

Wykorzystanie krzywej osiadania pala do wyznaczania oporu pobocznicy i podstawy pala

Dr inż. Krzysztof Żarkiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

W praktyce inżynierskiej nośność pala określa się na podstawie wyników badań podłoża gruntowego. Podczas projektowania fundamentów na palach bardzo często napotyka się na wiele problemów związanych z poprawną interpretacją parametrów gruntu. W obliczeniach nośności pali zakłada się profil obliczeniowy, który jest pewnego rodzaju uśrednieniem wyników badań podłoża gruntowego. Jak podkreślają Wiszniewski i Krasieński [6], inżynierowie nigdy nie są całkowicie pewni, z jakim gruntem mają do czynienia. W związku z tym projektowana nośność pali jest pewnego rodzaju przybliżeniem. W znacznym stopniu utrudnia to weryfikację poprawności zastosowanych założeń i przyjętych metod obliczeniowych. Dokładność wyników badań podłoża gruntowego ma zasadniczy wpływ na określenie prawidłowej nośności pala. Wpływ na to ma także zastosowana metoda obliczeń. Istnieje wiele metod pozwalających na określenie składowych nośności pala, ale wyniki obliczeń wciąż bu-

dzą wiele wątpliwości i jak dotąd nie ma metody, która w pełni wyjaśniałaby zjawisko współpracy pala z gruntem.

Próbné obciążenie statyczne jest badaniem weryfikującym nośność badanego pala. Jest ono także rodzajem badania podłoża gruntowego. Musi zatem istnieć korelacja pomiędzy wynikami próbnego obciążenia statycznego i parametrami gruntu. Poznanie tej zależności umożliwi udoskonalenie metod projektowania pali i ułatwi inżynierom weryfikację założeń projektowych.

OPIS WSPÓŁPRACY PALA Z GRUNTEM

Pale są elementami fundamentu głębokiego, których zadaniem jest przekazanie obciążenia od obiektu budowlanego na głębiej zalegające warstwy podłoża gruntowego. Stosuje się je

w przypadku, gdy wytrzymałość gruntów zalegających w strefie aktywnej, pod obiektem budowlanym posadowionym bezpośrednio, jest niewystarczająca lub gdy osiadanie przekracza wartość dopuszczalną. Współpraca pala z gruntem polega na przekazywaniu obciążenia na otaczające podłoże gruntowe poprzez opór podstawy i poboczniczy pala. Mechanizmy powstania tych oporów znacznie różnią się od siebie.

Opór podstawy pala powstaje w wyniku ściskania gruntu pod podstawą pala. Wytrzymałość gruntu pod podstawą pala jest określona poprzez wytrzymałość na ścinanie w stanie trójosiowego ściskania. Wzrost wytrzymałości w stosunku do fundamentów bezpośrednich, przy założeniu jednakowych parametrów wytrzymałościowych, jest spowodowany znacznie większymi efektywnymi naprężeniami geostatycznymi, które powodują powstanie większych naprężeń normalnych na płaszczyźnie ścinania. Odształcenia gruntu w krytycznym stanie naprężenia, spowodowanym naciskiem na grunt przez podstawę pala, nie są w stanie spowodować wyparcia gruntu na powierzchnię, niemniej jednak należy mieć na uwadze, że uplastycznieniu gruntu przy osiągnięciu naprężeń krytycznych prawie zawsze towarzyszy zwiększenie objętości, które w niektórych przypadkach obejmuje także strefę powyżej podstawy pala. Zwiększenie objętości gruntu spowodowane ścinaniem występuje w gruntach dylatatywnych, w których współczynnik parcia K może wzrosnąć nawet do wartości 5. Analizę tę przedstawiono w pracach Han, Salgado, Prezzi [3] oraz Lashkari [7]. Badania Krasieńskiego [5] na palach przemieszczeniowych wskazują również, że proces wykonywania pali przemieszczeniowych w gruntach niespoistych powoduje wzrost naprężeń poziomych w otoczeniu poboczniczy, co powoduje jednocześnie wzrost początkowej wartości współczynnika K .

W metodzie Terzaghi'ego w gruntach niespoistych opór podstawy jest określany na podstawie parametru zależnego od kąta tarcia wewnętrznego gruntu pod podstawą pala i składowej pionowej efektywnego naprężenia geostatycznego w poziomie podstawy pala zgodnie z wzorem (1) [1]:

$$q_p = \sigma'_{vp} N_q \quad (1)$$

gdzie:

q_p – graniczny jednostkowy opór pod podstawą pala [kPa],
 σ'_{vp} – efektywna wartość składowej pionowej naprężenia w gruncie w poziomie podstawy pala [kPa],
 N_q – współczynnik nośności zależny od kąta tarcia wewnętrznego [–].

W przypadku pali wykonanych w gruntach spoistych obciążenie pala powoduje redukcję naprężeń efektywnych w strukturze gruntu. W takim przypadku tarcie cząsteczek gruntu jest zredukowane do zera, a głównym parametrem opisującym wytrzymałość gruntu pod podstawą pala jest wytrzymałość na ścinanie gruntu w warunkach bez odpływu. Wartość jednostkowego oporu gruntu pod podstawą pala wynosi od do wytrzymałości na ścinanie gruntu w warunkach bez odpływu. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się jednak najczęściej wartość zgodną z wzorem (2):

$$q_p = 9c_u \quad (2)$$

gdzie:

c_u – wytrzymałość na ścinanie gruntu w warunkach bez odpływu [kPa].

Jednostkowy graniczny opór poboczniczy pala (3) może być wyrażony jako iloczyn współczynnika parcia gruntu, składowej

pionowej naprężenia efektywnego w gruncie oraz kąta tarcia gruntu w strefie kontaktowej pal – grunt, który może być określany na podstawie kąta tarcia wewnętrznego gruntu i rodzaju pala [17]:

$$q_s = K \sigma'_{vp} \tan \delta \quad (3)$$

gdzie:

K – współczynnik parcia gruntu określający stosunek składowej poziomej do pionowej naprężenia w gruncie [–],

δ – kąt tarcia na powierzchni kontaktowej pal – grunt [°].

W gruntach spoistych jednostkowy opór poboczniczy pala określany jest na podstawie zarówno informacji o naprężeniu geostatycznym w podłożu gruntowym, jak i wytrzymałości gruntu na ścinanie w warunkach bez odpływu, zgodnie z wzorem (4):

$$q_s = \lambda(\sigma'_{vp} + 2c_u) \quad (4)$$

gdzie:

q_s – jednostkowy graniczny opór na poboczniczy pala [kPa],

λ – bezwymiarowy współczynnik zależny od geometrii pala [–] [17].

Na podstawie tak obliczonych wartości jednostkowych granicznych oporów poboczniczy i podstawy pala obliczany jest całkowity opór podstawy i poboczniczy pala zgodnie z równaniami (5) i (6):

$$N_{gr,1} = \frac{\pi D^2}{4} q_p \quad (5)$$

gdzie:

$N_{gr,1}$ – graniczny opór podstawy pala [kN],

D – średnica podstawy pala [m],

$$T_{gr} = \pi D \int_0^H q_s(z) dz \quad (6)$$

gdzie:

T_{gr} – graniczny opór poboczniczy pala [kN],

D – średnica trzonu pala [m],

H – długość pala [m],

z – głębokość p.p.t. [m].

Podstawowe równanie nośności pala (7):

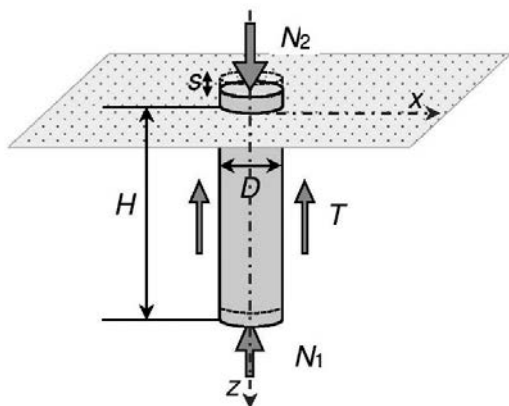
$$N_{gr,2} = N_{gr,1} + T_{gr} \quad (7)$$

Równanie (7) dotyczy stanu granicznego nośności, przy którym obserwowane jest bardzo duże i niekontrolowane odształcenie gruntu. Odształcenie ośrodka gruntowego w otoczeniu pala powoduje powstanie osiadania pala. Do poprawnej oceny nośności pala niezbędne jest także określenie mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala wraz z osiadaniem od wartości 0 kN do wartości granicznych. Zależność tych oporów od osiadania opisano równaniem (8) i przedstawiono na rys. 1 i 2.

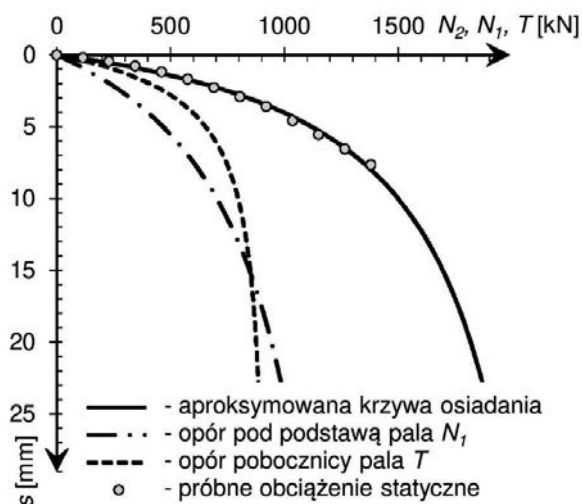
$$N_2(s) = N_1(s) + T(s) \quad (8)$$

Opór poboczniczy i podstawy pala w praktyce inżynierskiej bardzo często obliczany jest niezależnie od siebie. Niemniej jednak, jak dowodzą ostatnie badania, opory te współzależą od siebie. Wskazano to niejednokrotnie w pracach Żarkiewicza [18], Kamal, Arab, Dif [4], Loukidis i Salgado [9]. W związku z tym ważne jest rozpatrywanie tych dwóch składowych jednocześnie. Taką analizę umożliwia krzywa osiadania podzielona na dwie składowe: krzywą oporu poboczniczy i krzywą oporu podstawy w stosunku do osiadania.

Analizy rozkładu oporów pali terenowych wskazują, że opór pobocznic mobilizuje się znacznie szybciej niż opór podstawy. Ma to miejsce nawet w przypadkach, gdy ponad połowa długości pala przechodzi przez słabe grunty organiczne. Związane jest to ze specyfiką mobilizacji składowej stycznej naprężenia w gruncie przy ścinaniu i mobilizacji składowej pionowej naprężenia przy ściskaniu. Maksymalne naprężenie ścinające osiągnięte jest już przy niewielkich odkształceniach postaciowych,



Rys. 1. Ogólny schemat współpracy pala z podłożem gruntowym



Rys. 2. Wykres mobilizacji oporu pobocznic $T(s)$, podstawy pala $N_1(s)$ i oporu całkowitego $N_2(s)$ wraz z osiadaaniem głowicy pala

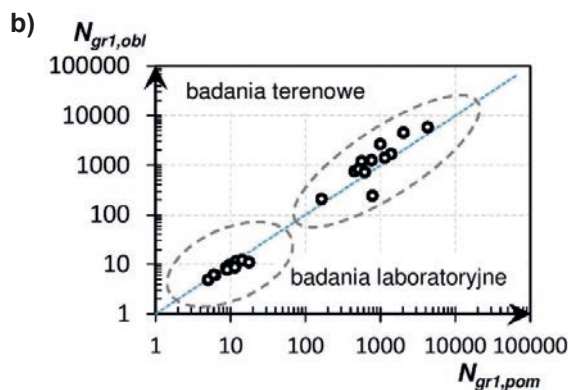
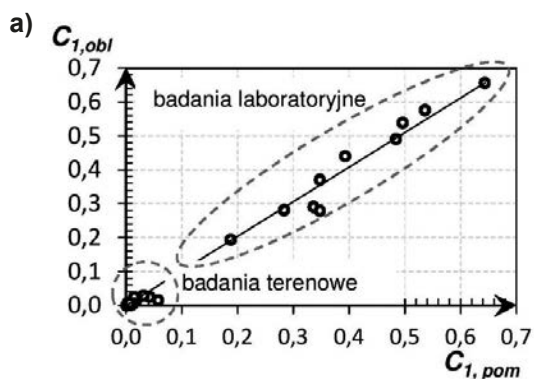
natomiast do zmobilizowania granicznego naprężenia ściskającego pod podstawą pala konieczne jest znacznie większe osiadanie. W związku z tym bardzo często zdarza się, że obciążenie w warunkach eksploatacyjnych jest przekazywane do podłoża gruntowego głównie poprzez opór pobocznic.

INTERPRETACJA WYNIKÓW PRÓBNEGO OBCIĄŻENIA STATYCZNEGO

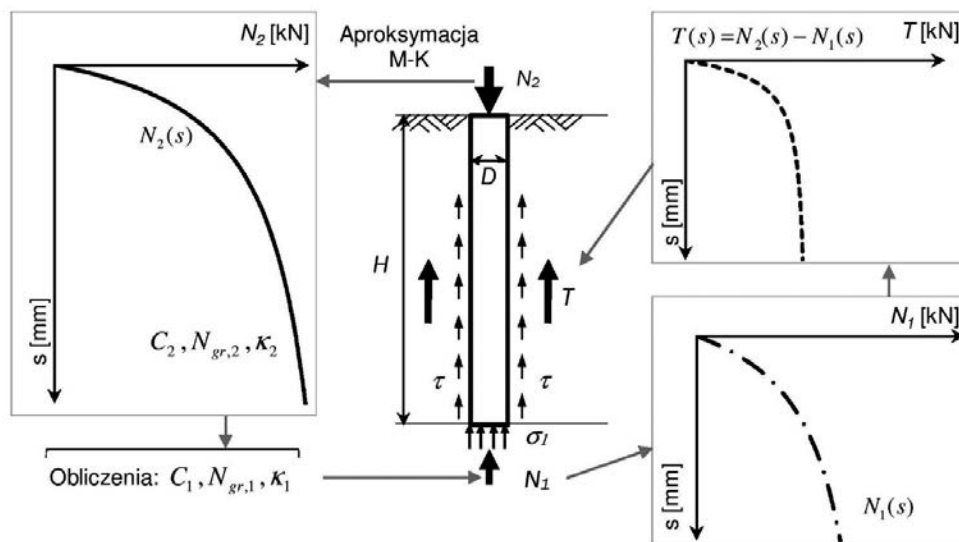
Nośność pala wynika z sumy oporów pobocznic i podstawy pala. Opory te w praktyce inżynierskiej obliczane są na podstawie parametrów podłoża gruntowego [2, 8, 15]. Z badania próbnego obciążenia statycznego uzyskuje się krzywą osiadania, która jest superpozycją dwóch krzywych: krzywej oporu podstawy i krzywej oporu pobocznic. Powstaje pytanie: czy istnieje możliwość określenia tego rozkładu na podstawie informacji uzyskanych z badania próbnego obciążenia statycznego? A także: czy istnieje możliwość skorelowania tego rozkładu z obliczonymi wartościami jednostkowych oporów gruntu na pobocznicę i pod podstawą pala?

Wyniki próbnego obciążenia statycznego przedstawiane są w postaci zbioru punktów $\{N_i; s_i\}$. Istnieje wiele analiz umożliwiających sprawdzenie nośności pala, na przykład według polskiej normy palowej [19] albo na podstawie nośności granicznej określonej na podstawie różnych kryteriów i założonego współczynnika bezpieczeństwa [1]. Jest też metoda analizy, która nie skupia się wyłącznie na określeniu wartości granicznej nośności pala, ale także na innych parametrach mających wpływ na kształt krzywej osiadania pala. Metodą tą jest aproksymacja Meyera-Kowalowa [12], zwana dalej M-K, która umożliwia opisanie zależności obciążenie – osiadanie poprzez trzy parametry. Metody wyznaczania parametrów M-K zawarto w pracach [11, 13, 14, 16, 18]. Opis matematyczny krzywej osiadania umożliwia dalsze badanie kształtu krzywej przez analizę parametrów M-K.

Badania przeprowadzone przez Żarkiewicza [18] umożliwiły określenie zależności pomiędzy parametrami krzywej osiadania uzyskanej z próbnego obciążenia statycznego i parametrami krzywej oporu podstawy pala. Badania przeprowadzono na modelowych palach w warunkach laboratoryjnych i skorelowano z wynikami badań terenowych. Korelację pomierzonych oporów podstawy i obliczonych na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego przedstawiono na rys. 3. Ideę określenia rozkładu oporów przedstawiono na rys. 4 i we wzorach (9, 10,



Rys. 3. Zależność: a) $C_{1,obl}$ i $C_{1,pom}$, b) $N_{gr1,obl}$ i $N_{gr1,pom}$



Rys. 4. Schemat określania oporów pobocznicy i podstawy pali formowanych wraz z osiadaniem na podstawie wyników próbnego obciążenia statycznego

11). Metoda polega na określeniu parametrów krzywej M-K: C_2 , $N_{gr,2}$, κ_2 , wykorzystując wyniki próbnego obciążenia statycznego, następnie na podstawie równań (9, 10, 11) i informacji o geometrii pala określa się parametry oporu podstawy pala C_1 , $N_{gr,1}$, κ_1 . W ostatnim kroku określa się opór pobocznicy pala na podstawie zasady superpozycji z wzoru (8).

$$C_1 = C_2(0,467\kappa_2 + 1)^2 \quad (9)$$

$$N_{gr,1} = \frac{C_2}{C_1} N_{gr,2} \left[1 + 0,1435 \left(\frac{H}{D} \right)^{1/3} \kappa_{2^{0,5}} \right] \quad (10)$$

$$\kappa_1 = 0,8331\kappa_2 \quad (11)$$

OKREŚLENIE OPORU POBOCZNICY I PODSTAWY PALA NA PODSTAWIE KRZYWEJ OSIADANIA

Do analizy wybrano dwa pale wykonane w technologii przemieszczeniowej, formowane w gruncie (pal nr 1 i 2), a także jeden pal przemieszczeniowy w rurze obsadowej z iniekcją na poboczniczy pala (pal nr 3). Pale wykonano w podłożu gruntowym zbudowanym z nasypu do głębokości 2 m, poniżej zalegały grunty organiczne do głębokości 9 ÷ 10 m p.p.t. Podstawy pali były wprowadzone w piaski drobne (pal 1 i 2) i piaski średnie (pal 3). Przeprowadzono próbne obciążenia statyczne wykonanych pali zgodnie z procedurą normy [19], otrzymując zbiór danych $\{N_i; s_i\}$. Następnie dane te aproksymowano metodą M-K, a przy zastosowaniu wzorów (9, 10, 11) określono opory podstawy pali. Wyniki analizy wraz z geometrią pali podano w tabl.1 oraz przedstawiono na rys. 5.

Na rys. 5 przedstawiono pale znacznie różniące się rozkładem oporów. Przedstawione rozkłady potwierdzają, że opór poboczniczy mobilizuje się bardzo szybko i już przy niewielkich osiadaniach (15 ÷ 25 mm) osiąga wartość 75 ÷ 95 % wartości granicznej, podczas gdy opór podstawy wynosi od 50 ÷ 75%.

Na podstawie wyników rozkładu oporów sprawdzono, czy istnieje możliwość weryfikacji parametrów podłoża gruntowe-

go. Do obliczenia jednostkowego oporu podstawy pala określono wartość efektywnych naprężeń w poziomie podstawy pala zgodnie z wzorem (12).

$$\sigma'_{v0bl} = \gamma' H + \Delta \sigma'_v = \gamma' H + \frac{T_{gr}}{\pi(l^2 + lD)} \quad (12)$$

gdzie:

γ' – efektywny ciężar objętościowy gruntu na długości poboczniczy pala [kN/m^3],

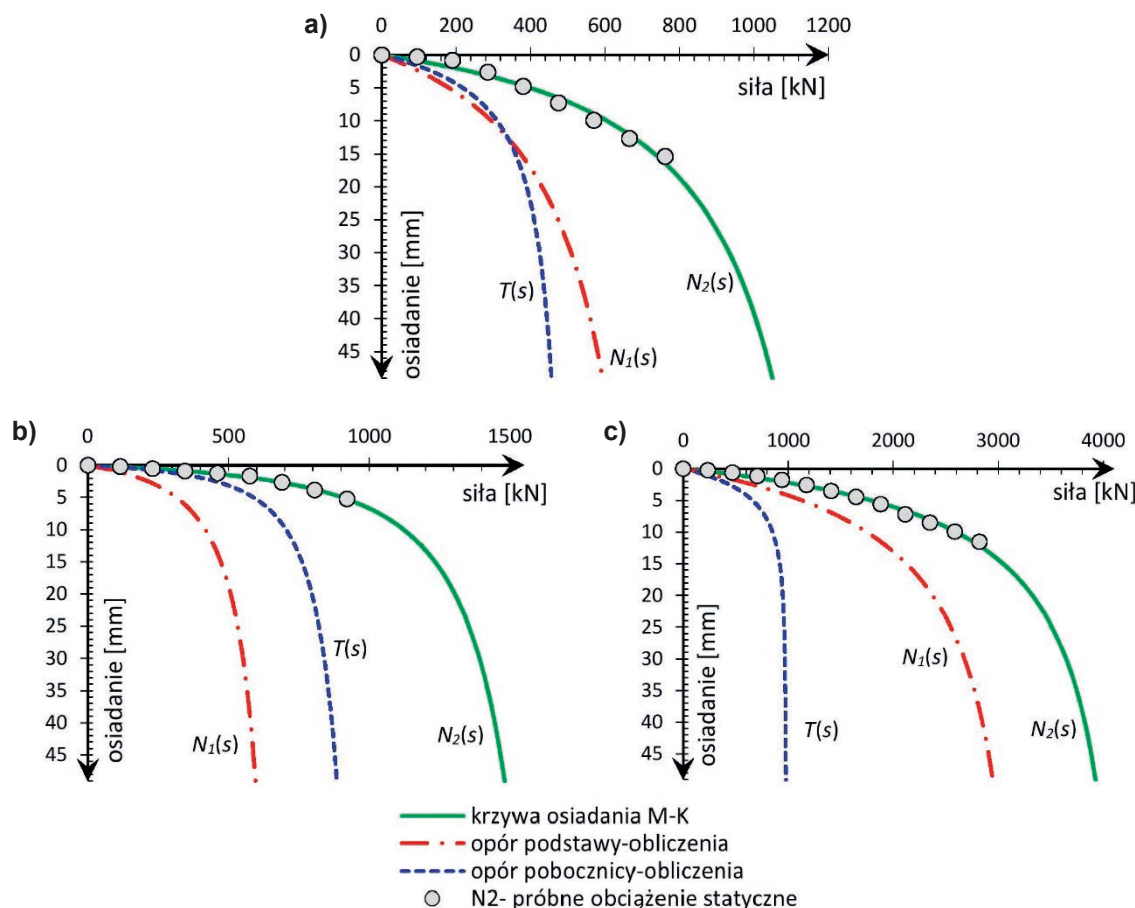
l – zasięg oddziaływania naprężeń stycznych na poboczniczy pala (dla praktycznych obliczeń przyjęto $l = 3D$ [10]).

Współczynnik N_q obliczono na podstawie wyznaczonego jednostkowego oporu gruntu i składowej pionowej naprężenia efektywnego w gruncie. Kąt tarcia wewnętrznego gruntu pod podstawą pala obliczono na podstawie znanej wartości N_q z wzoru (13) [17], przy założeniu, że współczynnik η jest liniową funkcją kąta tarcia wewnętrznego dla wartości brzegowych według propozycji Janbu opisanej w pracy Wrana [17].

Tabl. 1. Wyniki obliczeń rozkładu krzywych osiadania na opór podstawy i opór poboczniczy pala

Numer pala		1	2	3
D	[m]	0,4	0,4	0,56
H	[m]	12,06	11,08	16
Q_{r^*}	[kN]	761	920	1880
C_2	[mm/kN]	0,00842	0,00177	0,00177
$N_{gr,2}$	[kN]	1 363	1 844	4 321
κ_2	[-]	1,262	2,161	0,729
C_1	[mm/kN]	0,02127	0,00717	0,00317
$N_{gr,1}$	[kN]	810	748	3 306
κ_1	[-]	1,051	1,800	0,607
T_{gr}	[kN]	552	1 095	1 015
$\sigma_{gr,1}$	[MPa]	6,45	5,96	13,42

* Q_r – nośność pala według projektu



Rys. 5. Obliczone opory poboczny i podstawy pala: a) pal 1, b) pal 2, c) pal 3

$$N_q = \left(\tan \phi' + \sqrt{1 + \tan^2 \phi'} \right)^2 \exp(2\eta \tan \phi') \quad (13)$$

gdzie:

ϕ' – efektywna wartość kąta tarcia wewnętrznego gruntu poniżej podstawy pala [°],

η – kąt zdefiniowany przez kształt powierzchni ścinania wokół podstawy pala [17].

W tabl. 2. przedstawiono metodę oszacowania parametrów podłoża gruntowego. Otrzymane wartości kąta tarcia wewnętrznego

są zgodne z wartościami oczekiwanymi. Określenie tych wartości wymagało założenia parametrów l_0 i η . Sposób określenia tych parametrów będzie przedmiotem dalszych badań.

PODSUMOWANIE

Nośność pala w praktyce inżynierskiej oblicza się na podstawie granicznych wartości oporów jednostkowych, które dotyczą bardzo dużych i niekontrolowanych osiadań. Po uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa otrzymuje się projektową nośność pala. Bardzo rzadko w procesie projektowania pali uwzględnia się jego osiadanie, podczas gdy weryfikacja nośności sprowadza się najczęściej do analizy zależności obciążenie – osiadanie pala.

Próbne obciążenie statyczne dostarcza wiele informacji o współpracy pala z podłożem gruntowym. Obciążenie jakie przykłada się na głowicę i odpowiednie osiadanie jest wynikiem wystąpienia dwóch oporów: oporu poboczny i oporu podstawy pala.

W pracy przedstawiono metodę interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego prowadzącą do określenia granicznego oporu podstawy i poboczny pala, a także do określenia mobilizacji tych oporów wraz z osiadaniami. W ten sposób istnieje możliwość sprawdzenia zapasu bezpieczeństwa przy założonym osiadanu w odniesieniu do oporu poboczny i podstawy pala.

Tabl. 2. Wyniki obliczeń warunków geotechnicznych gruntu pod podstawą pala wraz z danymi wejściowymi i założeniami

Numer pala		1	2	3
D	[m]	0,4	0,4	0,56
H	[m]	12,06	11,08	16
T_{gr}	[kN]	552	1 095	1 015
$\sigma_{gr,1}$	[MPa]	6,45	5,96	13,42
l_0	[m]	1,20	1,20	1,68
η	[–]	1,67	1,61	1,76
σ'_{v0obl}	[kPa]	208	290	234
N_q	[–]	30,98	20,52	57,41
ϕ'_{obl}	[°]	33	31	37

Ponadto stwierdzono, że obliczone opory podstawy i poboczniczy osiągają znaczne wartości. Wyjaśnieniem powstania tak dużych wartości jednostkowego oporu pod podstawą pała może być zjawisko wzrostu składowej pionowej naprężenia efektywnego w podłożu gruntowym spowodowane wystąpieniem oporu na poboczniczy, który zwiększa jednocześnie zakres strefy uplastycznionej pod podstawą pała. Określenie zależności interakcji poboczniczy i podstawy pała będzie przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

1. Fellenius B. H.: Basics of Foundation Design., Electronic, Sidney, British Columbia, Canada, 2014.
2. Gwizdała K., Dyka I.: Osiadanie pali i fundamentów palowych, [w:] Seminarium: Zagadnienie Posadowień Na Fundamentach Palowych, 2004, 53-74.
3. Han F. i inni: Shaft and base resistance of non-displacement piles in sand, Computers and Geotechnics. 83, 2017, 184-197.
4. Kamal Z. A. i inni: Analysis of The arching phenomenon of bored piles in sand, Alexandria Engineering Journal. 55, 2016, s. 2639–2645.
5. Krasiński A.: Numerical simulation of screw displacement pile interaction with non-cohesive soil, Archives of Civil and Mechanical Engineering. vol. 14, 2014, 122-133.
6. Krasiński A., Wiszniewski M.: Static Load Test on Instrumented Pile – Field Data and Numerical Simulations, Studia Geotechnica et Mechanica, vol. 39, 2017.
7. Lashkari A.: A simple critical state interface model and its application in prediction of shaft resistance of non-displacement piles in sand, Computers and Geotechnics, vol. 88 2017, 95-110.
8. Lehane B.B.M.: Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests, 119 2016, 19-35.
9. Loukidis D., Salgado R.: Analysis of the shaft resistance of non-displacement piles in sand, Géotechnique. vol. 58, 2008, 283-296.
10. Meyer Z.: Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów. Wydawnictwo ZAPOL, Szczecin, 2012.
11. Meyer Z.: Static Load Tests, Short Series Interpretation, Studia Geotechnica et Mechanica, vol. XXXVI, 2014, 45-49.
12. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
13. Meyer Z., Szmechel G.: Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie-osiadanie dla testów statycznych pali żelbetowych w gruntach sypkich, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2010.
14. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Określenie maksymalnych składowych statycznych naprężenia na poboczniczy pała podczas badania statycznego, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2014, 217-221.
15. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Optymalizacja równania nośności pała na podstawie laboratoryjnych badań modelowych, [w:] XXII Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, 2015, 83-92.
16. Szmechel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2014.
17. Wraha B.: Pile Load Capacity – Calculation Methods, Studia Geotechnica et Mechanica vol. 37, 2015.
18. Żarkiewicz K.: Analiza formowania się oporu poboczniczy pała w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych. Rozprawa doktorska Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2017.
19. PN-B-02482:1983. Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych.