

PROJEKTOWANIE PRZEMIESZCZENIOWYCH PALI WKRĘCANYCH – ANALIZA DOŚWIADCZEŃ

Piotr Zieliński¹, Andrzej T. Wojtasik^{1, 2}

¹GT Projekt, Swadzim

²Politechnika Poznańska, Poznań

Streszczenie. Mając na uwadze brak krajowych wytycznych dotyczących metod obliczania przemieszczeniowych pali wkręcanych oraz liczne awarie, których powstanie wiąże się z błędnym wymiarowaniem takich pali, w artykule porównano różne podejścia obliczeniowe. Ponadto poddano krytycznej analizie kilka wybranych projektów, mając na celu przedstawienie praktycznego zastosowania przedstawionych podejść obliczeniowych. Analizę ograniczono do współpracy pali z podłożem niespoistym.

Słowa kluczowe: przemieszczeniowy pał, nośność, przemieszczenie, sondowanie CPT, obliczenia pali, grunt niespoisty

WSTĘP

Istnieje wiele odmian stosowanych technik pali wkręcanych. Jedne z pierwszych, opracowane około 40 lat temu, to pale typu „Atlas” i „Fundex”. Z biegiem lat opracowano kolejne technologie, takie jak: „Omega”, „De Waal”, CMC, SDP, SDC, FDP i „Screw-sol”. Pierwsze zastosowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych w Polsce datuje się na drugą połowę lat 90. ubiegłego wieku, a na szeroką skalę – od około 10 lat. Pale te powszechnie wykorzystywane są do posadowienia pośredniego obiektów budownictwa ogólnego oraz przemysłowego, posadowienia podpór obiektów inżynierskich, a także do wzmocnienia słabonośnego podłoża w budownictwie drogowym.

Pomimo szerokiego zastosowania przemieszczeniowych pali wkręcanych we współczesnej praktyce inżynierskiej technologia ta nie jest w pełni zbadana od strony naukowej [Kraśniński 2013]. Od wielu lat prowadzone są badania dążące do dokładnego rozpoznania współpracy pała przemieszczeniowego wkręcane go z podłożem gruntowym. „Kła-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Piotr Zieliński, GT Projekt, Swadzim, ul. Parkowa 4, 62-080 Tarnowo Podgórne, e-mail: piotr.zielinski@gtprojekt.pl

syczne” metody projektowania pali nie sprawdzają się w odniesieniu do tej technologii, dlatego powstało kilka niezależnych propozycji obliczania tego typu pali.

Najpopularniejszym podejściem do projektowania przemieszczeniowych pali wkręcanych jest wykorzystanie wyników uzyskiwanych z sondowań statycznych CPTU (Cone Penetration Undrained Test). W trakcie wykonywania sondowania CPTU mierzone są następujące parametry: opór na powierzchni stożka (q_c , MPa), tarcie gruntu o powierzchnię boczną tulei ciernej (f_s , MPa) oraz ciśnienie wody w porach gruntu (u , MPa) [Sikora 2006].

Mając na uwadze brak krajowych wytycznych dotyczących metod obliczania przemieszczeniowych pali wkręcanych oraz liczne awarie, których powstanie wiąże się z błędnym wymiarowaniem nośności pali, w artykule porównano cztery różne podejścia obliczeniowe. Analizę ograniczono do współpracy pala z podłożem niespoistym dla przypadków trzech różnych inwestycji charakteryzujących się podobnymi warunkami gruntowymi.

METODY OBLICZENIOWE

Zasady obliczeń

Obowiązująca w Polsce norma Eurokod 7 [PN-EN 1997-2:2009] wyróżnia cztery sposoby projektowania fundamentów palowych [Wysokiński i in. 2011]:

- na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych, których zgodność z innym porównywalnym doświadczeniem została wykazana za pomocą obliczeń lub w inny sposób,
- na podstawie empirycznych lub analitycznych metod obliczeniowych, których wiarygodność została wykazana przez próbne obciążenia statyczne w podobnych sytuacjach,
- na podstawie wyników próbnych obciążeń dynamicznych, których wiarygodność została wykazana przez próbne obciążenia statyczne w podobnych sytuacjach,
- na podstawie obserwacji zachowania porównywalnych fundamentów palowych, jeżeli dane te są potwierdzone wynikami badań pali w terenie i badań podłoża.

Projektowanie nośności pali na podstawie sondowań statycznych CPTU zalicza się do empirycznych metod obliczeniowych.

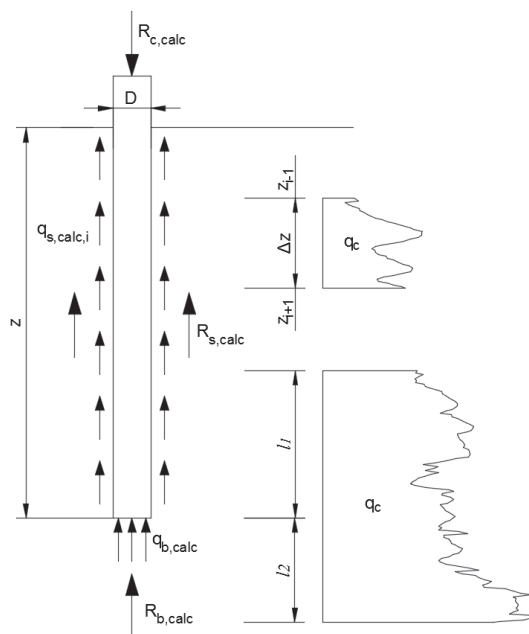
Uznaną i stosowaną metodą obliczania nośności pala na podstawie sondowania CPTU jest propozycja Bustamante i Gianceselli, tzw. metoda LCPC [Bustamante i Gianceselli 1982]. W normie Eurokod 7 [PN-EN 1997-2:2009] podano przykład określania nośności pojedynczego pala wciskanego na podstawie wartości q_c z badania CPTU, który można zastosować do obliczeń pali przemieszczeniowych wkręcanych. W 2013 roku ukazała się praca, będąca efektem habilitacyjnego projektu badawczego zrealizowanego na Politechnice Gdańskiej. Projekt ten dotyczył analizy współpracy przemieszczeniowych pali wkręcanych z niespoistym podłożem gruntowym. Efektami tego projektu są m.in. propozycja metody obliczania nośności pali przemieszczeniowych wkręcanych na podstawie wyników sondowania statycznego oraz propozycja obliczania nośności i osiadań tych pali z wykorzystaniem funkcji transformacyjnych.

Wykorzystując wyniki badań sondą statyczną, oblicza się nośność pala wciskanego na podstawie oporu (q_c):

$$R_{c,calc} = R_{b,calc} + R_{s,calc} = A_b q_{b,calc} + \sum_{i=1}^n A_{s,i} q_{s,calc,i} \quad (1)$$

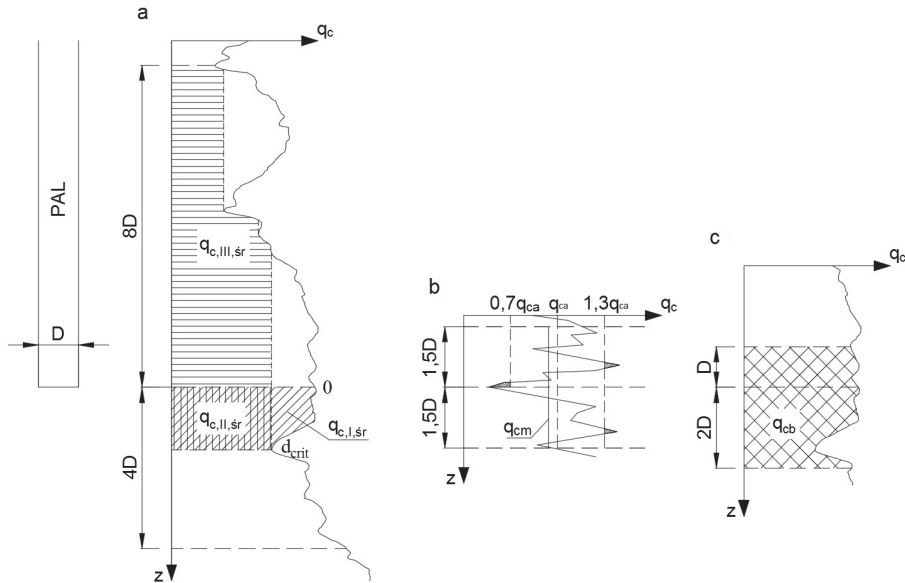
gdzie: $q_{b,calc}$ – jednostkowy opór pod podstawą pala [kPa],
 $q_{s,calc,i}$ – jednostkowy opór wzdłuż pobocznic pala w i -tej warstwie gruntu [kPa],
 $A_b, A_{s,i}$ – powierzchnia podstawy pala oraz powierzchnia pobocznic na danym odcinku i [m²].

Schemat obliczania nośności pali na podstawie sondowania statycznego CPTU pokazano na rysunku 1. Przedstawiono tam dodatkowe oznaczenia niewystępujące we wzorze (1), które wymagają komentarza. Odległości l_1 oraz l_2 odnoszą się do zakresu powyżej i poniżej poziomu posadowienia podstawy pala, dla którego uśredniany jest opór podłoża. Wartość Δz jest miąższością i -tej warstwy, dla której obliczany jest jednostkowy opór wzdłuż pobocznic pala.



Rys. 1. Założenia do obliczeń nośności pala na podstawie badań sondą statyczną CPTU
 Fig. 1. Assumptions for calculating bearing capacity of piles based on CPTU test

Poszczególne metody obliczeniowe różnią się od siebie sposobem i zakresem uśredniania jednostkowego oporu gruntu pod stożkiem, w strefie przy podstawie pala ($q_{b,calc}$ – rys. 2). Szczegółowe opisy poszczególnych metod oraz wyjaśnienia oznaczeń zawartych na rysunku 2 znaleźć można w literaturze [Bustamante i Gianceselli 1982, Sikora 2006, PN-EN 1997-2:2009, Gwizdała 2010, Krasiński 2013].



Rys. 2. Założenia do obliczeń jednostkowego oporu gruntu w strefie przy podstawie pała według: a – Eurokodu 7, b – metody LCPC, c – Krasieńskiego

Fig. 2. Assumptions to calculate unit cone resistance for pile base according to: a – Eurocode 7, b – LCPC method, c – Krasieński

Różnice pomiędzy analizowanymi metodami obliczeniowymi dotyczą również samego obliczania jednostkowych oporów pod podstawą i wzdłuż pobocznic pała ($q_{b,calc}$, $q_{s,calc,i}$). W przypadku metod LCPC oraz proponowanej w Eurokodzie 7 obliczenie $q_{b,calc}$, $q_{s,calc,i}$ odbywa się przez zastosowanie odpowiednich współczynników nośności podstawy i pobocznic. W metodzie opracowanej przez Krasieńskiego obliczenie $q_{b,calc}$, $q_{s,calc,i}$ polega na podstawieniu odpowiednio uśrednionych oporów do zaproponowanych wzorów.

Poniżej przedstawiono zależności stosowane w poszczególnych podejściach obliczeniowych oraz współczynniki nośności dotyczące pałi przemieszczeniowych wkręcanych, wykonywanych w podłożu niespoistym.

Metoda LCPC

Zależności do obliczenia jednostkowych oporów gruntu pod podstawą i wzdłuż pobocznic pała:

$$q_{b,calc} = \psi_1 \cdot q_{cm} \quad (2)$$

$$q_{s,calc,i} = \frac{q_{cm}}{\psi_{2,i}} \quad (3)$$

gdzie: ψ_1 – współczynniki nośności podstawy,
 ψ_2 – współczynniki nośności pobocznic w obrębie i -tej warstwy.

W metodzie LCPC współczynniki nośności (ψ) uzależnione są od rodzaju gruntu oraz od wartości oporu na stożku sondy CPTU. Tabela 1 pokazuje wartości współczynników.

Tabela 1. Współczynniki nośności oraz graniczne opory na pobocznicę według metody LCPC
Table 1. Bearing factors and maximum shaft resistances according to LCPC method

Rodzaj gruntu Nature of soil	Opór stożka, q_c Cone resistance, q_c	Współczynnik nośności Bearing factor		Maksymalny opór na pobocznicę, $q_{s,calc,i}$ Maximum shaft resistance $q_{s,calc,i}$
	MPa	ψ_1	ψ_2	kPa
Piasek luźny Loose sand	≤ 5	0,5	60	35
Żwir, piasek średnio zagęszczony Moderately dense sand, and gravel	5–12	0,5	100	120
Żwir, piasek zagęszczony Dense to very dense sand and gravel	>12	0,4	150	150

Metoda według propozycji Eurokodu 7

Zależności do obliczenia jednostkowych oporów gruntu pod podstawą i wzdłuż pobocznicę pala:

$$q_{b,calc} = 0,5 \cdot \alpha_p \cdot \beta_s \cdot \left\{ \frac{q_{c,I,sr} + q_{c,II,sr}}{2} + q_{c,III,sr} \right\} \quad (4)$$

$$q_{s,calc,i} = \alpha_s \cdot q_{cs,i} \quad (5)$$

gdzie: α_p – współczynnik klasy pala; dla pali przemieszczeniowych wkręcanych w gruntach niespoistych przyjęto 0,8,

β_s – współczynnik uwzględniający kształt poszerzonej podstawy pala; dla pali przemieszczeniowych wkręcanych należy przyjmować wartość 1,0,

α_s – współczynnik nośności pobocznicę w obrębie i -tej warstwy obliczeniowej.

W przypadku propozycji zawartej w Eurokodzie 7 współczynniki nośności podstawy pala są uzależnione od technologii wykonywania pala oraz kształtu jego podstawy. Jest również podana wartość graniczna oporu gruntu pod podstawą pala: $q_{b,calc} \leq 15$ MPa. Maksymalna wartość współczynnika nośności pobocznicę dla piasków i pospółek wynosi 0,009, przy czym należy pamiętać, że w przypadku piasków bardzo gruboziarnistych konieczny jest współczynnik redukcyjny 0,75, a w przypadku żwirów – 0,5 [PN-EN 1997-2:2009, Wysokiński 2011].

Metoda według Krasińskiego

Zależności do obliczenia jednostkowych oporów gruntu pod podstawą i wzdłuż pobocznicę pala:

$$q_{b,calc} = 2475 \cdot \left(\frac{q_{cb}}{q_{ref}} \right)^{0,16} \quad [\text{kPa}] \quad (6)$$

$$q_{s,calc,i} = 65 \cdot \left(\frac{q_{cs,i}}{q_{ref}} \right)^{0,23} \quad [\text{kPa}] \quad (7)$$

gdzie: q_{ref} – naprężenie referencyjne (porównawcze), przyjmowane o wartości 1 MPa.

W powyższych wzorach wartości q_{cb} oraz $q_{cs,i}$ należy podawać w MPa i powinny one dodatkowo spełniać warunki:

$$q_{cb} \in (5-30) \text{ MPa} \quad (8)$$

$$q_{cs,i} \in (5-25) \text{ MPa} \quad (9)$$

Należy zaznaczyć, że wzory (6) i (7) są zależnościami empirycznymi, opracowanymi na podstawie niewielkiej liczby badań pali o zbliżonych średnicach (360–400 mm) [Kraśiński 2013], które wykonano w podobnych warunkach gruntowych – nawodnionych piaskach rejonu delty Wisły.

Metoda wykorzystująca funkcje transformacyjne według Kraśińskiego

Metoda ta daje możliwość oceny nośności pala na podstawie analizy krzywej Q - s . Zaproponowano następujące funkcje transformacyjne t - z i q - z :

$$q_{b,calc}(s_b) = 2475 \cdot \left(\frac{q_{cb}}{q_{ref}} \right)^{0,16} \cdot \left(\frac{s_b}{z_{b;ref}} \right)^{0,38} ; z_{b;ref} = 0,1 \cdot D_b \quad (10)$$

$$q_{s,calc}(s_s) = 53 \cdot \left(\frac{q_{cs,i}}{q_{ref}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{s_s}{z_{s;ref}} \right)^{0,38} ; z_{s;ref} = 10 \text{ mm} \quad (11)$$

Tak jak wcześniej, wartość naprężenia referencyjnego należy przyjmować jako $q_{ref} = 1,0$ MPa.

Współczynniki korelacyjne oraz częściowe przyjmowane do obliczeń

Dla obliczonej, zgodnie z powyższymi zależnościami, nośności podstawy pala ($R_{b,calc}$) oraz jego pobocznicy ($R_{s,calc}$) należy, zgodnie z obowiązującą w Polsce normą Eurokod 7, zastosować odpowiednie współczynniki redukujące, ponieważ są to nośności graniczne.

Do wyznaczania nośności charakterystycznych pali według Eurokod 7 przewiduje się stosowanie współczynników korelacyjnych ξ_3 oraz ξ_4 (tab. 2). Wartości tych

Tabela 2. Wartości współczynników korelacyjnych (ξ) [PN-EN 1997-1:2008]Table 2. Values of correlation coefficients (ξ) [PN-EN 1997-1:2008]

n	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
ξ_4	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

współczynników uzależnione są od liczby zbadanych profili gruntowych. Warto tutaj zaznaczyć, że idea stosowania współczynników ξ_3 i ξ_4 zachęca do prowadzenia dokładniejszych badań podłoża gruntowego, dzięki czemu zwiększa się bezpieczeństwo projektowania, często przy jednoczesnym zmniejszaniu kosztów inwestycyjnych [Kraśiński 2013].

Do obliczeń porównawczych przedstawionych w artykule, według metod LCPC oraz metody zawartej w Eurokodzie 7, przyjęto wartości współczynników korelacyjnych $\xi_3 = \xi_4 = 1,4$. Kraśiński proponuje obniżenie współczynników ξ_3 i ξ_4 , dzieląc ich wartości przez 1,1. W analizie według tej metody przyjęto zatem współczynniki korelacyjne $\xi_3 = \xi_4 = 1,3$. W obliczeniach uwzględniono współczynniki korelacyjne, ponieważ sondowania statyczne, dla których wykonywano obliczenia, nie były wykonywane dokładnie w punktach analizowanych pali.

W celu określenia wartości obliczeniowych nośności pali stosuje się współczynniki częściowe (γ). Zgodnie z Eurokodem 7, wartości częściowych współczynników dla podstawy, pobocznicy oraz całkowitego oporu gruntu, oznaczane odpowiednio: $\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t$, wynoszą 1,1 (podejście DA.2). Współczynniki te przyjęto do obliczeń według metod LCPC oraz Eurokodu 7. Do obliczeń przy wykorzystaniu trzeciej z metod przyjęto zaproponowane w tej metodzie współczynniki $\gamma_b = 1,65$ oraz $\gamma_s = 1,20$. Należy zwrócić uwagę, że w oryginalnej metodzie LCPC [Bustamante i Ganeselli 1982] proponowano współczynnik bezpieczeństwa $\gamma_s = \gamma_b = 2,0$.

W przypadku metody obliczania nośności oraz osiadań, wykorzystującej funkcje transformacyjne zaproponowane przez Kraśińskiego, zastosowano współczynniki korelacyjne o wartościach zmniejszonych i pominięto współczynniki częściowe (γ), gdyż wartości charakterystyczne określane są z odpowiednim poziomem bezpieczeństwa [Kraśiński 2013].

WYNIKI BADAŃ

Przykłady obliczeniowe

W celu porównania wyżej wymienionych metod obliczeniowych wybrano 14 pali wykonanych przy realizacji trzech różnych inwestycji na terenie Polski (tab. 3). Wszystkie pale były wykonane w technologii SDP (*screw displacement piles* lub *soil displacement piles*). Jest to jedna z najczęściej wykorzystywanych w Polsce technologii przemieszczeniowych pali wkręcanych. Wszystkie analizowane pale SDP były poddane próbnym obciążeniom statycznym.

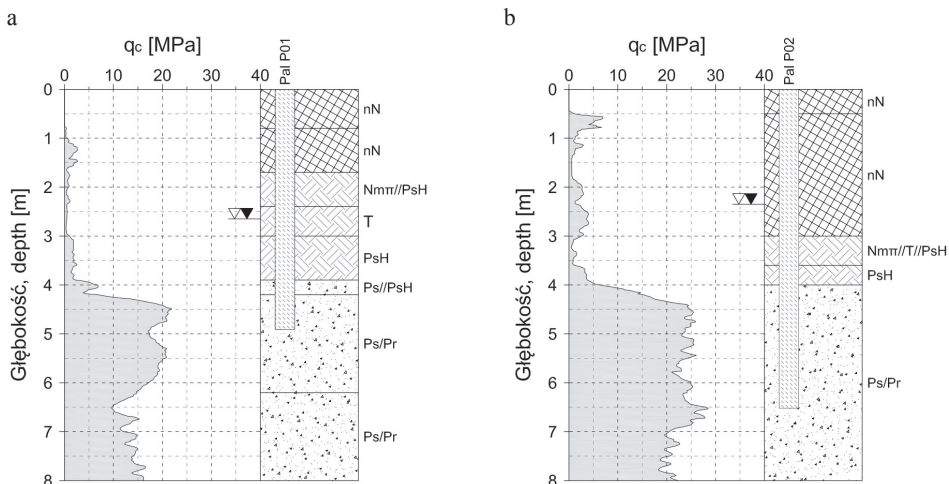
W obliczeniach nośności pominięto warstwy słabonośne i przypowierzchniowe.

Tabela 3. Podstawowe informacje dotyczące analizowanych pali
Table 3. Basic information about analyzed piles

Symbol pala Pile symbol	Inwestycja Investment	Typ pala Pile type	Średnica [m] Diameter [m]	Długość pala [m] Pile length [m]
P01	1	SDP	0,4	4,91
P02	1	SDP	0,4	6,52
P03	2	SDP	0,4	14,2
P04	2	SDP	0,4	14,57
P05	2	SDP	0,4	13,43
P06	2	SDP	0,4	13,25
P07	2	SDP	0,4	11,02
P08	2	SDP	0,4	16,02
P09	2	SDP	0,4	16,39
P10	2	SDP	0,4	8,46
P11	2	SDP	0,4	12,92
P12	3	SDP	0,4	10,63
P13	3	SDP	0,4	11,63
P14	3	SDP	0,4	8,52

Opis warunków gruntowych poszczególnych inwestycji

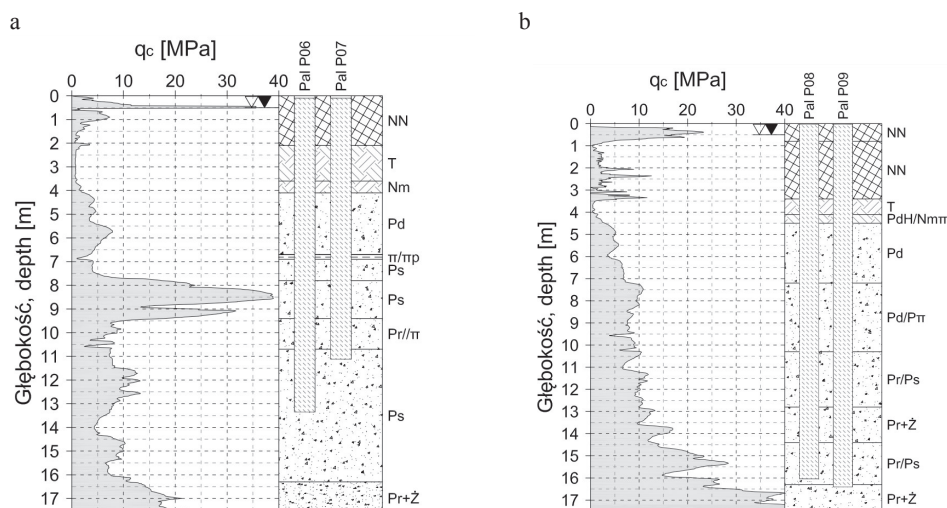
Na podstawie wyników badań geotechnicznych dla inwestycji nr 1 stwierdzono, że powierzchniową warstwę stanowią nasypy niekontrolowane, zalegające na warstwie gruntów organicznych odłożonych na mineralnych osadach piaszczystych w stanie średnio zagęszczonym oraz zagęszczonym. Głębokość, do której stwierdzono zaleganie gruntów słabonośnych w miejscach wykonanych badań, to maksymalnie 4,0 m p.p.t. Na rysunku 3 pokazano profile podłoża oraz wykresy sondowań CPTU dla inwestycji nr 1.



Rys. 3. Przykładowe wykresy sondowań CPTU wykonanych w ramach inwestycji nr 1:
a – w pobliżu pala P01, b – w pobliżu pala P02

Fig. 3. Examples of CPTU test for investment No. 1 near to: a – pile P01, b – pile P02

Na podstawie wyników badań geotechnicznych dla inwestycji nr 2 stwierdzono, że warstwę przypowierzchniową tworzą antropogeniczne nasypy niekontrolowane o miąższości od około 1,0 m do około 4,5 m. Pod gruntami nasypowymi zalegają grunty organiczne: torfy, lokalnie w dolnych partiach gytie oraz lokalnie namuły. Miąższość osadów organicznych wynosi od około 1,0 m do około 4,0 m. Poniżej tych osadów zalegają piaski (drobne, średnie, lokalnie pyłaste) z przewarstwieniami pyłów glin pyłastych i glin pyłastych zwięzłych. Na rysunku 4 pokazano profile podłoża oraz wykresy sondowań CPTU dla inwestycji nr 2.



Rys. 4. Przykładowe wykresy sondowań CPTU wykonanych w ramach inwestycji nr 2: a – w pobliżu pali P06 i P07, b – w pobliżu pali P08 i P09

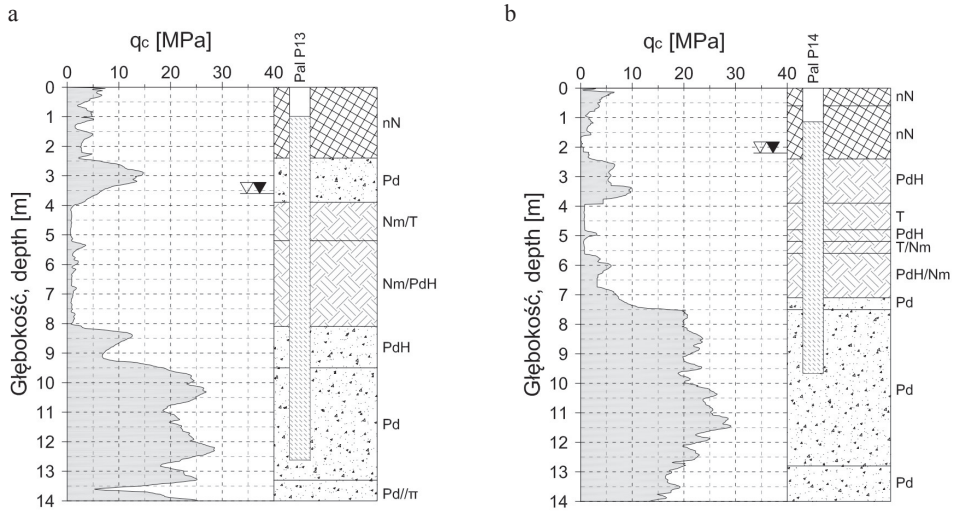
Fig. 4. Examples of CPTU test for investment No. 2 near to: a – piles P06 and P07, b – piles P08 and P09

Na podstawie wyników badań geotechnicznych dla inwestycji nr 3 stwierdzono, że przypowierzchniową warstwę stanowią grunty nasypowe, których miąższość w punktach badawczych wynosiła od 1,6 do 3,3 m. Poniżej gruntów nasypowych zalegają grunty słabonośne w postaci piasków z domieszkami humusu oraz typowe grunty organiczne (torfy oraz namuły). Miąższość tych osadów nie przekraczała 10 m, a samych gruntów organicznych – od 0,5 do 4,0 m. Poniżej podłoża słabonośnego zalegają piaski z niewielkimi przewarstwieniami glin i glin pyłastych. Na rysunku 5 pokazano profile podłoża oraz wykresy sondowań CPTU dla inwestycji nr 3.

Warunki gruntowe stwierdzone na terenie wymienionych inwestycji były do siebie na tyle zbliżone, że możliwe było prowadzenie porównawczych obliczeń nośności pali.

Wyniki obliczeń

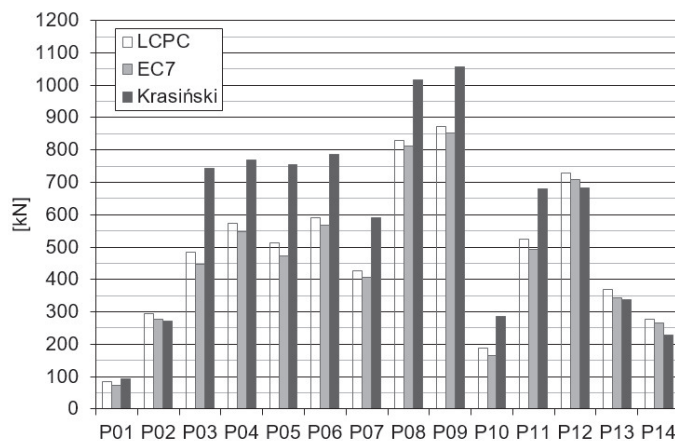
Dla analizowanych klasycznych metod obliczeniowych wyznaczono nośność graniczną charakterystyczną oraz obliczeniową. Obliczone wartości nośności pali dla pobocznic, podstawy oraz nośność całkowitą pokazano na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 5. Przykładowe wykresy sondowań CPTU wykonanych w ramach inwestycji nr 3: a – w pobliżu pala P13, b – w pobliżu pala P14

Fig. 5. Examples of CPTU test for investment No. 3 near to: a – pile P13, b – pile P14

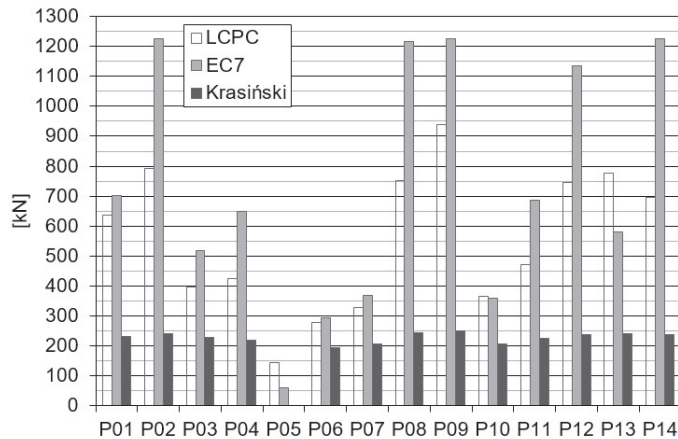
Nośność pobocznicy pali P03–P11 była największa w metodzie zaproponowanej przez Krasieńskiego. W przypadku pali P01 oraz P02, które zostały wprowadzone na znacznie mniejszą głębokość w podłoże nośne, obliczone wartości nośności pobocznic są znacznie bardziej zbliżone do tych wyznaczonych pozostałymi dwiema metodami. Nośność pobocznic wyznaczona według metod LCPC oraz Eurokod 7 jest podobna (rys. 6).



Rys. 6. Obliczeniowa nośność pobocznicy pali

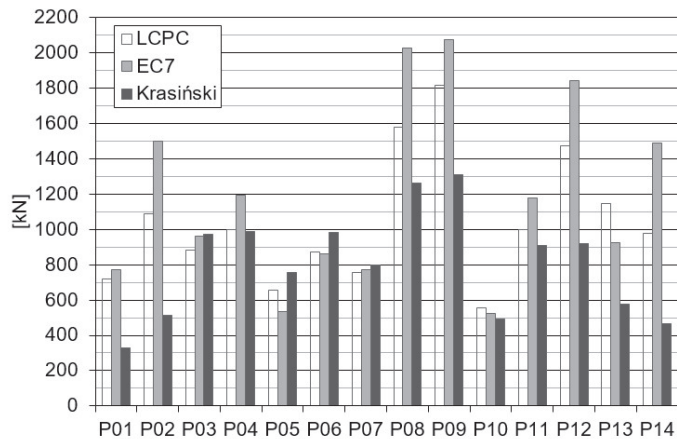
Fig. 6. Computational bearing capacities of pile shaft

Dla nośności podstaw pali stwierdzono bardzo duże różnice pomiędzy analizowanymi metodami obliczeniowymi (rys. 7). Największe wartości nośności podstaw pali obliczono na podstawie metody Eurokod 7. Należy zwrócić uwagę na wyniki uzyskane dla metody zaproponowanej przez Krasińskiego, gdzie obliczone wartości nośności pali są do siebie bardzo zbliżone i są mniejsze niż w przypadku pozostałych dwóch metod (dla pala P05 nie wyznaczono nośności podstawy, ponieważ uśredniony jednostkowy opór w strefie przy podstawie pala wynosił mniej niż 5 MPa, $q_{cb} < 5,0$ MPa).



Rys. 7. Obliczeniowa nośność podstaw pali

Fig. 7. Computational bearing capacities of piles base



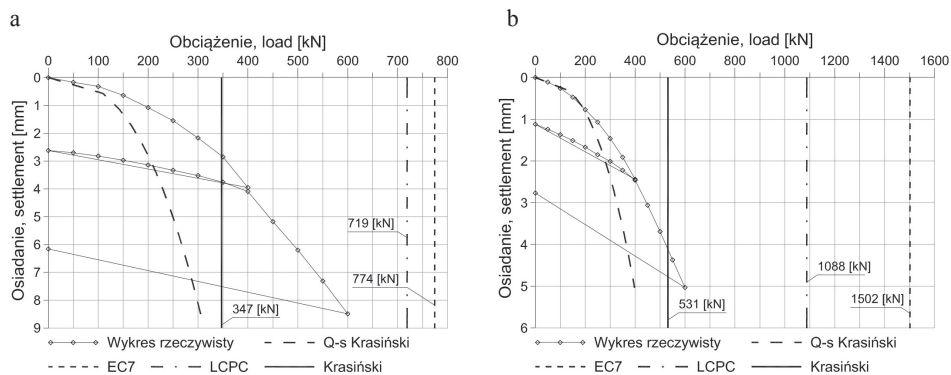
Rys. 8. Obliczeniowa nośność pali

Fig. 8. Computational total bearing capacities of piles

Dla ośmiu, z czternastu analizowanych pali, całkowite wartości nośności obliczone według propozycji EC7 są największe, a w sześciu przypadkach są zbliżone do tych uzyskanych pozostałymi metodami. Nośność uzyskana za pomocą metody zaproponowanej

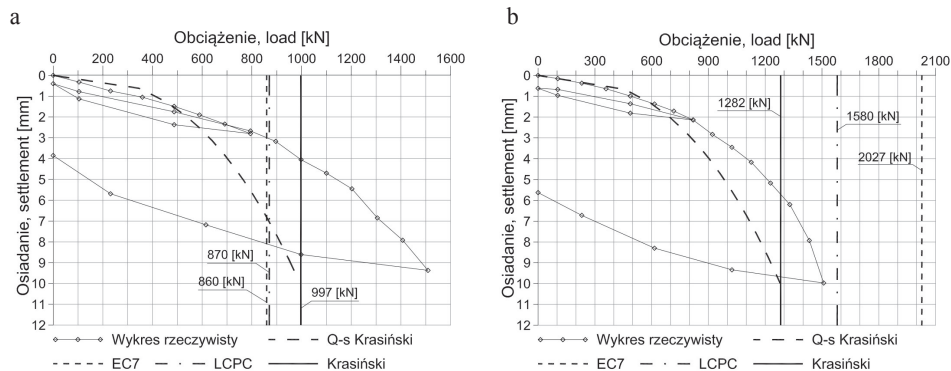
przez Krasińskiego jest najmniejsza dla dziewięciu z analizowanych pali, w pięciu przypadkach jest zbliżona do wartości otrzymanych pozostałymi metodami.

W celu obrazowego przedstawienia uzyskanych wyników analiz na wykresy próbnych obciążeń wybranych pali naniesiono obliczoną nośność pali oraz krzywą Q - s wyznaczoną na podstawie funkcji transformacyjnych zaproponowanych przez Krasińskiego, bez uwzględnienia skrócenia własnego trzonu pali (rys. 9, 10 i 11). Analizując otrzymane wyniki, należy pamiętać o tym, że krzywe Q - s wyznaczone według Krasińskiego odzwierciedlają charakterystykę współpracy pała tylko z warstwami gruntów nośnych, zalegających pod gruntami słabonośnymi. W rzeczywistych wykresach z próbnych obciążeń udział mają również opory gruntów w górnych partiach podłoża – grunty organiczne i nasypowe. Opory takich gruntów mogą podczas próbnych obciążeń statycznych osiągać znaczne wartości.



Rys. 9. Porównanie wyników obliczeń nośności pali inwestycji nr 1: a – P01, b – P02

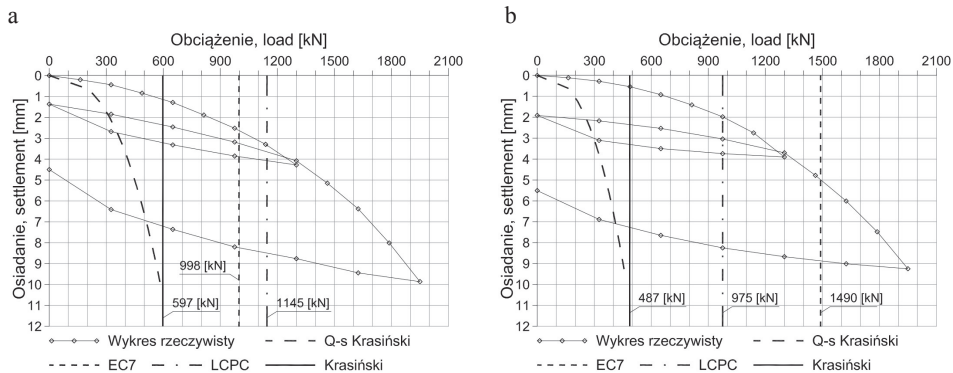
Fig. 9. Comparison of calculated piles bearing capacities – investment No. 1: a – P01, b – P02



Rys. 10. Porównanie wyników obliczeń nośności pali inwestycji nr 2: a – P06, b – P08

Fig. 10. Comparison of calculated piles bearing capacities – investment No. 2: a – P06, b – P08

Zaproponowana przez Krasińskiego metoda wyznaczania krzywej Q - s zadowalająco odwzorowuje zachowanie się pali wykonanych na potrzeby inwestycji nr 1 i 2 (rys. 9 i 10). Dla pali wykonanych w ramach inwestycji nr 3 (rys. 11) obliczona krzywa Q - s odbiega od wykresów próbnych obciążeń statycznych.



Rys. 11. Porównanie wyników obliczeń nośności pali inwestycji nr 3: a – P13, b – P14

Fig. 11. Comparison of calculated piles bearing capacities – investment No. 3: a – P13, b – P14

PODSUMOWANIE

Otrzymane wyniki obliczeń i analiz wskazują na duże rozbieżności pomiędzy analizowanymi i porównywanymi metodami obliczeniowymi w zakresie szacowania nośności podstaw pali wykonanych w nawodnionym podłożu niespoistym. Uzyskane rezultaty sugerują, że najbezpieczniejszym podejściem projektowym jest szacowanie nośności przemieszczeniowych pali wkręcanych z wykorzystaniem metody zaproponowanej przez Krasińskiego, z zastrzeżeniem, że dla gruntów o bardzo dużych wartościach parametrów ($q_c > 20$ MPa) otrzymane dla tej metody nośności mogą być zaniżone (patrz wykresy próbnych obciążeń dla inwestycji nr 3).

Przyczyny zaobserwowanych różnic dla nośności podstaw pali są następujące:

- obliczenie nośności podstawy pała, zgodnie z propozycją Eurokodu 7, uzależnione jest jedynie od technologii wykonywania pała; stan gruntu, w jaki wprowadzona jest podstawa pała, nie ma wpływu na sposób obliczenia; określenie granicznego oporu podłoża pod podstawą pała $q_{b,calc} \leq 15$ MPa jest w opinii autorów wartością znacznie zawyżoną,
- w obliczeniach metodą LCPC współczynnik nośności podstawy pała uzależniony jest od stanu podłoża gruntowego, w jaki jest ona wprowadzony, ale brak jest określonej górnej granicy oporu podłoża pod podstawą pała dla gruntów niespoistych o bardzo dużych wartościach parametrów ($q_c > 20$ MPa),
- zależność do obliczania oporu podłoża pod podstawą pała, zaproponowana przez Krasińskiego, w sposób znaczący redukuje wpływ zagęszczenia podłoża w strefie podstawy pała na otrzymane wyniki, co w opinii autorów jest podejściem uzasadnionym.

W świetle wyników programu badawczego [Krasiński 2013] nie zaleca się projektowania pali pograżanych w podłożu niespoistym na podstawie metody proponowanej w Eurokodzie 7. Wyniki badań dla różnego rodzaju pali przemieszczeniowych wkręcanych (w tym pali SDP) wykonanych w piaskach drobnych i średnich jednoznacznie wykazały duży udział w przeniesieniu obciążeń przez pobocznice, natomiast stosunkowo mały – przez podstawę.

Zaproponowane przez Krasińskiego funkcje transformacyjne do wyznaczania krzywej $Q-s$ zadowalająco odwzorowują zachowanie się pali wprowadzonych na zróżnicowaną głębokość (od $\sim 1,0$ do $\sim 12,0$ m) w niespoiste podłoże nośne o $q_c \sim 10\text{--}20$ MPa (inwestycje nr 1 oraz 2). Dla pali wprowadzonych w podłoże nośne o bardzo dobrych parametrach (inwestycja nr 3; $q_c \sim 20$ MPa i więcej) obliczone krzywe mogą zawyżać wartości osiadań pali.

Konkludując, należy podkreślić przydatność metod wymiarowania nośności pali na podstawie wyników sondowań CPTU, jednak metody te wymagają dalszych weryfikacji i modyfikacji na podstawie analizy większej liczby przypadków, w których dysponuje się wynikami sondowań statycznych CPTU i wynikami próbnymi obciążen statycznych przemieszczeniowych pali wkręcanych.

PIŚMIENNICTWO

- Bustamante, M., Gianceselli, L. (1982). Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT. Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, ESOP-II, Amsterdam, 2, 493–500.
- Gwizdała, K. (2010). Fundamenty palowe. T. 1. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Krasiński, A. (2013). Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk.
- PN-EN 1997-1: 2008. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- PN-EN 1997-2: 2009. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- Sikora, Z. (2006). Sondowanie statyczne. Metody i zastosowanie w geoinżynierii. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Wysokiński, L., Katolicki, W., Godlewski, T. (2011). Projektowanie geotechniczne według Euroko-
du 7. Poradnik. Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.

SCREW DISPLACEMENT PILES DESIGN – PRACTICAL ANALYSIS

Abstract. Comparison of four, different calculation methods of screw displacement piles bearing capacity was caused by two main reasons: lack of local, national guidelines and numerous failures, caused by design mistakes. Furthermore, several selected projects were critically analyzed in order to present engineering application these calculation methods. The displacement piles screw into non-cohesive soil were analyzed.

Key words: screw pile, bearing capacity, displacement, CPT test, pile design, non-cohesive soil

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.08.2016

Cytowanie: Zieliński, P., Wojtasik, A.T. (2016). Projektowanie przemieszczeniowych pali wkręcanych. Analiza doświadczeń. Acta Sci. Pol. Architectura, 15 (4), 113–126.