

Weryfikacja nośności pala ustalonej na podstawie badań CPTU

Irena Bagińska, Michał Baca, Adrian Rózański, Maciej Sobótka

W pracy zaprezentowano metody oceny nośności pali bazując na rozpoznaniu podłoża gruntowego sondą statyczną CPTU. Przedstawiono możliwe do zastosowania w warunkach rzeczywistych metody służące bezpośredniej ocenie nośności pali wykonywanych w technologii CFA. Obliczenia przeprowadzono dla pojedynczego pala i odniesiono do metody uniwersalnej proponowanej w Eurokodzie 7 oraz metody normowej zgodnej z normą PN-83/B-02482. Otrzymane wyniki poddano weryfikacji poprzez porównanie z wartością graniczną nośności pala wciskanego uzyskaną z próbnego obciążenia statycznego. W pracy przedstawiono propozycję doboru lokalnych współczynników nośności podstawy ψ_1 oraz poboczniczy ψ_2 . Wartości współczynników ustalono na bazie wyniku próbnego obciążenia statycznego pala oraz szacunkowej nośności poboczniczy i podstawy pala z globalnej charakterystycznej wartości nośności pala w warunkach rzeczywistych.

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 14.01.2013

data akceptacji do druku: 22.02.2013



dr inż. Irena Bagińska
Politechnika Wrocławska
Instytut Geotechniki
i Hydrotechniki
irena.baginska@pwr.wroc.pl



inż. Michał Baca
student
Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa
Lądowego i Wodnego
michal.baca@wp.pl



dr inż. Adrian Rózański
Politechnika Wrocławska
Instytut Geotechniki
i Hydrotechniki
adrian.rozanski@pwr.wroc.pl



mgr inż. Maciej Sobótka
Politechnika Wrocławska
Instytut Geotechniki
i Hydrotechniki
maciej.sobotka@pwr.wroc.pl

Rozbudowa infrastruktury drogowej wraz z obiektami inżynierskimi na terenach skomplikowanych pod względem geotechnicznym wymusza konieczność stosowania posadowień pośrednich. Precyzyjne określenie nośności fundamentów wymaga zastosowania szczegółowych badań geotechnicznych obejmujących nie tylko wiercenia, ale również sondowania statyczne CPT oraz CPTU. Wyniki pomiarów geotechnicznych *in situ* służą bezpośrednio do projektowania pali. Podczas realizacji obiektu nośności pali ustalone w fazie projektowej podlegają weryfikacji przez obowiązkowe próbne obciążenia statyczne.

W pracy na podstawie rzeczywistego pomiaru podłoża gruntowego sondą statyczną CPTU, idealnie w osi projektowanego pala wzorcowego, określono nośność pojedynczego pala pracującego na wciskanie. Do oceny nośności pala CFA zastosowano meto-

dy Energopolu [2,3,11], Busamente-Gianesello [1,2,3,11], Philoponnata-Kłosa [2,3,6,11] oraz obie normowe Eurokodu 7 [9] i PN-83/B-02482 [10]. Otrzymane wyniki poddano weryfikacji poprzez porównanie z wartością granicznej nośności pala wciskanego uzyskaną, po jego wykonaniu, z próbnego obciążenia statycznego.

Analiza porównawcza stała się podstawą do zaproponowania możliwości wyznaczenia lokalnych współczynników nośności ψ_1 , ψ_2 mogących służyć ocenie nośności kolejnych pali posadowionych w sąsiedztwie pala wzorcowego.

Analiza rozpoznania geotechnicznego

Rozpoznanie geotechniczne sondą statyczną CPTU wykonano idealnie w osi wstępnie zaplanowanego pala. Zarejestrowane wielkości oporu gruntu pod wciskaniem stożkiem q_c

oraz opór tarcia gruntu na poboczniczy tulei sondy f_s zostały bezpośrednio zaaplikowane do algorytmów obliczeniowych oceny nośności fundamentów palowych.

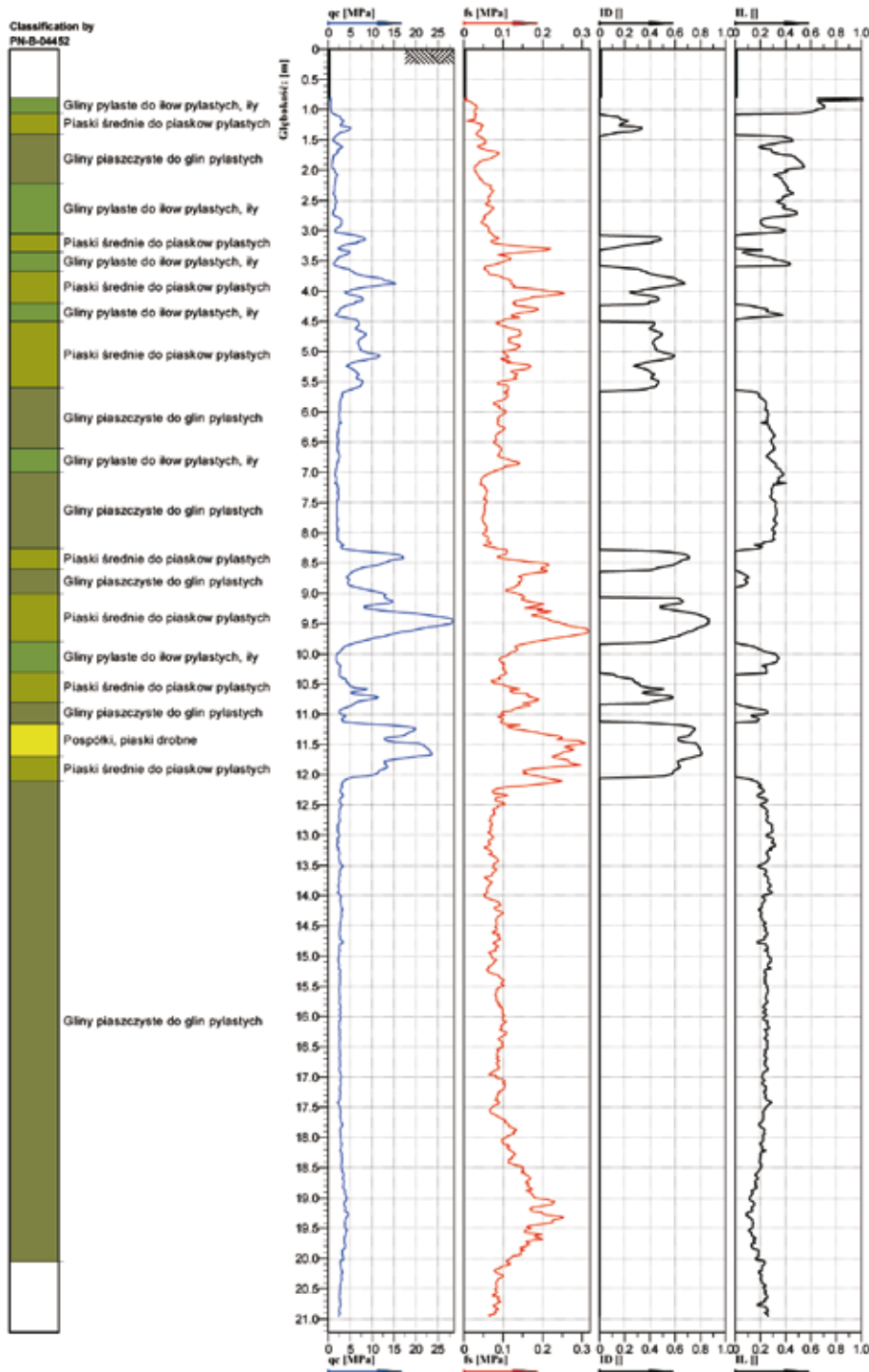
Na dwóch pierwszych wykresach (rys. 1) przedstawiono, w funkcji głębokości, zarejestrowane wielkości pomiarowe, które posłużyły wyznaczeniu profilu geologicznego zgodnego z klasyfikacją normową [8]. Wyniki sondowań statycznych były również podstawą określenia stanu zagęszczenia i plastyczności poszczególnych warstw oraz wszystkich niezbędnych parametrów koniecznych przy ustalaniu nośności pala we wszystkich metodach obliczeniowych.

W podłożu gruntowym do głębokości około 12 metrów zalegają naprzemiennie grunty spoiiste i niespoiiste. W spoiistych przeważają piaski średnie do piasków pylastych w stanie średnio zagęszczonym, a głębiej w stanie zagęszczonym. Wśród spoiistych przeważają gliny piaszczyste do glin pylastych w stanie plastycznym. Poniżej 12 metra głębokości zlokalizowana jest warstwa gruntu spoiстого, o bardzo dużej miąższości, w postaci glin piaszczystych do glin pylastych na pograniczu stanu plastycznego i twardoplastycznego.

Z punktu widzenia projektowego posadowienia pośredniego na palach teren jest trudny, ponieważ brak jest mocnej warstwy, w której możliwe byłoby zakończenie pali. Dodatkowo najgłębiej zalegającą warstwą jest jednorodny grunt spoiisty o niemalże stałej wartości stopnia plastyczności wynoszącej 0,25.

Metody oceny nośności pali wciskanych na podstawie badań sondą statyczną

W metodach oceny charakterystycznej nośności pali wciskanych na podstawie badań podłoża CPTU stosuje się wzór (1):



1. Sondowanie statyczne CPTU wraz z interpretacją wg. [8]

$$R_{ck} = R_{b,k} + R_{s,k} = A_b \cdot q_{b,k} + \sum_{i=1}^n A_s \cdot q_{s,k,i} \quad (1)$$

$$q_{b,k} = \psi_1 \cdot \bar{q}_c \quad (2)$$

$$q_{s,k,i} = \frac{\bar{q}_{csi}}{\psi_2} \quad \text{lub} \quad q_{s,k,i} = \frac{\bar{f}_{si}}{\psi_3} \quad (3)$$

Globalna nośność pała wciskanego (1) jest sumą nośności podstawy oraz pobocznic pała w odniesieniu do pola podstawy A_b i pola pobocznic pała A_s . Ich wartości ustalane są na podstawie charakterystycznego oporu jednostkowego pod podstawą $q_{b,k}$ zgodnie z (2) oraz charakterystycznego oporu jednostkowego pobocznic pała w kolejnych warstwach gruntu $q_{s,k,i}$ zgodnie z (3):

W zależności od zastosowanej metody obliczeniowej dobierane są współczynniki nośności podstawy i pobocznic ψ_1, ψ_2, ψ_3 . Ich wartości zależą od technologii wykonania pała, rodzaju i stanu gruntu, a także sposobu uśredniania wartości $\bar{q}_c, \bar{q}_{csi}, \bar{f}_{si}$.

Uśredniony jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy \bar{q}_c w strefie przy podsta-

wie pała ustala się zgodnie z (4), natomiast uśredniony jednostkowy opór gruntu pod stożkiem sondy \bar{q}_{csi} na podstawie pomiaru q_c z zależności (5), a uśredniony jednostkowy opór gruntu na pobocznicę tulei sondy \bar{f}_{si} na podstawie pomiaru f_s zgodnie z (6).

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

$$\bar{q}_{csi} = \frac{1}{\Delta h} \int_{h-l_1}^h q_c(h) dh \quad (5)$$

$$\bar{f}_{si} = \frac{1}{\Delta h} \int_{h-l_1}^h f_s(h) dh \quad (6)$$

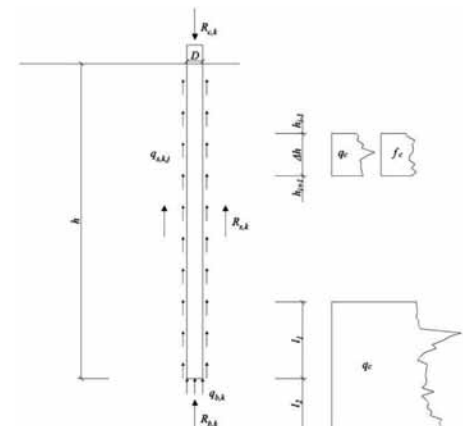
Oznaczenia zastosowane we wzorach (4, 5, 6) zgodne są z rysunkiem 2.

Na przestrzeni lat powstało wiele metod pozwalających określić nośność pojedynczego pała bezpośrednio z badań CPTU. Różnią się one zakresem stosowania. Istnieją metody pozwalające wyznaczyć nośność dowolnego rodzaju pała w każdym rodzaju gruntu, ale zdarzają się metody mające zawężone spektrum stosowania, w zależności od technologii wykonywania pała, czy specyficznych warunków gruntowych, dla których dana metoda została opracowana. Do najbardziej znanych i popularnych pozwalających wyznaczyć nośność pała CFA należą:

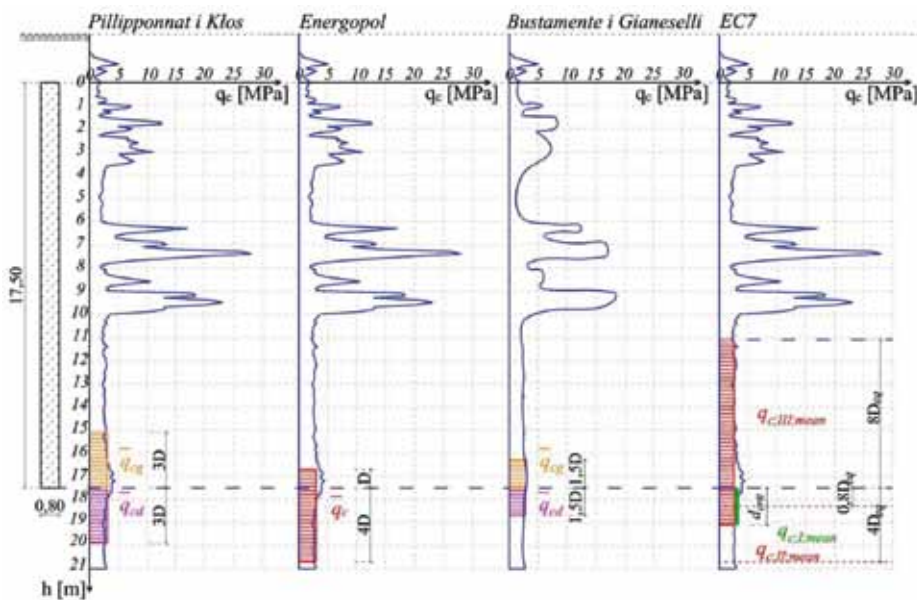
- metoda Energopolu,
- metoda Busamente-Gianesello,
- metoda Philopponata-Kłosa.

Metoda Philopponata - Kłosa [2,3,6,11]

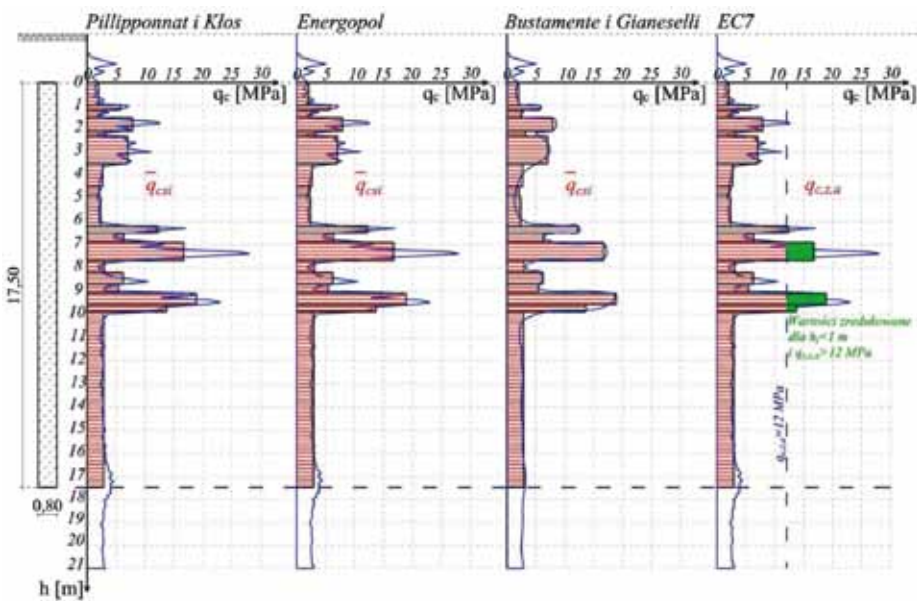
W opisywanej metodzie, przed przystąpieniem do obliczenia nośności, zakłada się wstępne opracowanie wyników sondowań według określonych formuł. Przede wszystkim należy wyeliminować z wykresu q_c wszystkie wartości znacznie przewyższające wartość średniego przebiegu wykresu q_c , przy czym kwalifikowanie takich skoków zależy wyłącznie od indywidualnej interpretacji projektanta szacującego nośność pała.



2. Oznaczenia wykorzystywane do obliczenia nośności pojedynczego pała na podstawie pomiarów CPTU [2,3,11]



3. Graficzne zobrazowanie obszarów uśredniania wartości q_c do ustalenia nośności podstawy pala



4. Graficzne zobrazowanie obszarów uśredniania wartości \bar{q}_{csi} do ustalenia nośności poboczniczy pala

Taka poprawka eliminuje lokalne skoki wykresu q_c i sprawia, że oszacowana wielkość nośności ma większy zapas bezpieczeństwa. W analizowanym przykładzie nie zastosowano odrzucenia skoków q_c , ponieważ nie miały one charakteru lokalnego. Strefy ustalania \bar{q}_c do oceny nośności podstawy przedstawiono na rysunku 3, natomiast \bar{q}_{csi} do oceny nośności poboczniczy na rysunku 4.

Współczynnik ψ_1 dobiera się na podstawie rodzaju gruntu zalegającego w podstawie pala i przyjmuje on wartości od 0,35 dla żwirów do 0,5 dla ilów. Współczynnik ψ_2 zależy zarówno od rodzaju gruntu w profilu pala, jak i od technologii wykonania pala. Dla analizowanego przykładu jego wartość zawierała się w przedziale 71 - 235.

W metodzie Philipponanta - Kłosa dla różnych technologii wykonawstwa ustalone są graniczne dopuszczalne wartości jednostkowego oporu na poboczniczy \bar{q}_{csi} . W przy-

padku uzyskania, podczas obliczeń, wartości \bar{q}_{csi} większych od granicznych, należy je odrzucić i przyjąć zadane wartości graniczne. W rozpatrywanym przypadku obliczeniowym nie było konieczności zastosowania tej procedury.

Metoda Energopolu [2,3,11]

Metoda zakłada ustalanie współczynników nośności ψ_1 i ψ_2 na podstawie średnicy lub przekątnej przekroju pala oraz rodzaju podłoża gruntowego w profilu wzdłuż pala. Stosowanie metody nie ogranicza się do konkretnych technologii wykonawstwa. Jedynym ograniczeniem stosowania metody jest możliwość jej stosowania dla pali o średnicy mniejszej niż 1,2 m.

Zastosowanie metody Energopolu możliwe jest dla wszystkich rodzajów gruntu. Współczynnik ψ_1 ustalony zostaje jedynie na podstawie zmienności q_c w pobliżu podsta-

wy pala, natomiast współczynnik ψ_2 zależy jedynie od rodzaju gruntu.

Dla rozpatrywanego przypadku przyjęto następujące wartości współczynników nośności. Dla podstawy przyjęto $\psi_1 = 0,40$, a dla poboczniczy wartości ψ_2 wynosiły 200 – dla gruntów niespoistych i 125 – dla gruntów spoistych.

Na rysunku 3 przedstawiono zakresy ustalania \bar{q}_c do oceny nośności podstawy, natomiast na rysunku 4 zaprezentowano zmienność \bar{q}_{csi} zastosowaną do oceny nośności poboczniczy.

Metoda Giancesello – Bustamantego [1,2,3,11]

Metoda może być stosowana we wszystkich rodzajach pali oraz gruntów. Wartości współczynników nośności dobiera się indywidualnie w zależności od gruntu oraz technologii wykonania pala. Średni opór stożka sondy statycznej wyznacza się w czterech etapach.

Etap I to wstępna korekta wartości q_c otrzymanych z badania CPTU, co oznacza, że krzywa $q_c(h)$, gdzie h to głębokość pomiaru, powinna być zbliżona do minimalnych wartości q_c (patrz rysunek 3 i 4).

Etap II to wyznaczenie średnich wartości q_{cg} nad i q_{cd} poniżej podstawy pala na podstawie poprawionych wartości q_c w przedziale $(h-1,5D; h+1,5D)$, gdzie D to średnica pala.

Etap III to wyznaczenie średniego oporu $\bar{q}_c = \frac{1}{2} (q_{cg} + q_{cd})$.

Etap IV to wyznaczenie na podstawie skorygowanych wartości q_c średnich oporów \bar{q}_{csi} do oceny oporu poboczniczy.

Jest to jedna z bezpieczniejszych metod projektowania, gdyż charakteryzuje się odpowiednio dużymi parametrami ψ_1 i ψ_2 . W przypadku gdy po zastosowaniu ψ_2 wartości wynikowe oporu jednostkowego na poboczniczy \bar{q}_{csi} przekroczą wartości graniczne dopuszczalne, należy je odrzucić i przyjąć ustalone wartości graniczne.

Dla omawianego przykładu współczynnik ψ_1 wynosi 0,40, a ψ_2 – dla poboczniczy – przyjmowano od 60, dla gruntów spoistych, do 120 i 200 dla spoistych w zależności od q_c . Dla wszystkich warstw glin i dla jednej warstwy piasku wynikowe opory jednostkowego na poboczniczy przekraczały wartości graniczne, dlatego zostały zredukowane do wartości dopuszczalnych.

Metoda Eurokod 7 [9]

Eurokod 7 w załącznikach D.6 i D.7 przytacza dwie propozycje ustalenia nośności pojedynczego pala wciskanego.

Pierwsza metoda (Zał. D.6) jest korelacją pozwalającą ustalać nośność podstawy i poboczniczy pala bezpośrednio ze średnich wartości oporów wciskania sondy q_c . Co prawda w krajowym Eurokodzie 7 tabel-

rycznie przytoczone są korelacje jedynie dla pali pracujących w gruntach sypkich, ale w innych europejskich odpowiednikach (np. niemieckim) możliwe jest odnalezienie korelacji również dla gruntów spoiwystych. Z uwagi na duże przybliżenia korelacyjne metodę należy traktować z dużym zapasem niepewności, jedynie do ustaleń szacunkowych wartości nośności.

W pracy zastosowano metodę drugą, która szczegółowo opisana została w Eurokodzie 7 - załącznik D.7.

Całkowita nośność pala wciskanego ustalona zostaje, podobnie jak w (1) poprzez sumowanie nośności podstawy i poboczniczy pala:

$$R_{ck} = R_{b,k} + R_{s,k} = A_b \cdot p_{max,base} + C_p \int_0^{\Delta l} p_{max,shaft,z} dz \quad (7)$$

Nośność podstawy $R_{b,k}$ określona zostaje z iloczynu pola podstawy A_b oraz maksymalnego jednostkowego oporu podstawy $p_{max,base}$. Natomiast nośność poboczniczy ustalona zostaje z iloczynu obwodu trzonu pala C_p oraz scałkowanego, po głębokości z , maksymalnego jednostkowego oporu tarcia poboczniczy $p_{max,shaft,z}$.

Określenie $p_{max,base}$ wymaga trzykrotnej analizy zarejestrowanych podczas badania CPTU wartości q_c . Ustalone zostają obszary uśredniania $q_{c,l,mean}$, $q_{c,ll,mean}$ i $q_{c,III,mean}$, które graficznie przedstawiono na rysunku 3. Dla ich ustalenia konieczne jest obliczenie zastępczej średnicy podstawy $D_{eq} = 1,13 a \sqrt{\frac{b}{a}}$, gdzie a to długość krótszego, a b dłuższego boku podstawy, przy czym $b \leq 1,5a$.

Kolejnym etapem jest określenie głębokości krytycznej d_{crit} na której q_c uzyskuje minimalne wartości w przedziale głębokości od $h_{pos} + 4 D_{eq}$ do $h_{pos} + 0,8 D_{eq}$, gdzie h_{pos} to głębokość posadowienia projektowanego pala (patrz rysunek 3).

W przedziale głębokości od $h_{pos} + d_{crit}$ do h_{pos} obliczone zostają dwie średnie wartości oporów q_c . Pierwsza z nich, tj. $q_{c,l,mean}$ wyznaczona zostaje zgodnie z zależnością (8), gdzie $q_{c,l}$ to zarejestrowane wielkości q_c . Druga - $q_{c,ll,mean}$ - określona zostaje zgodnie ze wzorem (9), gdzie $q_{c,ll}$ to najniższe wartości pomiarowe q_c w zadanym przedziale głębokości.

$$q_{c,l,mean} = \frac{1}{d_{crit}} \int_0^{d_{crit}} q_{c,l} dz \quad (8)$$

$$q_{c,ll,mean} = \frac{1}{d_{crit}} \int_0^{d_{crit}} q_{c,ll} dz \quad (9)$$

Trzecie uśrednienie służące wyznaczeniu nośności podstawy poszukiwane jest w przedziale znajdującym się powyżej podstawy pala na głębokości od $h_{pos} - 8 D_{eq}$ do h_{pos} . Wartość $q_{c,III,mean}$ określona zostaje zgodnie ze

wzorem (10), a w obliczeniach brane są pod uwagę, w zadanym przedziale głębokości, wartości q_c mniejsze niż najniższe $q_{c,ll}$ użyte do wyznaczenia $q_{c,III,mean}$.

$$q_{c,III,mean} = \frac{1}{8D_{eq}} \int_0^{-8D_{eq}} q_{c,III} dz \quad (10)$$

Wszystkie trzy wartości opisane równaniami (8), (9) i (10), wraz z przyjętymi współczynnikami normowymi [9] α_p , β i s , pozwalają - zgodnie z (11) - wyznaczyć maksymalny opór podstawy, który ostatecznie nie może zostać przyjęty większy niż 15 MPa:

$$p_{max,base} = 0,5 \alpha_p \beta s \left\{ \frac{q_{c,l,mean} + q_{c,ll,mean}}{2} + q_{c,III,mean} \right\} \quad (11)$$

Wyznaczenie maksymalnego jednostkowego oporu tarcia na poboczniczy $p_{max,shaft,z}$ jest znacznie mniej pracochłonne. Wymaga jednak wstępnego zredukowania zarejestrowanych podczas badania CPTU wartości q_c większych niż 15 MPa w warstwach o miąższości większej niż 1 m do wartości 15 MPa, a w warstwach o miąższości mniejszej niż 1 m do wartości 12 MPa. Ostatecznie, maksymalny jednostkowy opór tarcia na poboczniczy ustalony zostaje według zależności $p_{max,shaft,z} = \alpha_s q_{c,z,a}$, gdzie $q_{c,z,a}$ to wartości q_c na głębokości z po uwzględnieniu redukcji, a α_s to współczynnik zależny od rodzaju gruntu i technologii wykonania pala.

Współczynniki α_s , podane w Eurokodzie 7, są maksymalnymi dopuszczalnymi wartościami dla konkretnych rodzajów gruntu. Przyjęcie ich w obliczeniach bezpośrednio jako maksymalne dopuszczalne wartości może skutkować przeszacowaniem nośności pala. Projektanci powinni przeprowadzić rozsądne oszacowanie bazujące na doświadczeniu i znajomości wpływu danej technologii na ośrodek gruntowy podczas wykonawstwa. W analizowanym przykładzie, do określenia α_s , wykorzystano metodę LCPC zgodnie z normą holenderską [7].

Styczne obciążenia próbne i ich interpretacja

Pale stanowią bardzo ważny element posadowienia obiektów inżynierskich. Jedną ze znaczących różnic w stosunku do tradycyjnego budownictwa nadziemnego jest kontrola wykonanej konstrukcji. Gdy konstrukcja powstaje w otwartym terenie przy zachowaniu wszelkich zasad bezpiecznego projektowania, dokładnego wykonawstwa i użyciu odpowiedniej jakości materiałów budowlanych, nie istnieje duże prawdopodobieństwo awarii. W przypadku pali, mogą się jednak pojawić pewne „znaki zapytania”. Dlatego też we wszelkich normach i zaleceniach projektowych na całym świecie poja-

wia się zagadnienie kontroli jakości robót palowych. Najczęściej stosowaną kontrolą jakościowej nośności są próbne obciążenia statyczne i dynamiczne.

Próbne obciążenia statyczne są jedną z najstarszych i darzonych największym zaufaniem metod kontrolnych badań fundamentów palowych. Dlatego w Eurokodzie 7 [9] wymieniono kilka wariantów projektowania fundamentów palowych właśnie z uwzględnieniem próbnych obciążeń statycznych.

Dopuszczalne jest projektowanie pali na podstawie:

- wyników próbnych obciążeń statycznych,
- metod empirycznych lub analitycznych, których wiarygodność została potwierdzona przez próbne obciążenia statyczne w porównywalnych warunkach,
- wyników pomiarów dynamicznych, gdy wiarygodność ich wykorzystania została potwierdzona przez próbne obciążenia statyczne w porównywalnych warunkach gruntowych,
- obserwacji i pomiarów gruntowych, gdy wiarygodność ich wykorzystania została potwierdzona przez próbne obciążenia statyczne w porównywalnych warunkach gruntowych.

Na podstawie wymienionych metod można jednoznacznie stwierdzić, że opierają się one na próbnych obciążeniach statycznych jako element decydujący. Również polska norma palowa [10], nakazuje wykonywać próbne obciążenia statyczne jako potwierdzenie nośności wyznaczonej w tradycyjny sposób.

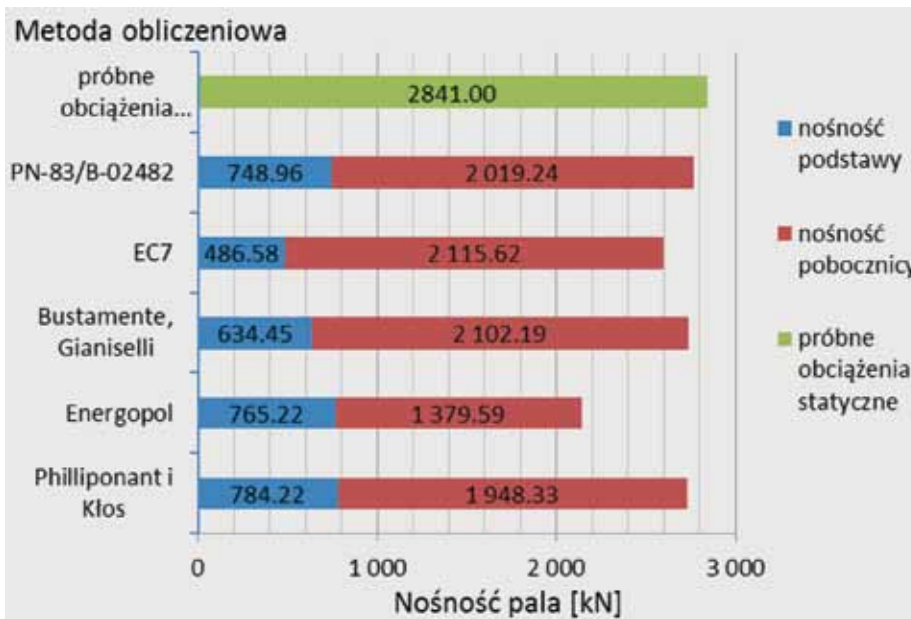
Dlatego w pracy wyniki obliczeń analitycznych oceny nośności porównano z oceną nośności granicznej kontrolnych badań statycznych.

Idealnie w osi wcześniejszego badania statycznego CPTU wykonany zostały pal CFA długość 17,5 m i średnicy 80 cm. Po ponad 30 dniach od wykonania w gruncie przeprowadzone zostało próbne obciążenie statyczne. W drugim cyklu obciążenia określono graniczną nośność pala równą 2 841 kN ustaloną na podstawie wykresu pomocniczego zgodnie z interpretacją według normy PN-83/B-02482 [5].

Analiza nośności i jej weryfikacja

Analizę porównawczą przeprowadzono dla charakterystycznych wartości oceny nośności pali CFA długości 17,5 m i średnicy 80 cm obliczonych czterema metodami określającymi nośność na podstawie badań CPTU (Energopolu, Busamente-Gianesellego, Philopponnata-Kłosa, Eurokodu 7) oraz metodą klasyczną normową według PN-83/B-02482.

Wyniki obliczeniowe zweryfikowano porównując z graniczną wartością nośności otrzy-



5. Wykres porównawczy wyników oceny nośności pali wciskanych

Tab.1: Zestawienie wyników oceny nośności pala z wyszczególnieniem nośności podstawy oraz poboczniczy

Lp.	Metoda	$R_{b,k}$	$R_{s,k}$	R_{ck}	$R_{b,k}/R_{ck}$	$R_{s,k}/R_{ck}$	R_{ck}/Q_{pr}
		kN	kN	kN	%	%	%
1	Philliponant-Kłos	784,22	1948,33	2732,55	28,70	71,30	96,18
2	Energopol	765,22	1379,59	2144,80	35,68	64,32	75,49
3	Bustamente-Gianiselli	634,45	2102,19	2736,64	23,18	76,82	96,33
4	Eurokod 7	486,58	2115,62	2602,20	18,70	81,30	91,59
5	PN-83/B-02482	748,96	2019,24	2768,20	27,06	72,94	97,44
6	Próbnne obciążenia	-	-	2841,00	-	-	100,00

maną z próbnymi obciążeniami statycznymi, co przedstawiono na rys. 5. Wszystkie oceny nośności dały wartości mniejsze od granicznej, wyznaczonej przez próbne obciążenie. Najniższą szacunkową nośność uzyskano z metody Energopolu i wynosiła ona 2 144,80 kN, co stanowi 75,49% nośności granicznej z obciążeniami próbnymi (patrz Tab.1). Natomiast najwyższą wartość, tj. 2 768,20 kN oszacowano na podstawie metody normowej, według PN-83/B-02482. Uzyskana w ten sposób wartość stanowi aż 97,44% nośności granicznej (patrz Tab.1).

Zarówno na rysunku 5, jak i w Tab.1, zaprezentowano wyniki oceny nośności globalnej oraz z wyszczególnieniem charakterystycznej nośności podstawy oraz poboczniczy pala. Zauważalne jest, iż we wszystkich metodach zawsze większą częścią globalnej wartości nośności jest nośność poboczniczy mająca swój średni udział na poziomie

$$\frac{\sum_{i=1}^n R_{s,ki}/R_{ckj}}{n} = 73,34\% \quad (11)$$

Dla podstawy udział ten klasyfikuje się na poziomie

$$\frac{\sum_{i=1}^n R_{b,ki}/R_{ckj}}{n} = 26,66\% \quad (12)$$

Oszacowanie lokalnych współczynników nośności ψ_1 i ψ_2

Udziały nośności poboczniczy (11) i podstawy (12) w globalnej wartości nośności stają się danymi wyjściowymi do ustalenia lokalnych współczynników ψ_1 i ψ_2 .

Przyjmując za rzeczywistą nośność pala wartość uzyskaną z próbnymi obciążeniami, możliwe jest ustalenie szacunkowej nośności poboczniczy oraz podstawy pala zgodnie z procentowym udziałem (11) i (12):

$$R_{b,k} = 26,66\% \cdot R_{ck} = 26,66\% \cdot 2841 \text{ kN} = 757,49 \text{ kN} \quad (13)$$

$$R_{s,k} = 73,34\% \cdot R_{ck} = 73,34\% \cdot 2841 \text{ kN} = 2083,51 \text{ kN} \quad (14)$$

Obliczenie współczynnika nośności ψ_1 dla podstawy

Korzystając ze wzorów (1) i (2), po przekształceniach otrzymano:

$$\psi_1 = \frac{R_{b,k}}{A_b \cdot \bar{q}_c} \quad (15)$$

W trakcie obliczeń numerycznych jako \bar{q}_c przyjęto wartość średnią ze wszystkich pomiarów dla poszczególnych metod wyno-

sząca $\bar{q}_c = 3,19 \text{ MPa}$.

Ostatecznie wartość współczynnika nośności dla podstawy ψ_1 , zgodnie z (15), wynosi 0,32.

Obliczenie współczynnika nośności ψ_2 dla poboczniczy

Aby obliczyć rozkład współczynników ψ_2 w zależności od poszczególnych warstw gruntu obliczono procentowy udział poszczególnych warstw gruntu w całkowitej nośności poboczniczy (patrz Tab.2). Procentowy rozkład średni ustalono bazując na procentowym rozkładzie udziału poszczególnych warstw w czterech metodach oceny nośności (Energopolu, Bustamente-Gianisello, Philopponnata-Kłosa, Eurokodu 7).

Mając procentowy rozkład średni udziału poszczególnych warstw wyznaczono na podstawie (14) rozkład $\bar{q}_{s,i}$. Ostatecznie na podstawie tych obliczeń wyznaczono wartości współczynników ψ_2 dla konkretnych warstw geotechnicznych zgodnie z poniższym zapisem

$$\psi_2 = \frac{A_{s,i} \cdot \bar{q}_{s,i}}{R_{s,ki}}$$

Wartości ψ_2 są większe dla gruntów sypkich niż spoiistych. Dodatkowo w gruntach sypkich wzrost stopnia zagęszczenia powoduje generowanie większych wartości ψ_2 . W gruntach spoiistych wzrost wartości stopnia plastyczności powoduje spadek ψ_2 . Potwierdza to regułę zaprezentowaną przez Gwizdałę i innych [4] mówiącą, że wzrost oporów q_c dopuszcza stosowanie większych wartości ψ_2 .

Podsumowanie i wnioski końcowe

W rozpatrywanym przykładzie obliczeniowym metoda Energopolu ustaliła najniższą wartość nośności pala i można ją uznać za najbezpieczniejszą, jednak z drugiej strony trzeba by ją uznać za najmniej ekonomiczną.

Najmocniej zbliżone wartości próbnego obciążenia uzyskały metody Philopponnata-Kłosa, Gianisello-Bustamantego, oraz klasyczna normowa wg normy krajowej PN-83/B-02482. Jest to zderzenie całkowicie odmiennych algorytmów, które w efekcie potrafią uzyskać bardzo zbliżone wyniki. Z jednej strony posługujemy się bezpośrednio pomiarami z badań CPTU, a z drugiej przeprowadzonymi na ich podstawie parametrami pochodnymi.

Rozwiązanie z Eurokodu 7 dało rozwiązanie pośrednie w stosunku do już omówionych metod. Największą zaletą stosowania tej metody jest fakt, że postępujemy zgodnie z zaleceniami normy i możemy zawsze się na nią powołać. W metodach empirycznych wyznaczanych w warunkach lokalnych nie posiadamy już takiej pewności.

Olbrzymią zaletą stosowania metod oce-

Tab.2: Procentowy udział poszczególnych warstw w całkowitej nośności poboczniczy oraz rozkład współczynnika nośności ψ_2

Rodzaj gruntu	I_b	I_L	% rozkład udziału warstwy w całkowitej nośności poboczniczy				rozkład średni	q_{st} kPa	$R_{s,k,l}$ kN	ψ_2 -
			B.-G.	Energop.	Ph.- Kł	EC7	%			
G_n-I_n		0,40	3,76%	3,00%	4,10%	4,16%	3,75%	2058,0	31,1	66
$Ps-P_n$	0,40		0,84%	1,05%	1,38%	1,37%	1,16%	5760,3	48,1	120
G_n-I_n		0,30	1,43%	1,14%	1,26%	1,25%	1,27%	2599,7	35,0	74
P_s-P_n	0,50		3,47%	4,33%	5,68%	5,64%	4,78%	7918,8	66,1	120
G_n-I_n		0,20	1,17%	0,94%	0,84%	0,83%	0,94%	3212,8	39,2	82
$Ps-P_n$	0,50		6,19%	7,71%	10,12%	10,06%	8,52%	7056,6	58,9	120
G_p-G_n		0,30	4,96%	3,95%	4,18%	4,16%	4,31%	2711,9	35,8	76
G_n-I_n		0,30	1,58%	1,26%	1,67%	1,66%	1,54%	2154,9	32,0	67
G_p-G_n		0,30	5,68%	4,53%	5,44%	5,41%	5,26%	2390,7	33,6	71
$Ps-P_n$	0,60		2,02%	3,36%	2,87%	3,06%	2,83%	12284,8	78,1	157
G_p-G_n		0,10	4,65%	3,70%	1,67%	1,66%	2,92%	6354,6	60,6	105
$Ps-P_n$	0,70		7,34%	12,20%	10,67%	11,14%	10,34%	16737,9	107,1	156
G_n-I_n		0,20	2,80%	2,23%	2,09%	2,08%	2,30%	3062,9	38,1	80
$Ps-P_n$	0,40		2,28%	2,85%	3,73%	3,71%	3,14%	6247,2	52,1	120
G_p-G_n		0,20	3,99%	3,18%	1,67%	1,66%	2,63%	5456,3	54,4	100
$Po-Pd$	0,70		5,18%	8,61%	7,53%	7,13%	7,11%	18897,5	117,9	160
$Ps-P_n$	0,60		2,26%	3,75%	3,28%	3,42%	3,18%	13714,2	87,8	156
G_p-G_n		0,20	40,41%	32,23%	31,80%	31,60%	34,01%	2909,7	37,1	78

ny nośności na podstawie badań CPTU jest duże przyśpieszenie procesu projektowania pali, ponieważ można pominąć proces interpretacyjny badań CPTU związany z ustaleniem parametrów, geotechnicznych, a na ich podstawie dopiero nośności pali.

Mnogość metod obliczeniowych pozwalających oszacowywać nośność pala wciśkanego wielokrotnie na bazie tych samych danych może wzbudzać jednocześnie uczucie pewności jak i niepewności rozwiązania. Jednak dopiero próbne obciążenia statyczne mogą ostatecznie rozwiązać wszelkie wątpliwości. Duże znaczenie może mieć lokalność konkretnego rozwiązania w stosunku do rzeczywistych warunków geotechnicznych. Dlatego w pracy zaproponowano sposób ustalania lokalnych współczynników nośności podstawy ψ_1 i poboczniczy ψ_2 . Z ich pomocą możliwe jest szybkie projektowanie pali posadowionych w sąsiedztwie wzorcowego pala obliczeniowego.

Zastosowana analiza wsteczna ustalania ψ_1 , ψ_2 może być stosowana zawsze gdy dokonane jest oszacowanie nośności na podstawie kilku metod obliczeniowych oraz istnieje ich weryfikacja w postaci próbnego obciążenia statycznego. ◀

Materiały źródłowe

[1] Bustamante M., Gianselli L.: Określanie nośności pala pojedynczego na podstawie badań in situ. Archiwum Hydrotechniki, 1983, Tom XXX, Zeszyt 1, 98-112.

- [2] Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.
- [3] Gwizdała K., Stęczniewski M.: Charakterystyka metod określania nośności pali przy wykorzystaniu sondy statycznej CPT. Inżynieria Morska i Geotechnika, 1998, nr 6, 302-306.
- [4] Gwizdała K., Stęczniewski M., Dyka I.: Wykorzystanie sondowań statycznych do obliczania nośności i osiadań pali. Nowoczesne Budownictwo Inżynierskie, 2009, nr 4, 62-69.
- [5] Krążelewski J.: Keller Polska S.A.
- [6] Kłós J.: Obliczanie nośności pojedynczego pala na podstawie wyników sondowań statycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, 1983, nr 3, 303-306.
- [7] NEN6743:1991/A1:1997, Geotechniek – Berekeningsmethode voor funderingen op palen – Drukpalen
- [8] PN-B-04452:2002 Geotechnika. Badania polowe
- [9] PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego
- [10] PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych
- [11] Sikora Z.: Sondowanie statyczne metody i zastosowanie w geoinżynierii, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2006.