



OKREŚLENIE NOŚNOŚCI POBOCZNICY PAŁA NA PODSTAWIE PRÓBNYCH OBCIĄŻEŃ STATYCZNYCH

ZYGMUNT MEYER, *meyer@zut.edu.pl*

GRZEGORZ SZMECHEL

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania metody Meyera-Kowalowa do predykcji zachowania pała pod próbnym obciążeniem statycznym, oraz wskazano możliwość wykorzystania tej metody do określenia granicznej nośności podstawy pała. W pracy przedstawiono dwa odmienne przypadki zachowania pała pod próbnym obciążeniem statycznym, analizę ich osiadań z wykorzystaniem metody Meyera-Kowalowa, a także próbę opisu mechanizmu rozdziału nośności pała na jego podstawę i pobocznice. Wnioski płynące z przeprowadzonych analiz wskazują na występowanie pewnych błędnych założeń przy samym projektowaniu nośności pała.

Słowa kluczowe: nośność pała, interpretacja próbnych obciążeń, metoda Meyera-Kowalowa.

1. Wprowadzenie

Zazwyczaj posadowienie pośrednie budynków realizowane jest w obiektach o dużej odpowiedzialności, wszędzie tam gdzie wystąpienie awarii mogłoby doprowadzić do powstania zagrożenia życia ludzkiego lub dużych strat materialnych. Próbne obciążenia statyczne pała są jak dotąd najlepszym sposobem weryfikacji poprawności rozwiązania problemu posadowienia pośredniego obiektów budowlanych. Wykonanie próbnych obciążeń statycznych pozwala często na uniknięcie poważnej awarii obiektu budowlanego. Częstym problemem, który pojawia się podczas próbnych obciążeń statycznych jest brak określenia nośności granicznej pała. Dzieje się tak między innymi, dlatego że inwestor oraz wykonawca nie godzi się na zniszczenie pała, które mają później współpracować z konstrukcją, lub też na zniszczenie pała nie pozwalają względy techniczne. Dla pała o dużych średnicach, lub posadowionych w dobrych warunkach gruntowych przyłożenie w głowicy pała odpowiedniego obciążenia mogącego spowodować jego zniszczenie jest bardzo trudne. W efekcie w wyniku próbnego obciążenia pała nie uzyskujemy pełnej informacji o tym, jaka jest jego nośność graniczna. Pomocne w interpretacji wyników badań mogą okazać się metody normowe, czy opisane w literaturze takie jak metoda Poulosa-Davisa, China, Decourta czy Meyera-Kowalowa (dalej zwaną metodą MK). W dalszej części artykułu autorzy podejmą próbę rozwinięcia metody Meyera-Kowalowa o możliwość określenia nośności granicznej podstawy pała bazując właśnie na metodzie MK i wynikach badań sondą statyczną metodą CPT.

2. Opis metody

Metoda MK jest metodą analitycznej interpretacji krzywej obciążenie osiadanie uzyskanej w wyniku próbnych obciążeń statycznych pała od obciążenia początkowego aż do nośności granicznej pała. Główny wzór opisujący zależność osiadanie obciążenie pała jest następujący:

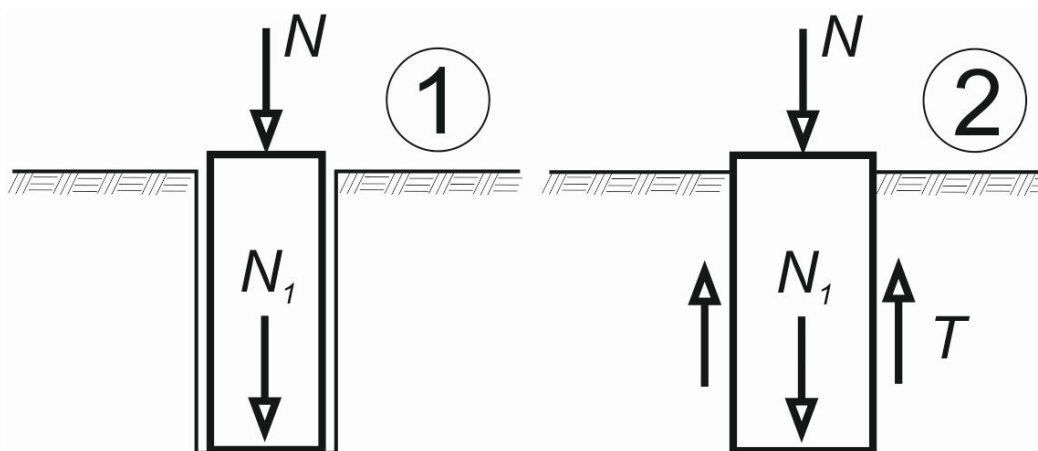
$$s = C \cdot N_{gr} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

gdzie: C – jest stałą podatności podłoża w stosunku do pąla który uwzględnia odpór podstawy i pobocznic, N – siła przyłożona w głowicy pąla, N_{gr} – siła przyłożona w głowicy pąla, przy której pął osiada w sposób niekontrolowany, s – osiadanie pąla, κ – bezwymiarowy współczynnik.

Prace opisujące związki krzywej podanej wzorem nr (1) to prace Meyera [1, 2, 3, 4] oraz Szmehela [8]. Meyer podał propozycję związku obciążenie-osiadanie pąla w pełnym zakresie: krzywą tą w pracy określa się, jako krzywą Meyera-Kowalowa (MK). W poprzednich opracowaniach [4, 5, 6, 8] podano sposoby, które umożliwiają obliczenie parametrów tej krzywej w oparciu o metody statystyczne. Znajomość tych parametrów pozwala na ekstrapolację krzywej obciążenie-osiadanie poza obszar obciążeń statycznych. W prezentowanej pracy autorzy proponują rozszerzenie metody MK o elementy pozwalające na wydzielenie w pracy pąla granicznego odporu pobocznic i podstawy. W tym celu założono, że pracę pąla teoretycznie można podzielić na dwa osobne stany:

- pął, którego reakcja pochodzi tylko od odporu podstawy, stan 1 oraz
- pął, którego reakcja pochodzi od odporu podstawy i odporu pobocznic, stan 2.

Schematycznie sytuację pokazano na rys. 1



Rys. 1. Schemat pracy pąla w dwóch stanach 1 i 2

Stany te można opisać równaniami: stan 1

$$s = C_1 \cdot N_{gr1} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr1}}\right)^{-\kappa_1} - 1}{\kappa_1} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

Stan 2:

$$s = C_2 \cdot N_{gr2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr2}}\right)^{-\kappa_2} - 1}{\kappa_2} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

Określenie odporu poboczniczy na podstawie obu tych stanów opisuje wzór:

$$T = N(s_2) - N(s_1) \quad [\text{kN}] \quad (4)$$

Z próbnego statycznego obciążenia pała otrzymano parametry krzywej 2 obliczone metodami statycznymi C_2 , κ_2 , N_{gr2} . Nieznane są natomiast parametry stanu 1. W celu określenia wartości parametrów stanu 1 wykonano szereg badań analitycznych na zbiorach danych z próbnych obciążeń statycznych [6, 7, 8], na tej podstawie autorzy proponują dokonanie następujących założeń:

– współczynnik opisujący podłoże gruntowe C_2 można opisać wzorem:

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{E_q D} \quad [-] \quad (5)$$

gdzie: na podstawie znajomości wartości oporu stożka sondy wciskanej q_c [MPa] można napisać także:

$$E_q = (2q_c)^{7/6} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

Nośność podstawy pała:

$$N_{gr1} = \frac{q_c \pi D^2}{4} \quad [\text{MN}] \quad (7)$$

– istnieje pewna graniczna wartość odporu poboczniczy dla $s=\infty$ odpowiadająca T_∞ , dla celów inżynierskich obliczeń można ją wyrazić wzorem:

$$T_\infty = \pi D \sum h_i f_s \quad \text{lub} \quad T_\infty = \pi D \int_0^L f_s dL \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

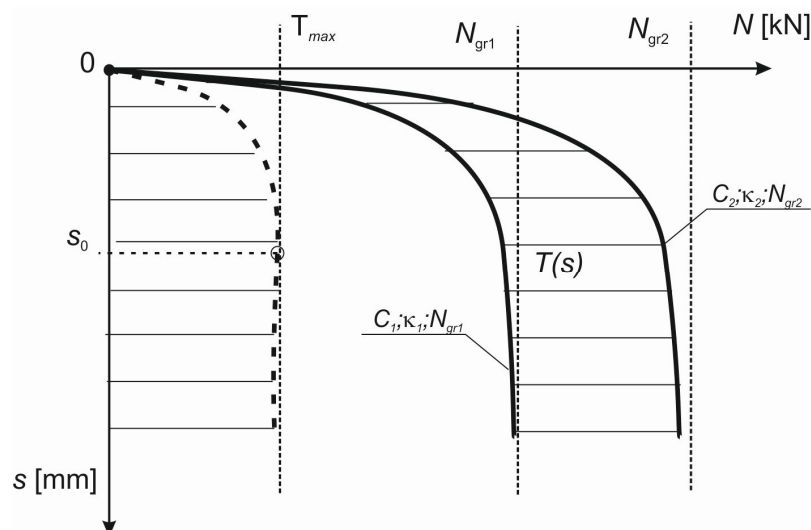
gdzie:

E_q – moduł pod podstawą pała,

h_i – miąższość i-tej warstwy gruntu wydzielonej na długości pała na podstawie sondowania CPT,

f_s – odpowiadający tej warstwie opór na tulei ciernej sondy statycznej w [MPa]

Przy powyższych założeniach pracę pała w gruncie w dwóch opisanych wyżej stanach można zilustrować za pomocą rysunku 2.

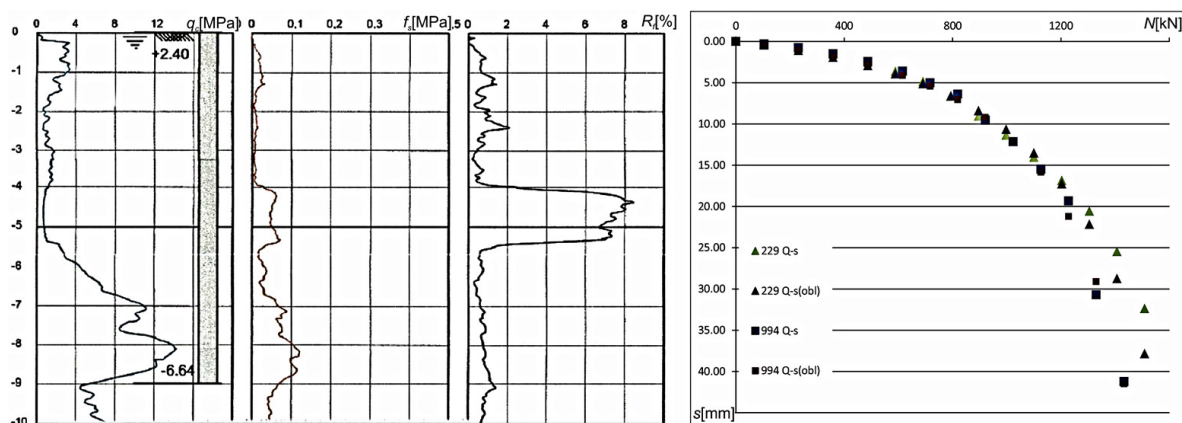


Rys. 2. Schemat obliczenia odporu poboczniczy pala

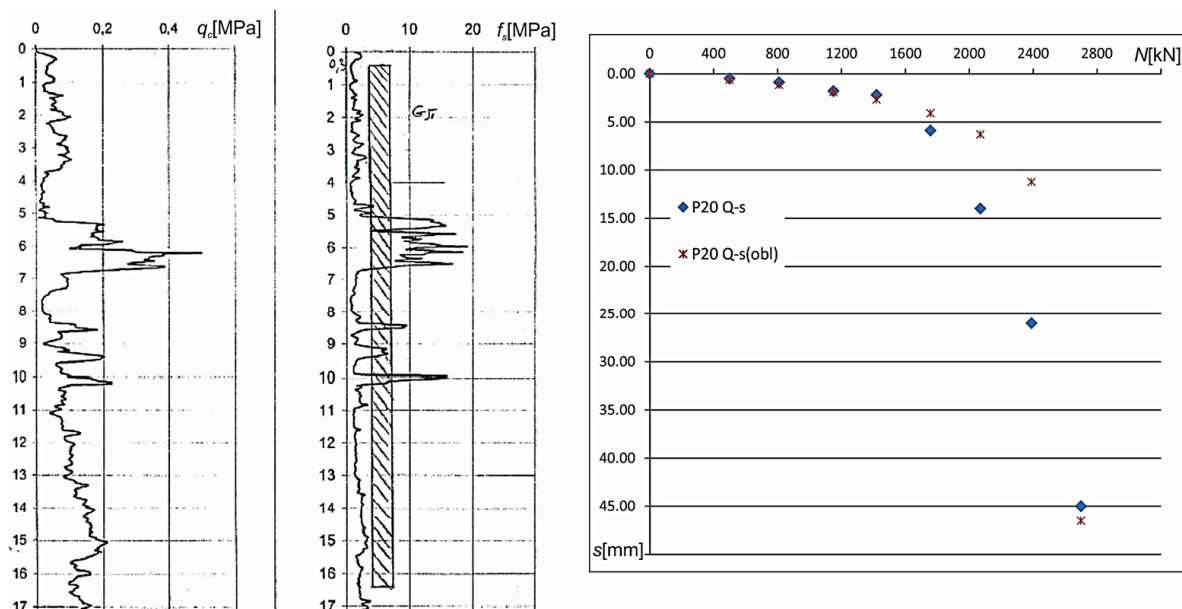
3. Przykład obliczeniowy

Przykładowe obliczenia wykonano dla 2 pali SDP formowanych w gruncie wykonanych podczas budowy budynku biurowego na terenie województwa Zachodniopomorskiego oraz pala wielkośrednicowego wierconego stanowiącego część fundamentu podpory obiektu inżynierskiego zlokalizowanego na południu Polski, warunki gruntowe w formie wyników sondowań CPT przedstawiono na rysunkach 3 i 4 wraz z krzywymi obciążenie-osiadanie uzyskanymi podczas próbnych obciążeń. Parametry uzyskane z modelu MK wynoszą: dla pala 299: $C_2 = 0,0041$ kN/mm, $N_{gr2} = 2557$ kN, oraz $\kappa_2 = 2,65$ dla pala 994: $C_2 = 0,0038$ kN/mm, $N_{gr2} = 2043$ kN, oraz $\kappa_2 = 2,05$.

Średnica pali SDP wynosiła 400 mm, długość obu pali ok. 9,0 m. Pale te zagłębione były w warstwie wierzchniej do około 3,0 m p.p.t. w nasypy niekontrolowane słabe, pod nasypami, do głębokości około 5,0 m p.p.t. znajdowały się grunty słabonośne w postaci namulów i torfów. Podłoże pod torfami zbudowane jest z piasków drobnych i średnich w stanie średnio zagęszczonym oraz zagęszczonym. W piaskach występują soczewki gruntów pylastych (piaski pylaste, glina pylasta). Ustabilizowane zwierciadło wody gruntowej podczas badań znajdowało się na głębokości od około 0,2 do około 0,8 m p.p.t. tj. na poziomie od około 1,7 do 2,2 m n.p.m.

Rys. 3. Wyniki badań CPT i krzywe próbnego obciążenia (określone analitycznie i podczas próbnych obciążeń statycznych) dla pali SDP $D = 400$ mm

Średnica pala wierconego $D = 1000$ mm, długość omawianego pala $L = 16$ m. Pale podpory obiektu zagłębione były w lessopochodne grunty spoiste i mało spoiste w postaci pyłów, glin pylastych zwięzłych w stanie od miękkoplastycznego do twardoplastycznego a przy podstawie pali nawet półzwartych iłów. Parametry uzyskane z modelu MK dla pala wierconego wynoszą: $C_2 = 0,0041$ kN/mm, $N_{gr2} = 2557$ kN, oraz $\kappa_2 = 2,65$



Rys. 4. Wyniki badań CPT i krzywe próbnego obciążenia (określone analitycznie i podczas próbnego obciążenia statycznych) dla pala wierconego $D = 1000$ mm

Następnie wykorzystując wcześniej podane zależności (2), (3), (4), (5) i (6) obliczono parametry stanu pierwszego tj. wówczas gdy pał pracuje tylko podstawą.

Dla analizowanych pali wykonano więc obliczenia nośności pobocznic w stanie granicznym wykorzystując wzór (8).

Dla pala SDP nr 299 $L = 9,0$ m:

$$T_{\infty} = \pi D \sum h_i f_s = \pi \cdot 0,4 \cdot 0,35 = 439,8 \text{ kN.}$$

Dla pala SDP nr 994 $L = 11$ m:

$$T_{\infty} = \pi D \sum h_i f_s = \pi \cdot 0,4 \cdot 0,4444 = 558,5 \text{ kN.}$$

Dla pala wielkośrednicowego nr 20 $L = 16$ m:

$$T_{\infty} = \pi D \sum h_i f_s = \pi \cdot 1,0 \cdot 1,59 = 5010 \text{ kN.}$$

Jeżeli powyższe założenia są prawdziwe wówczas nośność podstawy pala N_{gr1} dla pali SDP musiałaby wynosić wg wzoru (4) odpowiednio dla pala 229:

$$N_{gr1} = 2557 - 439,8 = 2117,2 \text{ kN.}$$

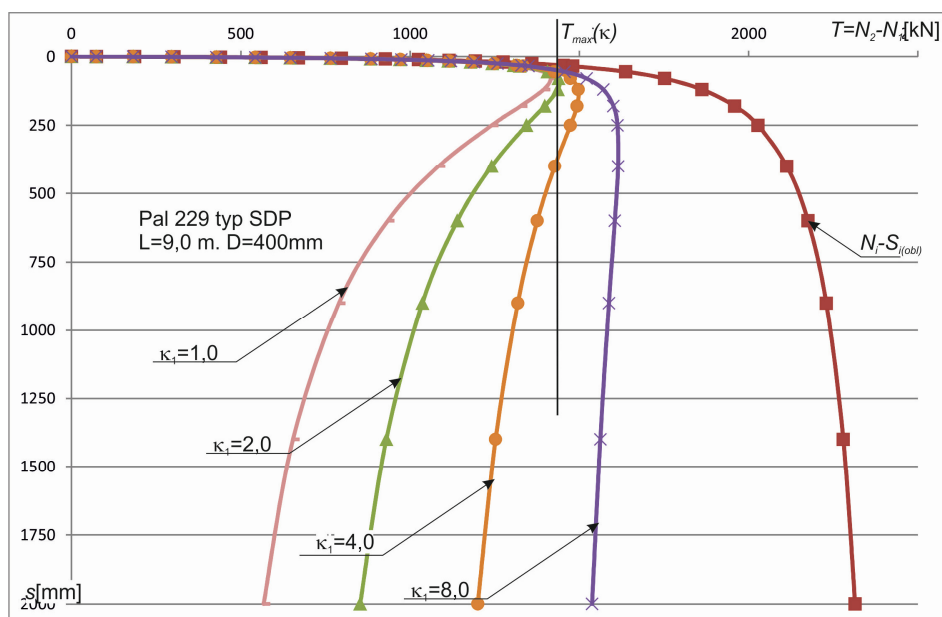
Dla pala 994:

$$N_{grI} = 2043 - 585 = 1458 \text{ kN.}$$

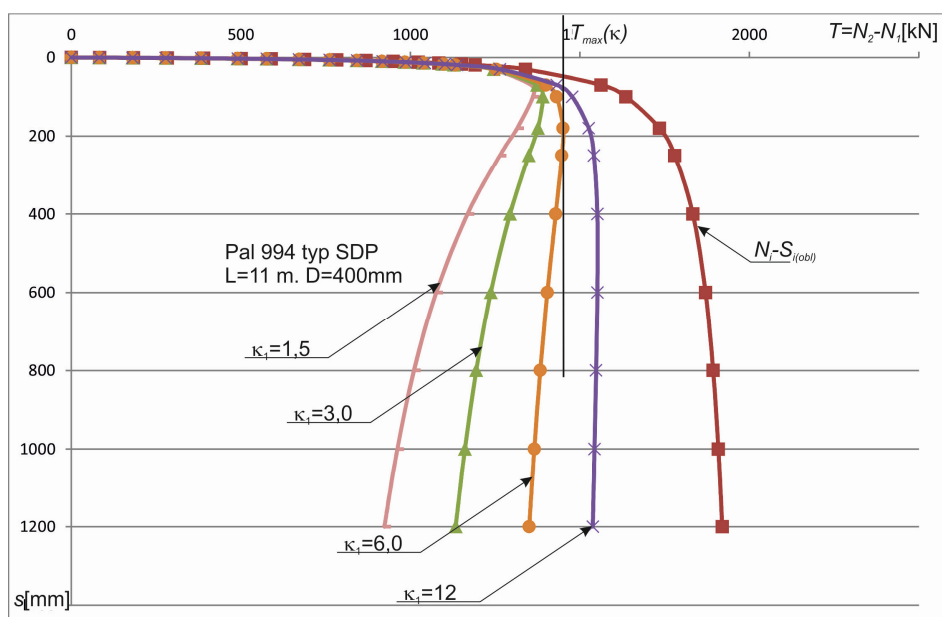
Dla pala wielkośrednicowego wierconego zdecydowano o zmniejszeniu wartości T_{∞} o 60% z uwagi na technologię wykonania pala zgodnie z zaleceniami norm i literatury [9] wówczas:

$$N_{grI} = 2742 - 2004 = 738 \text{ kN.}$$

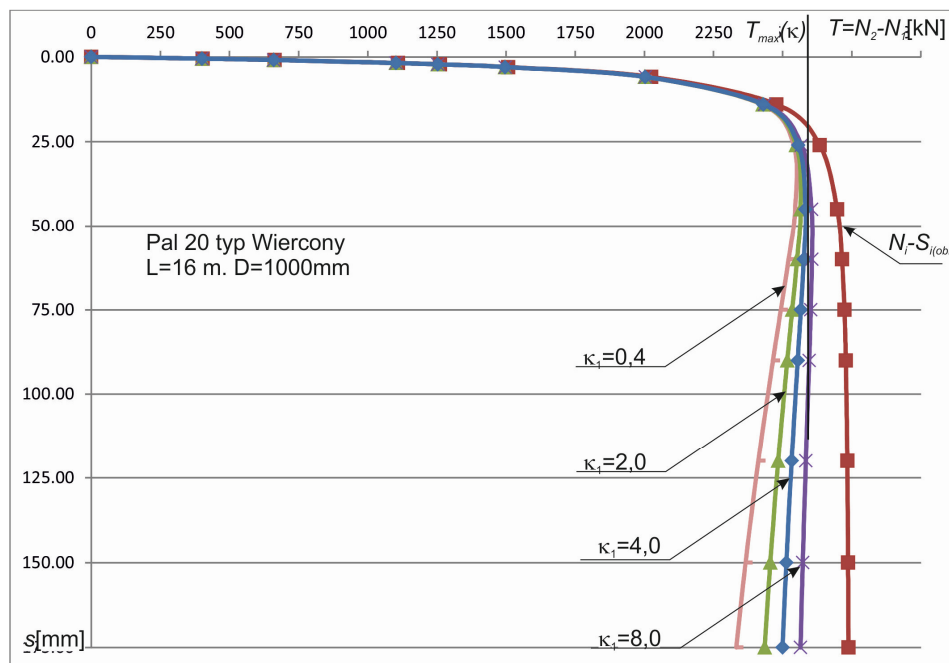
W ten sposób uzyskano współczynniki C_I , N_{grI} , do optymalizacji zostaje tylko parametr κ_I dla zmiennych wartości bezwymiarowego współczynnika κ wykorzystując wzór (4) otrzymano następujące wykresy:



Rys. 5. Nośność poboczniczy pala dla różnych wartości współczynnika κ_I dla pala SDP 229, D = 400 mm



Rys. 6. Nośność poboczniczy pala dla różnych wartości współczynnika κ_I dla pala SDP 994, D = 400 mm



Rys. 7. Nośność poboczniczy pala dla różnych wartości współczynnika κ_1 dla pala 20, D = 1000 mm

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono metodę analitycznego obliczenia odporu poboczniczy pala na podstawie próbných obciążeń statycznych pala.

Do matematycznego opisu zjawiska wykorzystuje się przedstawioną w literaturze krzywą $Q-s$ Meyera-Kowalowa.

Rozwiązanie uzyskano przy założeniu, że graniczny odpór poboczniczy można uzyskać odejmując od siebie funkcję obciążenie osiadanie pala dla dwóch różnych stanów pracy pala: bez udziału poboczniczy oraz przy jej udziale w przenoszeniu obciążeń.

Graniczny odpór poboczniczy pala dla stanu drugiego odpowiada oporowi f_s na tulei ciernej sondy CPT z uwzględnieniem procesu technologii wykonania pala.

Odpór podstawy natomiast uzyskano odejmując od nośności granicznej pala nośność graniczną poboczniczy uzyskaną z badań CPT.

Wyniki obliczeń wskazują, że dla celów obliczeń inżynierskich metoda ta daje wyniki obserwowane w praktycznych przypadkach, lecz odpór podstawy pala jest znacznie większy niż wskazywałyby na to obliczenia oparte wyłącznie na wynikach sondowania statycznego.

Przedstawione przykłady wyraźnie wskazują na istnienie pewnego maksymalnego odporu poboczniczy, dla pewnej szczególnej wartości osiadania pala, której przy projektowaniu pali nie powinno się przekraczać, pomimo tego, iż podstawa pala dalej wykazuje pewien wzrost nośności.

Literatura

1. Meyer Z.: Analiza naprężeń na poboczniczy oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesq'a. XVIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne problemy inżynierii środowiska. Szczecin Czerwiec 2010.
2. Meyer Z., Kowalów M. Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych próbných obciążeń pali. XXIV Konferencja Naukowo Techniczna Awary Budowlane, Szczecin– Międzyzdroje 2009.
3. Meyer Z., Kowalów M. Model krzywej aproksymującej wyniki próbných obciążeń pali. Inżynieria Morska i Geotechnika Nr 3/2010.

4. Meyer Z., Szmechel G. Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie – osiadanie dla próbnych obciążeń pali żelbetowych w gruntach sypkich. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 4/2010.
5. Meyer Z., Szmechel G. Metoda interpretacji próbnych obciążeń pali prefabrykowanych. Materiały na 58 KN Krynica 2012 Zeszyty Politechniki Rzeszowskiej.
6. Meyer Z., Szmechel G. Wybór funkcji aproksymującej parametry modelu – krzywej obciążenie osiadanie dla pali prefabrykowanych na podstawie próbnych obciążeń pali. Materiały na 59 KN Krynica 2013 Zeszyty Politechniki Lubelskiej.
7. Meyer Z., Żarkiewicz K. Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 01/2014, s. 30–35.
8. Szmechel G. Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Praca doktorska. Wydział Budownictwa i Architektury ZUT w Szczecinie. 2014.
9. PN-EN 1997-1. Eurokod 7 Projektowanie Geotechniczne, cz.1 Zasady ogólne.

PILE SHAFT RESISTANCE ON THE BASIS OF STATIC PILE LOAD TESTING

Abstract: Paper presents use of Meyer Kowalow method for pile settlement prediction in two separated states, with and without shaft resistance. On that base authors shows how to determine limit shaft and base capacity of the pile connecting Meyer Kowalow method and CPT test results. Conclusions apply to usefulness of SPLT for better designing of deep foundations, in case when we can determine Usability Limit State on its results.

Keywords: pile capacity, Meyer-Kowalow method, SPLT interpretation, pile shaft capacity, pile base capacity.