

Interpretacja wyników próbnego obciążenia statycznego pala

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr. inż. Kamil Stachecki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych metod interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego pala wraz z porównaniem wyników ekstrapolacji krzywej Q-s. Analiza wykonano na podstawie wyników badań statycznych pali przeprowadzonych w pełnym zakresie obciążenia, które udostępniła firma Energopol Szczecin S.A. do celów naukowych. Zagadnienie dotyczące ustalenia przebiegu zależności między obciążeniem a osiadaniem pala na podstawie przeprowadzonych badań statycznych stanowi ciągle aktualny problem badań, który był poruszany między innymi w pracach [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, 16].

METODY INTERPRETACJI WYNIKÓW PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

Jedną z metod pełnej interpretacji wyników badań statycznych w postaci ciągłej krzywej Q-s jest zaproponowana w 2010 roku krzywa Meyera-Kowalowa [11], która w dalszej części pracy będzie nazywana krzywą M-K. Do opisu zależności między obciążeniem a osiadaniem pala w metodzie M-K wykorzystywane jest poniższe równanie:

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

gdzie:

s – osiadanie pala [mm],
 N – obciążenie w głowicy pala [kN],
 C_2 – odwrotność zagregowanej stałej Winklera [mm/kN],
 N_{gr2} – nośność graniczna pala [kN],
 κ_2 – bezwymiarowy parametr określający rozkład oporu w podstawie i na pobocznicy pala.

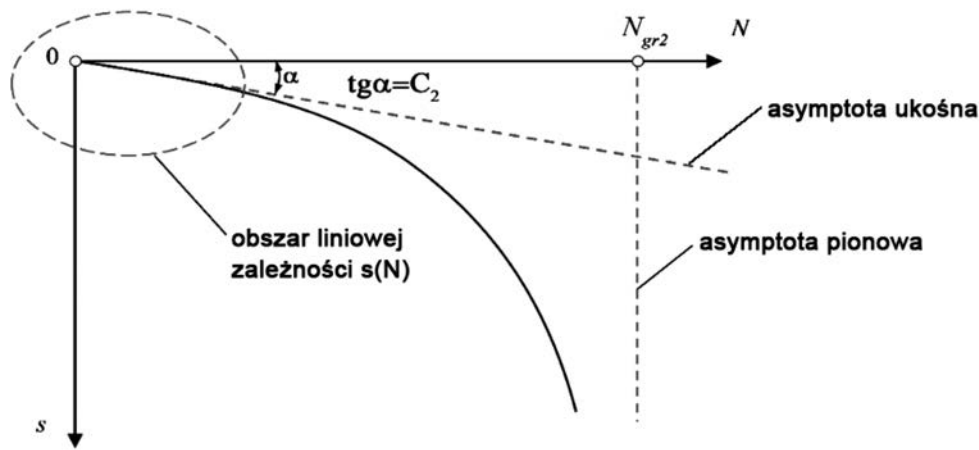
Powyższą zależność można również przedstawić w sposób graficzny, tak jak na rys. 1.

Na podstawie zbioru wartości pomierzonych w badaniu statycznym $\{s_i, N_i\}$ można wyznaczyć metodami statystyki matematycznej parametry C_2 , κ_2 , N_{gr2} występujące w zależności (1). Najczęściej jest wykorzystywana do tego metoda najmniejszych kwadratów, co w skrócie można opisać równaniem:

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

gdzie:

$s_{i,pom}$ – pomierzone osiadanie pala [mm],
 $s_{i,calc}$ – obliczone osiadanie pala [mm],
 δ_i^2 – błąd kwadratowy [mm²].



Rys. 1. Charakterystyczne asymptoty ograniczające krzywą $s = s(N)$ [10]

Ponadto metoda M-K umożliwia podział krzywej próbnego obciążenia statycznego pala $N_2(s)$ na krzywą oporu podstawy $N_1(s)$ oraz pobocznicy $T(s)$, wykorzystując poniższe związki:

$$N_1(s) = N_{gr1} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr1}} \right)^{-\left(\frac{1}{\kappa_1} \right)} \right] \quad (3)$$

$$N_2(s) = N_{gr2} \cdot \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_2 \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr2}} \right)^{-\left(\frac{1}{\kappa_2} \right)} \right] \quad (4)$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (5)$$

gdzie:

N_{gr1} – graniczny opór podstawy pala [kN],

C_1, κ_1 – parametry krzywej oporu podstawy.

Badania prowadzone od ponad 10 lat w Katedrze Geotechniki Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska (WBiŚ) Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego (ZUT) w Szczecinie pozwoliły również na opisanie związków między parametrami krzywej próbnego obciążenia statycznego pala, czyli C_2, κ_2, N_{gr2} , a parametrami krzywej oporu podstawy, czyli

C_1, κ_1, N_{gr1} [10, 14, 18, 19]. Zależności te można przedstawić za pomocą poniższych równań:

$$\frac{C_1}{C_2} = (\kappa_2 + 1)^2 \quad (6)$$

$$\kappa_1 = \ln(1 + \kappa_2) \quad (7)$$

$$N_{gr1} = \frac{N_{gr2}}{2^{\kappa_2}} \quad (8)$$

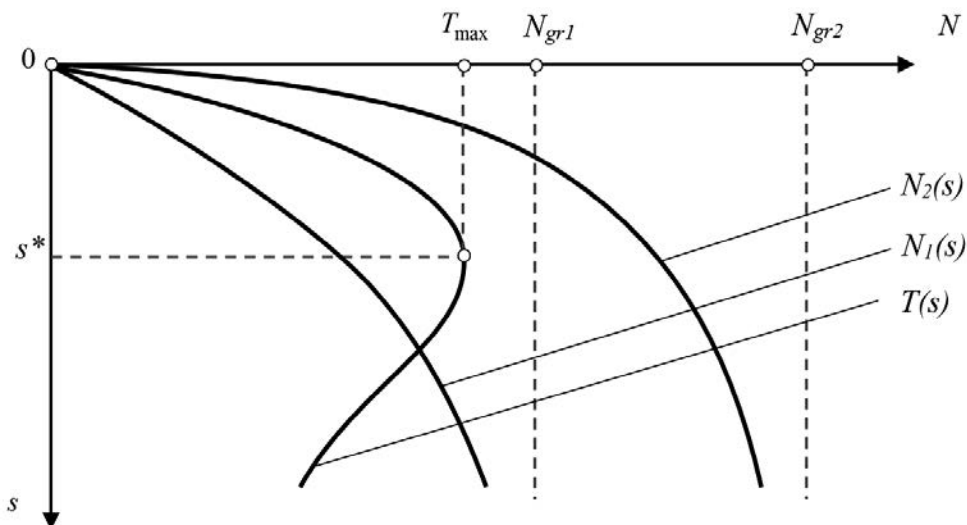
Wykorzystanie wartości C_1, κ_1, N_{gr1} , obliczonych z równań (6) ÷ (8), umożliwia opisanie, oprócz krzywej próbnego obciążenia statycznego, również krzywej oporu podstawy oraz oporu pobocznicy na podstawie zależności (3) ÷ (5). Przykład przebiegu krzywych $N_2(s); N_1(s); T(s)$ przedstawiono na rys. 2.

W literaturze znaleźć można również równania innych autorów. Jednym z analizowanych podejść do interpretacji badania statycznego jest metoda Chin-Kondnera [4], która jest opisywana poniższym równaniem:

$$\frac{s}{N}(s) = A_1 \cdot s + B_1 \quad (9)$$

gdzie:

A, B – stałe parametry opisujące prostą $\frac{s}{N}(s)$.



Rys. 2. Przykład przebiegu krzywych $N_2(s); N_1(s); T(s)$ [10]

Można zauważyć, że po podstawieniu wartości $\kappa_2 = 1$ w równaniu M-K (1) otrzymamy:

$$s(N) = C_2 \cdot N_{gr2} \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{N}{N_{gr2}}} - 1 \right] \quad (10)$$

Po przekształceniach prowadzi do postaci analogicznej do (9):

$$\frac{s}{N}(s) = s \cdot \frac{1}{N_{gr2}} + C_2 \quad (11)$$

co pozwala stwierdzić, że metoda Chin-Kondnera jest szczególnym przypadkiem metody M-K dla $\kappa_2 = 1$. W praktycznych przypadkach $\kappa_2 \neq 1$ co może prowadzić do błędów w opisie zależności Q-s, szczególnie dla nieliniowej części krzywej, w przypadku występowania dużych obciążeń. Można również zauważyć, że wartość parametru A_1 można porównać do odwrotności nośności granicznej pała N_{gr2} , natomiast parametr B_1 można porównać do parametru C_2 . Wartości C_2 oraz N_{gr2} opisujące równanie Chin-Kondnera (11) są w większości przypadków różne od wartości opisujących równanie M-K (1).

W literaturze często wymieniana jest również metoda Brinch-Hansena [2], którą można opisać poniższym związkiem między obciążeniem a osiadaniami:

$$\frac{\sqrt{s}}{N}(s) = A_2 \cdot s + B_2 \quad (12)$$

gdzie:
 A_2, B_2 – stałe parametry opisujące prostą $\frac{\sqrt{s}}{N}(s)$.

W równaniu (12) parametr B_2 można analogicznie, jak w metodzie Chin-Kondnera, porównać do parametru C_2 występującego w metodzie Meyera-Kowalowa. Po przekształceniach można wówczas również zapisać:

$$A_2 = \frac{1}{4 \cdot (N_{gr2})^2} \cdot \frac{1}{C_2} \quad (13)$$

co prowadzi do:

$$\frac{\sqrt{s}}{N}(s) = \frac{1}{4 \cdot (N_{gr2})^2} \cdot \frac{s}{C_2} + C_2 \quad (14)$$

Metoda ta jednak daje duże różnice w obliczonych wartościach osiadania w przypadku dużych obciążeń w głowicy pała powodujących nieliniowy przebieg zależności obciążenie – osiadanie.

W pracy Kacprzaka [9] przywołano również szczególnie przypadek równania M-K dla $\kappa_2 = 0$, w postaci funkcji logarytmicznej, która ma postać:

$$s(N) = -C_2 \cdot N_{gr2} \cdot \ln \left[1 - \frac{N}{N_{gr2}} \right] \quad (15)$$

Ze względu na fakt, że w praktyce $\kappa_2 = 0$ oznacza pał, który pracuje jedynie podstawą, zakres stosowania równania (15) jest wyraźnie ograniczony. Podobne podejście stosowane jest również w przypadku funkcji transformacyjnych według podejścia francuskiego [3, 7] w odniesieniu do osiadania podstawy oraz poboczniczy:

$$s_1(N) = -\frac{D}{K' \cdot E_m} \cdot T_\infty \cdot \ln \left[1 - \frac{T}{T_\infty} \right] \quad (16)$$

$$s_2(N) = -\frac{D}{K \cdot E_m} \cdot N_{gr1} \cdot \ln \left[1 - \frac{N_1}{N_{gr1}} \right] \quad (17)$$

gdzie:

s_1 – osiadanie poboczniczy [mm],
 s_2 – osiadanie podstawy [mm],
 D – średnica pała [m],
 E_m – moduł presjometryczny na danej głębokości [m],
 K, K' – empiryczne współczynniki.

W podejściu francuskim uwzględniona jest dodatkowo wartość modułu presjometrycznego na danej głębokości E_m oraz empiryczne współczynniki K oraz K' , co powoduje rozszerzenie zakresu stosowalności równania w przypadkach, w których pał pracuje również podstawą poprzez wartość parametru C_1 .

Kolejnym z analizowanych podejść jest metoda interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego zaproponowana przez Decourta [5], która jest opisywana równaniem:

$$N(s) = \frac{B_3 \cdot s}{1 - A_3 \cdot s} \quad (18)$$

gdzie:

A_3, B_3 – stałe parametry opisujące prostą $\frac{N}{S}(N)$.

Nośność graniczna pała jest wówczas równa:

$$N_{gr2} = \frac{B_3}{A_3} \quad (19)$$

Parametr A_3 można analogicznie, jak w metodzie Chin-Kondnera oraz Brinch-Hansena, porównać do parametru C_2 występującego w metodzie Meyera-Kowalowa. Po przekształceniach wyrażenie (18) można zapisać w postaci:

$$N(s) = \frac{s}{C_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{s}{C_2 \cdot N_{gr2}}} \quad (20)$$

W przypadku dużych obciążeń w głowicy pała powyższa metoda wykazuje wyraźne różnice z wartościami pomierzonymi.

Ostatnią z analizowanych metod jest metoda Poulosa [16], która opisuje zależność obciążenie – osiadanie pała poniższym równaniem:

$$\frac{N}{s}(N) = k_{p0} \cdot \left(1 - R_{fp} \cdot \frac{N}{N_{gr2}} \right) \quad (21)$$

gdzie:

R_{fp} – stały współczynnik hiperboliczny przyjmujący wartość ,
 k_{p0} – sztywność początkowa pała wyznaczona jako stosunek $\frac{N}{s}$ dla początkowych osiadań, dla których występuje liniowa zależność, wartość porównywalna z odwrotnością parametru C_2 [kN/mm].

Po przekształceniach wyrażenie można zapisać w postaci (22):

$$s(N) = \frac{N \cdot C_2}{1 - R_{fp} \cdot \frac{N}{N_{gr2}}} \quad (22)$$

Porównanie wykresów $s(N)$ dla różnych metod interpretacji zbiorów danych próbnego obciążenia statycznego $\{N_i, s_i\}$ przedstawiono na rys. 3 ÷ 5. Do weryfikacji wykorzystano wyniki badań statycznych przeprowadzonych w pełnym zakresie ob-

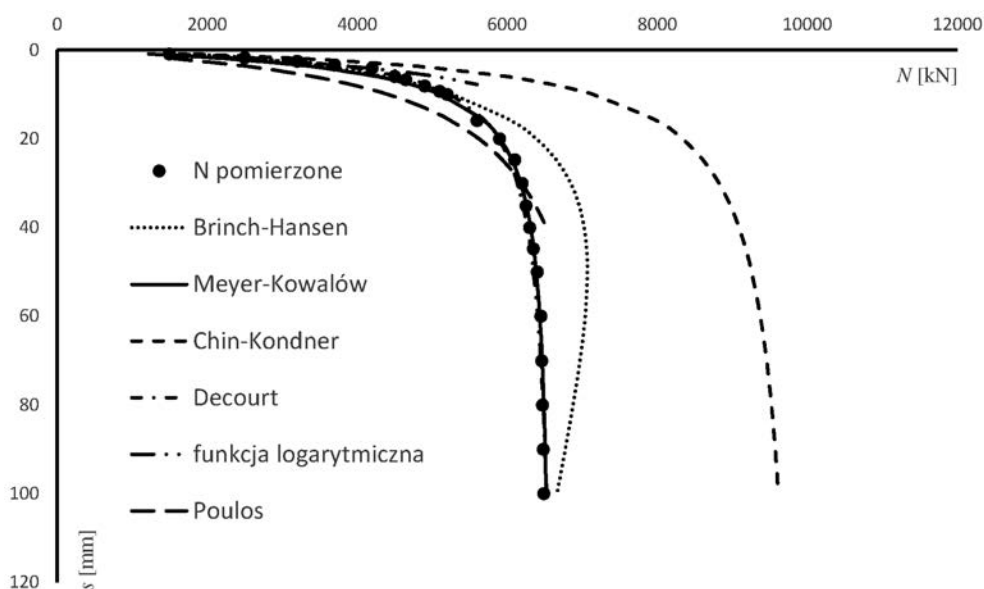
ciężenia przez Energopol Szczecin S.A, co pozwoliło na prześledzenie przebiegu krzywych próbnego obciążenia statycznego z wykorzystaniem wybranych metod interpretacji. Przeanalizowano trzy prefabrykowane pale żelbetowe wykonane w ilarach. Mając na celu zminimalizowanie wpływu błędów pomiarowych związanych między innymi z dopasowywaniem się pala do gruntu w początkowym zakresie obciążenia, w obliczeniach pominięto odczyty początkowe. Ekstrapolację przeprowadzono dla części w praktyce spotykanego przypadku, czyli sytuacji, w której próbne obciążenia statyczne nie są przeprowadzone w celu zniszczenia pala. W związku z powyższym ostatecznie do obliczeń przyjęto środkowe odczyty, natomiast na wykresach przedstawiono komplet rezultatów, aby możliwe było porównanie przebiegu każdej z krzywych w pełnym zakresie obciążenia. W tabl.1 przedstawiono parametry analizowanych pali, z uwzględnieniem pomierzonych wartości nośności granicznej

pala , natomiast na rys. 3 ÷ 5 przedstawiono porównanie otrzymanych krzywych obciążenia dla każdej z analizowanych metod.

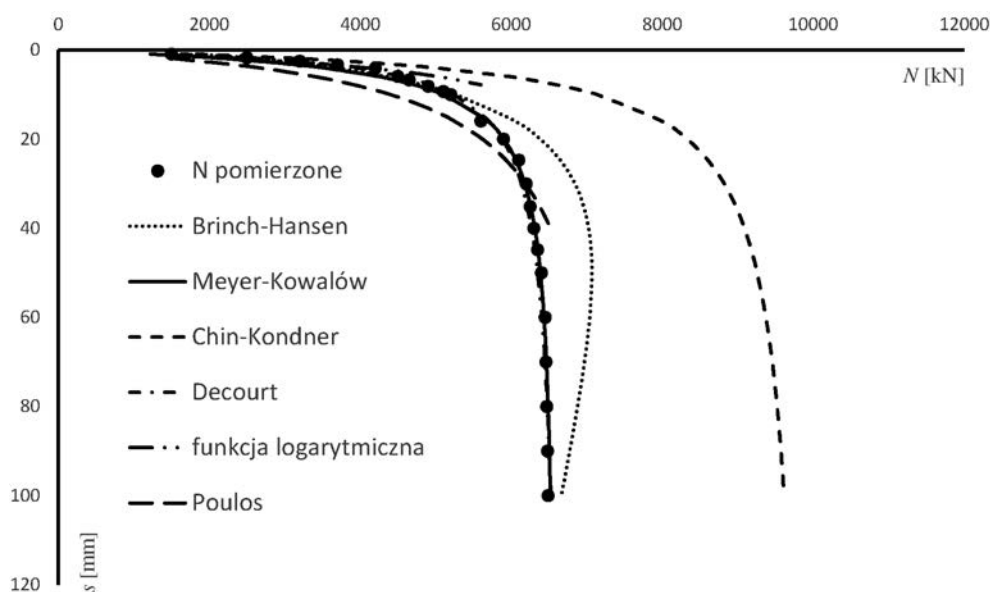
Tabl. 1. Parametry analizowanych pali

Pal	H [m]	D [m]	$N_{gr, test}$ [kN]
38-12P	33,5	1,5	11785
36N-10L	27,5	1	6490
38-10P	31,5	1,5	11900

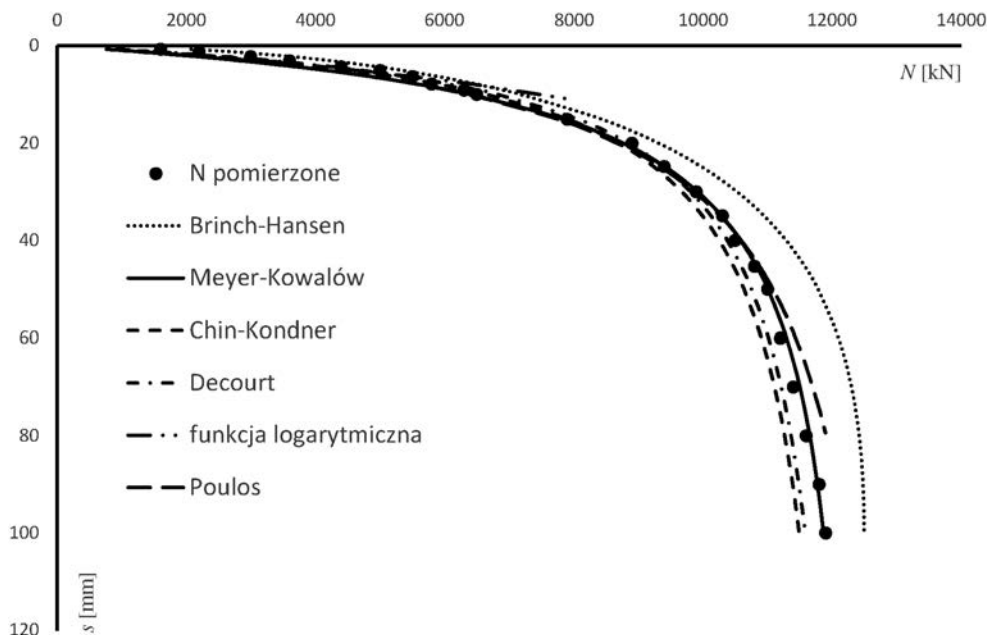
Na przedstawionych powyżej rysunkach można zauważyć, że w każdym z analizowanych przypadków ekstrapolacja metodą M-K skutkuje otrzymaniem dokładnych rezultatów w peł-



Rys. 3. Porównanie przebiegu krzywych próbnego obciążenia statycznego pala 38-12P



Rys. 4. Porównanie przebiegu krzywych próbnego obciążenia statycznego pala 36N-10L



Rys. 5. Porównanie przebiegu krzywych próbnego obciążenia statycznego pala 38-10P

nym zakresie obciążenia. Pozostałe krzywe wykazują zgodność w liniowym zakresie zależności obciążenie – osiadanie natomiast w przypadku nieliniowego zakresu przebieg aproksymowanej krzywej próbnego obciążenia statycznego może się wyraźnie różnić od rzeczywistego. Do dalszej interpretacji wyników próbnego obciążenia statycznego wykorzystano metodę Meyera-Kowalowa.

PRZYKŁAD PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA

Krzywa M-K przedstawiona na rys. 4 opisująca przebieg zależności między obciążeniem a osiadaniem pala 36N-10L jest opisana następującymi parametrami, które wyznaczono bezpośrednio ze zbioru wartości wyników próbnego obciążenia

statycznego pala $\{N_p, s_i\}$ metodami statystyki matematycznej w sposób opisany między innymi w [11, 15, 18, 19]:

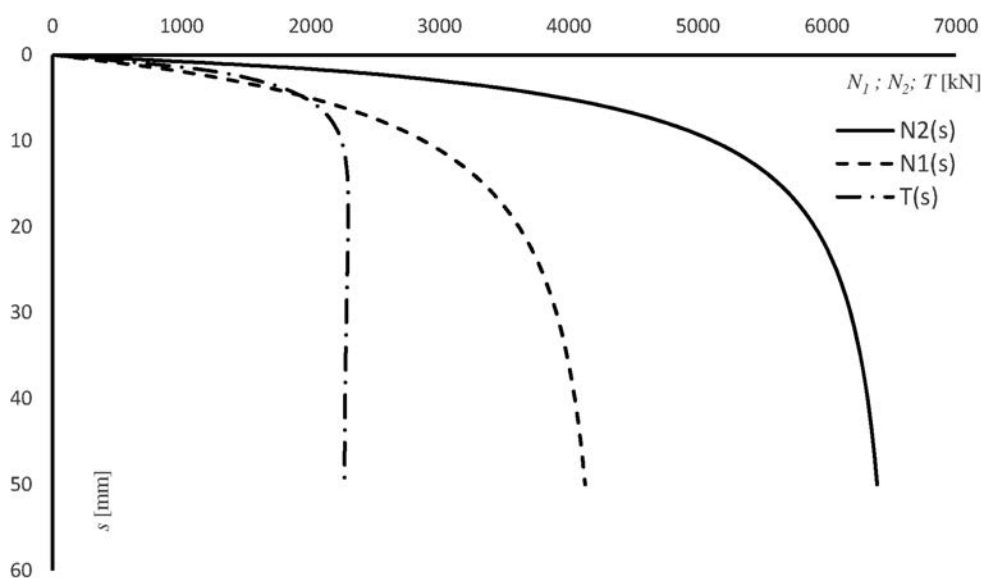
$$C_2 = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm/kN}; \quad \kappa_2 = 0,61; \quad N_{gr2} = 6490 \text{ kN}$$

Z równań (3) ÷ (5) można obliczyć parametry krzywej oporu podstawy:

$$C_1 = C_2 \cdot (\kappa_2 + 1)^2 = 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot (0,61 + 1)^2 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ mm/kN}$$

$$\kappa_1 = \ln(1 + \kappa_2) = \ln(1 + 0,61) = 0,48$$

$$N_{gr1} = \frac{N_{gr2}}{2^{\kappa_2}} = \frac{6490}{2^{0,61}} = 4318 \text{ kN}$$



Rys. 6. Przebieg krzywej próbnego obciążenia statycznego oraz krzywych oporu podstawy i pobocznicy pala 36N-10L

Powyższe parametry pozwalają na opisanie zarówno krzywej próbnego obciążenia statycznego $N_2(s)$, jak również krzywej oporu podstawy $N_1(s)$ oraz oporu pobocznic $T(s)$, co przedstawiono na rys. 6.

Badania prowadzone w Katedrze Geotechniki WBiŚ umożliwiły również opisanie zależności między parametrami krzywej M-K, a parametrami gruntu. Analiza dotycząca sposobu współpracy pala z gruntem opisana w pracy Meyera i Siemaszki [12] umożliwiła określenie zależności (23) ÷ (26) pozwalających na obliczenie parametru κ_2 na podstawie badania sondą CPTU w zależności od kształtu strefy uplastycznionej gruntu pod podstawą pala, co przedstawiono na rys. 7.

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{3,68} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{0,785} \cdot \frac{\bar{q}_c}{q_b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}} \right]^{1/2} - 1 \quad (23)$$

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{3,68} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{0,785} \cdot \frac{\bar{q}_c}{q_b} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3} \right) \left(1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3} \right)} \right]^{1/2} - 1 \quad (24)$$

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{20,86} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{0,785} \cdot \frac{\bar{q}_c}{q_b} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}} \right]^{3/5} \quad (25)$$

$$\kappa_2 = \left[\frac{4\beta}{3,68} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{0,785} \cdot \frac{\bar{q}_c}{q_b} \cdot \frac{D}{D_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} q_b^{1/3}} \right]^{1/2} - 1 \quad (26)$$

gdzie:

$\bar{q}_c$ – średni opór wzdłuż pobocznic [MPa],

q_b – opór pod podstawą pala [MPa],

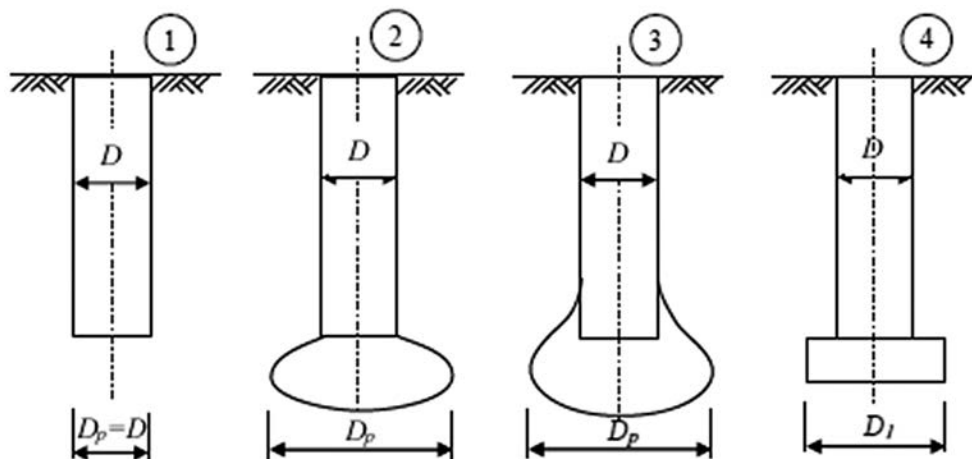
β – parametr zależny od technologii wykonania pala przyjmujący wartości 1 ÷ 2.

Badanie przeprowadzone przez Meyera i Stacheckiego [13, 17] z wykorzystaniem badań statycznych pali obciążonych do zniszczenia umożliwiły sformułowanie empirycznej zależności opisującej nośność graniczną pala:

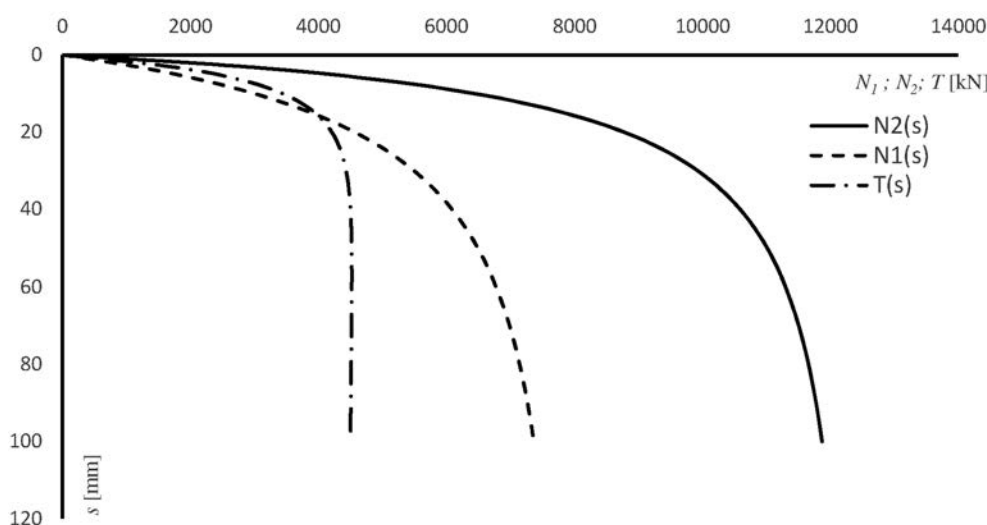
$$N_{gr2} = 4,439 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{1,757} \cdot q_b \cdot D^2 \quad (27)$$

gdzie:

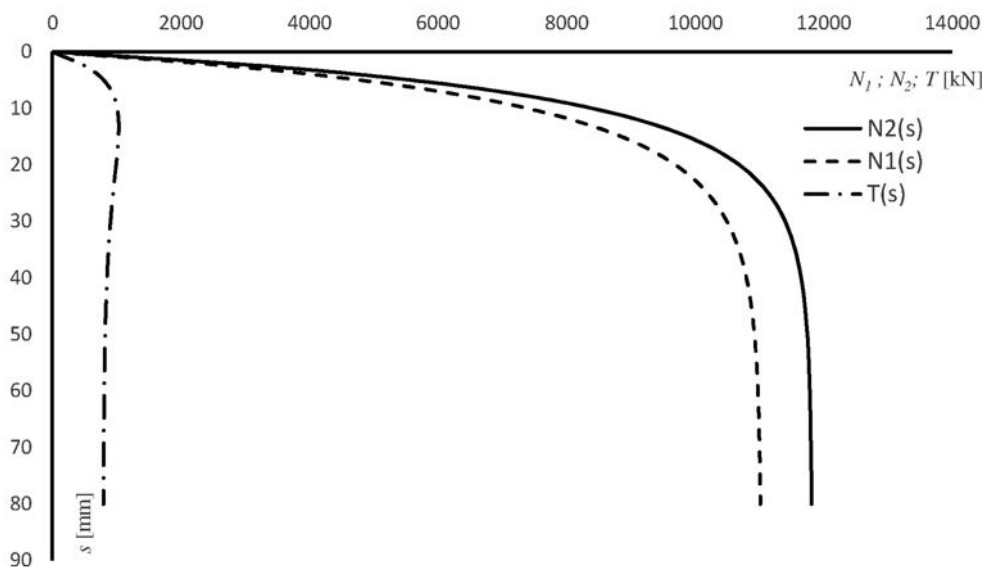
H – długość pala [m].



Rys. 7. Kształt strefy uplastycznionej pod podstawą pala [12]



Rys. 8. Przebieg krzywej próbnego obciążenia statycznego oraz krzywych oporu podstawy i pobocznic pala 38-10P.



Rys. 9. Przebieg krzywej próbnego obciążenia statycznego oraz krzywych oporu podstawy i pobocznicy pala 38-12P

W przypadku, gdy znana jest nośność graniczna pala, możliwe jest obliczenie oporu pod podstawą pala:

$$q_b = \frac{1}{4,439 \cdot 10^{-3} \cdot D^2} \cdot N_{gr2} \cdot \left(\frac{D}{H} \right)^{1,757} \quad (28)$$

Na rys. 8 i 9 przedstawiono podział krzywej próbnego obciążenia statycznego na krzywą oporu podstawy i pobocznicy pozostałych analizowanych pali. Parametry opisujące krzywe zestawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Parametry M-K opisujące pal 38-12P oraz 38-10P

Pal	N_{gr2} [kN]	C_2 [mm/kN]	κ_2	N_{gr1} [kN]	C_1 [mm/kN]	κ_1
38-10P	12500	$8,7 \cdot 10^{-4}$	0,65	7966	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,50
38-12P	11820	$6,4 \cdot 10^{-4}$	0,1	11028	$7,8 \cdot 10^{-4}$	0,095

PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono analizę aproksymacji krzywej obciążenie – osiadanie pala uzyskiwanej z próbnych obciążeń statycznych. Przedstawiono najczęściej spotykane w literaturze metody przyjmowane do opisu tej krzywej i porównano wyniki obliczeń z pomiarami przeprowadzonymi na rzeczywistych palach w terenie. Okazuje się, że krzywa Chin-Kondnera jest szczególnym przypadkiem krzywej Meyera-Kowalowa dla $\kappa_2 = 1$. W metodzie M-K parametr κ_2 reprezentuje wzajemny udział w odporze pobocznicy i podstawy pala. Podobnie jest w przypadku krzywej logarytmicznej, która powstaje w szczególnym przypadku, gdy κ_2 dąży do zera, czyli opór pobocznicy jest równy zero, a nośność pala wynika jedynie z oporu podstawy. Równania Brinch-Hansena, Decourt, Poulos wykazują zgodność w przypadku małych obciążeń, natomiast dla większych – różnice pomiędzy obliczonymi a pomierzonymi są znaczne. W związku z tym można powiedzieć, że obowiązują one głównie w zakresie liniowej teorii sprężystości. Krzywa Meyera-Kowalowa, którą przyjęto do dalszej analizy w niniejszej pracy ma dwie cechy, które przybliża-

ją tę krzywą do fizycznych cech zjawiska próbnego obciążenia statycznego. Po pierwsze krzywa M-K ma asymptotę ukośną dla nachyloną pod kątem odpowiadającym odwrotności zagregowanej stałej Winklera. Jest to wartość zagregowana, ponieważ stała Winklera w literaturze akademickiej odnosi się do odporu podstawy, natomiast w tym przypadku nachylenie asymptoty ukośnej jest powodowane zarówno przez opór podstawy, jak i pobocznicy. Drugim z elementów charakteryzujących krzywą M-K jest nośność graniczna pala, jest to asymptota pionowa. Pozostałe związki zawarte w niniejszej pracy wynikają z analiz ponad 140 różnych krzywych próbnego obciążenia statycznego przeprowadzonych w Katedrze Geotechniki WBiIŚ. Uzyskane w ten sposób zależności pozwoliły na rozdzielenie krzywej próbnego obciążenia statycznego pala na krzywą oporu podstawy oraz oporu pobocznicy, co pozwala w szybki sposób określić, jaki jest udział pobocznicy i podstawy w formowaniu się odporu pala wraz z jego osiadaniem. Celem pracy było przedstawienie ostatnich wyników badań, które uzyskano na podstawie wyników próbnych obciążeń statycznych pali obciążonych w pełnym zakresie obciążenia, czyli do osiągnięcia obciążenia granicznego. Na podstawie uzyskanych wyników możliwe było uzyskanie zależności opisującej w zależności od odporu sondy statycznej, długości oraz średnicy pala i zweryfikowanie równań opisujących parametr. Mając to na względzie, w niniejszej pracy miano na celu przybliżenie wiedzy o tym, jak można odzwierciedlać krzywą próbnego obciążenia statycznego pala na podstawie wyników badań eksperymentalnych oraz jak można wykorzystać tę krzywą do oceny udziału pobocznicy i podstawy w tworzeniu się nośności pala. Program dalszych badań przewiduje analizę zależności między stałymi a parametrami geotechnicznymi oraz wymiarami pala. Trwają również aktualnie badania nad analizą modułu sprężystości, w szczególności pod podstawą pala w zależności od wyniku sondowania sonda statyczną. W literaturze istnieje szereg wzorów, które pozwalają na przeliczanie tych wartości w przypadku różnych gruntów. Zachowanie się gruntu pod podstawą pala, kiedy częściowo zaczyna pojawiać się strefa uplastycznionego gruntu powodująca modyfikację występujących między parametrami zależności również jest przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

1. Briaud J. L.: Geotechnical Engineering. Unsaturated and saturated soils. Wiley, New Jersey 2013.
2. Brinch Hansen J.: A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute, vol. 28, Copenhagen 1970.
3. Bustamante M., Frank R., Gianselli L.: Prevision de la coubre de chargement des fondations profondes isolees. XII ICSMFE, Rio de Janeiro, 1989.
4. Chin F. K.: Estimation of the Ultimate Load of Piles Not Carried to Failure. Proceedings of 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering, Singapore, 1970, 81-90.
5. Decourt L.: Behavior of foundations under working load conditions. Proceedings of the 11th Pan-American Conference on Soil Mechancis and Geotechnical Engineering, Foz Dolguassu, Brazil, vol. 4, 1999, 453-488.
6. Fellenius B. H.: Basics of Foundation Designs. Electronic Edition, www.felleniu.net
7. Frank R., Zhao S.R.: Estimation par les parameters pressiometriques de l'enforcement sous charge axiale des pieux fores dans des sols fins. Bull. Liaison Labo. P. wt. Ch., 119, 1982, 17-24.
8. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 2010
9. Kacprzak G.: Współpraca fundamentu płytowo-palowego z podłożem gruntowym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018
10. Meyer Z.: Wykorzystanie wyników testu statycznego pala do określenia mobilizacji oporu podstawy i poboczniczy. XXXII Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła 2017, 303-318.
11. Meyer Z, Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 2010, 438-441.
12. Meyer Z, Siemaszko P.: Static load test curve analysis based on soil field investigations. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, vol. 67, nr 2, 2019, 329-337.
13. Meyer Z, Stachecki K.: Praktyczne zastosowanie konwersji krzywej próbnego obciążenia pala przy zmianie jego wymiarów oraz parametrów gruntowych. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Warsztaty Pracy Rzeczoznawcy Budowlanego, 2020, 387-394
14. Meyer Z, Szmeczel G.: Określenie oporów poboczniczy pala na podstawie próbnych obciążeń statycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 2015, 441-444.
15. Meyer Z, Wasiluk A.: Weryfikacja krzywej Meyera-Kowalowa w oparciu o wyniki eksperymentalne oraz kolejny etap analizy niedokładności pomiarów testu statycznego pala. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 6, 2019, 315-323.
16. Poulos H. G.: Practical design procedures for piled raft foundations in "Design applications of raft foundations". J. A Hemsley, Thomas Telford Publishing, London, 2010, 425-468.
17. Stachecki K.: Współczesne zagadnienia z inżynierii lądowej. Prace naukowe doktorantów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2020, 197-204.
18. Szmeczel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2014.
19. Żarkiewicz K.: Analiza formowania się oporu poboczniczy pala w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin 2017.