

Analiza mobilizacji oporu poboczniczy i podstawy pala na podstawie interpretacji badań modelowych

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr inż. Krzysztof Żarkiewicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Głównym celem próbnego obciążenia pala jest sprawdzenie relacji obciążenie – osiadanie. Każdy pomiar podczas badania jest informacją o osiadaniu głowicy pala po przyłożeniu do niej siły. W związku z tym, z całego badania otrzymujemy zbiór danych $\{N_p, s_i\}$. Wyniki próbnego obciążenia można przedstawić na wykresie $s_i = f(N_p)$. Zdaniem autorów, krzywa osiadania może być podstawą do określenia rozkładu oporów na pobocznicy i pod podstawą pala, a także do oznaczenia niektórych parametrów gruntu. Badania pali oraz określenie dystrybucji siły przyłożonej w głowicy w podłożu gruntowym stało się przedmiotem wielu badań [1, 2, 3, 9, 11]. Zwykle, jeżeli mówimy o próbnym obciążeniu pali, mamy na myśli badania w skali naturalnej. Zakłada się podświadomie, że w badaniach modelowych występuje efekt skali, który nie jest dokładnie rozpoznany. Zastosowana w niniejszej pracy krzywa Meyera i Kowalowa do opisanie relacji obciążenie – osiadanie głowicy pala (Q - S) w pełnym zakresie obciążenia nie zawiera współczynników skali. Krzywa uwzględnia jedynie parametry wyznaczone na podstawie ciągu wartości Q - S z próbnym obciążeniami statycznymi. Rodzą się pytania:

- Czy krzywa Meyera i Kowalowa może być zastosowana w eksperymentach w małej skali (laboratoryjnej)?
- Które z parametrów tej krzywej zawierają najsilniej efekt skali?
- Czy efekt skali można uwzględnić poprzez zależności analityczne opisujące te parametry?

Te pytania legły u podstaw przeprowadzenia badań w niniejszej pracy.

OPIS MATEMATYCZNY

Sposób aproksymacji wyników próbnego obciążenia zaproponował Meyer i Kowalow (M-K) [6], a metodę określenia

parametrów krzywej aproksymującej (M-K) opisano w pracach [4, 7, 10]. Metoda ta umożliwia wyznaczenie nośności granicznej pala, a w związku z tym określenie zapasu nośności pala. Poza nośnością graniczną w równaniu Meyera-Kowalowa występują jeszcze dwa parametry: κ oraz C , które zawierają informację o parametrach podłoża gruntowego. Parametry krzywej aproksymującej Meyera-Kowalowa wyznacza się na podstawie zbioru danych pomiarowych $\{N_p, s_i\}$ zgodnie z przedstawioną w dalszej części artykułu procedurą.

Parametr C określa się na podstawie aproksymacji liniowej pierwszych czterech punktów pomiarowych z próbnego obciążenia.

Wzór na obliczenie osiadań ma postać [6]:

$$s_{i,obl} = C \frac{N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (1)$$

gdzie:

C – parametr krzywej osiadania [mm/kN],

N_{gr} – nośność graniczna pala, przy której pal osiada w sposób nieograniczony [kN],

κ – bezwymiarowy parametr krzywej osiadania [-],

$N_{i,pom}$ – przyłożona siła w głowicy w i -tym stopniu obciążenia [kN],

$s_{i,obl}$ – obliczone osiadanie głowicy pala w i -tym stopniu obciążenia [mm].

Stosując podstawienie:

$$X_i = \frac{N_{gr}}{\kappa} \left[\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}} \right)^{-\kappa} - 1 \right] \quad (2)$$

oraz zakładając równość osiadań pomierzonych i obliczonych dla danego stopnia obciążenia:

$$s_{i,pom}(N_i) = s_{i,obl}(N_i) \quad (3)$$

parametr C można obliczyć statystycznie metodą najmniejszych kwadratów odchyłek z zależności [7]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^4 s_{i,pom} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^4 X_i^2} \quad (4)$$

Na podstawie powyższych zależności parametr C uzależniono od parametru κ oraz nośności granicznej N_{gr} . Znając wartości osiadań pomierzonych istnieje możliwość obliczenia stosunków dwóch kolejnych osiadań:

$$Y_{i,pom} = \frac{s_{i+1,pom}}{s_{i,pom}} \quad (5)$$

Dla wartości obliczonych stosunek ten przyjmie postać:

$$Y_{i,obl} = \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1,pom}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\left(1 - \frac{N_{i,pom}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1} \quad (6)$$

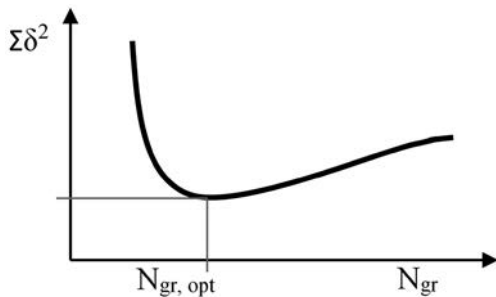
W celu uzyskania równania (8) metodą najmniejszych kwadratów odchyłek wyznaczono nośności graniczne wybranych wartości parametru dla których warunek jest spełniony określonym równaniem (7) i przedstawiony na rys. 1 [7]:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \delta^2 = (Y_{i,pom} - Y_{i,obl})^2 = \min \quad (7)$$

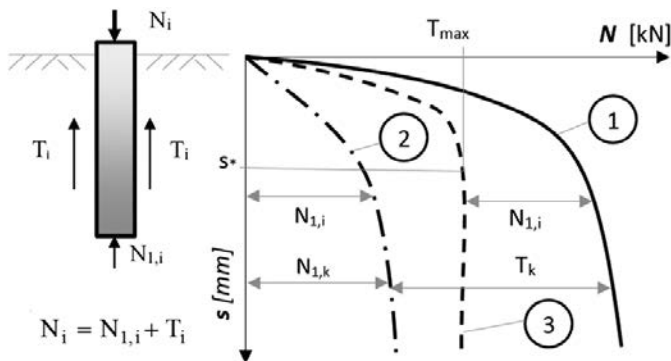
Dla określonego zbioru danych $\{N_{gr}, \kappa\}$, stosując regresję liniową, wyznaczono stałe a i b zależności (8) [7]:

$$N_{gr} = a\kappa + b \quad (8)$$

Następnie wykorzystano otrzymaną funkcję liniową (8) do równania (6) i wyznaczono κ metodą najmniejszej sumy kwadratów odchyłek. Parametr κ jest jedyną zmienną tej sumy.



Rys. 1. Warunek minimalnych odchyłek do wyznaczenia $N_{gr,opt}$



Rys. 2. Ogólny mechanizm przekazywania obciążenia zewnętrznego wraz z przedstawieniem zależności obciążenie – osiadanie z podziałem na opór pobocznicy i podstawy pała

$$\kappa = opt \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n-1} \delta^2 = \min \quad (9)$$

lub:

$$\kappa = opt \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{n-1} \Delta^2 = \min \quad (10)$$

gdzie:

$$\Delta = (s_{i,pom} - s_{i,obl})$$

Podczas próbnego obciążenia statycznego pała siła wciskająca przyłożona w głowicy jest przekazywana do podłoża gruntowego poprzez dwie składowe: opór na pobocznicę oraz opór gruntu pod podstawą zgodnie z rys. 2.

Zależność osiadania głowicy pała od przyłożonej siły można podzielić na dwa wykresy składowe $s_i = f(T_i)$, $s_i = f(N_{1,i})$. Przedstawiono to na rys. 2.

Przygotowano program badań laboratoryjnych, w którym przyjęto założenie, że opór pobocznicę uzyskuje się z odjęcia dwóch wykresów obciążenie – osiadanie. Pierwszy wykres, to wykres obciążenie – osiadanie $s_i = f(N_i)$ w warunkach, kiedy występuje opór pobocznicę (krzywa nr 1). Drugi wykres $s_i = f(N_{1,i})$ to wykres jedynie oporu gruntu pod podstawą pała, gdy opór pobocznicę jest równy 0 (tarcie o pobocznicę nie występuje, krzywa nr 2). Krzywa nr 3 to różnica oporów zgodnie z rys. 2.

Opór pod podstawą pała (krzywa nr 2) aproksymowany krzywą Meyera-Kowalowa [6] opisano równaniem:

$$N_{1,i}(s_i) = N_{1,gr} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 \cdot s_i}{C_1 \cdot N_{1,gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] \quad (11)$$

Siła w głowicy w zależności od powstałych osiadań, kiedy występuje tarcie o pobocznicę pała (krzywa nr 1) wynosi [6]:

$$N_i(s_i) = N_{gr} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa \cdot s_i}{C \cdot N_{gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (12)$$

Korzystając z równań (11), (12) otrzymano opór na pobocznicę (krzywa nr 3) w postaci:

$$T_i = N_{gr} - N_{1,gr} + N_{1,gr} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa_1 \cdot s_i}{C_1 \cdot N_{1,gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] - N_{gr} \left[1 - \left(1 + \frac{\kappa \cdot s_i}{C \cdot N_{gr}} \right)^{-\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (13)$$

Równanie to ma ekstremum w punkcie $s_i = s^*$ i wtedy [8]:

$$T(s^*) = T_{max} \quad (14)$$

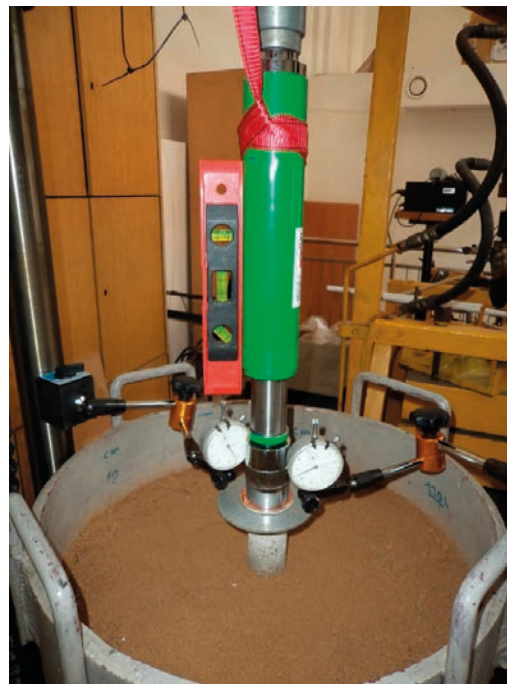
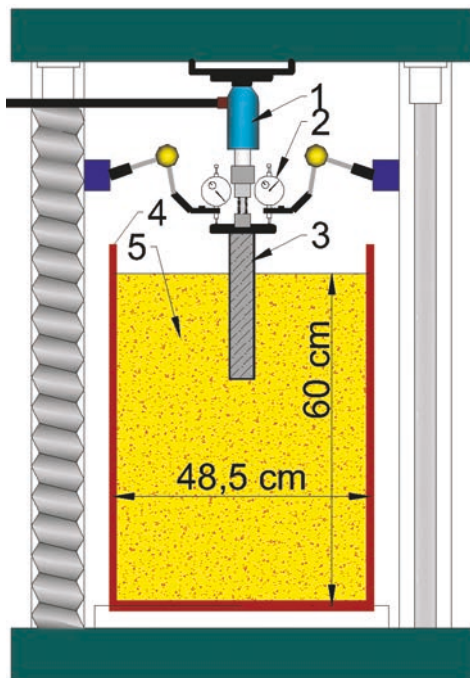
oraz asymptotę ukośną:

$$\lim_{s \rightarrow 0} T_i = \frac{C_1 - C}{C_1 C} s_i \quad (15)$$

gdzie:

s^* – osiadanie, przy którym mobilizują się maksymalne opory na pobocznicę pała [mm].

Równaniem (14) wyznacza się maksymalny opór na pobocznicę pała, który opisano w pracy [4, 8]. Równaniem (15) wyznacza się nachylenie wykresu zależności $T_i = f(s_i)$.



Rys. 3. Stanowisko badawcze

1 – siłownik hydrauliczny, 2 – czujniki przemieszczeń, 3 – pał betonowy, 4 – stalowa komora w kształcie walca, 5 – grunt niespoisty

Odwracając funkcję, otrzymano współczynnik nachylenia krzywej oporu na pobocznicę pała w początkowym zakresie obciążenia, gdy $s \rightarrow 0$:

$$C_T = \frac{C_1 C}{C_1 - C} \quad (16)$$

Parametry C_1 , C określono z wcześniejszych badań i opisano w pracy [5]:

$$C_1 = \frac{4}{\pi E_q D} \quad (17)$$

gdzie:

E_q – moduł odkształcenia gruntu pod podstawą pała [kPa],
 D – średnica pała [m],

$$C = \frac{7,5}{\pi E_t H} \quad (18)$$

gdzie:

E_t – moduł odkształcenia gruntu przy pobocznicę pała [kPa],
 H – długość pała [m].

3. Przeprowadzenie próbnego obciążenia pała siłą wciskającą przykładaną stopniowo za pomocą siłownika hydraulicznego.

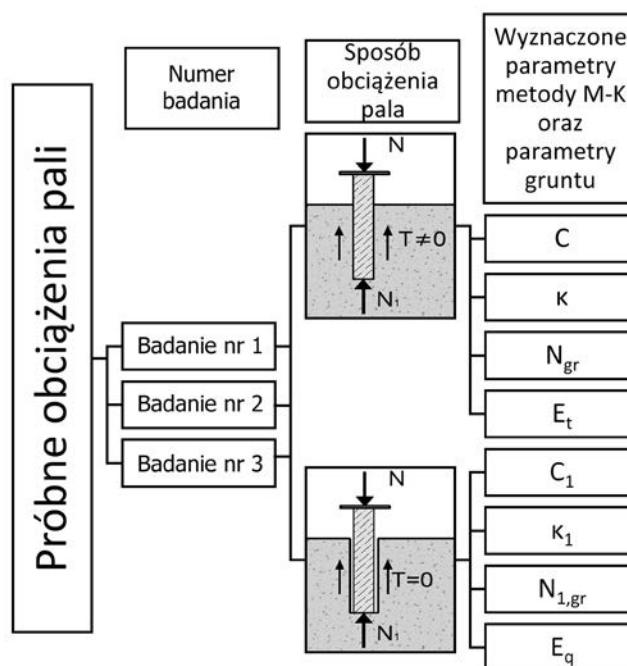
Podczas obciążania rejestrowano siłę i przemieszczenie głowicy pała. Przejście na kolejny stopień obciążenia następowało po stwierdzeniu umownej stabilizacji osiadań. Stopnie obciążenia zwiększano do wystąpienia niekontrolowanego osiadania. W przypadku próbnego obciążenia z wykluczeniem pobocznic w przenoszeniu obciążenia w punkcie nr 2 nie zagęszczano gruntu przy pobocznicę

BADANIA MODELOWE

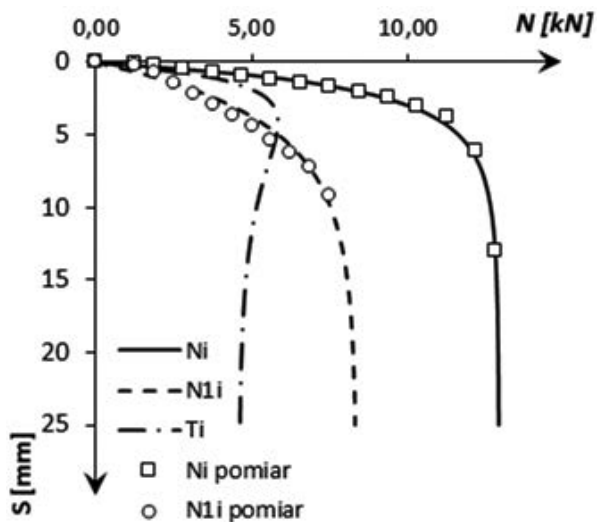
Opis stanowiska badawczego

Stanowisko badawcze składało się z komory o średnicy 48,5 cm i wysokości 60 cm wypełnionej gruntem niespoistym (piasek średni). Wykonano pale betonowe o średnicy 4,64 cm w formie z rury PCV. W celu nadania większej szorstkości pobocznicę powierzchnię zewnętrzną pali obrobiono mechanicznie. Procedura badań składała się z następujących kroków:

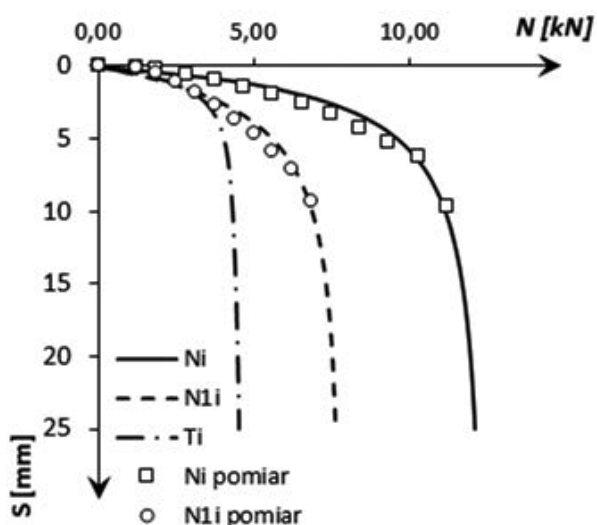
1. Wykonanie otworu w gruncie o głębokości 20 cm i średnicy wewnętrznej 5 cm za pomocą rury PCV.
2. Umieszczenie w otworze betonowego pała i zagęszczenie gruntu od góry w otoczeniu pała.



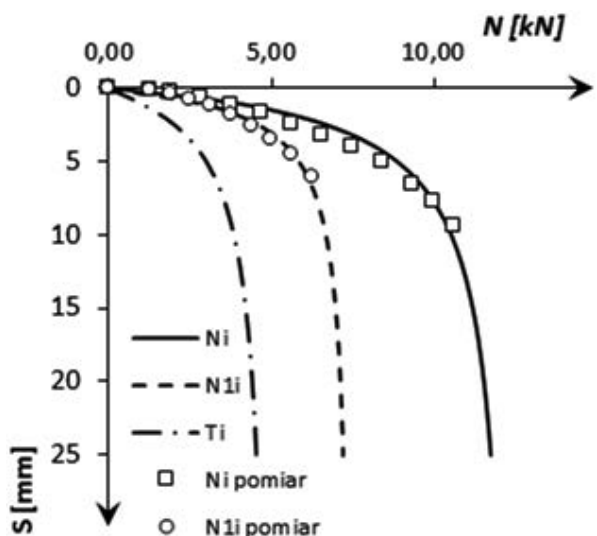
Rys. 4. Program badań i parametry wyznaczone podczas opracowania wyników



Rys. 5. Wyniki pomiarów próbnych obciążeń w badaniu nr 1, aproksymacja metodą Meyera-Kowalowa oraz obliczony opór na pobocznicę T_i



Rys. 6. Wyniki pomiarów próbnych obciążeń w badaniu nr 2, aproksymacja metodą Meyera-Kowalowa oraz obliczony opór na pobocznicę T_i

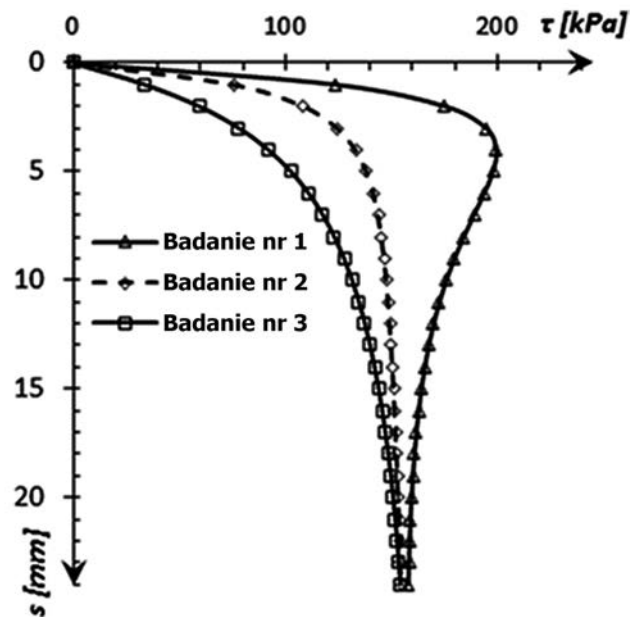


Rys. 7. Wyniki pomiarów próbnych obciążeń w badaniu nr 3, aproksymacja metodą Meyera-Kowalowa oraz obliczony opór na pobocznicę T_i

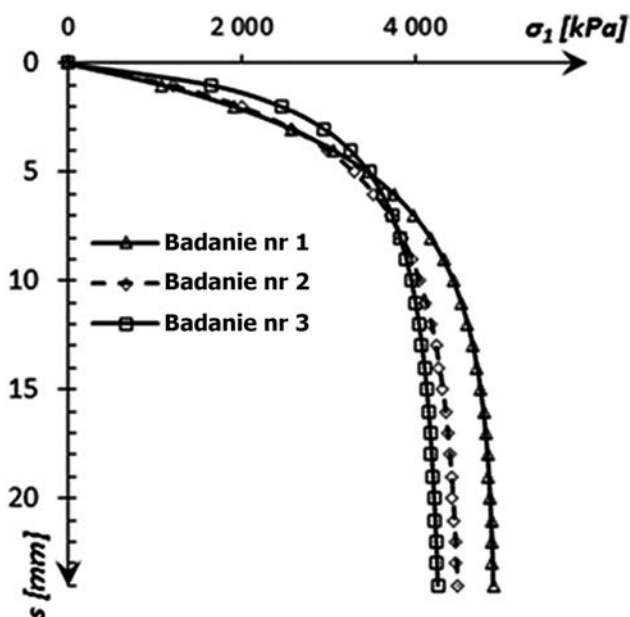
Program badań obejmował wykonanie trzech badań. Każde badanie podzielono na dwie części. Pierwsza dotyczyła próbnego obciążenia, w którym obciążenie było przekazywane do podłoża gruntowego jako suma dwóch składowych: oporu na pobocznicę i pod podstawą pała. W drugiej części wykluczono udział pobocznicę w przekazywaniu obciążenia.

Opracowanie wyników badań

Wyniki uzyskane podczas próbnego obciążenia w postaci zbiorów danych $\{N_p, s_i\}$ aproksymowano metodą Meyera-Kowalowa. Wyniki aproksymacji wraz z pomiarami przedstawiono na rys. 5 ÷ 9 oraz zestawiono w tabl. 1.



Rys. 8. Mobilizacja oporów tarcia gruntu na pobocznicę pała podczas próbnego obciążenia pały w trzech badaniach na podstawie wyników aproksymacji M-K



Rys. 9. Mobilizacja oporów gruntu pod podstawą pała podczas próbnego obciążenia pały w trzech badaniach na podstawie wyników aproksymacji M-K

Tabl. 1. Parametry krzywej aproksymującej oraz pozostałe parametry wyznaczone na podstawie badań modelowych

Numer badania		1	2	3
C_1	[mm/kN]	0,47499	0,40027	0,24172
C	[mm/kN]	0,13371	0,16935	0,19269
C_T	[mm/kN]	0,18609	0,29354	0,94999
N_{gr1}	[kN]	8,35	7,79	7,49
N_{gr}	[kN]	12,91	12,52	12,47
κ_1	[-]	0,08	0,37	0,71
κ	[-]	0,20	0,61	0,77
E_q	[MPa]	57,77	68,56	113,52
E_t	[MPa]	89,28	70,49	61,95

WNIOSKI

Z badań modelowych wynika, że mobilizacja oporów tarcia gruntu na pobocznicy pala zmienia się stosownie do stanu gruntu oraz rodzaju pala i może przebiegać od wartości 0 do wartości maksymalnej, lub też może osiągać wartość maksymalną, a następnie zmniejszać monotonicznie do wartości końcowej. Mobilizacja oporów gruntu pod podstawą pala jest monotoniczną funkcją rosnącą, która asymptotycznie dąży do wartości maksymalnego naprężenia w podstawie pala. Uzyskane wyniki w badaniach modelowych (w skali laboratoryjnej) wskazują, że mobilizacja oporu pobocznic wymaga odpowiedniego osiadania. Maksymalne opory tarcia gruntu o pobocznice mogą występować przy małych osiadaniach, albo też wykres asymptotycznie zbliża się do maksymalnego oporu na pobocznicy pala. Nośność graniczna obliczona według metody Meyera i Kowalowa na podstawie zbioru $\{N_p, s_i\}$ wykazuje bardzo dobrą zgodność z nośnością pala pomierzą dla dużych osiadań.

Uzyskane wyniki aproksymacji parametrów metody Meyera i Kowalowa wskazują, że metoda ta, którą przygotowano pierwotnie do analizy próbnych obciążeń statycznych pala, może być zastosowana do badań modelowych w warunkach laboratoryjnych. W każdym przypadku aproksymacja pozwala na jednoznaczne uzyskanie trzech parametrów modelu M-K: C , N_{gr} , κ pala z udziałem pobocznic oraz parametry C_1 , N_{gr1} , κ_1 pala obciążanego bez udziału pobocznic.

Sposób wykorzystania badań modelowych może być porównywany ze statystycznymi obciążeniami pali w naturze. Na tym etapie badań trudno jest jednoznacznie powiedzieć, jak uzyskane parametry przekładają się na skalę podobieństwa. Będzie to przedmiotem dalszych badań.

Program dalszych badań przewiduje uzależnienie parametrów modelu M-K aproksymowanych statystycznie na podstawie zbioru pomierzonych danych $\{N_p, s_i\}$ z parametrami geotechnicznymi gruntu używanymi w praktyce inżynierskiej. Umożliwi to rozwiązanie zadania odwrotnego polegającego na określeniu parametrów krzywej M-K na podstawie wielkości geotechnicznych wykorzystywanych w praktyce inżynierskiej.

Przygotowany do badań grunt był zagęszczany w pojemniku, a stopień zagęszczenia określano metodami standardowymi. Autor ma świadomość, że obciążenie pali zagłębionych w gruncie powoduje zmianę zagęszczenia, a w związku z tym kolejne badania odbywały się w ośrodku gruntowym, w którym zmienił się stopień zagęszczenia. Wskazuje na to charakter oporów tarcia na pobocznicy pala (rys. 8) oraz graniczne wartości oporów pod podstawą pala w różnych badaniach (rys. 9). Nie można zatem przyjąć, że stopień zagęszczenia był stały w trakcie wszystkich badań. Zdaniem autorów parametrami kalibrującymi ten stan są współczynniki C_1 , C . Są to parametry, które reprezentują podatność podłoża (podatność pala) na osiadanie w pierwszej fazie obciążeń (dla niewielkich obciążeń). Zdaniem autorów dla niewielkich obciążeń istnieje możliwość uzyskania analitycznych wzorów wyznaczających C_1 , C w zależności od typowych parametrów gruntowych.

LITERATURA

1. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. TOM II. PWN, Warszawa 2013.
2. Krasiński A.: Problematyka interpretacji pomiarów rozkładu siły osiowej w trzonie pala podczas próbnych obciążeń statycznych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 2/2012, 118-124.
3. Krasiński A.: Pale przemieszczeniowe wkręcane. Współpraca z niespoistym podłożem gruntowym. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
4. Meyer Z.: Przybliżony sposób interpretacji wyników badań statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2014, 202-207.
5. Meyer Z., Kowalów M.: Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych obciążeń próbnych pali, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awaria Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009.
6. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 03/2010.
7. Meyer Z., Szmeczel G.: Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie osiadanie z próbnych obciążeń statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2011.
8. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Określenie maksymalnych składowych statycznych naprężenia na pobocznicy pala podczas badania statycznego. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2014, 217-221.
9. Sieńko Z., Krasiński A.: Pomiar pionowego rozkładu siły w palu podczas testów statycznych. 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN, Krynica 2010.
10. Szmeczel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Szczecin 2014.
11. Żarkiewicz K.: Analiza zmian naprężeń na pobocznicy kolumny betonowej podczas próbnego obciążenia [W:] Wiedza i eksperymenty w budownictwie, pod red. Joanny Bzówki. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2014, 251-260.