

Wykorzystanie badań CPT do projektowania pali małych średnic formowanych świdrem ciągłym

Dr inż. Mariusz Wyroślak, dr inż. Rafał Ossowski
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Z punktu widzenia technologii wykonawstwa [9] pale wiercone o średnicy do 300 mm należy klasyfikować jako mikropale. Wydaje się, że jest to arbitralna granica podziału, bowiem w przypadku pali przemieszczeniowych za mikropale uznaje się pale o średnicy 150 mm. Zatem, kryterium podziału to nie tylko średnica, ale również technologia i przeznaczenie pala. Pale średnicy 300 mm można traktować jako mikropale, ale także jako pale klasyczne, dlatego w artykule mowa jest o palach małych średnic w odróżnieniu od normowego podziału [9]. Zastosowanie pali małych średnic jest szerokie. Mogą to być elemen-

ty posadowienia fundamentów, zakotwienia, zbrojenie gruntu pod nasypami lub stabilizacja osuwisk.

Pale małych średnic mogą przenosić znaczne siły osiowe, ale względnie niewielkie siły poziome. Przeważnie wykonywane są w projektach, które nie oddziałują znacząco na sąsiadujące obiekty oraz środowisko [2].

W artykule opisano przykład analizy nośności i osiadania pali małych średnic w określonych warunkach geotechnicznych, z uwzględnieniem parametrów wyznaczonych na podsta-

wie sondowań CPT, w przypadku pali wykonywanych świdrem ciągłym (jak pale CFA) o średnicy 300 mm.

NOŚNOŚĆ POJEDYNCZEGO PALA NA PODSTAWIE SONDOWANIA CPT

Procedury opisane w Eurokodzie 7 [7, 8] dają projektantowi kilka możliwości oszacowania nośności pala. Tego rodzaju analizę granicznego oporu pala w gruncie na obciążenie można wykonać na podstawie próbnego obciążenia statycznego pala, wyników badań gruntu oraz badania dynamicznego obciążenia pala [2, 3].

W artykule rozważono metodę oznaczania nośności pala na podstawie profilowania podłoża gruntowego za pomocą badania

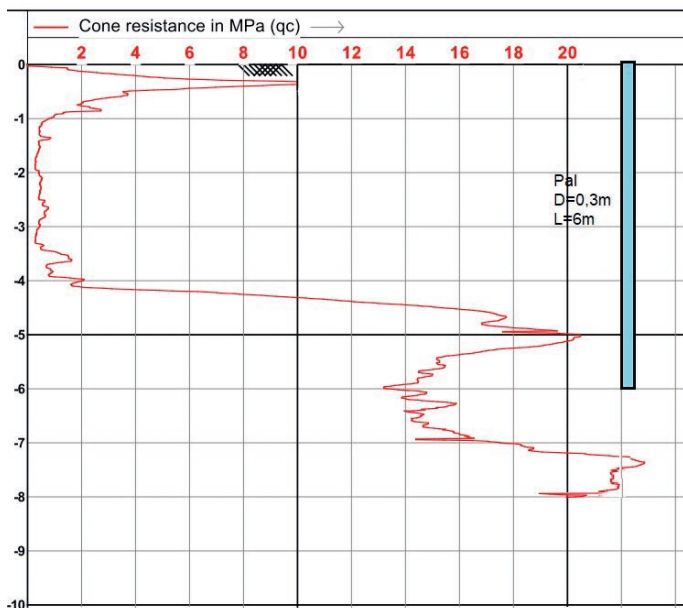
CPT. Opisane procedury obliczeniowe opierają się na belgijskich i francuskich doświadczeniach w kontekście norm EC7.

Algorytm postępowania, na końcu którego otrzymujemy wartość projektowej nośności pala $R_{c,d}$, można podzielić na pięć kroków obliczeniowych:

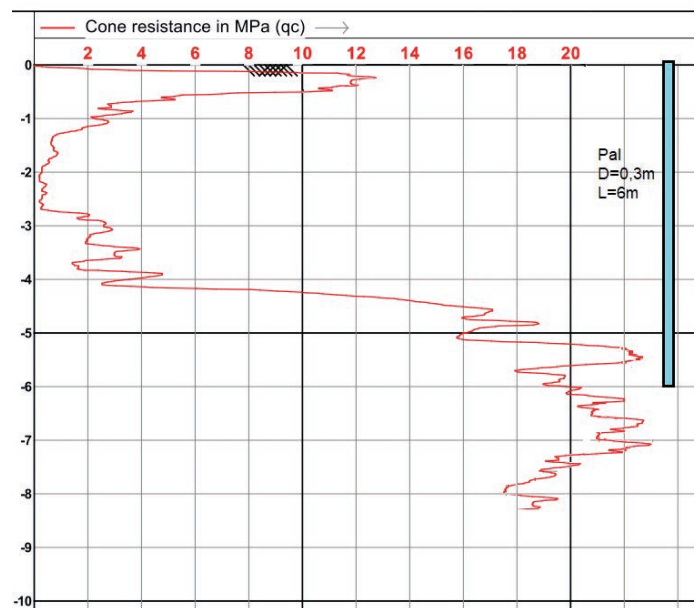
Krok 1

Wykonanie sondowań CPT w zaplanowanej liczbie punktów n . W analizowanym przypadku warunki gruntowe scharakteryzowano badaniami CPT w liczbie $n = 4$, które przedstawiono na rys. 1 ÷ 4.

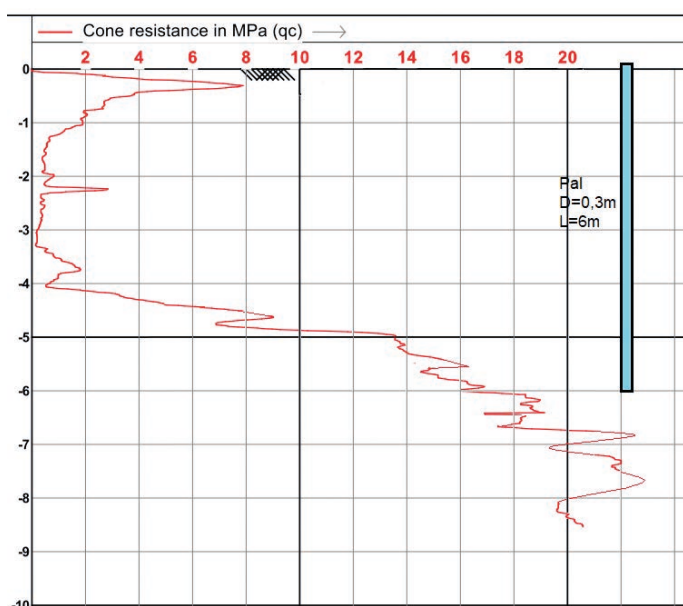
Sondowania CPT wykazały istnienie warstwy gruntów ściśliwych ($M_0 = 1,0$ MPa) o zróżnicowanej miąższości, ponad



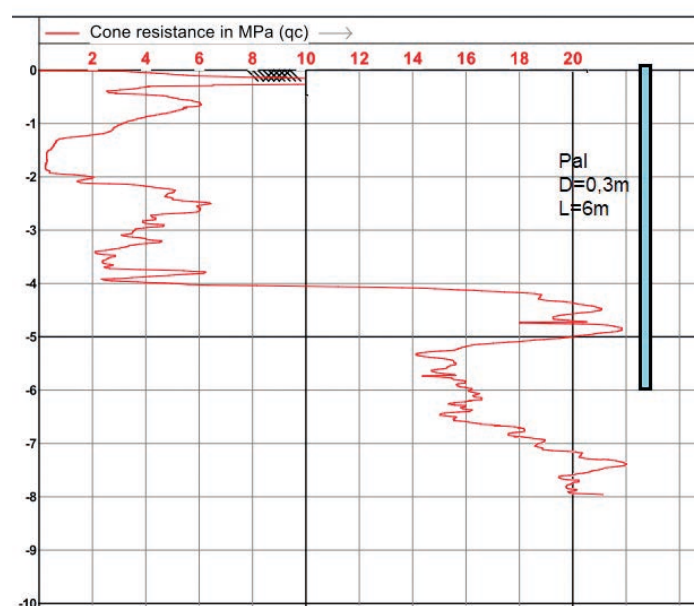
Rys. 1. Sondowanie CPT1



Rys. 3. Sondowanie CPT3



Rys. 2. Sondowanie CPT2



Rys. 4. Sondowanie CPT4

którą znajduje się warstwa nasypu niekontrolowanego. Istniejąca nasyp, jak również dodatkowo projektowany nasyp o miąższości około 1,0 m spowodują konsolidację warstwy ściśliwej. W tych warunkach można spodziewać się wystąpienia tarcia negatywnego na pobocznicach pała. Miąższości warstw z potencjalnym tarcieniem negatywnym zestawiono w tabl. 1.

Tabl. 1. Miąższość warstw z potencjalnym tarcieniem negatywnym

Profil	Przełot warstwy nasypu niekontrolowanego [m p.p.t.]	Przełot warstwy ściśliwej [m p.p.t.]
CPT1	0,0 – 1,0	1,0 – 4,0
CPT2	0,0 – 1,2	1,2 – 4,0
CPT3	0,0 – 1,2	1,2 – 2,8
CPT4	0,0 – 1,2	1,2 – 2,0

Tarcie negatywne wydaje się być problemem bardziej związanym z osiadaniami pała, to jest stanem granicznym użyteczności (SLS) niż stanem granicznym nośności (ULS) [5]. Badania próbnego obciążenia pała w warunkach z wymuszonym tarcieniem negatywnym i bez takiego obciążenia [6] wykazały znaczące różnice przebiegu krzywej $Q-s$, przy niewiele różniącym się obciążeniu granicznym (rys. 5).

Efekt tarcia negatywnego na pobocznicach pała występuje w przypadku konsolidacji warstwy ściśliwej na skutek przykładnięcia nasypem, obniżenia zwierciadła wody gruntowej lub znacznego naruszenia struktury gruntu. Jednak obliczenie wartości tarcia negatywnego jest zagadnieniem złożonym. Jeżeli pał osiada razem z warstwą konsolidowaną, jak w przypadku pali tarczowych (zawieszonych), to tarcie negatywne nie występuje. Największe tarcie negatywne wystąpi w przypadku posadowienia podstawy pała na podłożu sztywnym (np. skalistym – abstrahujemy tu od faktu, że wtedy na nośność pała wpływa nośność podstawy).

W Eurokodzie 7 [7, 8] zaleca się obliczanie wartości charakterystycznej tarcia negatywnego jako sumy oporów tarcia na pobocznicach wszystkich podwarstw i ze znakiem przeciwnym:

$$T_{n,k} = -R_{s(i)} \quad (1)$$

Projektowane tarcie negatywne przyjmuje się w postaci dodatkowego obciążenia pała ze współczynnikiem częściowym jak w przypadku obciążeń stałych ($\gamma_G = 1,35$):

$$T_{n,d} = \gamma_G \cdot T_{n,k} \quad (2)$$

Krok 2

Wartości całkowite oporów pała R_c w gruncie na obciążenie osiowe wciskające obliczone są jako suma oporów wyznaczonych dla każdego z n profili CPT pod podstawą R_b oraz na pobocznicach R_s , według zaleceń belgijskich [4]. Wartości oporów pod podstawą pała wyznacza się z wzoru:

$$R_b^{CPT} = \alpha_b \cdot \varepsilon_b \cdot \beta \cdot \lambda \cdot A_b \cdot q_b \quad (3)$$

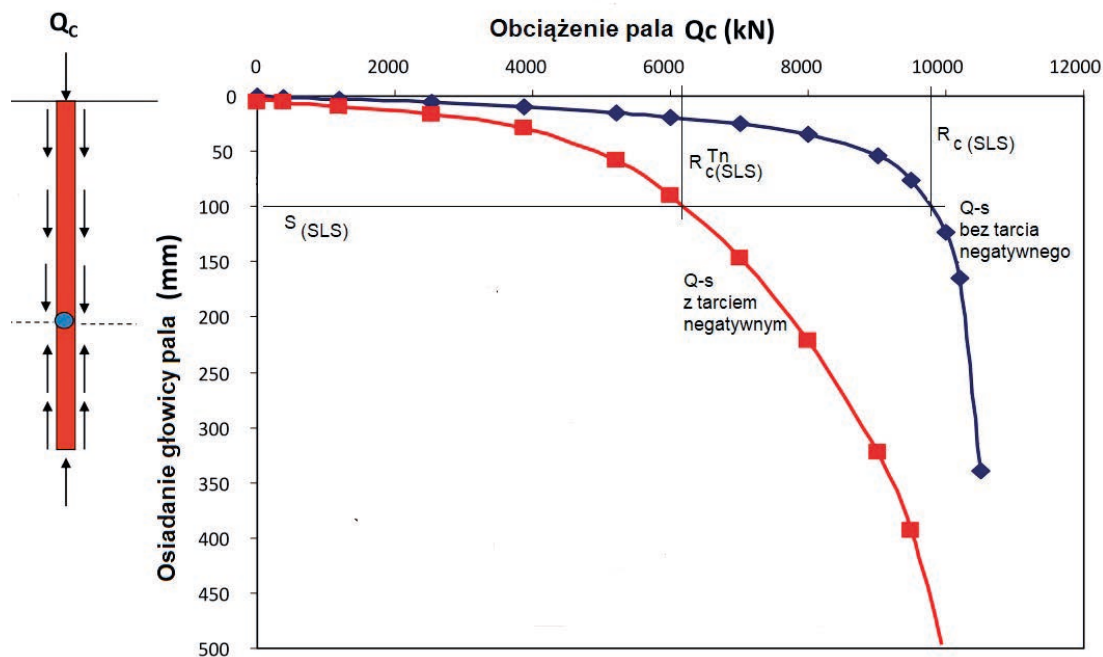
gdzie:

q_b – jednostkowy opór w podstawie pała [kPa]. Istnieje wiele metod szacowania tej wielkości na podstawie badań CPT. W artykule zastosowano metodę francuską [1], w której przyjmuje się dla pali wierconych świdrem ciągłym w gruntach spoiowych $q_b = 0,15 \cdot q_c$, a dla gruntów niespoistych $q_b = 0,375 \cdot q_c$, jako wartość uśrednioną na długości trzech średnic poniżej i powyżej podstawy pała.

α_b – współczynnik doświadczalny zależny od technologii wykonania pała i rodzaju gruntu [-] (tabl. 2);

ε_b – parametr opisujący względną wytrzymałość na ścinanie gruntu, skalowaną w zależności od średnicy stożka CPT D_c oraz średnicy pała D_b : w gruntach przekonsolidowanych $\varepsilon_b = \max \left\{ 1 - 0,001 \cdot \left(\frac{D_b}{D_c} - 1 \right); 0,476 \right\}$, w gruntach normalnie skonsolidowanych $\varepsilon_b = 1,0$ [-];

β – współczynnik kształtu podstawy pała: dla pali z podstawą okrągłą lub kwadratową $\beta = 1,0$, dla pali prostokątnych ($a \times b$) w podstawie $\beta = \frac{1 + 0,3 \cdot (a/b)}{1,3}$, dla ścian palowych $\beta = 0,77$;



Rys. 5. Przykładowe próbné obciążenie pała o średnicy 1,0 m z tarcieniem negatywnym i bez tarcia negatywnego [6]

Tabl. 2. Przykładowe wartości współczynnika α_b [4]

Technologia wykonania pała	α_b	
	Grunty przekonsolidowane	Grunty normalnie skonsolidowane
wbijane, wciskane	1,0	1,0
wkręcane	0,8	0,7
CFA, wiercone	0,8	0,5

Tabl. 3. Wartości współczynnika η_p [4]

Rodzaj gruntu	q_c [MPa]	[-] lub q_s [kPa]
iły (pyły)	1 ÷ 6	$\eta_p = 1/60$
	> 6	$q_s = 100$
gliny piaszczyste/iły (pyły) piaski gliniaste/iły (pyły)	1 ÷ 10	$\eta_p = 1/80$
	> 10	$q_s = 125$
piaski	1 ÷ 10	$\eta_p = 1/90$
	10 ÷ 20	$q_s = 110 + 4(q_c - 10)$
	> 20	$q_s = 150$

Tabl. 4. Przykładowe wartości współczynnika α_s [4]

Technologia wykonania pała	α_s	
	Grunty przekonsolidowane	Grunty normalnie skonsolidowane
wbijane, wciskane	0,9	1,0
wkręcane	0,9	1,0
CFA, wiercone	0,3	0,4

λ – współczynnik redukcji uwzględniający możliwość relaksacji gruntu pod podstawą przy poszerzonej podstawie: dla pał bez poszerzonej podstawy $\lambda = 1,0$, dla pał z poszerzoną podstawą wartości podane w [4];
 A_b – pole podstawy pała [m²].

Opór na pobocznicy wyznacza się z wzoru:

$$R_s^{CPT} = \chi_s \cdot \sum (\alpha_{s,i} \cdot h_i \cdot q_{s,i}) \quad (4)$$

gdzie:

- $q_{s,i}$ – opór jednostkowy na pobocznicy pała w warstwie i : $q_{s,i} = 1000 \cdot \eta_{p,i} \cdot q_{c,m,p}$
- $\eta_{p,i}$ – współczynnik doświadczalny uwzględniający stosunek tarcia między pobocznica pała a pobocznica końcówki CPTU, ustalany według tabl. 3:
- $q_{c,m,i}$ – uśredniona wartość q_c w warstwie i ,
- χ_s – obwód pobocznicy pała [m],
- h_i – miąższość warstwy i ,
- $\alpha_{s,i}$ – współczynnik doświadczalny warstwy uwzględniający rodzaj gruntu i współczynnik tarcia gruntu o pobocznice pała (tabl. 4) [-].

W analizowanym przypadku czterech sondowań CPT wyniki obliczeń są następujące:

$$R_b^{CPT1} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,375 \cdot 14000 = 46 \text{ kN}$$

$$R_s^{CPT1} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 0,5 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{80} \cdot 8,5 + \right. \\ \left. + 0,4 \cdot 1,0 \cdot 142 + 0,4 \cdot 0,5 \cdot 128 \right) = 97,7 \text{ kN}$$

$$R_c^{CPT1} = 143,7 \text{ kN}$$

$$R_b^{CPT2} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,375 \cdot 16000 = 53 \text{ kN}$$

$$R_s^{CPT2} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,0 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{80} \cdot 8,0 + \right. \\ \left. + 0,4 \cdot 1,0 \cdot 130 \right) = 143,6 \text{ kN}$$

$$R_c^{CPT2} = 196,6 \text{ kN}$$

$$R_b^{CPT3} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,375 \cdot 20000 = 66 \text{ kN}$$

$$R_s^{CPT3} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,4 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{80} \cdot 3,0 + \right. \\ \left. + 0,4 \cdot 0,8 \cdot 134 + 0,4 \cdot 1,0 \cdot 150 \right) = 116,8 \text{ kN}$$

$$R_c^{CPT3} = 182,8 \text{ kN}$$

$$R_b^{CPT4} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot 0,15^2 \cdot 0,375 \cdot 15500 = 51,4 \text{ kN}$$

$$R_s^{CPT4} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 2,0 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{80} \cdot 4,0 + \right. \\ \left. + 0,4 \cdot 1,0 \cdot 150 + 0,4 \cdot 1,0 \cdot 130 \right) = 143,3 \text{ kN}$$

$$R_c^{CPT4} = 194,7 \text{ kN}$$

Tarcie negatywne obliczono dla $n = 4$ profili CPT, przy czym poniższa propozycja nie określa warstwy ściśliwej jako gruntu organicznego. Obliczenia wykonano wyłącznie na podstawie wyników sondowania statycznego. Dla gruntów bardzo ściśliwych proponuje się przyjąć współczynniki według propozycji własnej, które podano w tabl. 5:

Tabl. 5. Współczynniki do obliczenia oporów tarcia dla gruntów bardzo ściśliwych

$q_c < 1 \text{ MPa}$	$\alpha_s = 1,0$ niezależnie od technologii wykonania pała	$q_s = 10 \text{ kPa}$
-----------------------	---	------------------------

$$T_{n,k}^{CPT1} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,0 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{90} \cdot 4,0 + 1,0 \cdot 3,0 \cdot 10 \right) = 45 \text{ kN}$$

$$T_{n,k}^{CPT2} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{90} \cdot 4,0 + 1,0 \cdot 2,8 \cdot 10 \right) = 46,5 \text{ kN}$$

$$T_{n,k}^{CPT3} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{90} \cdot 8,0 + 1,0 \cdot 1,6 \cdot 10 \right) = 55,3 \text{ kN}$$

$$T_{n,k}^{CPT4} = \pi \cdot 0,3 \cdot \left(0,4 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{90} \cdot 4,5 + 1,0 \cdot 0,8 \cdot 10 \right) = 32 \text{ kN}$$

Zgodnie z zaleceniami Eurokodu 7 [7, 8] do obliczenia wartości projektowej tarcia negatywnego należy przyjąć maksymalną wartość charakterystyczną:

$$T_{n,d} = 1,35 \cdot 55,3 = 74,7 \text{ kN}$$

Krok 3

Wartości nośności pała wyznacza się na podstawie określonego modelu obliczeniowego. Niedoskonałości modelu obliczeniowego kalibruje się poprzez współczynnik γ_{Rd} . Wartości skalibrowane nośności pała oblicza się dla każdego profilu CPT.

$$R_{c,cal}^{CPT} = \frac{R_c^{CPT}}{\gamma_{Rd}} \quad (5)$$

Użycie tego współczynnika jest zgodne z postanowieniami Eurokodu 7, niemniej problematyczne jest ustalenie wartości współczynnika. Zalecenia belgijskie podano w tabl. 6.

Tabl. 6. Współczynnik modelu obliczeniowego [4]

Technologia wykonania pala	γ_{Rd1} Bez próbnego obciążenia pala	γ_{Rd2} Próbne obciążenie pala w zbliżonych warunkach geotechnicznych	γ_{Rd3} Próbne obciążenie pala w określonych warunkach geotechnicznych
wbijane, wciskane	1,0	1,0	1,0
wkręcane	1,3	1,1	1,0
CFA	1,35	1,2	1,1
wiercone	1,2	1,2	1,1

$$R_{c,cal}^{CPT1} = \frac{143,7}{1,35} = 106,4 \text{ kN}$$

$$R_{c,cal}^{CPT2} = \frac{196,6}{1,35} = 145,6 \text{ kN}$$

$$R_{c,cal}^{CPT3} = \frac{182,8}{1,35} = 135,4 \text{ kN}$$

$$R_{c,cal}^{CPT4} = \frac{194,7}{1,35} = 144,2 \text{ kN}$$

Krok 4

Wyznaczenie jednej wartości charakterystycznej nośności pala na podstawie wszystkich wykonanych badań gruntu.

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{\text{mean}}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,cal})_{\text{min}}}{\xi_4} \right\} \quad (6)$$

gdzie:

ξ_3, ξ_4 – współczynniki korelacyjne zależne od liczby zbadanych profili geotechnicznych n , przyjmowane odpowiednio dla obliczonej wartości średniej nośności $(R_{c,cal})_{\text{mean}}$ i minimalnej $(R_{c,cal})_{\text{min}}$. Zgodnie z zapisami Eurokodu 7, w przypadku $n = 4$ zbadanych profili oraz dla konstrukcji zwiężczającej pale o małej sztywności wartości współczynników wynoszą: $\xi_3 = 1,31$ i $\xi_4 = 1,2$.

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{132,9}{1,31}; \frac{106,4}{1,2} \right\} = \min \{101,5; 88,7\} = 88,7 \text{ kN}$$

Krok 5

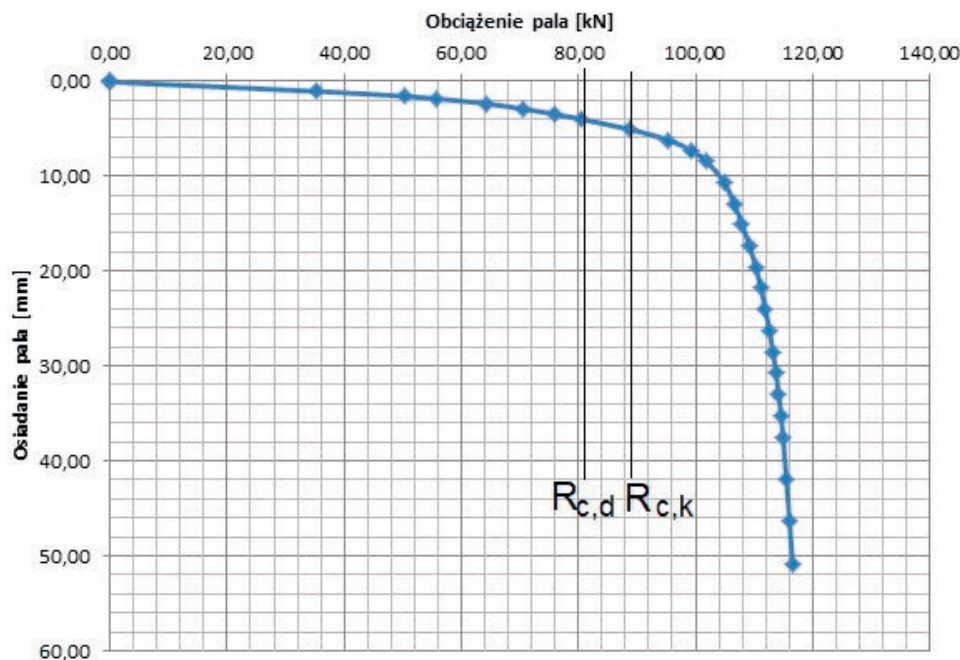
W celu wyznaczenia wartości projektowych nośności przyjęto częściowe współczynniki bezpieczeństwa zgodnie z podejściem obliczeniowym 2* [8]: $\gamma_b = 1,1$ i $\gamma_s = 1,1$.

$$R_{c,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} = \frac{88,7}{1,1} = 80,6 \text{ kN}$$

OSIADANIE PALA W OBLICZENIACH MES

Aby zweryfikować obliczenia analityczne, zgodnie z opisaną procedurą, przeprowadzono uproszczone obliczenia osiadania pala z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do analizy w układzie osiowo-symetrycznym wybrano pal o długości 6 m zaprojektowany do warunków gruntowych opisanych w profilu CPT2. Do obliczeń przyjęto sprężysto-plastyczny model Coulomba-Mohra. Na poboczniczy nie zastosowano redukcji tarcia ze względu na technologię pali. Ponieważ zdyskretyzowano pojedynczy pal bez płyty, to model nie pozwala na uchwycenie efektu tarcia negatywnego (tarcie negatywne jest uwzględnione jako dodatkowe obciążenie).

Przebieg krzywej Q - s (rys. 6) w obliczeniach MES jest wynikiem przyjętych założeń i ograniczeń analitycznych w programie. Dokładna analiza numeryczna jest trudna i złożona,



Rys. 6. Krzywa Q - s w obliczeniach MES

choćby ze względu na problem modelowania warunków brzegowych związanych z przepływem wody gruntowej podczas konsolidacji. Nie bez znaczenia jest także trudność w określeniu wielu parametrów obliczeniowych, które nie zawsze mogą być precyzyjnie ustalone w badaniach CPT, w szczególności jest to współczynnik ściśliwości, porowatość, interakcja grunt – pal.

Istnieje wysokie prawdopodobieństwo, że efekt tarcia negatywnego byłby trudny do wychwycenia w klasycznych próbnym obciążeniach pala, gdzie nie wymusza się takiego dodatkowego oddziaływania na pobocznicy pala (między innymi ze względu na brak elementu przenoszącego obciążenie bezpośrednio na ośrodek gruntowy), ale ewentualnie uwzględnia się je jako obciążenie osiowe na głowicy zwiększające obciążenie od konstrukcji. Uzyskana z analizy MES charakterystyka nośności potwierdza przydatność zaproponowanej procedury obliczeniowej.

WNIOSKI

Metody projektowania pali opierają się przeważnie na opracowanych empirycznych lub półempirycznych parametrach skorelowanych statystycznie z bazą danych porównawczych. W przypadku wyznaczania nośności pala na podstawie sondowania CPT jednostkowe opory w podstawie pala q_b otrzymuje się z procedury skalowania oporów na stożku CPT q_c w odniesieniu do powierzchni podstawy pala. Opory na pobocznicy pala q_s uzyskuje się z transformacji oporów tarcia pomierzonych na pobocznicy końcówki CPT f_s lokalnie lub globalnie albo na podstawie korelacji z oporem na stożku q_c .

W prezentowanym artykule przyjęto metodę szacowania oporów jednostkowych opartą na doświadczeniach francuskich. Jest to metoda dająca znaczny zapas bezpieczeństwa, niemniej w przypadku pali małych średnic projektowanie po stronie bezpiecznej jest uzasadnione. Uproszczone analizy MES potwierdziły przydatność stosowanych metod w praktyce projektowej.

LITERATURA

1. Bustamante M., Frank R.: Design of axially loaded piles — French practice. In: Design of axially loaded piles – European practice, Proceedings of the ERTC3 Seminar, Brussels, Belgium, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1997.
2. Gwizdała K.: Fundamenty palowe T1 Technologie i obliczenia. PWN, Warszawa, 2010.
3. Gwizdała K., Krasieński A.: Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem zasad Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych. Acta Scientiarum Polonorum. Seria: Architectura, 15(2) (1): 3-22, 2016.
4. Hyubrechts N., De Vos M., Bottiau M., Maertens L.: Design of piles – Belgian practice. ISSMGE – ETC3 International Symposium on Design of Piles in Europe, Leuven, Belgium, 2016.
5. Tan S. A., Fellenius B.: Negative skin friction pile concepts with soil-structure interaction. Geotechnical Research 3(4), str. 137–147, 2016.
6. Wong K. S.: Negative Skin Friction on Piles in Layered Soil Deposits. Journal of Geotechnical Engineering 121(6), 1995.
7. PN-EN 1997-1. Projektowanie geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.
8. PN-EN 1997-1:2008/NA. Załącznik krajowy do polskiej normy.
9. PN-EN 14199:2015-07. Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Mikropale.