003) Foye i inni (2006) |
| Pale wiercone | 0,23 do $\exp[-0,66 I_D]$ | Salgado (2004, 2006) |



Rys. 1. Typowy wykres q_c w miejscu usytuowania pala, proponowane warstwy uśrednienia dla pobocznicy q_{cs} oraz zakres warstwy nośności podstawy pala q_{cb}

wiono w tabeli 1 dla piasków, a dla gruntów spoistych w tabeli 2. Natomiast wartości współczynników tarcia na pobocznic c_s są trudniejsze do określenia, a w szczególności dla grupy pali wierconych. Wartości współczynników c_s przedstawiono w tabeli 3 dla piasków, a dla gruntów spoistych w tabeli 4.

TABELA 2

Wartości współczynników c_b oporu podstawy pala dla gruntów spoistych [1]

| Typ pala | c_b | Autor |
|------------------------|--|-------------------------|
| Pale przemieszczeniowe | 0,9 do 1,0 (iły miękkoplastyczne i plastyczne) | [1] |
| Pale wiercone | 0,35 (iły zwięzłe) | Price and Wardle (1982) |

TABELA 3

Wartości współczynników c_s tarcia na pobocznicy dla piasków [1]

| Typ pala | c_b | Autor |
|---------------------------|---|----------------------------|
| Pale przemieszczeniowe | 0,0040 dla piasku 0,0057 dla piasku pylastego 0,0069 dla piasku pylastego z iłem 0,0080 dla piasku ilastego z pyłem 0,0086 dla piasku pylastego | Aoki i Velloso (1975) |
| Pale nieprzemieszczeniowe | 0,0027 dla piasku 0,0037 dla piasku pylastego 0,0046 dla piasku pylastego z iłem 0,0054 dla piasku ilastego z pyłem 0,0058 dla piasku pylastego | Lopes i Laprovitera (1988) |
| Pale z rurą otwartą | 0,0015 do 0,003 dla IFR $\leq 0,60$ 0,0015 do 0,004 dla IFR ≤ 1 | Lee i inni (2003) |
| Pale z rurą zamkniętą | 0,004 do 0,006 dla ID $\leq 0,5$ 0,004 do 0,007 dla ID $\leq 0,7$ 0,004 do 0,009 dla ID $\leq 0,9$ | Lee i inni (2003) |

TABELA 4

Wartości współczynników c_{bs} tarcia na poboczniczy dla gruntów spoistych [1]

| Typ pala | c_b | Autor |
|---------------------------|---|----------------------------|
| Pale przemieszczeniowe | 0.017 dla iłu 0.011 dla iłu pylastego 0.0086 dla iłu pylastego z piaskiem 0.0080 dla iłu piaszczystego z pyłem 0.0069 dla iłu piaszczystego | Aoki i Velloso (1975) |
| Palenie przemieszczeniowe | 0.012 dla iłu 0.011 dla iłu pylastego 0.0046 dla iłu pylastego z piaskiem 0.0087 dla iłu piaszczystego z pyłem 0.0077 dla iłu piaszczystego | Lopes i Laprovitera (1988) |

Uwagi:

W literaturze poświęconej obliczeniu nośności pali na podstawie wyników badań sondą CPT występuje wiele propozycji zakresu uśrednienia wyników q_c przy obliczaniu jednostkowego oporu podstawy pala q_{cb} .

1. K. Gwizdała proponuje uśrednianie w obszarze 4 D powyżej poziomu podstawy pala i 1 D poniżej podstawy pala [2].
2. Eurokod PN-EN 1997-2 [3] podaje zakres uśrednienia 8 D powyżej poziomu podstawy pala i 0,8 D poniżej podstawy pala z wykresu q_r .
3. W pracy G. Cai i inni [4] Podano przegląd różnych propozycji określenia nośności podstawy pala i poboczniczy na podstawie badań sondą CPT prezentowane w latach 1975 do 2004.

3. Porównanie wyników

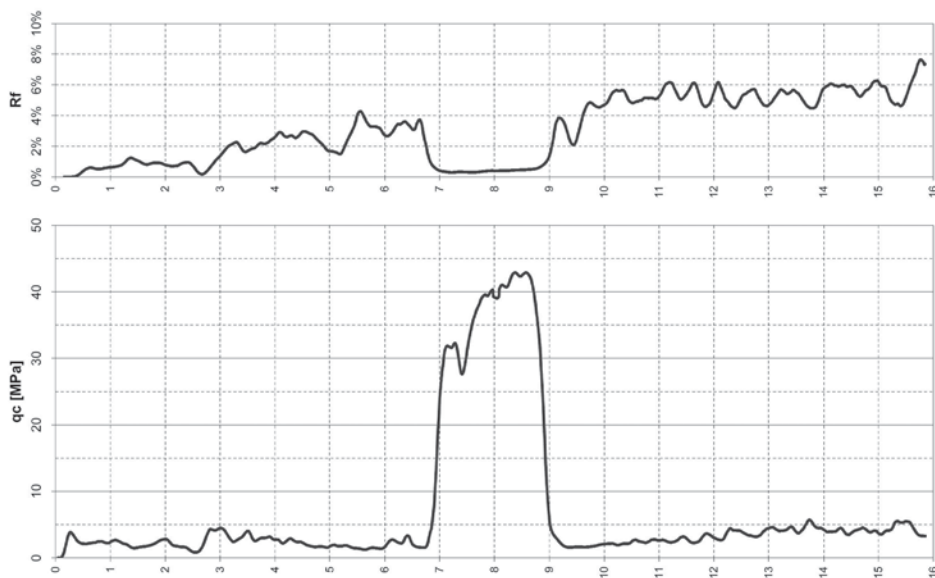
Dla porównania wartości nośności pala uzyskiwanej różnymi metodami wykonano obliczenia dla referencyjnego pala wierconego.

Obliczenia wykonano w oparciu o wyniki sondowania statycznego wykonanego przez zespół pracowników Zakładu Współdziałania budowli z Podłożem Politechniki Krakowskiej na poligonie badawczym w Zesławicach (N–E część Krakowa). W badaniu wykorzystano sondę Pagani TG63–150 z końcówką elektryczną CPTU. Pomierzono parametry: opór stożka q_c oraz tarcie na tulei czarnej f_s z rejestracją co 1 cm; obliczono parametr znormalizowany $R_f = f_s / q_c$. Wyniki badania przedstawiono na rysunku 2, a profil litologiczny badanego obszaru zestawiono w tabeli 5.

TABELA 5

Profil litologiczny badanego terenu

| Nr warstwy | Głębokość [m p.p.t.] | Nazwa i oznaczenie gruntu wg PN-EN ISO 14688 | Nazwa i oznaczenie gruntu wg PN-86/B-02480 |
|------------|----------------------|--|--|
| 1 | 0,00–0,50 | Organiczny — Humus (Or) | Humus (H) |
| 2 | 0,50–6,85 | Pył ilasty (clSi) Ił pylasty (siCl) | Gлина pylasta (Gπ), Gлина pylasta zwięzła (Gπz) |
| 3 | 6,85–9,00 | Piasek średni (MSa) | Piasek średni (Ps) |
| 4 | 9,00–15,90 | Ił (Cl) | Ił (I) |



Rys. 2. Wyniki sondowania statycznego (q_c , R_f) wykorzystane do obliczeń nośności pała referencyjnego

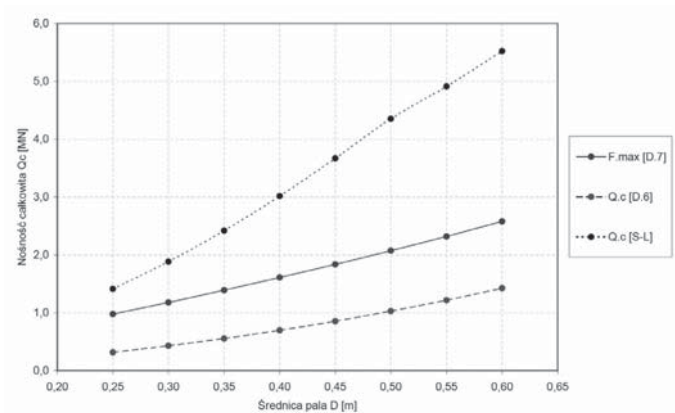
Nośność pała referencyjnego obliczono trzema sposobami: dwa z nich zaczerpnięto z normy Eurokod 7 [3] — zastosowano procedurę uproszczoną według Załącznika D.6 oraz metodę dokładniejszą wg Załącznika D.7 wspomnianej normy.

Trzeci sposób oparto o wzory zawarte w tabelach 1, 3 i 4: Salgado (2004, 2006) dla podstawy pała; Lopes i Laprovitera (1988) dla pobocznic pała.

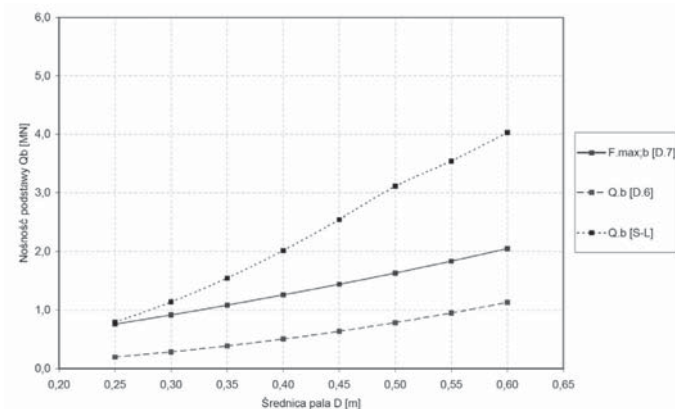
Geometria pała referencyjnego została określona w następujący sposób: podstawa pała została umieszczona w warstwie piasków średnich (warstwa nr 3) na głębokości 8,20 m p.p.t.. W czasie obliczeń uwzględniono pracę pobocznic pała począwszy od warstwy nr 2 (0,50 m p.p.t.), a same obliczenia przeprowadzono dla różnych średnic pała od 0,25 do 0,60 m.

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 3–5. Widoczne są tu różnice w oszacowaniu nośności pała wciskanego przy zastosowaniu różnych metod obliczeń. Metody normowe podane w EC7–2 dają wyniki znacznie niższe (a zatem bezpieczniejsze — należy przy tym zaznaczyć, że uzyskane wyniki są wartościami charakterystycznymi nośności).

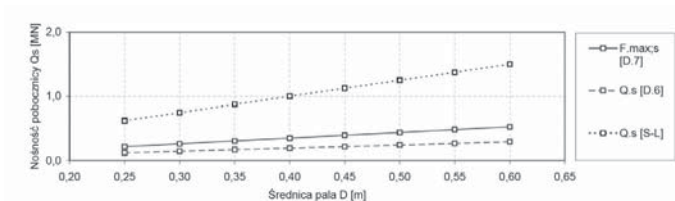
Znaczne zawyżenie nośności pobocznic pała uzyskanej metodą Lopes i Laprovitera (1988) w stosunku do metod opisanych w EC7–2 (rys. 5) może wynikać z faktu, iż norma w tym przypadku nakazuje uznanie warstw o $q_c < 2$ MPa za nienośne, a co za tym idzie pominięcie nośności pobocznic w tych warstwach, jak również warstwach zalegających powyżej.



Rys. 3. Nośność całkowita pala referencyjnego w funkcji średnicy trzonu pala: [D7] — Eurokod 7 [3] wg Załącznika D.7, [D6] — Eurokod 7 [3] wg Załącznika D.6, [S-L] — współczynniki podane w tabelach 1, 3 i 4



Rys. 4. Nośność podstawy pala referencyjnego w funkcji średnicy trzonu pala



Rys. 5. Nośność poboczny pala referencyjnego w funkcji średnicy trzonu pala

5. Wnioski

W artykule rozważane jest zagadnienie projektowania fundamentów palowych na podstawie wyników badań polowych wykonanych sondą statyczną CPT. Przedstawiono porów-

nianie nośności pali wierconych o stałej długości 8.2 m i średnicach 0.2 m do 0.65 m wykonanych w technologii CFA, a obliczonych na podstawie wzorów Eurokodu 7 [3] oraz na podstawie wzorów doświadczalnych podanych przez Purdue University w USA [1].

Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach nr 3–5. Porównując rezultaty obliczeń można stwierdzić, że:

- 1) Wyniki uzyskane metodami ujętymi w Eurokodzie 7 w załączniku D6 i D7 są niższe niż uzyskane metodą podaną przez Purdue University w USA [1], a zatem są „po stronie bezpiecznej” dla inżyniera projektanta.
- 2) Wyniki nośności uzyskane zgodnie z Eurokodem 7, załącznik D6 są niższe od wyników uzyskanych zgodnie z Eurokodem 7, załącznik D7. Różnica wynika z faktu, iż w załączniku D6 nakazuje się uznanie warstw o $q_c < 2$ MPa za nienośnej, a co za tym idzie pominięcie nośności poboczniczy w tych warstwach.

LITERATURA

- [1] Loukidis D., Salgado R., Abou-Jaoude G.: Assessment of Axially-Loaded Pile Dynamic Design Methods and Review of INDOT Axially-Loaded Design Procedure, Purdue University, Civil Engineering Joint Transportation Research Program, Final INDOT Report, 2008
- [2] Gwizdała K., Stęczniewski M., Dyka I.: Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczenia nośności i osiadań pali. Seminarium IBDM i PZWFS Fundamenty Palowe, Warszawa, 22 kwietnia 2009, s. 105–126
- [3] PN-EN 1997-2:2007, Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego, Załącznik D: Badania statyczną sondą stożkową bez pomiaru i z pomiarem ciśnienia wody w porach.
- [4] Cai G., Liu S., Tong L., Du G.: Assessment of Direct CPT and CPTU Methods for Predicting the Ultimate Bearing Capacity of Single Piles. Engineering Geology 104, 2009, pp. 211–222