

Problemy zasad wymiarowania pali

Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, dr inż. Grzegorz Szmeczel

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Praktyka projektowania i wykonawstwa fundamentów na palach wskazuje, że w większości przypadków osiadanie pali jest minimalne. Projektant jest zobowiązany sprawdzić pierwszy i drugi stan graniczny. W związku z tym przyjmuje się często dopuszczalne naprężenie w podstawie pala, wzdłuż pobocznic i określa obliczeniowe osiadania. Gdyby przyjąć osiadanie dopuszczalne fundamentu konstrukcji na poziomie $2 \div 3$ cm, wówczas rodzi się pytanie czy fundament, który w rzeczywistości pod obciążeniem osiada $4 \div 5$ mm, przy dopuszczalnym osiadaniu $2 \div 3$ cm w pełni wykorzystuje możliwości pracy pala w gruncie. Innymi słowy, czy współczynnik bezpieczeństwa nie jest zbyt wysoki? Jakie powinno być dopuszczalne obciążenie pala tak, aby osiadanie było równe lub zbliżone do dopuszczalnego?

Obecnie określenie siły dopuszczalnej, jaka może być przyłożona w głowicy pala, wykonuje się na podstawie kilku możliwych procedur:

- Metody analityczne: projektowane obciążenie pala określone na podstawie wymiarów pala i znajomości parametrów gruntowych na podstawie norm i wytycznych oraz badań *in situ* [12].
- Metody związane z wykonawstwem pali: dopuszczalne obciążenie pala w głowicy jest określone na podstawie badań dynamicznych podczas zagłębiania pali w grunt, pomiarów oporu świda pali wierconych [3].

Próbné obciążenia: dopuszczalne obciążenie pala określa się na podstawie próbných obciążení statycznych pali [12, 13].

Należy zaznaczyć, że w Eurokodzie 7 jako podstawowy z 4 sposobów projektowania nośności pali podaje się metodę opartą na próbných obciążení statycznych. W EC 7 zaleca się przyjmowanie wartości osiadań $0,1D$ jako wartości osiadania granicznego, odpowiadających nośności granicznej. To sugeruje, że pale nie są wykorzystane w większości przypadków. Z drugiej jednak strony podczas próbných obciążení statycznych pali rzad-

ko dochodzimy do wartości obciążeń i osiadania zbliżonych do wartości 0,1D. Sytuacja taka jest wynikiem trudności technicznych związanych z przyłożeniem w głowicy pala odpowiednio wysokich obciążeń, budową stanowisk balastowych i kotwiących, a także zdecydowanym oporem inwestora w stosunku do zniszczenia pala obciążanego. W tej sytuacji rodzi się problem, czy na podstawie wyników klasycznego próbnego obciążenia pali i uzyskania tylko krótkiego ciągu danych obciążenie-osiadanie jesteśmy w stanie z dostateczną, do celów inżynierskich, dokładnością ekstrapolować krzywą obciążenie – osiadanie poza zakres próbnego obciążenia po to, aby uzyskać osiadanie równe 0,1D, a następnie obciążenie, które można nazwać niszczącym. Problem ten spowodował, że coraz częściej mówi się o krzywej obciążenie – osiadanie pala w pełnym zakresie, to znaczy od siły w głowicy równej zero do siły, która prowadzi do niekontrolowanych osiadań. W literaturze można znaleźć próby analitycznego określenia krzywej obciążenie – osiadanie w pełnym zakresie. Niniejsza praca zawiera przykład wykorzystania takiego modelu krzywej N - s , który pozwala na taką ekstrapolację.

PRZEGLĄD LITERATURY Z ZAKRESU METOD EKSTRAPOLACJI KRZYWEJ N - s

Istnieje wiele metod interpretacji krzywej obciążenie-osiadanie głowicy pala. Krzywa ta opisuje w sposób najbardziej wiarygodny pracę pala pojedynczego w gruncie. Metoda interpretacji krzywej oraz wybór konkretnego podejścia zależy od metody obliczeń i oceny stopnia wymaganego bezpieczeństwa konstrukcji [1, 5, 12, 13]. W odniesieniu do interpretacji krzywej (N - s) stosuje się pojęcia: obciążenie graniczne, graniczne obciążenie obliczeniowe, obciążenie dopuszczalne [3] lub umowne obciążenie graniczne.

W związku z dużą liczbą metod interpretacji próbnych obciążeń pali wyniki uzyskane przy zastosowaniu metody Meyer-Kowalów (M-K) z wykorzystaniem nieliniowego modelu krzywej (N - s) zinterpretowano w niniejszej pracy także za pomocą innych metod opisanych w literaturze.

Należy także zaznaczyć, że w zależności od zastosowanej metody interpretacji różnią się między sobą nazwy poszczególnych nośności i odpowiadające im osiadania. Za odpowiadające osiadanie autor przyjmuje osiadanie, które wynika z wybranej metody dla nośności, którą dana metoda uznaje za graniczną, czy też krytyczną rozpatrywanego pala. W opinii autora o nośności granicznej pala można mówić tylko i wyłącznie, jeżeli osiadanie odpowiadające nośności umownie nazwanej graniczną dąży do nieskończoności, tak jak zaproponowano w metodach: Mazurkiewicza, China-Koendnera, Gwizdały, Decourta czy Meyera-Kowalowa oraz Meyera (2013) [11]. W odniesieniu do różnych metod w przypadku osiadań odpowiadających nośności pala przyjmuje się zazwyczaj osiadanie równe 10% średnicy [3, 13] lub ogranicza się je do wartości osiadań charakterystycznych lub maksymalnych uzyskanych podczas badania statycznego [11]. W związku z tym porównanie uzyskanych wartości wymaga uwzględnienia współczynnika bezpieczeństwa w metodach podających N graniczne, dla którego $s \rightarrow \infty$. Jeśli podzielić uzyskane wartości nośności przez współczynnik bezpieczeństwa okazuje się, że uzyskany zbiór wyników może różnić się.

Metoda ekstrapolacji krzywej obciążenie-osiadanie uzyskanej podczas próbnych obciążeń pali jest rozwijana sukcesywnie od 2009 roku, a badania nad jej udoskonaleniem wciąż trwają. W 2009 roku Meyer i Kowalów podali równanie krzywej [6], które w kolejnych latach było przedmiotem dalszych badań [8, 9, 10, 11]. W ramach pracy [11] opracowano program Set Pile opierający się na metodzie Meyera-Kowalowa. Przykłady podane w niniejszej pracy przeanalizowano przy wykorzystaniu tego właśnie programu.

Prowadząc badania nośności za pomocą próbnych obciążeń statycznych pali, otrzymuje się zbiór wartości $\{N_i; s_i\}$ obciążenie – osiadanie, rzadko jednak dochodzi się do wartości granicznej obciążenia pala. Sytuacja ta jest spowodowana brakiem możliwości technicznych wywołania obciążenia, jakie należałoby przyłożyć w trakcie badania, aby osiągnąć wartość nośności granicznej. Obciążenia te znajdują się w przedziale od kilku do nawet kilkunastu mega newtonów.

Jednym ze sposobów określenia nośności granicznej pala jest aproksymacja wyników uzyskanych podczas badań do wybranej krzywej, a następnie parametryzacja tej krzywej za pomocą narzędzi statystycznych.

MATEMATYCZNY OPIS KRZYWEJ MEYERA-KOWALOWA

Według literatury [4, 5, 6] krzywa aproksymacyjna próbne obciążenia pali zaproponowana przez Meyera-Kowalowa powinna spełniać następujące warunki brzegowe:

- dla $N \rightarrow 0$ krzywa $s(N)$ dąży do linii prostej (asymptota ukośna),
- dla $N \rightarrow N_{gr}$ osiadanie s powinno dążyć do nieskończoności, czyli występuje tu asymptota pionowa $\lim_{N \rightarrow N_{max}} s(N) = \infty$.

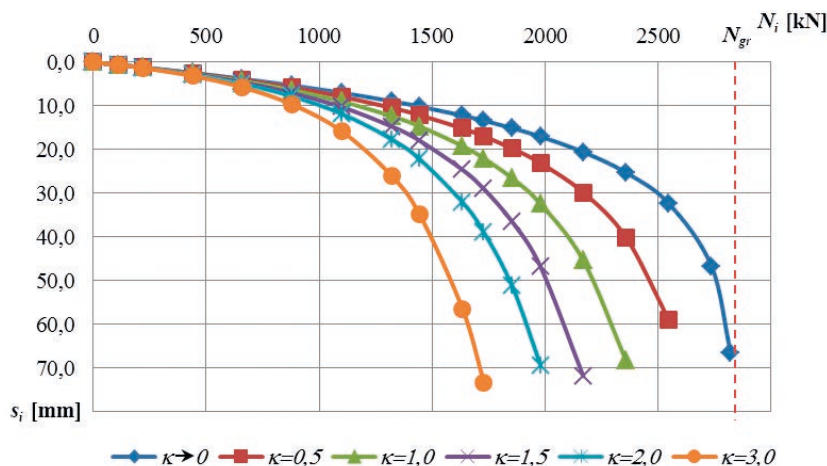
Zależność osiadania od obciążenia dla tak sformułowanych warunków opisuje równanie:

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

Jest to podstawowe równanie aproksymujące wyniki próbnych obciążeń pali. Opierając się na powyższych założeniach opracowano metodę parametryzacji funkcji $s(N)$ opisaną w pracach [6, 7, 8, 11].

STATYSTYCZNE OKREŚLENIE PARAMETRÓW RÓWNIANIA M-K

Z próbnych statycznych obciążeń pali uzyskuje się krzywą (N - s), to znaczy ciąg wartości N_i, s_i . Za pomocy tego zbioru wartości można aproksymować parametry stałe. Wartość współczynnika C [11]:



Rys. 1. Krzywa Meyera-Kowalowa przy zmiennych wartościach parametru κ oraz przy założonych $N_{gr} = 2850$ kN oraz $C = 0,05$ mm/kN

$$C = \frac{\sum (s_i N_i)}{\sum (N_i)^2} = C(\kappa; N_{gr}) \text{ [mm/kN]} \quad (2)$$

W przypadku granicznym, dla którego $\kappa \rightarrow 0$ równanie (1) przyjmuje postać:

$$s_i = C \cdot N_{gr}(0) \cdot (-1) \ln \left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}(0)} \right) \text{ [mm]} \quad (3)$$

I dalej zależność pomiędzy κ i N_{gr} opisana jest równaniem [11]:

$$N_{gr}(\kappa) = N_{gr}(0) + A_1 \cdot \kappa + A_2 \cdot \kappa^2 + A_3 \cdot \kappa^3 \text{ [kN]} \quad (4)$$

Dla κ równego 1, 2, 3 układ równań z 4 niewiadomymi $N_{gr}(0)$, A_1 , A_2 , A_3 ma postać:

$$\begin{cases} N_{gr}(1) = N_{gr}(0) + A_1 + A_2 + A_3 & \text{[kN]} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} N_{gr}(2) = N_{gr}(0) + 2A_1 + 4A_2 + 8A_3 & \text{[kN]} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_{gr}(3) = N_{gr}(0) + 3A_1 + 9A_2 + 27A_3 & \text{[kN]} \end{cases} \quad (7)$$

Do obliczenia niewiadomej $N_{gr}(\kappa)$ wykorzystano następnie związki empiryczne wyprowadzone na podstawie analizy zbiorów danych z próbnych obciążeń statycznych pali zagłębionych w gruntach niespoistych:

Dla $\kappa = 0 \div 3$ ustalono empiryczne zależności dla $\kappa = 0$ oraz $\kappa = 3$

Po podstawieniu:

$$X_i = \frac{N_i}{N_{gr}} \quad \text{oraz} \quad B_i = \frac{s_i}{CN_i} \quad (8) \text{ i } (9)$$

W ogólnym przypadku podstawiając do równania podstawowego (1)

$$B_i = \frac{(1 - X_i)^{-\kappa} - 1}{X_i \kappa} \quad (10)$$

Następnie podstawiając $\kappa = 0$ oraz $\kappa = 3$. Jak wykazano dla $\kappa = 0$ otrzymano:

$$B_i = \frac{\ln(1 - X_i)^{-3}}{X_i} \quad (11)$$

Natomiast dla $\kappa = 3$

$$B_i = \frac{(1 - X_i)^{-3} - 1}{3X_i} \quad (12)$$

Funkcja opisująca związek pomiędzy zmiennymi X_i i B_i przyjmuje postać:

$$X_i = A_0 (B_i - 1) A_1^{B_i} \quad \text{dla} \quad X_i \in (0; 0,5) \quad (13)$$

Stałe A_0 oraz A_1 obliczono w podanym zakresie X_i , wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów. Przy $\kappa = 0$ obliczenia pokazano w tabl. 1:

Najlepsze dopasowanie zmiennej X_i uzyskano dla $\kappa = 0$, gdy $A_0 = 6$ oraz $A_1 = 0,33$.

Do obliczenia niewiadomej $N_{gr}(\kappa)$ posłużono się związkami wyprowadzonymi na podstawie analizy zbiorów danych z próbnych obciążeń statycznych pali w gruntach niespoistych.

$$X_{i(\kappa)} = X_{i(0)} = 6 \cdot 0,33^{B_i} \cdot (B_i - 1) \quad (14)$$

$$X_{i(\kappa)} = X_{i(1)} = \frac{(B_i - 1)}{B_i} \quad (15)$$

$$X_{i(\kappa)} = X_{i(2)} = \frac{4(B_i - 1)}{4B_i - 1 + \sqrt{8B_i + 1}} \quad (16)$$

$$X_{i(\kappa)} = X_{i(3)} = 0,6 \cdot 0,7^{B_i} \cdot (B_i - 1) \quad (17)$$

Następnie obliczono odpowiadające poszczególnym wartościom κ nośności graniczne $N_{gr}(\kappa)$ korzystając z metody najmniejszych kwadratów:

Tabl. 1. Dopasowanie funkcji (13) za pomocą metody najmniejszych kwadratów

X_i	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
B_i	1,026	1,054	1,083	1,116	1,151	1,189	1,231	1,277	1,329	1,386
$X_i(A_0, A_1)$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

$$N_{gr(\kappa)} = \frac{\sum X_{i(\kappa)} \cdot N_i}{\sum X_{i(\kappa)}^2} \quad [\text{kN}] \quad (18)$$

Rozwiązaniem układu równań (5), (6), (7) są współczynniki A_1, A_2, A_3 , które podstawione do równania (4) uzależniają nośność graniczną N_{gr} od zmiany κ . Podstawiając uzyskane wartości do równania podstawowego (1), oblicza się wartości s_i^{obl} . Następnie zastosowano warunek na minimum sumy odchyłek, poszukując najlepiej dopasowanej krzywej (N -s) teoretycznej do krzywej uzyskanej z wyników próbnego obciążenia pała [11].

$$\min \delta_j^2 = \sum (s_i - s_i^{obl})^2 \quad [\text{mm}^2] \quad (19)$$

Na podstawie opisanych zależności stworzono program obliczeniowy SetPile i poddano analizie kilka przypadków krzywych obciążenie – osiadanie uzyskanych z próbnego obciążenia statycznych.

PRZYKŁAD PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA METODY M-K DO PALI O DUŻEJ NOŚNOŚCI

Mając na uwadze potrzebę przyspieszenia procedury opartej na metodzie M-K, stworzono program obliczeniowy SetPal, w którym wykorzystuje się algorytm statystycznej parametryzacji modelu MK opisany w niniejszej pracy. Posługując się program SetPile, przeanalizowano 5 przypadków pali Vibro wykonanych w zbliżonych warunkach gruntowych o długościach od 17,5 do 21,5 m o jednakowej średnicy 457/520 mm. Próbnego obciążenia statyczne wykonano przy wykorzystaniu procedury zawartej w normie [12] oraz projekcie technologicznym próbnego obciążenia. Analizowane pale stanowią fundament płyty dennej zbiorników na produkty chemiczne w porcie Szczecin. W skład wybudowanego magazynu wchodzi trzy zbiorniki magazynowe. Jako posadowienie zaprojektowano trzy niezależne fundamenty pod zbiorniki o średnicy 26,3 m i wysokości 18,6 m. Pod dnem zbiorników zaprojektowano fundament żelbetowy w kształcie walca o średnicy 26,7 m wyniesiony 0,3 m powyżej terenu. Całkowita wysokość fundamentu wyniosła 1,3 m. Grubość samej płyty fundamentowej wyniosła 1,0 m

WARUNKI GRUNTOWE

Przeprowadzone badania podłoża gruntowego oraz dodatkowe sondowania CPT wykazały, że w omawianym rejonie bezpośrednio od powierzchni zalega warstwa 0,3 ÷ 5,5 m nasypów zbudowanych głównie z żużla z domieszkami gruzu i grunów mineralnych. Pod nasypami stwierdzono piaski drobne zmiennej miąższości, od 0,5 do 4,0 m. Grunty piaszczyste są średnio zagęszczone, o stopniu zagęszczenia około $I_p = 0,35 \div 0,40$. Głębiej występuje seria osadów madowych wykształconych w postaci pyłów, namulów i torfów. Grunty takie zalegają przeciętnie do 9 ÷ 11 m p.p.t. Stan tych grunów jest na ogół plastyczny $I_L \approx 0,3$ do $I_L = 0,4$, jedynie miejscami natrafiono na namuły twardoplastyczne lub miękkoplastyczne. Pod nimi zalega kolejna seria grunów niespoistych – piasków drobnych i piasków pylastych, których nie przewiercono do głębokości 25,0 m p.p.t. Podstawy pali zakończono w warstwie średnio zagęszczonych piasków drobnych. Wyniki badań statycznych pali w odniesieniu do obciążenia maksymalnego i pośredniego zestawiono w tabl. 2.

Tabl. 2. Wyniki próbnego obciążenia, obciążenie N_{max} oraz N_t

Numer pała	L_p [m]	Rodzaj obciążenia	Wartość [kN]	S_{calc} [mm]
Nr 48 VF φ 457/520mm	17,50	N_{max} obciążenie maksymalne	2722	37,56
		N_t obciążenie projektowane	1815	15,05
Nr 52 VF φ 457/520mm	17,50	N_{max} obciążenie maksymalne	2722	13,85
		N_t obciążenie projektowane	1815	7,66
Nr 56 VF φ 457/520mm	18,50	N_{max} obciążenie maksymalne	2722	23,65
		N_t obciążenie projektowane	1815	9,56
Nr 60 VF φ 457/520mm	18,50	N_{max} obciążenie maksymalne	2722	21,19
		N_t obciążenie projektowane	1815	9,70
Nr 56 VF φ 457/520mm	21,50	N_{max} obciążenie maksymalne	2722	31,57
		N_t obciążenie projektowane	1815	13,26

Tabl. 3. Wyniki optymalizacji parametrów modelu M-K pali Vibro-Fundex

Nr pała	C [mm/kN]	$\kappa_{(opt)}$ [–]	$N_{gr(s=0,1D)}$ [kN]	N_{grMK} [kN]	Sd^2 [mm ²]
Nr 48 Vibro	0,00502	5,21	2910	10363	23,33
Nr 52 Vibro	0,00280	2,9	4350	9344	3,84
Nr 56 Vibro	0,00353	2,28	3950	8116	2,13
Nr 60 Vibro	0,00285	4,06	3580	8785	2,89
Nr 56 Vibro	0,00365	2,19	3010	5351	7,38

Wartości obciążeń przyłożonych w głowicy pała i odpowiadające im osiadanie uzyskane podczas próbnego obciążenia pokazano na rys. 1 (krzywe punktowe), natomiast wyniki aproksymacji metodą M-K reprezentują krzywe przerywane.

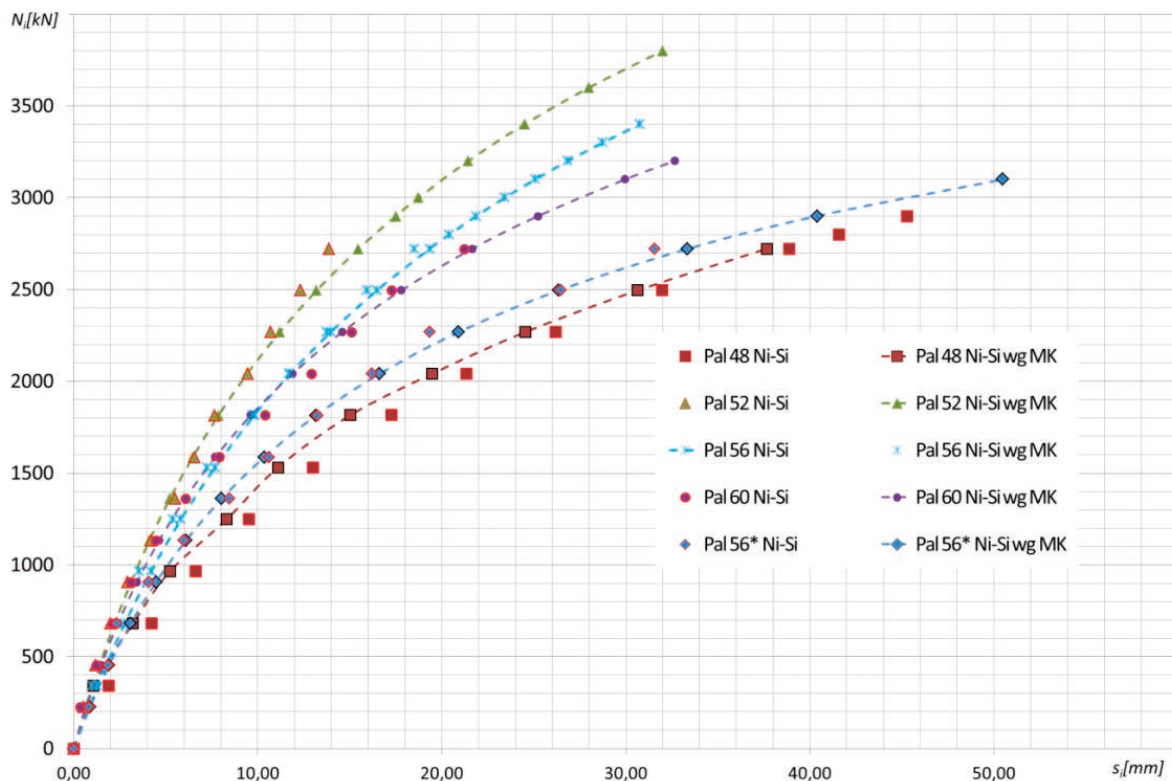
Stosując metodę M-K, obliczono parametry krzywej (N -s): N_{gr} , κ oraz C według procedury statystycznej. Wyniki tych obliczeń zaprezentowano w tabl. 3.

PORÓWNANIE WYNIKÓW NOŚNOŚCI GRANICZNEJ WEDŁUG RÓŻNYCH METOD INTERPRETACJI KRZYWEJ N -s

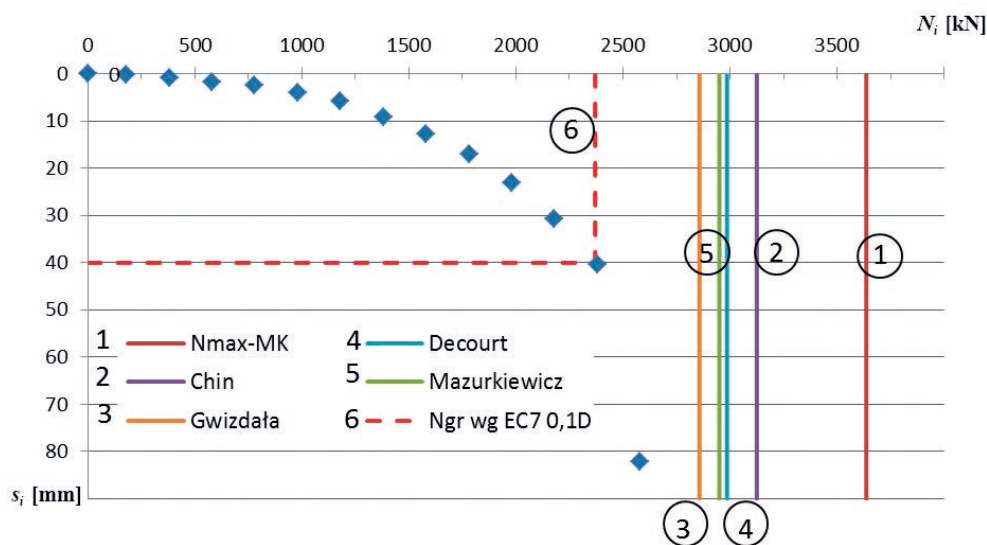
W celu porównania uzyskanych w wyniku analizy numerycznej wyników nośności według metody Meyera Kowalowa przeanalizowano jeden z przypadków pali opisanych w części pracy [13] wykonany w praktyce, który podczas badania próbnego obciążenia osiągnął znaczące wartości pomierzonych osiadań. Wyniki uzyskane podczas próbnego obciążenia pała przedstawiono w tabl. 4.

Stosując metodę M-K, obliczono parametry krzywej (N -s): $N_{grMK} = 3925$ kN, $\kappa = 2,61$ oraz $C = 0,00267$. Następnie wykonano interpretację wyników próbnego obciążenia metodami proponowanymi przez innych badaczy. Wyniki tego porównania ilustruje rys. 3.

Należy zauważyć, że stosując metodę M-K do obliczonego osiadania $s = 40$ mm, czyli zgodnie z definicją EC7 osiadania granicznego, obliczono odpowiadającą mu nośność graniczną



Rys. 2. Wyniki aproksymacji przebiegu krzywych N_i-s_i z metody M-K oraz wyniki próbnego obciążenia statycznego



Rys. 3. Nośność pala określona różnymi metodami, pal wykonany w praktyce, charakteryzujący się znacznymi osiadaniami [11]

Tabl. 4. Wyniki próbnego obciążenia pala o dużych wartościach osiadanias [11]

N_i [kN]	181	380	580	780	980	1180	1380	1580	1780	1980	2180	2380	2580
s_i [mm]	0,29	0,94	1,66	2,53	3,91	5,87	9,14	12,65	17	23,03	30,81	40,40	61,40

$N_{gr} = 2356$ kN, podczas gdy pomierzone obciążenie w punkcie $s_i = 40,40$ mm wynosiło 2380 kN.

Proponując wykorzystanie metody M-K, autorzy zakładają, że istnieje taka graniczna wartość obciążenia, które powoduje, że pal osiada w sposób niekontrolowany. Zakłada się, że wszystkie przyłożone na pal obciążenia są od tej wartości mniejsze. Przy takim założeniu jest możliwe przedstawienie na jednej

skali wartości nośności otrzymywanych przy zastosowaniu metody dostępnych w literaturze, a dzięki temu porównanie uzyskanych wyników pozwala na stwierdzenie, jak daleko różnią się one od proponowanej nośności brzegowej. Autorzy uważają, że dopiero wskazanie wartości nośności granicznej pozwala na jednoznaczne ustalenie współczynnika bezpieczeństwa analizowanego pala.

WNIOSKI

Metoda M-K pozwala na uzyskanie jednoznacznego zestawu parametrów krzywej $\kappa C N_{gr}$ dla każdego zbioru danych pomierzonych w próbnym obciążeniu statycznym s_i-N_i . Znajomość związku $s = s(N)$ pozwala na wykorzystanie w projektowaniu zasady dopuszczalnych osiadań, i odpowiadających im obciążeń pala, albo na przyjęciu dopuszczalnego obciążenia pala w głowicy, przyjmując N_{gr} za wielkość charakterystyczną i ustalenie do konkretnego przypadku współczynników bezpieczeństwa. Wówczas N_{gr} podzielić można przez współczynnik bezpieczeństwa. Takie podejście pozwala na lepsze wykorzystanie nośności pali, nośności, która wynika ze współpracy pala z podłożem gruntowym. Problemami, które pozostają do wyjaśnienia są: czy parametry krzywej M-K można określić na podstawie parametrów gruntowych, takich jak: E , ϕ , c , I_D , oraz wyjaśnienie, w jaki sposób powstaje mobilizacja naprężenia na poboczniczy pala. Metoda M-K była do tej pory dobrze opisana w wielu publikacjach, a wyniki, jakie otrzymujemy przy jej zastosowaniu z całą pewnością należy uznać za obserwowane w praktyce inżynierskiej. Tym bardziej należy kontynuować prace nad metodą M-K, zwłaszcza przy parametryzacji modelu w odniesieniu do warunków gruntowych w otoczeniu pala, oraz technologii jego wykonania.

LITERATURA

1. Fellenius B.H.: Basics of Foundation Design. Electronic edition. Sidney BC Canada, October 2012.
2. Gwizdała K.: Fundamenty Palowe Tom 1: Technologie i obliczenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

3. Gwizdała K.: Fundamenty Palowe Tom 2: Badania i zastosowania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
4. Meyer Z.: Analiza Naprężeń na poboczniczy oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa. XVIII Seminarium Naukowe z cyklu Regionalne problemy inżynierii środowiska. Szczecin Czerwiec 2010.
5. Meyer Z., Kowalów M.: Wykorzystanie testu Osterberga do statycznych próbnych obciążeń pali. XXIV Konferencja Naukowo techniczna Awaryjne Budowlane, Szczecin – Międzyzdroje 2009.
6. Meyer Z., Kowalów M.: Model krzywej aproksymującej wyniki próbnych obciążeń pali. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2010.
7. Meyer Z., Szmeczel G.: Analiza możliwości analitycznej aproksymacji krzywej obciążenie – osiadanie dla próbnych obciążeń pali żelbetowych w gruntach sypkich. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2010.
8. Meyer Z., Szmeczel G.: Metoda interpretacji próbnych obciążeń pali prefabrykowanych. Materiały na 58 KN Krynica 2012, Zeszyty Politechniki Rzeszowskiej.
9. Meyer Z., Szmeczel 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.
10. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Wykorzystanie wzoru na osiadanie płyty statycznej do określenia naprężenia pod podstawą kolumny betonowej. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 01/2014, 30-35.
11. Szmeczel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Praca doktorska. Wydział Budownictwa i Architektury ZUT w Szczecinie. 2014.
12. PN-83/B-02482 Fundamenty budowlane – Nośność pali i fundamentów palowych.
13. PN-EN 1997-1 Eurocode 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.