

dr inż. Kamil Stachecki^{1)*}

ORCID: 0000-0002-7522-8451

prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer²⁾

ORCID: 0000-0002-2459-6262

Analiza równania nośności granicznej prefabrykowanych pali wbijanych na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych

Analysis of the load bearing capacity equation for precast driven piles based on static load test results

DOI: 10.15199/33.2024.05.01

Streszczenie. W artykule przeanalizowano wyniki próbnych obciążeń statycznych siedmiu pali prefabrykowanych wykonanych na budowie wiaduktu drogowego. Celem pracy było ustalenie zależności pomiędzy nośnością graniczną pala a jego długością oraz szerokością. Do osiągnięcia celu wykorzystano analizę statystyczną, co umożliwiło sformułowanie równania, które mogło być następnie wykorzystane w obliczeniach. Określona zależność pozwala na obliczenie nośności granicznej pala w przypadku znanego oporu gruntu w poziomie podstawy. Przedstawiony w artykule przykład obliczeniowy opisuje zaimplementowanie rezultatów analizy do metody konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pala.

Słowa kluczowe: pale fundamentowe; nośność graniczna pala; krzywa osiadania pala; metoda M-K.

Abstract. In this paper the results of static load tests of seven precast piles executed at the construction of the road overpass were analyzed. The aim of this work was to determine the relation between the ultimate pile bearing capacity, its length and width. Statistical analysis was used to achieve the goal, which made it possible to formulate an equation that could then be used in calculations. The determined dependence allows for the calculation of the ultimate pile bearing capacity on the basis of the known soil resistance at the level of pile base. The example of calculation presented in the paper describes implementation of the analysis results to the method of static load test curve conversion.

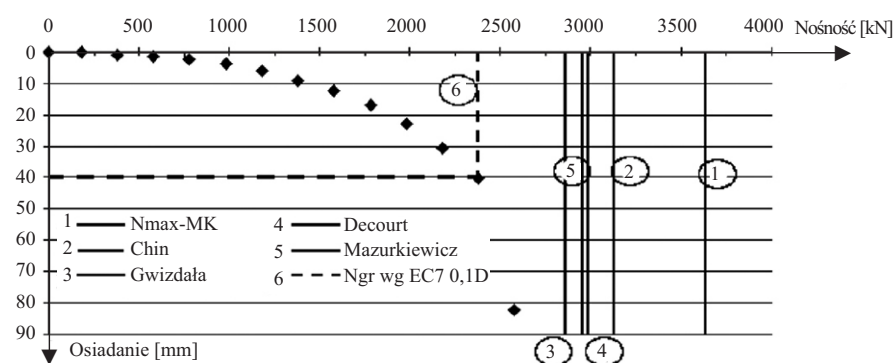
Keywords: pile foundations; pile ultimate bearing capacity; pile settlement curve; M-K method.

Nośność graniczna pala, czyli obciążenie, przy którym ulega on niekontrolowanemu osiadananiu, jest jednym z kluczowych parametrów decydujących o bezpieczeństwie konstrukcji posadowionej na fundamentach palowych. Istnieje wiele metod umożliwiających wyznaczenie granicznego oporu całkowitego pala na podstawie testu statycznego. Popularnie stosowane polegają zarówno na wykorzystaniu funkcji transformacyjnych [1 ÷ 4], jak i dopasowaniu krzywej na podstawie zbioru wyników testu statycznego (s_p, N_p) [5 ÷ 7]. W zależności od przyjętej metody wyniki mogą się znacznie różnić, co przedstawiono na rysunku 1 [7].

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

²⁾ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

^{*)} Adres do korespondencji: kamil.stachecki@tu.koszalin.pl



Rys. 1. Nośność pala określona różnymi metodami [7]

Fig. 1. Pile ultimate bearing capacity determined by different methods [7]

W literaturze można znaleźć również badania odnoszące się do numerycznych metod pozwalających na ustalenie nośności granicznej pala, wykorzystując metodę elementów skończonych [8], sieci neuronowe [9] oraz inne metody numeryczne [10 ÷ 12]. W przypadku pali obciążonych dodatkowo skręcaniem należy uwzględnić aspekty opisane

m.in. w [13]. Celem prezentowanej w artykule pracy jest ustalenie zależności opisującej nośność graniczną prefabrykowanych pali wbijanych, jako funkcji ich długości i szerokości. Ze względu na rozwój prefabrykacji w budownictwie pale wbijane stają się coraz częściej stosowanym rozwiązaniem posadowienia [14]. Analiza bazuje na prób-

nym obciążeniu statycznym pali zrealizowanych do celów naukowych przez firmę Energopol Szczecin S.A. Pale wykonano pod podporami wiaduktu drogowego WD-4, obwodnicy miasta Olecko w ciągu drogi DK nr 65. Podstawy analizowanych pali zagłębione są w pospółce o stopniu zagęszczenia 0,72. Powyżej znajdują się piaski średnie ze żwirami o stopniu zagęszczenia 0,48, 0,68 oraz pospółki o stopniu zagęszczenia 0,54. Na całym obszarze stwierdzono występowanie wody gruntowej powyżej poziomu podstawy pali maksymalnie od poziomu 0,0 m p.p.t. w przypadku pala 7/8 oraz 39/8, a minimalnie od poziomu 7,8 m p.p.t. w przypadku pala 11/11. Wykorzystując wcześniejsze autorskie analizy [15, 16], odnoszące się do opisu zależności nośności granicznej w przypadku pali wielkośrednicowych, w artykule zweryfikowano możliwość wyznaczenia podobnej zależności odnoszącej się do prefabrykowanych pali wbijanych. Ustalenie sposobu wyznaczenia nośności granicznej pali w zależności od ich długości oraz wymiarów podstawy umożliwia również konwersję krzywej obciążenia pala w pełnym zakresie obciążenia, zgodnie z autorską metodą [16].

Analiza zjawiska

Analizę przeprowadzono, wykorzystując zbiory wartości uzyskane w wyniku próbnego obciążenia statycznego siedmiu kwadratowych pali o wymiarach podanych w tabeli 1.

Tabela 1 Zestawienie analizowanych pali
Table 1. List of analyzed piles

Pal	B [m]	H [m]	H/B [-]
Pal 7/8	0,3	14,5	48,33
Pal 39/8	0,3	14,5	48,33
Pal 11/5	0,3	9	30
Pal 10/3	0,3	8	26,67
Pal 19/7	0,4	22	55
Pal 34/4	0,3	11	36,67
Pal 11/11	0,3	7	23,33

Do ustalenia nośności granicznej wykorzystano opis krzywych Q-s metodą Meyera-Kowalowa (M-K), która spełnia warunki fizyczne zarówno w przypadku małych, jak i dużych obciążeń. Wartość nośności granicznej jest asymptotą pionową funkcji, natomiast para-

metr C_2 określa nachylenie w zakresie małych obciążeń, gdzie przebieg jest w przybliżeniu linowy. Zaletą metody Meyera-Kowalowa jest to, że pozwala na opis krzywej oporu całkowitego, jak również krzywej oporu podstawy oraz poboczniczy, co umożliwia dokładną ocenę współpracy pala z podłożem gruntowym. Metoda M-K umożliwia ekstrapolowanie pomierzonego przebiegu zależności obciążenie-osiadanie do postaci krzywej ciągłej opisanej równaniem [4]:

$$s(N_2) = C_2 N_{gr2} \frac{\left(1 - \frac{N_2}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad (1)$$

gdzie:

s – osiadanie pala [mm];

C_2 – odwrotność zagregowanego parametru Winklera [mm/kN];

N_{gr2} – nośność graniczna pala [kN];

κ_2 – bezwymiarowy parametr związany z proporcją między oporem podstawy i poboczniczy pala;

N_2 – obciążenie głowicy pala [kN].

Wcześniejsze analizy [16] potwierdzają poprawność uzyskanych w taki sposób wartości oporu granicznego pala N_{gr2} . Parametry występujące w równaniu M-K, tj. N_{gr2} , C_2 , κ_2 wyznaczone na podstawie zbioru wyników otrzymanych w wyniku testu statycznego (s_i ; N_i). Do ustalenia wartości parametrów wykorzystano metodę najmniejszej sumy kwadratów odchyłek w odniesieniu do otrzymanego zbioru wartości (s_i ; N_i). Kwadrat odchyłki zdefiniowano równaniem (2):

$$\delta^2 = (s_{i,pom} - s_{i,calc})^2 \quad (2)$$

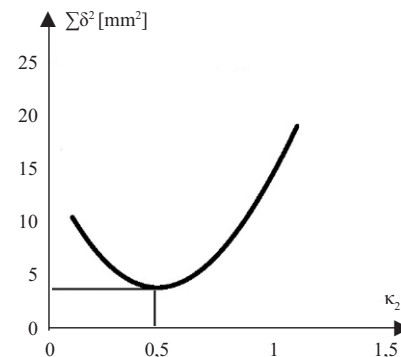
Sposób określania parametrów krzywej M-K został szczegółowo opisany m.in. w [4, 7, 16, 17]. W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczonego osiadania w przypadku optymalnych parametrów M-K, natomiast na rysunku 2 wynik minimalizacji sumy kwadratów analizowanego pala.

Po wyznaczeniu parametrów występujących w równaniu M-K możliwe jest wykreślenie krzywej opisującej w sposób ciągły relację między obciążeniem a osiadaniem w pełnym zakresie obciążenia (rysunek 3). Analogicz-

Tabela 2. Pomierzone i obliczone wartości w przypadku pala 11/5

Table 2. Measured and calculated values for pile 11/5

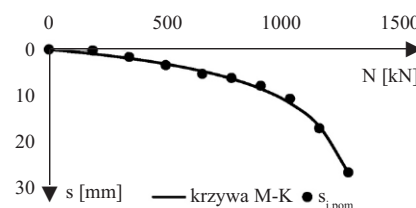
N_i [kN]	0	188	345	502	659	785	911	1036	1162	1287
$s_{i,pom}$ [mm]	0	0,23	1,62	3,4	5,23	6,12	7,82	10,61	16,94	26,45
$s_{i,calc,opt}$ [mm]	0	0,95	1,92	3,13	4,68	6,31	8,48	11,55	16,52	26,45



$N_{gr2} = 1447$ kN; $\min \Sigma \delta^2 = 2,51$ mm²; $\kappa_2 = 0,5$;
 $C_2 = 0,00455$ mm/kN

Rys. 2. Optymalne wartości parametrów M-K w przypadku pala 11/5

Fig. 2. Optimal values of M-K parameters for pile 11/5



Rys. 3. Krzywa M-K w przypadku pala 11/5

Fig. 3. M-K curve for pile 11/5

ne obliczenia przeprowadzono w przypadku pozostałych analizowanych pali, co umożliwiło opisanie zależności obciążenie-osiadanie każdego z nich. Wartość q_b , reprezentującą opór w poziomie podstawy pala, wyznaczono z odwrotności zależności (3) opisanej w [18], gdzie przy znanym stopniu zagęszczenia obliczono q_b .

$$I_D = 0,709 \cdot \log(q_b) - 0,165 \quad (3)$$

W praktyce opór w poziomie podstawy można wyznaczyć, wykorzystując sondowanie statyczne CPTU. Pozwala to na obliczenie wartości nośności granicznej pala bez potrzeby wykonywania próbnego obciążenia statycznego lub określenie oporu w poziomie podstawy w przypadku znanych wyników obciążeń próbnymi. Wykorzystując wcześniejsze badania [15, 16], do wyznaczenia równania opisującego związek między nośnością graniczną podstawy a jego para-

metrami geometrycznymi oraz oporem w poziomie podstawy wykorzystano następującą zależność:

$$N_{gr2} = \alpha_0 B^2 q_b (H/B)^{1/3} \quad (4)$$

gdzie:

α_0 – poszukiwany parametr;

H – długość pala [m];

B – szerokość pala [m].

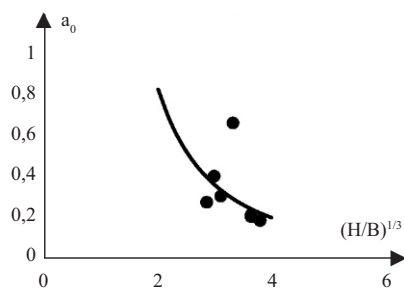
W pierwszym kroku wyznaczono, niezależnie od siebie, wartości α_0 odpowiadające każdemu z analizowanych pali. Parametry tych pali przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry analizowanych pali

Table 3. Parameters of analyzed piles

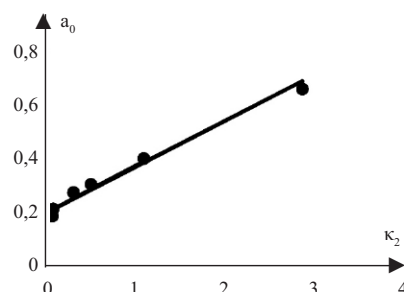
Pal	C_2 [mm/kN]	κ_2 [-]	N_{gr2} [kN]	q_b [MPa]	α_0 [-]
Pal 7/8	$3,11 \cdot 10^{-3}$	0,06	1135	17	0,20365
Pal 39/8	$2,70 \cdot 10^{-3}$	0,07	1178	17	0,21137
Pal 11/5	$4,55 \cdot 10^{-3}$	0,5	1447	17	0,30437
Pal 10/3	$3,34 \cdot 10^{-3}$	1,1	1839	17	0,40323
Pal 19/7	$1,21 \cdot 10^{-3}$	0,06	1911	17	0,18474
Pal 34/4	$2,89 \cdot 10^{-3}$	2,9	3376	17	0,66418
Pal 26/11	$1,78 \cdot 10^{-3}$	0,3	1199	17	0,27424

Kolejnym krokiem było określenie związku pomiędzy wartością α_0 a parametrami pali przedstawionymi w tabeli 3, aby uzyskać jedną zależność opisującą nośność graniczną w odniesieniu do analizowanych pali. Na rysunkach 4, 5 zaprezentowano trzy funkcje aproksy-



Rys. 4. Funkcja $a_0 (H/B)^{1/3}$

Fig. 4. Function $a_0 (H/B)^{1/3}$



Rys. 5. Funkcja $a_0(\kappa_2)$

Fig. 5. Function $a_0(\kappa_2)$

mujące parametr α_0 , opisane odpowiednio równaniami (5) i (6):

$$a_0(H/B) = 3,47[(H/B)^{1/3}]^{-2,06} \quad (5)$$

$$a_0(\kappa_2) = 0,197(1 + \kappa_2)^{0,925} \quad (6)$$

Najlepszą zgodność w przypadku analizowanych prefabrykowanych pali wbijanych otrzymano dla funkcji $a_0(\kappa_2)$, inaczej niż w przypadku pali wielkośrednicowych analizowanych w [15, 16], gdzie najlepszą zgodność otrzymano dla funkcji $a_0(H/B)$. Podstawiając równanie (6) do równania (4), można otrzymać ostateczny związek opisujący nośność graniczną pala:

$$N_{gr2} = 0,197(1 + \kappa_2)^{0,925} B^2 q_b (H/B)^{1/3} \quad (7)$$

W tabeli 4 porównano nośność graniczną obliczoną zgodnie z równaniem (7) $N_{gr2,calc}$ oraz określoną na podstawie testu statycznego $N_{gr2,test}$. Uzyskano dobrą zgodność w przypadku pali o różnej długości, szerokości oraz nośności granicznej. Dalsze badania będą obejmowały analizę pali wykonanych w różnych technologiach oraz znajdujące się w różnych warunkach gruntowych, co pozwoli uzyskać ogólne wnioski na temat współpracy pala z gruntem w odniesieniu do jego wartości granicznej. Warto również zwrócić uwagę, że parametr κ_2 można wyznaczyć na podstawie badania sondą CPTU, co było przedmiotem badań Meyera i Siemaszko opisanych w [19].

Tabela 4. Pomierzone i obliczone wartości nośności granicznej

Table 4. Measured and calculated values of pile ultimate bearing capacity

Pal	$N_{gr2,test}$	$N_{gr2,calc}$	$N_{gr2,test}/N_{gr2,calc}$
Pal 7/8	1135	1158	0,98
Pal 39/8	1178	1168	1,01
Pal 11/5	1447	1362	1,06
Pal 10/3	1839	1739	1,03
Pal 19/7	1911	2150	0,89
Pal 34/4	3376	3528	0,96
Pal 11/11	1199	1098	1,09

Praktyczne zastosowanie

Znając zależność opisującą związek między nośnością graniczną pala N_{gr2} a jego szerokością i długością, możliwe jest przeprowadzenie obliczeń pozwalających na konwersję krzywej próbnego statycznego obciążenia pala w przypadku zmiany jego geometrii zgodnie z metodą opisaną w [16]. Eurokod 7 do-

puszcza wnioskowanie o przebiegu krzywej obciążenia pala na podstawie próbnego obciążenia przeprowadzonego w przypadku pala o innych wymiarach podstawy [20]. Proponowana metoda konwersji pozwala na wykorzystanie wyników testu statycznego do przewidywania przebiegu krzywej obciążenie-osiadanie pala przy zmianie jego szerokości lub długości. Parametry stanu „0” oznaczone górnym indeksem „0” odnoszą się do pala, który został poddany testowi statycznemu, natomiast parametry stanu „1” do krzywej Q-s pala uzyskanej w wyniku konwersji. W efekcie badań prowadzonych przez Meyera i Siemaszko możliwie było zapisanie zależności [19]

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{20,86} \left(\frac{H}{B} \right)^{0,785} \frac{\bar{q}_c}{q_b} \frac{1}{1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}} \right]^{3/5} \quad (8)$$

Zakładając, że warunki gruntowe nie ulegają zmianie, czyli stały jest opór w poziomie podstawy q_b oraz średni opór wzdłuż pobocznicy \bar{q}_c , można przeprowadzić konwersję wg równania (9):

$$\kappa_2^{(1)} = \kappa_2^{(0)} \left(\frac{B^{(0)} H^{(1)}}{B^{(1)} H^{(0)}} \right)^{0,471} \quad (9)$$

W wielu praktycznych przypadkach warunki gruntowe będą się zmieniać przy zmianie długości pala i wówczas do konwersji parametru κ_2 należy skorzystać z zależności opisanej wcześniej m.in. w [15]. Parametr C_2 można obliczyć z równania (10) odnoszącego się do kształtu strefy uplastycznionej pod podstawą pala [15, 16, 21]:

$$C_2^{(1)} = C_2^{(0)} \frac{B^{(0)} (1 + \kappa_2^{(0)})^3}{B^{(1)} (1 + \kappa_2^{(1)})^3} \quad (10)$$

Ostatni z parametrów krzywej oporu całkowitego, czyli nośność graniczną pala, można wyznaczyć, przekształcając równanie (7). W przypadku, gdy warunki gruntowe nie ulegają zmianie można zapisać:

$$N_{gr2}^{(1)} = N_{gr2}^{(0)} \left(\frac{1 + \kappa_2^{(1)}}{1 + \kappa_2^{(0)}} \right)^{0,943} \left(\frac{H^{(1)}}{H^{(0)}} \right)^{1/3} \left(\frac{B^{(1)}}{B^{(0)}} \right)^{5/3} \quad (11)$$

Na podstawie równań (9), (10), (11) wyznacza się parametry krzywej oporu całkowitego przy założeniu, że warunki gruntowe oraz sposób dopasowa-

nia się podstawy pała do gruntu nie ulegają zmianie. Następnie możliwe jest wyznaczenie rozkładu oporu całkowitego na opór podstawy i poboczniczy. W metodzie M-K krzywe oporu podstawy i poboczniczy opisane są równaniami

$$N_1(s) = N_{gr1} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr1}} \right)^{-\left(\frac{1}{\kappa_1}\right)} \right] \quad (12)$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (13)$$

Znając parametry krzywej oporu całkowitego występujące w równaniu M-K (1), można ustalić wartości parametrów opisujących krzywą oporu podstawy i poboczniczy na podstawie zależności wyznaczonych w badaniach prowadzonych w Katedrze Geotechniki ZUT w Szczecinie [15, 17]:

$$C_1/C_2 = (\kappa_2 + 1)^2 \quad (14)$$

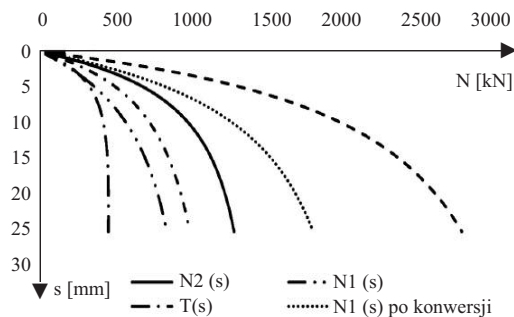
$$\kappa_1 = \ln(1 + \kappa_2) \quad (15)$$

$$N_{gr1} = N_{gr2} \cdot 2^{-(\kappa_2)} \quad (16)$$

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki obliczeń dotyczących konwersji krzywej pała o długości 9 m i szerokości 0,3 m na krzywą obciążenia pała o długości 20 m i szerokości 0,5 m przy założeniu, że warunki gruntowe oraz sposób dopasowania się podstawy pała do gruntu nie ulegają zmianie na skutek konwersji.

Podsumowanie

Analiza przeprowadzona na podstawie wyników próbnych obciążeń pali wykonanych w warunkach terenowych wykazała, że możliwe jest wyznaczenie zależności opisującej nośność graniczną pała, jako funkcję jego długości, szerokości oraz oporu w poziomie podstawy. Przedstawiona zależność (7) wykorzystuje również parametr κ_2 odnoszący się do relacji między oporem podstawy i poboczniczy. Parametr κ_2 można wyznaczyć na podstawie badania sondą CPTU [19] lub próbnego obciążenia statycznego [4, 7, 16, 17]. Zaimplementowanie równania (7) w metodzie konwersji krzywej [16] umożliwia konwersję w pełnym zakresie obciążenia, zarówno w odniesieniu do krzywej oporu całkowitego, jak i krzywej oporu podstawy i poboczniczy. Metoda Meyera-Kowalowa [6] pozwala na uzyskanie opisu zależności obciążenie-osiadanie pała



Rys. 6. Konwersja krzywej próbnego statycznego obciążenia prefabrykowanego pała wbijanego

Fig. 6. Static load test curve conversion for a precast driven pile

w postaci krzywej ciągłej w pełnym zakresie obciążenia, zarówno w przypadku przebiegu w przybliżeniu liniowego, jak i nieliniowego.

Kluczowym parametrem decydującym o bezpieczeństwie konstrukcji jest **nośność graniczna pała**, a jedną z metod jej określenia są próbne obciążenia statyczne, które stanowiły podstawę analizy omówionej w artykule. Przedstawiony zestaw równań może mieć znaczenie m.in. przy optymalizacji rozwiązań projektowych z wykorzystaniem wyników próbnych obciążeń statycznych. Dalsze badania będą miały na celu weryfikację opisanego równania, po zbadaniu większej liczby pali, w różnych warunkach gruntowych oraz innych technologiach wykonania, co może umożliwić uogólnienie przedstawionych rozwiązań.

Literatura

- [1] Briaud J. Geotechnical Engineering. Unsaturated and saturated soils. New Jersey: Wiley; 2013.
- [2] Gwizdała K. Fundamenty Palowe. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2013.
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją Topolnicki M., Kłosiński B. Wytuczne wzmacniania podłoża gruntowego kolumnami sztywnymi. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2022.
- [4] Krasieński A. Proposal for Calculating the Bearing Capacity of Screw Displacement Piles in Non-Cohesive Soils Based on CPT results: Studia Geotechnica et Mechanica. 2012; 34 (4): 41 – 51.
- [5] Chin F. K. Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure. Proceedings of 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering. 1970: 81 – 90.
- [6] Meyer Z, Kowalów M. Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria morska i geotechnika. 2010; 3: 438 – 44.
- [7] Szmeczel G. Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska. Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2015.
- [8] Mandolini A, Russo G, Viggiani C. Pile foundations: Experimental investigations analysis and design. XVI IC-SMGE, Millpress. 2005; 1: 177-195.
- [9] Nguyen T, Ly K, Nguyen-Thoi T, Nguyen B, Doan, N. Prediction of axial load bearing capacity of PHC nodlar pile using Bayesian regularization artificial neural network. Soils and foundations. 2022; 62 (5); <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101203>.
- [10] Józefika K, Zbiciak A, Maślakowski M, Piotrowski T. Numerical modeling and bearing capacity analysis of pile foundation. Procedia Engineering. 2015; 111: 356-363.
- [11] Wrana B. Pile load capacity – calculation methods: Studia Geotechnica et Mechanica. 2019; 37 (4): 83-93.
- [12] Vural İ, Kabaca H, Poyraz S. A Novel Approach Proposal for Estimation of Ultimate Pile Bearing Capacity Based on Pile Loading Test Data. Applied Sciences. 2023; 13 (13): 7993; <https://doi.org/10.3390/app13137993>
- [13] Shun-Wei Wang et al.: Analysis of the Bearing Characteristics of Single Piles under Vertical and Torsional Combined Loads, Advances in Civil Engineering. 2021; <https://doi.org/10.1155/2021/8896673>.
- [14] Gwizdała K, Roch Kowalski J. Prefabrykowane Pale Wbijane. Gdańsk: Politechnika Gdańska; 2005.
- [15] Meyer Z, Stachecki K. An attempt to analytically determine course of the continuous Q-s curve in case of changed pile length or diameter. Architecture Civil Engineering Environment. 2023; 16 (2): 119-126; <https://doi.org/10.2478/acee-2023-0021>.
- [16] Stachecki K. Analiza możliwości konwersji krzywej próbnego statycznego obciążenia pała przy zmianie jego geometrii. Rozprawa doktorska. Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; 2022.
- [17] Żarkiewicz K. Analiza formowania się oporu poboczniczy pała w gruntach niespoistych na podstawie badań laboratoryjnych. Rozprawa doktorska. Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; 2017.
- [18] Urbański A. et al: Podstawy Projektowania Geotechnicznego. Kraków: Politechnika Krakowska; 2016.
- [19] Meyer Z., Siemaszko P. Static load test curve analysis based on soil field investigations. Bulletin of Polish Academy of Sciences. 2019; 67 (2): 329-337.
- [20] Wysokiński L, Kotlicki W, Godlewski T. Projektowanie Geotechniczne według Eurokodu 7. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej; 2011.
- [21] Dembicki E. (red.). Fundamentowanie. Projektowanie i wykonawstwo. Tom 2. Posadowienie budowli. Warszawa: Arkady; 1988.

Podziękowania dla firmy Energopol Szczecin S.A. za udostępnienie wyników badań.

Przyjęto do druku: 9.04.2024 r.