

Analiza niedokładności pomiarów badania statycznego pala z wykorzystaniem modeli analitycznych

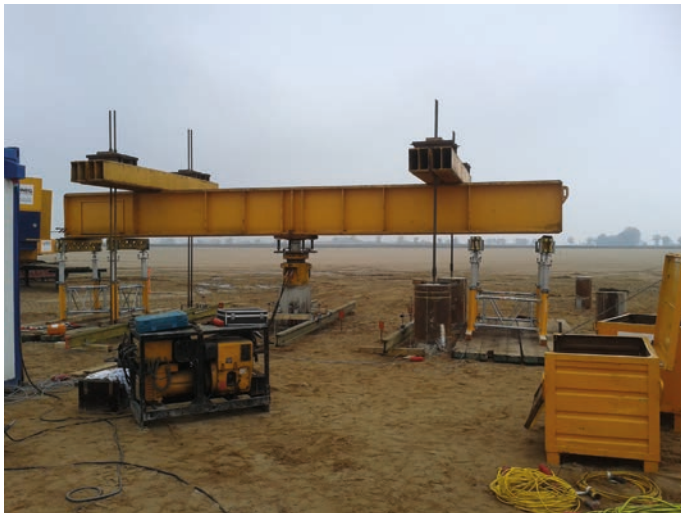
Prof. dr hab. inż. Zygmunt Meyer, mgr. inż. Adam Wasiluk

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury

Badanie statyczne pala jest najbardziej wiarygodnym sposobem zweryfikowania rzeczywistej nośności wykonanego pala. Pozwala ono na zgromadzenie zbioru punktów $\{s_i; N_i\}$, który umożliwia wykreślenie krzywej zależności obciążenie – osiadanie. Polega ono na przyłożeniu obciążeń w głowicy pala, wygenerowanych za pomocą specjalnie przystosowanej konstrukcji, z jednoczesnym pomiarem przemieszczeń. Zazwyczaj konstrukcja ta składa się z pali kotwiących, ciężkich belek stalowych, siłownika oraz aparatury pomiarowej. Konstrukcja z belek instalowana jest nad przedmiotowym palem przeznaczonym do badania, zostaje ona trwale połączona z palami kotwiącymi, następnie pomiędzy palem a belką montowany jest siłownik hydrauliczny wywierający ciśnienie. Na rys. 1 przedstawiono

przykładowe stanowiska do badania statycznego pala z użyciem pali kotwiących. Po zainstalowaniu aparatury mierzącej przemieszczenia przystępuje się do badań. W praktyce inżynierskiej zamiast pali kotwiących możliwe jest użycie obciążenia w formie balastu, zazwyczaj płyt betonowych układanych na stalowej konstrukcji, służących jako przeciwwaga do siłownika hydraulicznego. Na rys. 2 przedstawiono badanie statyczne pala z użyciem bloków betonowych.

Większość inżynierów, projektując próbne obciążenie statyczne pali, nadal korzysta z normy PN-83/B-02482, którą wycofano i zastąpiono normą PN-EN 1997-1:2008 [21, 22]. Zgodnie z zapisami normy próbne obciążenie wykonuje się w dwóch cyklach ze stopniowym wzrostem obciążeń. W pierwszym cyklu



Rys. 1. Badanie statyczne z użyciem pali kotwiących (fot. własna)



Rys. 2. Badanie statyczne z wykorzystaniem bloków betonowych (fot. własna)

uzyskuje się wartość siły, na jaką zaprojektowano pał, w drugim cyklu zazwyczaj dąży się do osiągnięcia 150% wartości nośności projektowej (wartość z pierwszego cyklu). Każdy kolejny stopień obciążenia w cyklu jest zadawany po ustabilizowaniu się przemieszczeń.

Krzywa uzyskana podczas próbnego statycznego obciążenia jest rzeczywistą reakcją podłoża i pała na przyłożone obciążenie. W sposób jednoznaczny i pewny obserwowane jest osiadanie wraz ze wzrostem obciążenia.

W sytuacji, gdy w badaniu nie osiągnięto wyraźnego wzrostu osiadania, przy bardzo małym wzroście oporu, do określenia nośności granicznej fundamentu palowego zgodnie z normą PN-EN 1997-1 należy przyjąć wartość siły odpowiadającą osiadanemu wynoszącemu 10% wymiaru średnicy pała. W praktyce inżynierskiej w tym punkcie często napotyka się na problem z osiągnięciem takich osiadań, szczególnie przy palach o większych średnicach. W takich sytuacjach konieczne jest użycie metod pozwalających na ekstrapolację krzywej $\{s_i; N_i\}$. Jedną z takich metod jest krzywa Meyera-Kowalowa. Metoda ta pozwala na wyznaczenie nośności granicznej pała N_{gr} rozumianą jako siłę, przy której pał osiada w sposób niekontrolowany, na podstawie zbioru wartości $\{s_i; N_i\}$ uzyskanych w próbnym obciążeniu statycznym.

W celu przeprowadzenia próbnego obciążenia statycznego optymalnym rozwiązaniem jest wykonanie badanego pała. Na

etapie wykonania pała mogą wystąpić zjawiska mające wpływ na początkową fazę osiadania przy małych obciążeniach, powodując pewnego rodzaju błąd pomiaru, a w efekcie niedoszacowanie wartości osiadania pała. Błąd ten może być spowodowany naruszeniem gotowego już elementu (np. ciężkim sprzętem na placu budowy) bądź samą technologią wykonania uniemożliwiającą pełną współpracę pała z gruntem i ugięciem przestrzeni gruntowej przez pale wyciągane. Wspomniana konstrukcja niezbędna do przeprowadzenia badania statycznego oraz jego procedura również mogą generować niedokładności podczas pomiarów. Pale kotwiące podlegają niewielkim ruchom w górę i w skrajnych przypadkach uniemożliwiają kontynuowanie badania. Konstrukcja stalowa musi zostać stężona. Na początku badania siłownik wciskający pał, zanim prawidłowo rozpocznie projektowe obciążenie, musi naprężyć konstrukcję oporową.

Zasadne jest postawienie tezy, że podczas przeprowadzania badania statycznego pała wciskanego może wystąpić niedokładność pomiarowa związana z technologią wykonania pała oraz sposobem wykonania próbnego obciążenia. Założenie wystąpienia takiego błędu w obliczeniach pozwoli na korektę zbioru danych $\{s_i; N_i\}$ i przeprowadzenie obliczeń na skorygowanym zbiorze.

W analizie pominięto błąd pomiarowy wynikający ze ściskania osiowego pała [3, 16].

OPIS MODELI ANALITYCZNYCH

Modele analityczne pozwalają na wyznaczenie hipotetycznej nośności pała (w literaturze wymienia się ich kilka). W pracy opisano najczęściej stosowane rozwiązania. Pierwszym z nich jest model funkcji transformacyjnych [2, 4 ÷ 9]. Metoda ta umożliwia skonstruowanie krzywej osiadania pała na podstawie znajomości funkcji określających zależności pomiędzy jednostkowym oporem pobocznic i podstawy pała a przemieszczeniem rozpatrywanego węzła trzonu pała. Każdy element pała pod wpływem obciążenia przemieszcza się zgodnie z funkcją $t - z$ w odniesieniu do elementów trzonu pała i $q - z$ w odniesieniu do podstawy pała. Rozwiązanie wymaga uzyskania stanu równowagi przy odpowiednim rozkładzie oporów w danym stopniu obciążenia pała poprzez wykonywanie obliczeń iteracyjnych. Ze względu na konstrukcję modelu jego uźmiennienie wymagałoby przebudowania. Model ten jest trudny do uwzględnienia przy analizie wpływu niedokładności pomiarów z badania statycznego. Będzie to przedmiotem dalszych badań.

Kolejnym modelem jest ekstrapolacja metodą China-Kondnera [1], która opiera się na przedstawieniu pochodnej krzywej osiadania w postaci równania liniowego. Model krzywej aproksymującej przyjmuje tę samą postać jak krzywa Meyera-Kowalowa (krzywa M-K), dla $\kappa = 1$, która będzie opisana w dalszej części pracy. Mając na uwadze tę zależność, dalsza analiza skupi się na modelu M-K.

W celu określenia wpływu niedokładności pomiarowej na zbiór $\{s_i; N_i\}$ wykorzystano krzywą Meyera-Kowalowa. Krzywa ta przedstawiona równaniem (1) zawiera trzy parametry. Parametr pierwszy to stała C , będąca odwrotnością stałej Winklera wprowadzonej w mechanice budowlanej do rozwiązania belki na sprężystym podłożu. Drugim parametrem jest siła przyłożona do głowicy N_{gr} , przy której pał osiada w sposób niekontrolowany.

wany. Trzecim parametrem jest parametr κ , który odzwierciedla proporcję pomiędzy oporem poboczniczy a podstawy. Analiza właściwości tej krzywej omówiono w [10 ÷ 14]. W związku z tym, że dwa z tych parametrów są parametrami fizycznymi (odwrotność stałej Winklera C oraz siła graniczna N_{gr}), można przy ustalaniu posłużyć się zasadami mechaniki gruntów. Podobnie jak i ustalenie oporu poboczniczy i podstawy pała w zakresie liniowych przemieszczeń do ustalenia parametru kappa. Parametry krzywej Meyera-Kowalowa można również uzyskać na drodze analizy statystycznej na podstawie zbioru punktów ze statycznych próbnych obciążeń. Poniżej przedstawiono właściwości krzywej M-K oraz opis parametrów tej krzywej.

Podstawową postać wzoru krzywej Meyera-Kowalowa opisana w [10] przedstawiono wzorem:

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

Oznaczenia, jednostki oraz fizyczny sens stałych parametrów modelu M-K:

C – odwrotność stałej Winklera [mm/kN],

N_{gr} – maksymalne obciążenie w głowicy, które powoduje niekontrolowane osiadanie [kN],

κ – proporcja pomiędzy oporem poboczniczy i podstawy pała [–].

Krzywa ta charakteryzuje się występowaniem dwóch asymptot. W początkowym zakresie osiadania zachowują charakter liniowy i można je opisać wykorzystując zasady liniowej mechaniki gruntów. W tym przedziale występuje asymptota ukośna. Wraz ze wzrostem osiadań wykres staje się nieliniowy,

a gdy obciążenia zaczynają osiągać wartości graniczne $N \rightarrow N_{gr}$, to krzywa $s(N)$ zbliża się do asymptoty pionowej. Schemat graficzny modelu M-K oraz schemat pracy pała w gruncie przedstawiono na rys. 3.

Ponieważ parametr C jest odwrotnością stałej Winklera, zatem wychodząc z zasad mechaniki gruntów, możemy opisać parametr C_1 (dla podstawy pała). Dla małych wartości siły N związek M-K redukuje się do postaci $s = C \cdot N$. Jeżeli związek ten zastosujemy do podstawy pała, to otrzymamy $s = C_1 \cdot N_1$. W zakresie liniowej teorii Boussinesq'a możemy założyć, że:

$$s = \frac{4 \cdot N_1}{\pi \cdot D \cdot E} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{4}{\pi \cdot D \cdot E} \quad (3)$$

gdzie:

C_1 – odwrotność stałej Winklera w podstawie pała [mm/kN],

N_1 – wartość odporu podstawy pała [kN],

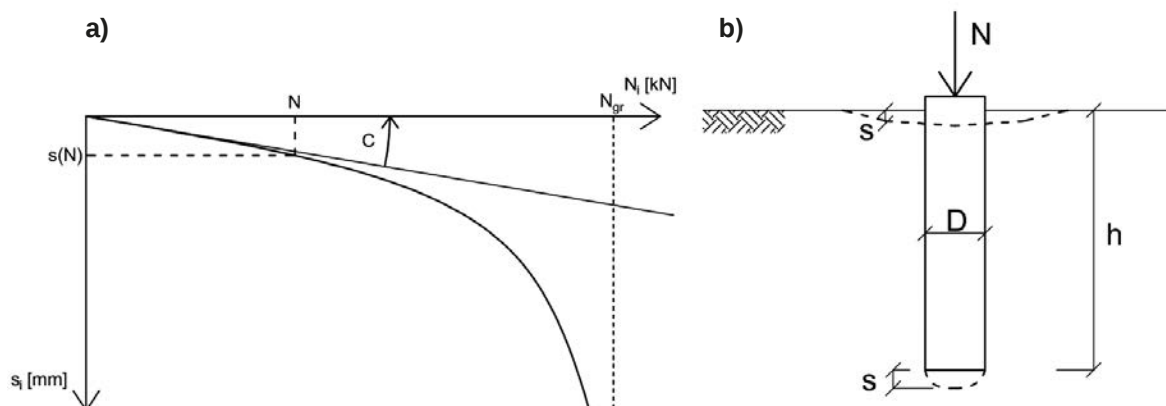
D – średnica pała [m]

E – moduł ścisłości gruntu [kPa]

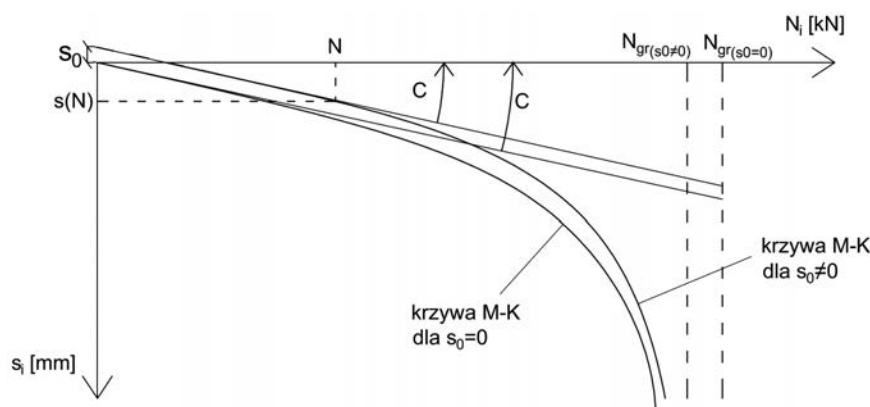
Problemem przy obliczaniu C_1 w sposób bezpośredni jest ustalenie związków $E = E(s)$ lub dla małych osiadań $E = E(q_b)$, gdzie $q_b = q_c(z)|_{z=h}$ (q_c – opór pod stożkiem z sondowania CPT).

Analiza próbnych obciążeń statycznych pałi oraz porównanie z wynikami sondowań sondą statyczną wskazuje, że dla gruntów sypkich dobre wyniki daje przybliżenie [11, 17]

$$E = E(q_b) \quad (4)$$



Rys. 3. Schemat graficzny modelu krzywej Meyera-Kowalowa (a) oraz schemat pracy pała w gruncie (b)



Rys. 4. Wystąpienie błędu s_0 w krzywej M-K

Uzyskanie odwrotności stałej Winklera C_1 ze wzoru (3) ogranicza ilość parametrów optymalizowanych w obliczeniach statystycznych.

W związku z tym, że zwykle w statycznych próbnych obciążeniach pali nie osiąga się N_{gr} , do wyznaczenia parametrów krzywej M-K można posłużyć się statystyką matematyczną i zbiorem wartości $\{s_i; N_i\}$.

W dalszej części autor przedstawił sposób wykorzystania krzywej M-K do określenia wpływu niedokładności wynikających z badania statycznego.

SPOSÓB UWZGLĘDNIENIA NIEDOKŁADNOŚCI POMIARÓW OSIADANIA W MODELU M-K

Zakładając występowanie niedokładności pomiarowej osiadania pala w trakcie badania statycznego, konieczne jest dodanie członu do wzoru podstawowego. Autor zaproponował, aby dla pierwszego odcinka krzywej $s = s(N)$ wprowadzić stałą poprawkę s_0 , która pozwala na zminimalizowanie sumy kwadratów od-

chyłek zbudowanego funkcjonu [12 ÷ 14, 20]. Na rys. 4 przedstawiono graficzne uwzględnienie błędu s_0 w krzywej M-K.

$$s_i = s_0 + C \cdot N_{gr} \frac{\left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1}{\kappa} \quad (5)$$

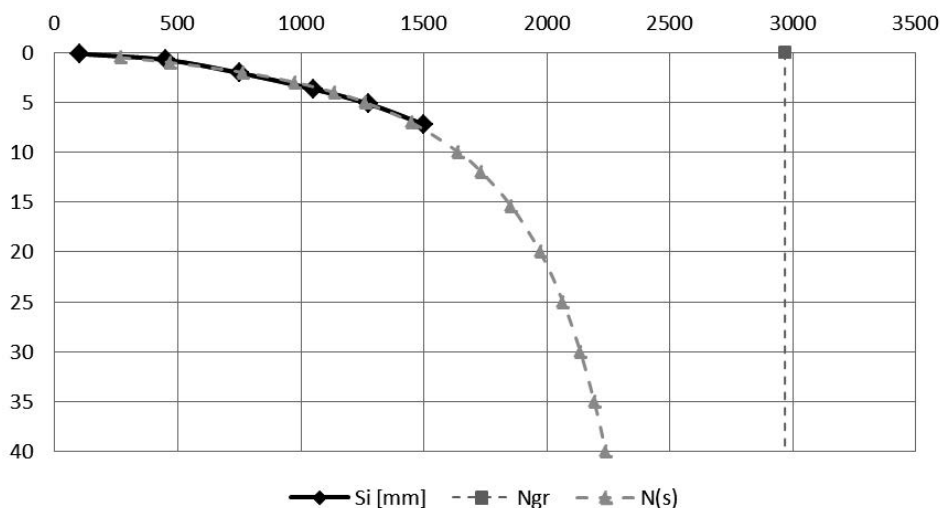
Rozwiązanie oparte jest na analizie statystycznej zbioru podstawowego $\{s_i; N_i\}$, przy czym jako równania warunkowe przyjmiemy na krzywej trzy punkty, to jest: s_i, s_{i+1}, s_{i+2} . Umożliwia to wyznaczenie parametrów krzywej po uprzednim wyeliminowaniu niedokładności pomiarowej w następujący sposób. W tym celu należy odjąć od siebie sąsiednie punkty w zbiorze, a następnie podzielić przez siebie różnicę tych punktów.

$$s_{i+1} - s_i = C \cdot N_{gr} \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - \left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}}\right)^{-\kappa}}{\kappa} \quad (6)$$

$$s_{i+2} - s_{i+1} = C \cdot N_{gr} \frac{\left(1 - \frac{N_{i+2}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - \left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa}}{\kappa} \quad (7)$$

N_{gr} [kN]	2968
C [mm/kN]	0,001635
κ [-]	2,06

N_i	s_i
[kN]	[mm]
450	0,74
750	2,05
1050	3,67
1275	5,15
1500	7,21

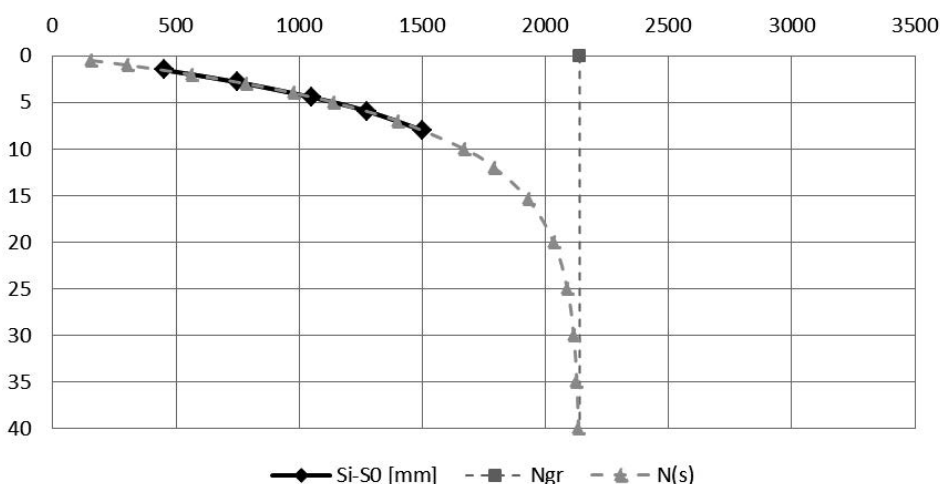


Rys. 5. Wynik ekstrapolacji krzywą M-K dla $s_0 = 0$

N_{gr} [kN]	2139
C [mm/kN]	0,003056
κ [-]	0,01

s_0	-0,776
-------	--------

N_i	$s_i - s_0$
[kN]	[mm]
450	1,52
750	2,83
1050	4,45
1275	5,93
1500	7,99



Rys. 6. Krzywa M-K uzyskana z uwzględnieniem s_0

Na podstawie pomierzonych wartości osiadania oraz odpowiadającym im sił jesteśmy w stanie wyznaczyć funkcję:

$$Y_{pom} = \frac{s_{i+1} - s_i}{s_{i+2} - s_{i+1}} \quad (8)$$

$$Y_{obl} = \frac{\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - \left(1 - \frac{N_i}{N_{gr}}\right)^{-\kappa}}{\left(1 - \frac{N_{i+2}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - \left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa}} \quad (9)$$

Podobnie jak w standardowej procedurze za pomocą najmniejszych sum kwadratów odchylek, wzory (6 ÷ 9), możliwe jest znalezienie s_0 .

Obliczenia prowadzi się zgodnie z poniższymi równaniami.

$$\sum s_{i+1} = n \cdot s_0 + \frac{C \cdot N_{gr}}{\kappa} \cdot \sum \left(\left(1 - \frac{N_{i+1}}{N_{gr}}\right)^{-\kappa} - 1 \right) \quad (10)$$

Po wyznaczeniu wartości odchyłki pomiarowej s_0 przystępujemy do obliczenia pozostałych parametrów κ , C , N_{gr} , tak jak w wersji oryginalnej.

W celu zilustrowania wpływu proponowanej metody uwzględnienia niedokładności pomiarowej posłużono się próbnymi statycznymi obciążeniami 9 pali wykonanych w różnych technologiach. Na rys. 5 i 6 przedstawiono poszczególne etapy optymalizacji – najpierw dla $s_0 = 0$, a następnie do obliczenia $s_0 \neq 0$.

ANALIZA WPŁYWU NIEDOKŁADNOŚCI s_0 NA APROKSYMOWANĄ NOŚNOŚĆ PAŁA W WARUNKACH RZECZYWISTYCH

Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy wyznaczenia parametrów krzywej M-K z uwzględnieniem niedokładności pomiarowej s_0 . Rozważany pał ma 11 m długości oraz 0,45 m średnicy w podstawie. Wykonano go w technologii Vibro w gruntach niespoistych.

W celu stwierdzenia, w jaki sposób zaproponowana metoda poprzez obliczenie poprawia dopasowanie dalszej części, porównano wyniki obliczeń dla $s_0 = 0$ oraz dla $s_0 \neq 0$ wyznaczone metodą proponowaną w niniejszej pracy. Na rys. 5 przedstawiono wyniki ekstrapolacji krzywej $\{s_i; N_i\}$ za pomocą krzywej M-K przy założeniu, że niepewność pomiarowa nie występuje (to jest $s_0 = 0$).

Na podstawie zbioru danych uzyskanych z badania statycznego i analizy M-K uwzględniającej wystąpienie niepewności pomiarowej, dla przedmiotowego pała uzyskano $s_0 = -0,776$ [mm]. Wynik aproksymacji przedstawiono na rys 6. Krzywą wrysowano na skorygowanym zbiorze danych $\{s_i - s_0; N_i\}$. W stosunku do podstawowej analizy z założeniem $s_0 = 0$ widoczny jest około 25% spadek wartości nośności granicznej pała N_{gr} .

Oznacza to, że wpływ niepewności pomiarowej może mieć znaczący wpływ na ten parametr krzywej M-K, co prowadzi do uzyskania znacząco różniących się wyników nośności granicznej pała N_{gr} .

Zestawienie wyników obliczeń proponowanego przybliżenia przedstawiono w tabl. 1.

Tabl. 1 Wyniki nośności granicznych () oraz niepewności pomiarowych dla pali wykonanych w różnych technologiach

Nr pała	$N_{gr} (s_0 = 0)$	$N_{gr} (s_0 \neq 0)$	s_0	L	D	Technologia wykonania pała
[-]	[kN]	[kN]	[mm]	[m]	[mm]	[-]
1	10815	10770	0,39	18	1500	Wiercone
2	4692	4221	0,13	18	630	Vibro
3	3762	3707	0,05	18	630	Vibro
4	1403	1366	0,12	12	510	FDP
5	3420	3993	-0,02	23,5	1400	Wiercone
6	2812	3344	0,02	8	1000	Wiercone
7	2446	2547	-0,04	15	400×400	Pref żel.
8	1519	1775	-0,12	13	420	FDP
9	2968	2138	-0,78	11	450	Vibro

Przedstawione wartości s_0 , które są zarówno wartościami dodatnimi, jak i ujemnymi, mogą sugerować wcześniej wspomniane zakotwienie urządzeń w postaci pała. Uzyskane wyniki wskazują, że uwzględnienie parametru może znacząco zmieniać obliczone N_{gr} .

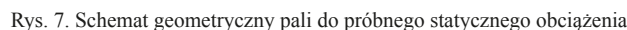
Największe różnice uzyskano dla pali Vibro (w tabl. 1 pozycja nr 2) oraz dla pali wierconych (pozycja 5 i 6). Świadczy to o tym, że pale w tej technologii wykazują największą wrażliwość na wyniki badania statycznego, szczególnie w pierwszym zakresie małych obciążeń. Wyniki uzyskane w tabl. 1 świadczą o tym, że wprowadzenie parametru s_0 może wpłynąć na zwiększenie N_{gr} albo na zmniejszenie N_{gr} . Wydaje się, że najbardziej istotne są przypadki, kiedy N_{gr} rośnie (tak jest w przypadku pali wierconych) i kiedy maleje (tak jest w przypadku pali Vibro).

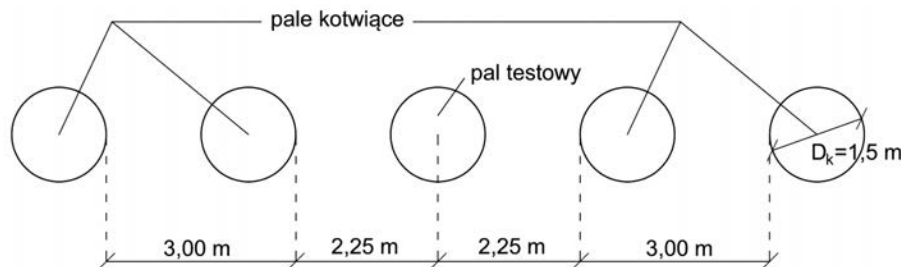
Powyższe wnioski oparto na małym zbiorze 9 pali. Intencją autora było sprawdzenie, czy proponowana metoda uwzględnienia niedokładności może wpływać w istotny sposób na główny parametr metody M-K (N_{gr}) oraz sprawdzenie, czy technologia wykonania pała ma związek z przedstawionymi niedokładnościami badania statycznego. Wstępne wyniki wskazują, że niedokładności te mogą mieć istotny wpływ, jak to wykazano uprzednio.

Sformułowanie ostatecznych wniosków wymaga badań z zastosowaniem tej metody do większej grupy pała, które poddane będą próbnym obciążeniom statycznym.

WPŁYW PIONOWEGO PRZEMIESZCZENIA PAŁA KOTWIĄCEGO NA WYNIK PRÓBNIEGO STATYCZNEGO OBCIĄŻENIA

Kolejną przyczyną, która może powodować niedokładności w ustalaniu zbioru wartości $\{s_i; N_i\}$, może być sposób przyłożenia obciążenia do głowicy pała. Jeżeli obciążenie to jest przyłożone w taki sposób, że wykorzystuje się pale kotwiące, wówczas współpraca pała kotwiącego z gruntem może powodować dodatkowe efekty dla pała badanego w relacji obciążenie – odkształcenie. Schematycznie wymiary pała oraz obciążenie takiego zakotwienia przedstawiono na rys. 7.





Rys. 9. Układ pali do przykładu obliczeniowego

$$s_0 = 2 \cdot \frac{1}{20} \cdot \frac{\frac{N}{2}}{\pi E_t \cdot L} = \frac{N}{20 \pi E_t \cdot L} \quad \text{ponieważ } P = N/2 \quad (18)$$

W przypadku zastosowania większej liczby pali kotwiących konieczne jest określenie sił wyciągających poszczególne pale kotwiące, a następnie, korzystając z zasady superpozycji, obliczenie wartości wyniesienia. Ostateczne wyniki statycznego próbnego obciążenia daje nam zbiór wartości $\{s_i; N_i\}$. Jeżeli do interpretacji tego wzoru wykorzystujemy krzywą M-K, to musimy przyjąć:

$$N_2 = N; \quad s_2 = s_{pom}(N) + \frac{N}{20 \pi E_t \cdot L} \quad (19)$$

Schematycznie wpływ tej korekty na przebieg krzywej M-K pokazano na rys. 8.

Na rys. 8 przedstawiono krzywą M-K uwzględniającą korektę na wyciąganie pali kotwiących w stosunku do krzywej dla osiadań pomierzonych w trakcie badania statycznego

Przykład obliczeniowy: przypadek zgodnie z literaturą [18].

Dane:

$$D_k = 1,5 \text{ m}, H_k = 27 \text{ m}, P = \frac{N}{4} = 2,5 \text{ MN}, s_{k\text{sr}} = 3,5 \text{ mm}, L_{sr} = 3,5 \text{ mm},$$

Po podstawieniu otrzymujemy:

$$0,0035 \text{ m} = \frac{1+0,3}{\pi} \cdot \frac{2,5 \text{ MN}}{E_t \cdot 27 \text{ m}} \quad \text{stąd } E_t = 11 \text{ MPa}$$

Wyniesienie powierzchni w przekroju pala testowego

$$s_0 = \frac{1}{20} \cdot \frac{N}{\pi E_t L_{sr}} = \frac{1}{20} \cdot \frac{10 \text{ MN}}{\pi \cdot 11 \text{ MPa} \cdot 4 \text{ m}} = 3,7 \text{ mm}$$

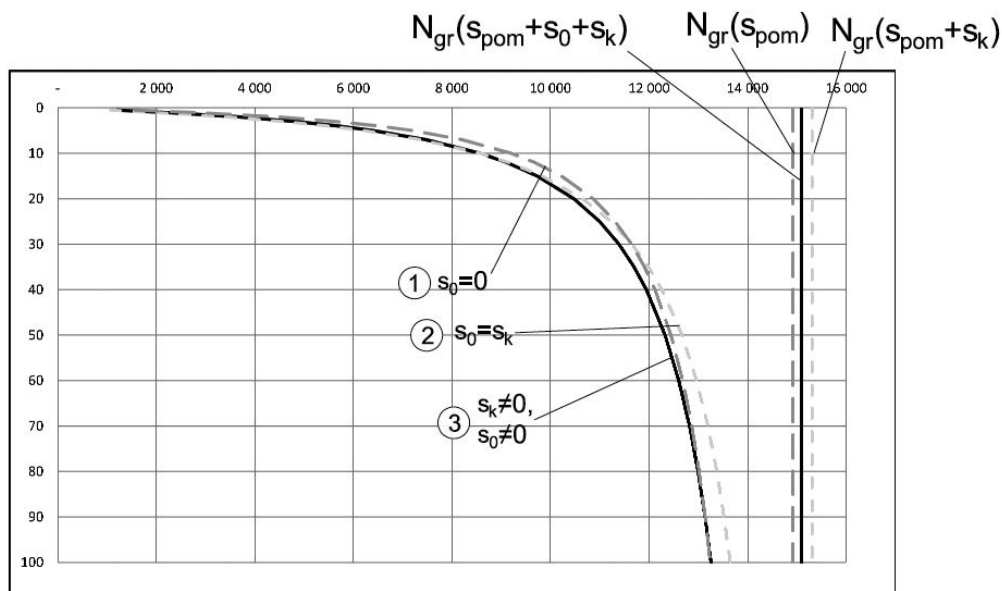
Ze względu na małą odległość $L_{sr} = 4 \text{ m}$ przy $H_k = 27 \text{ m}$ istnieje zależność $s_0 = s_k$, układ pali przedstawiono na rys. 9. Korzystając z tej zależności przedstawiono przykład wykreślonych krzywych ekstrapolujących, przedstawiający wpływ imperfekcji pomiarowych, które omówiono w tym rozdziale oraz ich wpływ na wartość głównego parametru krzywej M-K, to jest N_{gr} .

Na rys 10 i 11 przedstawiono obliczenia dla dwóch pali (pal 12L oraz 12P) o średnicy 1,5 m i długości 27 m, dla każdego z nich wykreślono po trzy krzywe M-K. Pale obciążono statycznie z pomiarem osiadania pala próbnego oraz rejestracją przemieszczeń pali kotwiących (4 pale w rzędzie, w odległościach co 3 m). Ze względu na bardzo małą odległość pali kotwiących od pala badanego założono $s_0 = s_k$. Na pierwszej z krzywych (nr 1) przedstawiono ekstrapolację wyników pomierzonych podczas badania statycznego dla zbioru $\{s_{pom,i}, N_i\}$ przy założeniu $s_0 = 0$, na kolejnej krzywej (nr 2) przedstawiono obliczenia

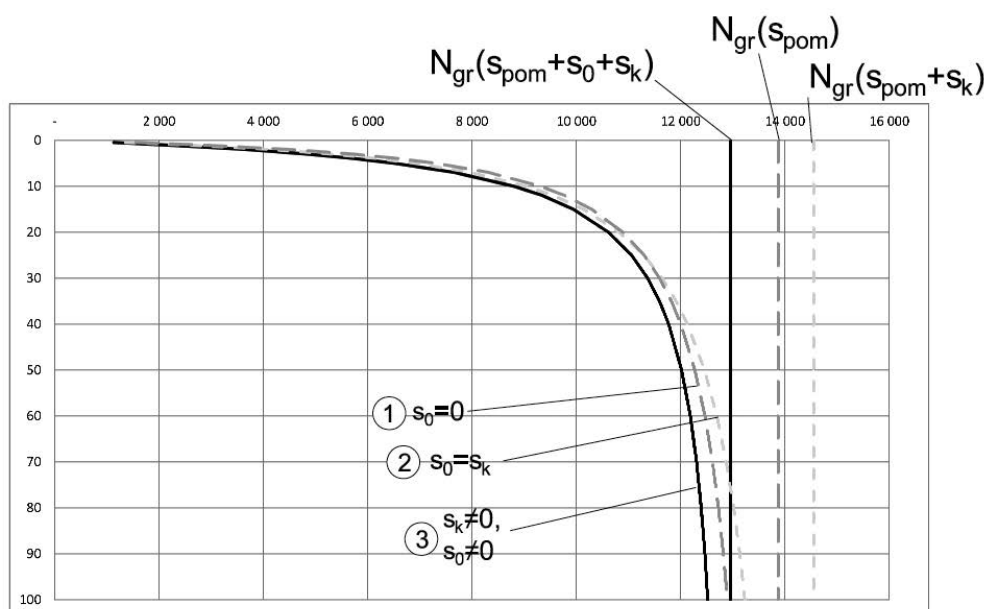
Tabl. 2. Wartości osiadania pomierzonego s_{pom} , wyniesienia oraz korekta osiadań uwzględniająca wyniesienie s_2 od lewej pal nr 12L oraz pal nr 12P

N	s_{pom}	$s_k(N)$	s_2
[kN]	[mm]		
682	0,18	0,08	0,26
1364	0,4	0,24	0,64
2046	0,71	0,40	1,11
2728	1,07	0,59	1,66
3411	1,39	0,79	2,18
4775	2,16	1,24	3,40
6139	3,54	1,80	5,34
7503	5,21	2,33	7,54
8185	6,67	2,62	9,29
8867	8,89	2,86	11,75
9549	11,84	3,20	15,04
10232	15,42	3,45	18,87

N	s_{pom}	$s_k(N)$	s_2
[kN]	[mm]		
807	0,23	0,03	0,26
1614	0,55	0,10	0,65
2421	0,98	0,16	1,14
3228	1,27	0,35	1,62
4035	1,72	0,46	2,18
4841	2,31	0,55	2,86
5648	2,96	0,60	2,56
6455	3,85	0,65	4,50
7262	5,00	0,72	5,72
8069	6,83	0,96	7,79
9078	9,61	1,18	10,79
10086	14,29	1,34	15,63



Rys. 10. Trzy krzywe M-K wraz z nośnością graniczną – Pal 12L ($s_0 = -0,13$ mm)



Rys. 11. Trzy krzywe M-K wraz z nośnością graniczną – Pal 12P ($s_0 = -0,18$ mm)

dla zbioru $\{s_{2,i}, N_i\}$ i $s_0 = 0$, czyli po uwzględnieniu wyniesienia spowodowanego ruchem pali kotwiących. Ostatnią z krzywych (nr 3) obliczono dla $\{s_{2,i}, N_i\}$ i $s_0 \neq 0$. W tabl. 2 przedstawiono wartości wyniesienia i korekty osiadań pomierzonych dla obu badanych pali.

Krzywe przedstawione na rysunku w sposób wyraźny wskazują, w jak znaczący sposób uwzględnienie błędów może wpłynąć na wyniki badania statycznego. Zmiany te będą rosły wraz z przemieszczaniem pali kotwiących. Na rys. 10 i 11 przedstawiono uwzględnienie imperfekcji pomiarowych wynikające ze współpracy pala badanego z gruntem obciążanego w głowicy oraz imperfekcji wynikających z faktu, że występują pale kotwiące, które powodują ugięcie (wyniesienie przestrzeni) i w ten sposób faktyczne przemieszczenie głowicy pala względem pierwotnej przestrzeni gruntowej jest sumą s oraz $s_k(N)$. Wyniki ob-

liczeń przedstawiono na rys. 10 i 11. Na rysunkach widać wyraźnie, że zaproponowanie metody najmniejszej sumy kwadratów odchyłek do wyznaczenia N_{gr} pozwoliło na uzyskanie trzech różnych wartości N_{gr} . Pierwszą wartość nośności granicznej uzyskano z pierwotnego zbioru $\{s_i, N_i\}$, przy założeniu, że $s_0 = 0$ oraz $s_k = 0$. Kolejną wartość to $N_{gr}(s_{pom} + s_k)$, gdzie uwzględniono jedynie ugięcie przestrzeni gruntowej wywołane palami kotwiącymi i przyjęto $s_0 = 0$ i $s_k \neq 0$. Trzecią wartość nośności granicznej $N_{gr}(s_{pom} + s_0 + s_k)$ założono przy $s_0 \neq 0$ oraz ugięciu przestrzeni gruntowej wywołane palami kotwiącymi $s_k \neq 0$. Dla jednego z przykładowych pali wykazano, że $N_{gr}(s_{pom} + s_0 + s_k)$ wyraźnie się zmniejsza. Z rys. 10 i 11 wynika następujący wniosek: każda z imperfekcji może mieć wpływ na N_{gr} . Metoda zaproponowana w niniejszej pracy sugeruje, że łączne uwzględnienie obu imperfekcji wpływa na obniżenie parametru N_{gr} .

WNIOSKI

1. Przedstawiony model obliczeniowy pozwala wyznaczyć ze zbioru wartości $\{s_i, N_i\}$ niepewność pomiarową s_0 przejawiającą się w następujący sposób:
 - a) Dopasowanie się gruntu do pala (zainicjowanie współpracy pala z gruntem wymaga „dopasowania się” gruntu do pala).
 - b) Odształcenie konstrukcji zapewniającej pionową siłę (to jest oddziaływanie siłownika hydraulicznego na stalowe belki zamocowane do pali kotwiących) i jej wpływ na współpracę pala z gruntem.
 - c) Ugięcie przestrzeni przez pale kotwiące, jeżeli takie występują.
 - d) W pracy nie uwzględnia się skrócenia pala przez ściskanie osiowe i efektów, jakie to ściskanie wywołuje na mobilizację pobocznic i podstawy pala. Wpływ tego skrócenia na mobilizowanie się oporu pobocznic i podstawy jest nadal przedmiotem badań i skrócenie to na pewno zmniejsza osiadanie podstawy pala w stosunku do osiadania głowicy.
2. Wyznaczona niepewność pomiarowa umożliwia korektę zbioru danych wyznaczonych z badania statycznego obciążenia pala $\{s_{1,i} - s_0, N_i\}$.
3. Przeprowadzona analiza wskazuje na istotny wpływ niepewności pomiarowej s_0 na parametry N_{gr} . Uwzględnienie niepewności pomiarowej wpływa na zmianę N_{gr} .
4. Program dalszych badań przewiduje analizę zjawiska występowania niepewności pomiarowej podczas wykonywania badania statycznego pala oraz poszukiwanie zależności pomiędzy określaniem s_0 a technologią wykonywania pala i parametrami gruntu.
5. W oparciu o klasyczną mechanikę gruntów możliwe jest uwzględnienie wpływu wyciągania pali kotwiących podczas badania statycznego pala oraz korekta zbioru danych wyznaczonych w badaniu $\{s_{2,i}, N_i\}$.
6. Przeprowadzona analiza wskazuje na istotny wpływ korekty zbioru danych osiadanie-obciążenie, uwzględniając wyciąganie pali kotwiących, to jest związek s_k i s_0 na parametr N_{gr} .
7. W praktycznym projektowaniu, zgodnie z wcześniejszymi normami oraz aktualnie obowiązującą normą PN-EN 1197:2008, stosuje się metody stanów granicznych i współczynniki częściowe bezpieczeństwa, które korygują między innymi niedokładności pomiarowe, jednak nie wyjaśniają zjawiska.

LITERATURA

1. Chin F. K.: Estimation of the Ultimate Load of Piles Not carried to Failure. Proceedings of the Second Southeast Asian Conference on Soil Engineering.
2. Dyka, I.: Analiza i metoda obliczeń osiadania grupy pali. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2001.

3. Gai G., Gong W.: Application of bi-directional static loading test to deep foundations, Journal of rock mechanics and geotechnical engineering, 2012.
4. Gwizdała, K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej 532, Budownictwo Wodne XLI, Gdańsk, 1996.
5. Gwizdała K., Dyka I.: Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego. Politechnika Gdańska, 2001.
6. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. PWN, Warszawa, 2010.
7. Gwizdała, K., Krasieński A.: Fundamenty palowe, Obliczenia z zastosowaniem zasad Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2016.
8. Krasieński A., Wiszniewski M.: Static load test on concrete pile – instrumentation and results interpretation, 2017.
9. Krasieński A.: Obliczenia statyczne fundamentów palowych, 2004.
10. Meyer, Z., Kowalow M.: Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, 2010.
11. Meyer Z.: Analiza naprężeń na pobocznicę pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o teorię Boussinesq’a. XVIII Seminarium Naukowe Regionalne Problemy Inżynierii Środowiska, Szczecin, 2010.
12. Meyer Z., Szmeczel G.: Problemy zasad wymiarowania pali. Inżynieria Morska i Geotechnika nr 3, 2015, 444-449.
13. Meyer Z., Szmeczel G.: Określenie oporów pobocznic pala na podstawie próbnych statycznych obciążeń pala. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3, 2015, 441-444.
14. Meyer Z., Żarkiewicz K.: Analiza mobilizacji oporu pobocznic i podstawy pala na podstawie interpretacji badań modelowych. Inżynieria Morska i Geotechnika 3, 2015, 350-354.
15. Osterberg J. O.: The Osterberg load test method for bored and driven piles: the first ten years, Proceedings of the 7th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations, Westgrade Group Limited, Vienna, Austria (1998), 1998, 1-11
16. Ruban T., Kort D.: Pile load testing of concrete belled pile and rock socket pile using the Osterberg load cell, 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 2011.
17. Szmeczel G.: Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, rozprawa doktorska, 2014.
18. Wiłun Z.: Zarys Geotechniki Wydawnictwo Komunikacji i Łączności WKŁ, 2013
19. Wyniki próbnych statycznych obciążeń pali, Energopol (2018), Warszawa, Budowa drogi ekspresowej S2.
20. Żarkiewicz K.: Analiza formowania się oporu pobocznic pala w gruntach niespoistych na podstawie modelowych badań laboratoryjnych. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, rozprawa doktorska, 2017.
21. PN-83/B-02482. Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych.
22. PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Cz. 1: Zasady ogólne.