

PROGNOZA NOŚNOŚCI PALI NA PODSTAWIE BADAŃ POŁOWYCH WEDŁUG NORM PN-EN-1997 I PN-B-02482

Witold BOGUSZ*, Stanisław ŁUKASIK

Zakład Geotechniki i Fundamentowania, Instytut Techniki Budowlanej, ul. Ksawerów 21, 02-656 Warszawa

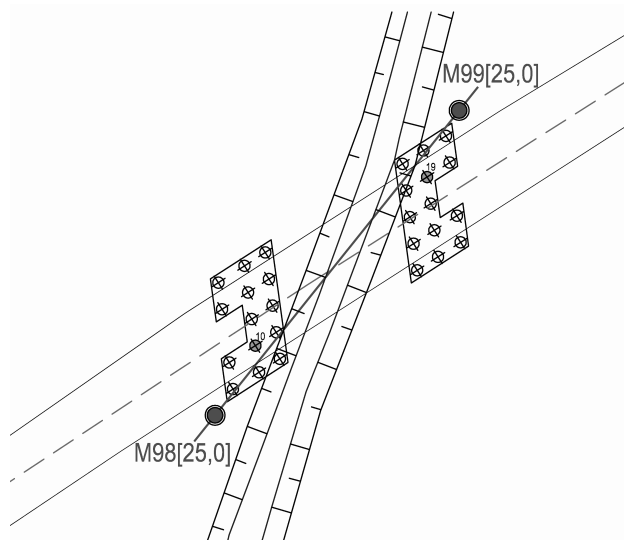
Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę nośności wierconych pali wielkośrednicowych stanowiących fundament obiektu mostowego, w ujęciu Eurokodu 7 oraz PN-83/B-02482. Nośność pali wyznaczoną z obliczeń porównano z określoną na podstawie próbnych obciążeń statycznych.

Słowa kluczowe: Eurokod 7, nośność pali wielkośrednicowych, CPT, próbne obciążenie statyczne.

1. Wprowadzenie

Zgodnie z Eurokodem 7 najpewniejszą metodą oceny nośności pali są próbne obciążenia statyczne. W Polsce, pomimo wprowadzenia Eurokodu, często podstawą projektowania fundamentów palowych nadal pozostaje norma PN-83/B-02482 *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*. Prezentuje ona konserwatywne podejście do sprawdzenia stanu granicznego nośności pali, zapewniając odpowiedni zapas bezpieczeństwa, choć czasem kosztem stosowania nieuzasadnionych ekonomicznie rozwiązań. Projektowanie według PN-EN-1997-1:2008 *Eurokod 7. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych* umożliwia większą optymalizację rozwiązań, lecz korzyści te są widoczne w przypadku dysponowania większą liczbą badań. Zwiększona liczba próbnych obciążeń statycznych, zrealizowanych we wstępnej fazie projektu, pozwala na wybranie rozwiązań bardziej ekonomicznych w późniejszej fazie wykonawczej. Podejście to ma jednak uzasadnienie w przypadku znacznej liczby projektowanych pali, gdy czas i koszty poświęcone na te badania pozwalają w sposób znaczący ograniczyć nakłady związane z realizacją projektu.

W artykule przedstawiono analizę nośności pali na podstawie PN-83/B-02482 oraz PN-EN-1997-1:2008 wykorzystując jako przykład posadowienie dwóch przyczółków mostu drogowego (rys. 1). Przyczółki posadowiono na palach o średnicy 120 cm i długości 18 m, wykonanych w rurach obsadowych z zastosowaniem iniekcji pod podstawą.



Rys. 1. Plan sytuacyjny (sondowania CPT w miejscu lokalizacji otworów M98 i M99)

Sprawdzenie stanu granicznego nośności GEO, zgodnie z załącznikiem krajowym do normy PN-EN-1997-1:2011 wymaga zastosowania podejścia obliczeniowego DA2*. Należy przyjąć następującą kombinację zestawów współczynników częściowych dla tego podejścia:

$$A1 + M1 + R3 \quad (1)$$

Sprawdzenie stanu granicznego nośności wymaga dla pala wciskanego spełnienia warunku:

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (2)$$

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: w.bogusz@itb.pl

gdzie: $F_{c;d}$ jest obliczeniowym osiowym obciążeniem pala wciskanego, a $R_{c;d}$ jest wartością obliczeniową nośności pala wciskanego, obliczoną jako:

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (3)$$

gdzie: $R_{c;d}$ jest wartością obliczeniową nośności pala wciskanego, a γ_t jest współczynnikiem częściowym do całkowitej nośności pala (tablica A.7 normy PN-EN-1997-1:2008, zestaw R2).

Z braku informacji dotyczących wartości charakterystycznych obciążeń przekazywanych przez przyczółki na grupę pali, porównano jedynie różnice w nośności badanych pali – wyznaczonych różnymi metodami. Dla kompleksowego sprawdzenia stanu granicznej nośności w celach projektowych należy jednak brać pod uwagę zapas bezpieczeństwa wynikający ze współczynników częściowych zarówno po stronie nośności, jak i obciążenia.

2. Warunki gruntowe

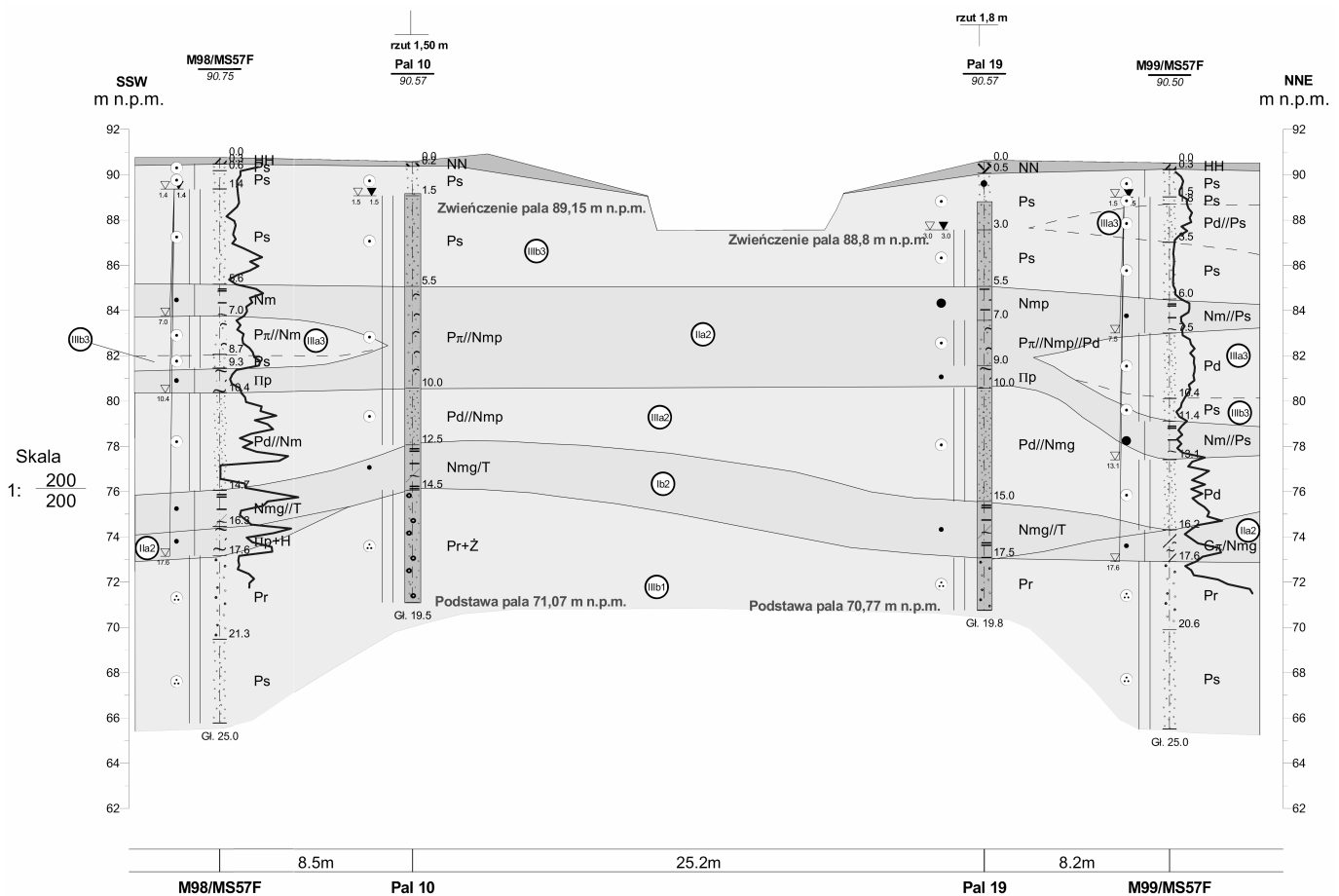
Warunki geotechniczne określono na podstawie dokumentacji w ramach, której na potrzeby projektu wykonano dwa otwory wiertnicze do głębokości 25 m poniżej poziomu terenu oraz dwa sondowania CPT

do głębokości 19 m poniżej poziomu terenu. Z badań wynika, że w podłożu występują czwartorzędowe osady rzeczne i rzeczno-zastoiskowe w postaci piasków rzecznych z przewarstwieniami gruntów słabonośnych (namuły i mady).

Na przekroju geotechnicznym (rys. 2) przedstawiono układ warstw występujących w podłożu z uwzględnieniem dodatkowych danych uzyskanych w trakcie wiercenia pali. W interpretacji przekroju należy jednak uwzględnić niedokładność rozpoznania rodzaju i stanu gruntu na podstawie urobku wydobywanego w trakcie wiercenia pali wielkośrednicowych. Na uwagę zasługuje fakt, że określenia profilu geologicznego podczas wiercenia dokonano dla jednego pala każdej podpory, niekoniecznie dla pala badanego w trakcie próbnego obciążenia.

Podstawy pali sięgają do warstwy zagęszczonych piasków grubych, pod którymi zalegają zagęzczone piaski średnie. Ponad podstawą występują średnio zagęzczone piaski drobne i średnie oraz przewarstwienia gruntów organicznych, głównie namułów w stanie twardoplastycznym.

Na przekroju (rys. 2) zamieszczono także wykresy oporu stożka q_c z sondowań CPT. Dla wykresu sondowania CPT M98 na rzędnej około 77 m nad poziomem morza spadek wartości wynika z wykonania podwiertu, udokumentowanego w karcie sondowania i nie świadczy o obecności słabszej warstwy.



Rys. 2. Przekrój geotechniczny z lokalizacją pali i sondowań CPT

3. Analiza nośności pali w oparciu o wyniki próbnych obciążeń statycznych

Próbne obciążenia statyczne pali numer 10 i 19 przeprowadzono zgodnie z wymaganiami normy PN-83/B-02482. Na podstawie otrzymanych zależności obciążenie-osiadanie (rys. 3) przeprowadzono analizę stanu granicznego nośności według norm PN-83/B-02482 oraz PN-EN-1997-1:2008. Maksymalne osiadanie osiągnięte dla pala numer 10 wynosiło 129,40 mm, a dla numer 19 – 87,74 mm. Maksymalne obciążenia dla których uzyskano stabilizację osiadań: pal 10 – 5195 kN; pal 19 – 7139 kN.

3.1. Analiza nośności pala według PN-83/B-02482

Warunek stanu granicznego nośności jest spełniony, gdy:

$$Q_r \leq k \cdot N_c^0 \quad (4)$$

gdzie: Q_r jest obciążeniem obliczeniowym działającym na pal, k jest współczynnikiem korelacyjnym zależnym od typu krzywej z wykresu pomocniczego (tablica 16

normy PN-B-02482:2008), a N_c^0 jest obciążeniem dopuszczalnym na pojedynczy pal ze względu na stan graniczny nośności.

Krzywa osiadania jest krzywą typu a, gdy spełniony jest warunek:

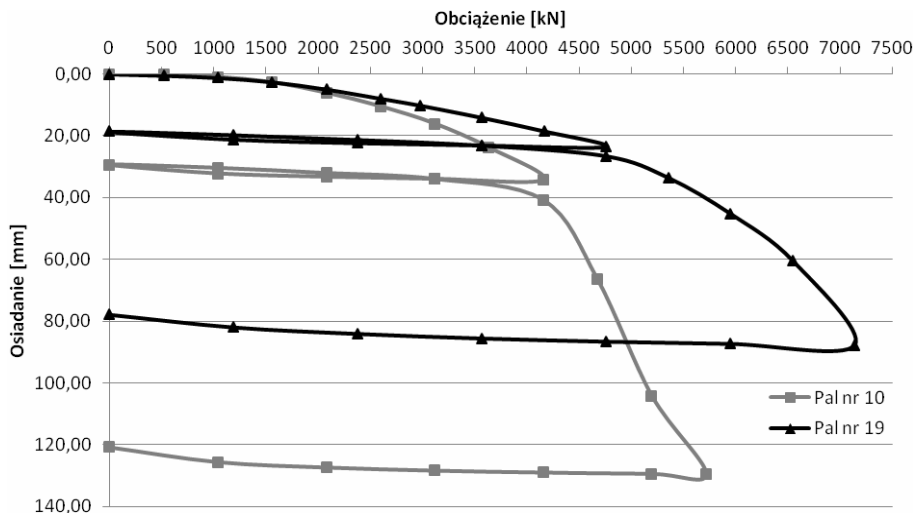
$$\frac{N_c^1}{N_g^1} \geq 0,4 \quad (5)$$

gdzie: N_c^1 jest początkiem pierwszego odcinka prostoliniowego krzywej wykresu pomocniczego; a N_g^1 jest punktem przecięcia pierwszego odcinka prostoliniowego z osią.

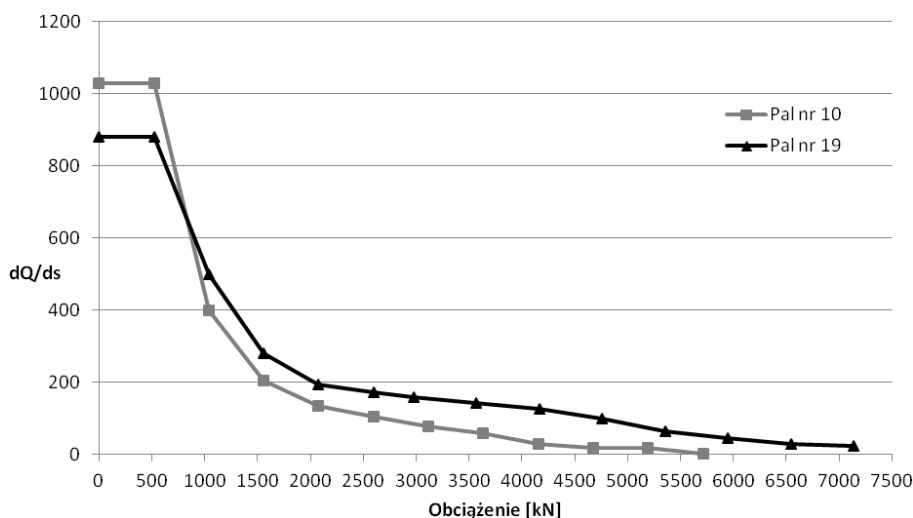
Dla krzywej typu a przyjmuje się:

$$N_c^0 = N_c^1 \quad (6)$$

Wykresy pomocnicze do analizy wyników próbnych obciążeń pokazano na rysunku 4. W tabeli 1 pokazano obliczenia nośności analizowanych pali na podstawie próbnych obciążeń według PN-83/B-02482.



Rys. 3. Wykresy zależności obciążenie-osiadanie z próbnych obciążeń statycznych



Rys. 4. Wykresy pomocnicze do analizy wyników próbnych obciążeń według PN-83/B-02482

Tab. 1. Nośność analizowanych pali na podstawie próbnych obciążeń według PN-83/B-02482

Nośność	Numer pala	
	10	19
Q_{max}	5195	7139
N_c^l	4156	5354
N_g^l	6600	8055
typ krzywej	a	a
k	1,00	1,00
N_c^o	4156	5354
$k \cdot N_c^o$	4156	5354

3.2. Analiza nośności pala według PN-EN-1997-1

Zgodnie z Eurokodem, za nośność graniczną przyjęto największe obciążenie, dla którego uzyskano stabilizację osiadań pala przed osiągnięciem wartości osiadania przekraczającego 10% jego średnicy. Nośność charakterystyczną pala wciskanego określa wzór:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\xi_1}, \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (7)$$

gdzie: $(R_{c;m})_{mean}$ jest średnią z wartości nośności pali wciskanych z próbnych obciążeń, $(R_{c;m})_{min}$ jest najniższą z wartości nośności pali wciskanych z próbnych obciążeń, ξ_1 , ξ_2 są współczynnikami korelacyjnymi do oceny wyników próbnych obciążeń statycznych pali według tablicy A.9 normy PN-EN-1997-1:2008.

Zwiększenie liczby próbnych obciążeń pozwala na zmniejszenie niepewności wyznaczenia nośności pali w danych warunkach. Według PN-EN-1997-1:2008 można wtedy zastosować niższe współczynniki korelacyjne do obliczenia wartości charakterystycznej nośności pali. W tabeli 2 przedstawiono analizę nośności pali dla rozpatrywanego przypadku.

Tab. 2. Nośność analizowanych pali na podstawie próbnych obciążeń według PN-EN-1997-1:2008

Nośność	Liczba badań		
	n = 1		n = 2
	Numer pala		
	10	19	10, 19
$R_{c;m}$	5195	7139	-
$(R_{c;m})_{mean}$	5195	7139	6167
ξ_1	1,4	1,4	1,3
$(R_{c;m})_{min}$	5195	7139	5195
ξ_2	1,4	1,4	1,2
$R_{c;k}$	3711	5099	4329
$R_{c;d}$	3374	4636	3935

Ze względu na zastosowanie pali tego samego rodzaju, długości i średnicy, w zbliżonych warunkach gruntowych, porównano obliczenia dla pali rozpatrywanych pojedynczo ($n = 1$) oraz analizowanych wspólnie ($n = 2$). Pomimo znacznej sztywności oczepu, nie zastosowano redukcji współczynników korelacyjnych. Wynika to z niewielkiej liczby pali występujących w podporze oraz sposobu ich rozmieszczenia.

4. Obliczenia nośności pali na podstawie wyników badań podłoża

Według PN-83/B-02482 obliczanie nośności pali należy wykonać w oparciu o znajomość profilu geotechnicznego oraz stopnia zagęszczenia I_D lub stopnia plastyczności I_L poszczególnych warstw podłoża. Z kolei, PN-EN-1997-1:2008 nie zawiera konkretnego sposobu wyznaczania nośności granicznej na podstawie badań podłoża. Wybór sposobu jej wyznaczenia należy do projektanta. Szeroki zakres metod określania nośności granicznej przedstawił Gwizdała (2011). Powszechne stosowanie sondowań statycznych CPTU dla celów rozpoznania podłoża zachęca w tym wypadku do bezpośredniego wykorzystywania wyników tych badań w celach projektowych. W warunkach polskich można spotkać się z zastosowaniem metody PN-EN-1997-2 (opartej na doświadczeniach holenderskich), metody Gwizdały oraz metody LCPC (Bustamante i Gianceselli, 1982).

Dla wyznaczenia nośności do analizy według normy PN-EN-1997-1:2008 wykorzystano metodę zaprezentowaną w załączniku D normy PN-EN-1997-2:2009. Należy ona do metod opartych na bezpośrednim wykorzystaniu wyników sondowań w postaci wartości oporu stożka q_c przy obliczaniu nośności, w odróżnieniu od metod wykorzystujących wartości parametrów określonych na podstawie cech wiodących I_L , I_D (uśrednionych dla wydzielonych warstw podłoża). Ponieważ długość pali przekracza nieco głębokość sondowań, w analizie przyjęto średnią wartość q_c pod podstawą, ekstrapolując na całą głębokość wartości uzyskane dla warstwy piasków zagęszczonych nad podstawą. W celach projektowych należy jednak wykonywać sondowania do głębokości, co najmniej 4 średnic pala poniżej jego podstawy.

4.1. Nośność obliczeniowa według PN-83/B-02482

Warunek stanu granicznego nośności jest spełniony, gdy:

$$Q_r \leq m \cdot N_t \quad (8)$$

gdzie: Q_r jest obciążeniem obliczeniowym działającym na pal, m jest współczynnikiem korekcyjnym (równym 0,9), a N_t jest obliczeniową nośnością pala wciskanego wyznaczoną według wzoru:

$$N_t = N_p + N_s = S_p q^{(r)} A_p + \sum S_{si} t_i^{(r)} A_{si} \quad (9)$$

gdzie: N_p jest oporem podstawy pala, N_s jest oporem poboczniczy pala wciskanego, S_p i S_{si} są współczynnikami technologicznymi, $q^{(r)}$ jest jednostkową obliczeniową

wytrzymałością gruntu pod podstawą, $t_i^{(r)}$ jest jednostkową obliczeniową wytrzymałością gruntu wzdłuż pobocznic, A_p jest polem przekroju poprzecznego podstawy pała, a A_{si} jest polem pobocznic pała.

Zgodnie z punktem 2.2.4 normy PN-83/B-02482, dla namulów w stanie innym niż zwarty i półzwarty, wartość jednostkowego oporu granicznego gruntu wzdłuż pobocznic pała należy przyjąć równą zero. Ponadto, gdy warstwa dla której $t = 0$ kPa ma miąższość większą od 0,5 m, zgodnie z zaleceniem normy należy sumować wartości oporu pobocznic jedynie dla warstw leżących poniżej jej spągu. Dla porównania przeprowadzono obliczenia nośności z uwzględnieniem tarcia tylko dla gruntów leżących poniżej warstw organicznych oraz z uwzględnieniem tarcia na całej pobocznic pała (dla warstw namulów $t = 0$ kPa). W obliczeniach nie uwzględniano tarcia negatywnego gruntu. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Nośność analizowanych pali według PN-83/B-02482 w oparciu o wyniki badań podłoża

Nośność	Numer pała	
	10	19
N_s	549 (1970) ¹⁾	1043 (2074) ¹⁾
N_p	3504	3504
N_t	4053 (5474) ¹⁾	4547 (5578) ¹⁾
$m \cdot N_t$	3648 (4927) ¹⁾	4092 (5020) ¹⁾

1) Wartość wyznaczona z uwzględnieniem tarcia pozytywnego gruntu na całej długości pała; dla namulów ($I_L = 0, 10-0, 20$): $t = 0$ kPa

4.2. Nośność obliczeniowa według PN-EN-1997-1

Nośność charakterystyczna pała wciskanego wynosi:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (10)$$

gdzie: $(R_{c;cal})_{mean}$ jest średnią z wartości nośności pali wciskanych wyznaczonych z obliczeń, $(R_{c;cal})_{min}$ jest najniższą z wartości nośności pali wciskanych wyznaczonych z obliczeń, ξ_3 i ξ_4 są współczynnikami korelacyjnymi do wyznaczenia wartości charakterystycznych na podstawie badań podłoża według tablicy A.10 normy PN-EN-1997-1:2008.

Wyniki nośności w oparciu o wyniki badań podłoża przedstawiono w tabeli 4.

Tab. 4. Nośność analizowanych pali według PN-EN-1997-1:2008 w oparciu o wyniki badań podłoża.

Nośność	Liczba badań		
	n = 1		n = 2
	Numer pała		
	10	19	10, 19
R_s	2611	2223	
R_b	4423	5368	-
$R_{c;cal}$	7034	7591	
$(R_{c;cal})_{mean}$	7034	7591	7313
ξ_3	1,4	1,4	1,35
$(R_{c;cal})_{min}$	7034	7591	7034
ξ_4	1,4	1,4	1,27
$R_{c;k}$	5024	5422	5417
$R_{c;d}$	4568	4929	4925

5. Wyniki analiz

Zestawienie wyników analiz nośności pali pokazano w tabeli 5.

Rozbieżność wyników uzyskanych w przypadku analizowanego pała numer 10 może wynikać z przeszacowanej w obliczeniach nośności jego podstawy, zarówno według normy PN-EN-1997-1:2008 jak i PN-83/B-02482. Możliwą przyczyną jest występowanie słabszej warstwy pod podstawą tego pała, która nie została udokumentowana sondowaniem ze względu na jego niedostateczną głębokość.

Pał numer 19 osiąga bardzo zbliżone wartości nośności obliczeniowych uzyskanych obiema metodami według obu norm, za wyjątkiem PN-83/B-02482, jeśli pominie się tarcie pozytywne części gruntów leżących powyżej przewarstwienia namulów zgodnie z wymaganiami normy.

Pominięcie tarcia pozytywnego na pobocznic pała, w obliczeniach zgodnie z zaleceniami normy PN-83/B-02482, skutkuje znaczną różnicą w otrzymywanych rezultatach. Uwzględniając tarcie pozytywne na pełnej długości pała, według PN-83/B-02482, wyznaczona wartość oporu na pobocznic osiąga wartości analogiczne do uzyskanych w obliczeniach na podstawie sondowania CPT. Przedstawiony w normie PN-83/B-02482 sposób uwzględniania występujących przewarstwień gruntów organicznych, jest w niniejszym przykładzie zbyt podatny na interpretację zastosowaną w dokumentacji oraz nie zawsze może być właściwy.

W przypadku obu analizowanych pali, obliczeniowa nośność, wyznaczona z pojedynczych próbnymi obciążeniami, według interpretacji Eurokodu 7, jest około 15% mniejsza od wyznaczonej według normy PN-83/B-02482 w oparciu o te same dane.

Dla porównania, rezultaty (tab. 6) przedstawiono także w postaci osiadań dla wartości obciążeń odpowiadających

Tab. 5. Zestawienie wyników analiz nośności pali

Norma	Nośność pala wciskanego [kN]				
	Liczba badań	n = 1		n = 2	
	Numer pala	10	19	10, 19	
Eurokod 7	Na podstawie badań podłoża	R_s	2611	2223	
		R_b	4423	5368	-
		$R_{c,cal}$	7034	7591	
		$R_{c;k}$	5024	5422	5417
		$R_{c;d}$	4568	4929	4925
	Na podstawie próbnego obciążenia statycznego	$R_{c;m}$	5195	7139	-
		$R_{c;k}$	3711	5099	4329
		$R_{c;d}$	3374	4636	3935
		N_s	549 (1970) ¹⁾	1043 (2074) ¹⁾	
		N_p	3504	3504	
PN-83/B-02482	Na podstawie badań podłoża	N_t	4053 (5474) ¹⁾	4547 (5578) ¹⁾	
		$m*N_t$	3648 (4927) ¹⁾	4092 (5020) ¹⁾	
		Q_{max}	5195	7139	
	Na podstawie próbnego obciążenia statycznego	N_g^l	6600	8055	
		$k*N_c^0$	4156	5354	

¹⁾ Wartość wyznaczona z uwzględnieniem tarcia pozytywnego gruntu na całej długości pala

Tab. 6. Osiadania wyznaczone z zależności obciążenie-osiadanie dla nośności obliczeniowych

Norma	Osiadanie s [mm]			
	Liczba badań	n = 1		n = 2
	Numer pala	10	19	10, 19
Eurokod 7	Na podstawie badań podłoża	60	27	85, 27
	Na podstawie próbnego obciążenia statycznego	20	25	30, 23
PN-83/B-02482	Na podstawie badań podłoża	24	25	
	Na podstawie próbnego obciążenia statycznego	40	34	

poszczególnym nośnościom obliczeniowym. Wartości osiadań podano na podstawie wyników próbnich obciążeń.

6. Podsumowanie

Obliczenia nośności wykonane bezpośrednio w oparciu o wyniki sondowania statycznego CPT, ze względu na dokładność samego badania, pozwalają na lepsze uwzględnienie zmienności podłoża gruntowego przy projektowaniu pali. Z kolei, opieranie analizy o wartości wyprowadzone jest obarczone błędem interpretacji i wynikającego z niej uśrednienia parametrów warstw podłoża. Należy pamiętać, że według Eurokodu 7 przeprowadza się sprawdzenie stanu granicznego nośności pali, ale samo wyznaczenie nośności granicznej na podstawie badań podłoża należy do projektanta.

W opisanym przykładzie wykorzystano metodę obliczenia przedstawioną w załączniku D normy PN-EN 1997-2:2009.

W dotychczasowej praktyce, wynikającej z zaleceń normy PN-83/B-02482, próbne obciążenia statyczne służyły głównie weryfikacji założeń projektowych i jakości wykonawstwa oraz stanowiły podstawę odbioru robót palowych. Według Eurokodu 7 są one jednak, najpewniejszą metodą wyznaczania nośności granicznej pali, stanowiącą podstawę do ich projektowania. Metodologia interpretacji próbnego obciążenia statycznego według PN-83/B-02482 jest bardziej złożona od przedstawionej w normie PN-EN-1997-1:2008, gdyż bierze pod uwagę cały przebieg badania. Dla badań odbiorczych obejmujących pojedyncze próbne obciążenia statyczne, może być ona jednak bardziej korzystna. W najczęstszym przypadku, gdy próbne obciążenia prowadzone są na palach konstrukcyjnych, rzadko

osiągana jest ich nośność graniczna odpowiadająca osiadanemu 0,10D. Przyjęcie wartości nośności niższej od granicznej i zastosowanie pojedynczego próbnego obciążenia może skutkować nieekonomicznym zaniżeniem otrzymanej nośności obliczeniowej. Według Eurokodu 7 dla takiego przypadku możliwe jest przeprowadzenie ekstrapolacji wykresu obciążenie-przemieszczenie dla pali wciskanych, jednak brakuje metod o wystarczająco potwierdzonej skuteczności dla jej zastosowania.

Ponadto, przy występowaniu widocznej różnicy w nośności, uzyskanej z łącznej analizy przynajmniej dwóch pali, w reprezentatywnych warunkach gruntowych, oddzielna ich analiza skutkuje lepszą optymalizacją projektu. Bauduin (2003) wskazuje, że już w przypadku współczynnika zmienności większego niż 10-12%, charakterystyczna wartość nośności pala będzie wynikała z najmniejszej z uzyskanych wartości. Wartość średnia będzie decydująca w przypadkach, gdy współczynnik zmienności będzie niższy. Gdy przekroczy on jednak 20%, zasadne jest zwiększenie liczby badań.

Literatura

- Bauduin Ch. (2003). Assessment of model factors and reliability index for ULS design of pile foundations. W: *Proc. of the 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Ghent 2003, 16.
- Bustamente M., Gianceselli L. (1982). Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometr CPT. W: *Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amestrdam 1982, Vol. 2, 493-500.
- Gwizdała K. (2011). *Fundamenty Palowe. Technologie i obliczenia*. Tom 1. PWN, Warszawa.

PREDICTION OF PILE CAPACITY BASED ON GEOTECHNICAL INVESTIGATION ACCORDING TO PN-EN-1997 AND PN-B-02482

Abstract: The paper presents bearing capacity analysis for large diameter piles used as bridge foundation, according to Eurocode 7 and Polish National standard PN-83/B-02482. Calculated bearing capacity of those piles was compared with capacity derived from static load tests.