



## ANALIZA WSPÓŁPRACY PAŁA Z GRUNTEM W DUŻYM ZAKRESIE OSIADANIA

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

KRZYSZTOF ŻARKIEWICZ

Katedra Geotechniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

**Streszczenie:** W niniejszym opracowaniu przedstawiono interpretację wyników próbnego, statycznego obciążenia pały. Na podstawie wstępnych badań laboratoryjnych na palach o zmniejszonych wymiarach określono zależności umożliwiające wyznaczenie mobilizacji oporu pod podstawą pały w zależności od osiadania jego głowicy. Przedstawiono metodę wyznaczenia rozkładu oporu na pobocznicy i pod podstawą pały na podstawie wyników próbnego obciążenia i sondowania CPT. Przeanalizowano dwa pale Tubex przeznaczone pod fundament przyczółków mostu w rejonie Szczecina. Analiza polegała na określeniu charakteru rozkładu oporów w dużym zakresie osiadania, znacznie wykraczającym poza próbne obciążenie statyczne. Wykazano, że projektowane wartości granicznego oporu gruntu pod podstawą i na pobocznicy pały nie zawsze w pełni odzwierciedlają prawidłową współpracę pały w podłożu gruntowym. Opory na pobocznicy pały są mobilizowane bardzo szybko, i w zakresie próbnego obciążenia statycznego często mają decydujący wpływ w przenoszeniu obciążenia zewnętrznego.

**Słowa kluczowe:** pale, osiadanie, próbne obciążenie statyczne, tarcie na pobocznicy pały, rozkład oporów na pobocznicy i pod podstawą pały.

### 1. Wstęp

Pale jako fundamenty głębokie przenoszą obciążenia zewnętrzne poprzez opór gruntu na pobocznicy i pod podstawą pały. W projektowaniu geotechnicznym, wartość tych oporów ustalana jest na podstawie zbadanych parametrów wytrzymałościowych gruntu. Zwykle jest to opór pod stożkiem  $q_c$  z sondowania CPT. Obliczony na podstawie sondowania opór pod podstawą  $R_b$  oraz sumaryczny opór na pobocznicy  $R_s$  umożliwia określenie nośności pały  $N_{proj}$ . Sprawdzenie nośności pały polega na próbnym obciążeniu, w którym wyznacza się zależność osiadania od przyłożonego obciążenia w głowicy  $s = f(N)$ . Można zatem stwierdzić, że wyznacznikiem nośności pały są jego osiadania.

Mobilizowane opory pod stożkiem sondy CPT dotyczą oporu stawianego przez grunt przy jednostajnym, statycznym wciskaniu sondy. Osiadania pały, podczas próbnego obciążenia, sięgają najczęściej kilkunastu milimetrów. Powstaje pytanie czy słusznym jest określanie nośności pały w oparciu o wartości  $q_c$  oraz stosowanie jednakowych współczynników bezpieczeństwa pały, skoro opory pod stożkiem mobilizowane są w dużo większym zakresie osiadań niż osiadanie osiągnięte podczas próbnego obciążenia statycznego? Czy można uznać, że pale o jednakowych nośnościach, lecz w różnych warunkach gruntowych są tak samo bezpieczne?

### 2. Opis zjawiska

Wyniki próbnego obciążenia statycznego pały w postaci zbioru punktów  $\{N_i, s_i\}$  można aproksymować funkcją zaproponowaną przez Meyera i Kowalowa [3], którą opisuje równanie (1):

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

gdzie:

$C$  – parametr krzywej osiadania [mm/kN],

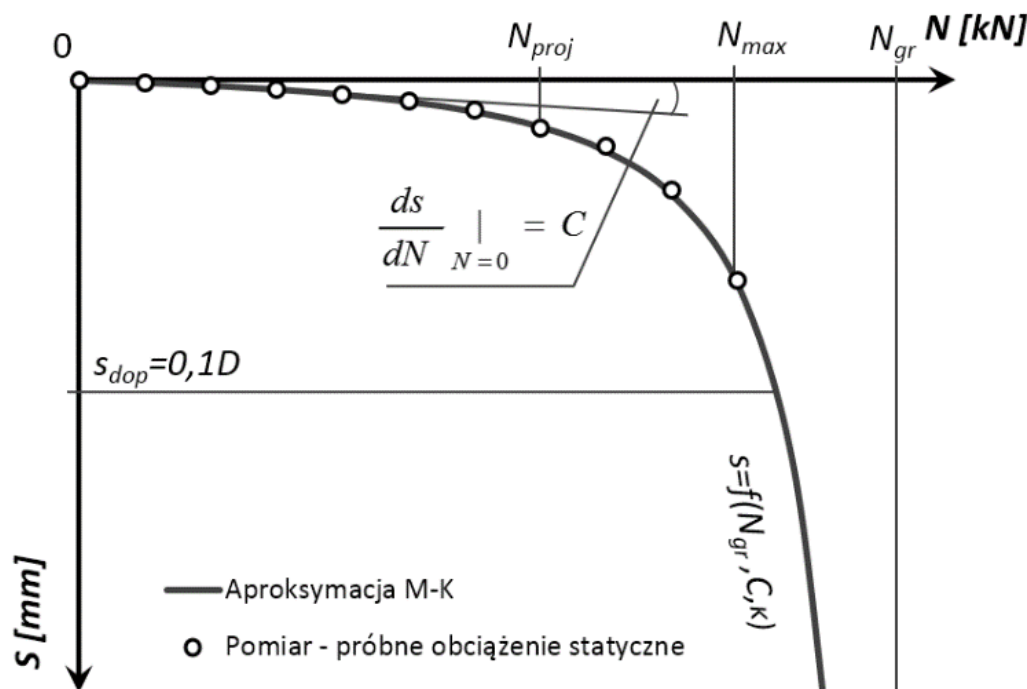
$N_{gr}$  – nośność graniczna pala, przy której pal osiada w sposób niekontrolowany [kN],

$\kappa$  – bezwymiarowy parametr krzywej osiadania [-],

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

$S_{i,pom}$  – pomierzone osiadanie głowicy pala w  $i$ -tym stopniu obciążenia [mm].

Aproksymacja metodą Meyera i Kowalowa (M-K) polega na wyznaczeniu trzech parametrów równania (1). Jednym z nich jest nośność graniczna pala  $N_{gr}$ . Odpowiada ona obciążeniu, przy którym obserwuje się bardzo duże i niekontrolowane osiadania. Stała  $C$  jest pochodną funkcji w punkcie zerowym, gdy  $s = 0$  mm i wyznacza ona początkowe nachylenie krzywej aproksymującej. Bezwymiarowy parametr  $\kappa$  odpowiada za kształt krzywej i określa szybkość zbliżania się przyłożonej siły do nośności granicznej przy stałym przyroście osiadania. Propozycje określenia parametrów krzywej M-K opisał Szmechel [5]. Wyniki aproksymacji umożliwiają przedłużenie krzywej osiadania uzyskanej z próbnego obciążenia statycznego. Znajomość dalszego kształtu krzywej pozwala na prognozowanie osiadań w większym zakresie obciążenia, często trudnym do osiągnięcia w terenie. Wyniki próbnego obciążenia wraz z aproksymowaną krzywą przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wyniki próbnego obciążenia i ich aproksymacja krzywą M-K

Siła przyłożona do głowicy pala jest przekazywana do podłoża gruntowego poprzez opór gruntu pod podstawą pala  $N_l$  i na pobocznicy pala  $T$ . Na opór pod podstawą składają się naprężenia ściskające działające na powierzchni podstawy pala. Opór na pobocznicy jest całką

naprężeń stycznych na pobocznicę pała, mobilizowanych na obwodzie pała, obliczoną na długości pała.

$$N_1 = \sigma_1 A \quad (2)$$

gdzie:

$\sigma_1$  – średnie naprężenie występujące bezpośrednio pod podstawą pała [kPa],  
 $A$  – pole podstawy pała [m<sup>2</sup>].

$$T = \pi D \int_0^{z=L} \tau dz \quad (3)$$

gdzie:

$D$  – średnica pała [m],  
 $\tau$  – składowa styczna naprężenia na pobocznicę pała [kPa].

Opór na pobocznicę mobilizowany podczas próbnego obciążenia statycznego można obliczyć na podstawie równania (4).

$$T(s_i) = N(s_i) - N_1(s_i) \quad (4)$$

Składowe równania (4) można opisać funkcjami aproksymującymi z metody M-K.

$$N(s_i) = N_{gr,2} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa_2 s_i}{C_2 N_{gr,2}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_2}} \right] \quad (5)$$

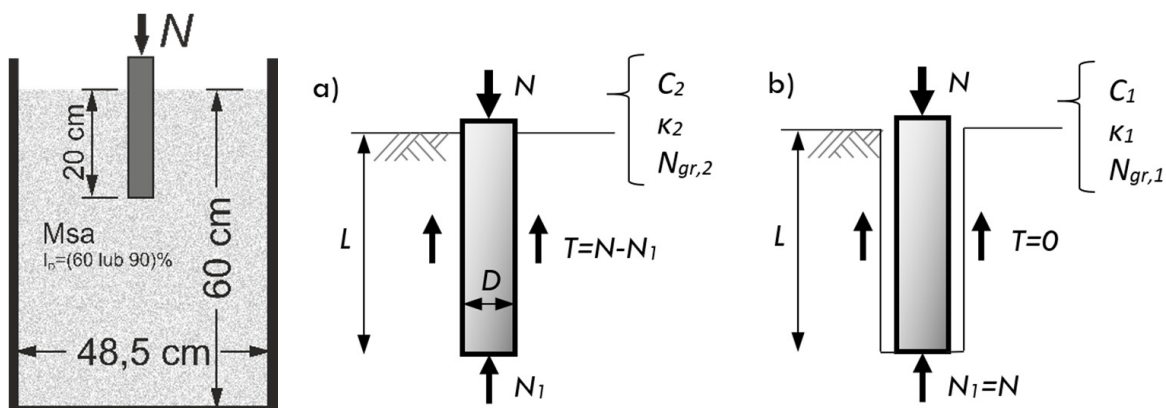
$$N_1(s_i) = N_{gr,1} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa_1 s_i}{C_1 N_{gr,1}} \right)^{-\frac{1}{\kappa_1}} \right] \quad (6)$$

Z aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego można wyznaczyć parametry równania (5) tj.  $N_{gr,2}$ ,  $C_2$ ,  $\kappa_2$ . Aby wyznaczyć  $N_1(s)$  należy znać:  $N_{gr,1}$ ,  $C_1$ ,  $\kappa_1$ . W celu wyznaczenia zależności jak parametry równania (5) (rys. 2a) zależą od parametrów równania (6) (rys. 2b) wykonano badania eksperymentalne na modelach pał w warunkach laboratoryjnych.

Program badań modelowych zakładał przeprowadzenie statycznych obciążeń pał o zmniejszonych wymiarach. Przebadano pale betonowe o średnicy 4,64 cm i długości 20 cm. Pale umieszczano w komorze stalowej wypełnione piaskiem średnim zagęszczonym statycznie warstwami o grubości 5 cm. Zagęszczenie określano na próbkach o nienaruszonej strukturze. Badania podzielono na dwie części, różniące się udziałem pobocznic w przenoszeniu obciążenia zgodnie z rys. 2.

W badaniach modelowych założono, że mobilizacja oporu na pobocznicę pała nie ma wpływu na wartość oporu pod podstawą [4]. Analiza teoretyczna tego zagadnienia wskazuje, iż w analizie ogólnego stanu odkształcenia-naprężenia, w półprzestrzeni gruntowej, naprężenia występujące na pobocznicę wywołują stan naprężeń również w podstawie. Opis tego zjawiska przedstawił Meyer [1] w zakresie małych osiadań. Analiza tych wyników wskazuje, iż dla celów praktycznych obliczeń wpływ ten, na obecnym etapie badań, można pominąć. W związku z tym opór pod podstawą pała będzie jednakowy w warunkach, gdy pobocznicą

przejmując część obciążenia oraz w warunkach kiedy pobocznica zostanie wykluczona z przenoszenia obciążenia zewnętrznego, zgodnie z rysunkiem 2.



Rys. 2. Komora kalibracyjna oraz schemat mobilizacji oporu gruntu pod podstawą pala w warunkach gdy: a) pobocznica przejmując część obciążenia; b) pobocznica jest wykluczona z przenoszenia obciążenia

Wykonano dwie serie badań przy różnym zagęszczeniu gruntu w komorze: seria I przy zagęszczeniu początkowym  $I_D = 60\%$  oraz seria II przy zagęszczeniu początkowym  $I_D = 90\%$ . Z badań modelowych w postaci próbnych obciążeń uzyskano zbiory danych  $\{N_{i,s_i}\}$  oraz  $\{N_{l,i,s_i}\}$ . Następnie metodą M-K otrzymano parametry krzywych opisujących próbne obciążenia  $N_{gr,2}$ ,  $C_2$ ,  $\kappa_2$  oraz  $N_{gr,1}$ ,  $C_1$ ,  $\kappa_1$ . Znając  $N(s)$  oraz  $N_l(s)$  możliwe było określenie mobilizacji oporu na pobocznicy modelowych pali z równania (4). W ten sposób określono również graniczną wartość oporu na pobocznicy pala. Stosunek maksymalnego oporu na pobocznicy do nośności granicznej pala opisano funkcją  $f$ ,

$$\frac{T_\infty}{N_{gr,2}} = f \quad (7)$$

gdzie:

$T_\infty$  – graniczny opór na pobocznicy mobilizowany przy niekontrolowanym osiadaniu [kN],  
 $N_{gr,2}$  – graniczna nośność pala uzyskiwana przy niekontrolowanym osiadaniu [kN].

Zaproponowano przedstawienie funkcji  $f$  w postaci równania (8), tj.

$$f = (\alpha - 1)^n (A + B \kappa_2) \quad (8)$$

gdzie:

$$\alpha = \frac{c_1}{c_2} [-].$$

Badania wskazywały na istotny wpływ zagęszczenia gruntu w komorze na rozkład oporów na pobocznicy i pod podstawą pala. Współczynniki  $A$  i  $B$  oraz wykładnik potęgi  $n$  uzależniono od zagęszczenia gruntu  $I_D$  i wyznaczono na podstawie badań modelowych próbnych obciążeń pali. Funkcja przyjmuje postać równania (9).

$$f = \left( \frac{C_1}{C_2} - 1 \right)^{-1,31+1,43I_D} [0,85I_D - 0,42 + (0,17I_D - 0,10)\kappa_2] \quad (9)$$

Badania laboratoryjne umożliwiły ponadto ustalenie zależności (10).

$$\kappa_1 = 0,6\kappa_2^{1,17} \quad (10)$$

Korzystając z równania (4) i zależności otrzymanych na podstawie badań laboratoryjnych istnieje możliwość wyznaczenia granicznego oporu podstawy pała modelowego według wzoru (11),

$$N_{gr,1} = N_{gr,2}(1 - f) \quad (11)$$

W warunkach terenowych, próbnym obciążeniach statycznych pali, otrzymuje się zbiór danych  $\{N_i, s_i\}$ , który jest podstawą do wyznaczenia parametrów modelu M-K tj.  $N_{gr,2}$ ,  $C_2$ ,  $\kappa_2$ .

Zależności określone w badaniach modelowych (równania 9,10,11) oraz parametry podłoża gruntowego w postaci oporu stożka CPT  $q_c$  i zagęszczenia gruntu  $I_D$  umożliwiają wyznaczenie dystrybucji przyłożonego obciążenia na opór mobilizowany na pobocznicy i pod podstawą pała, w pełnym zakresie nośności pała. Stałą  $C_1$  dla celów praktycznych można określić na podstawie oporu stożka CPT (12) [2] z zależności.

$$C_1 = \frac{2}{\pi D \sigma_{1,\max}^{4/3}} \quad (12)$$

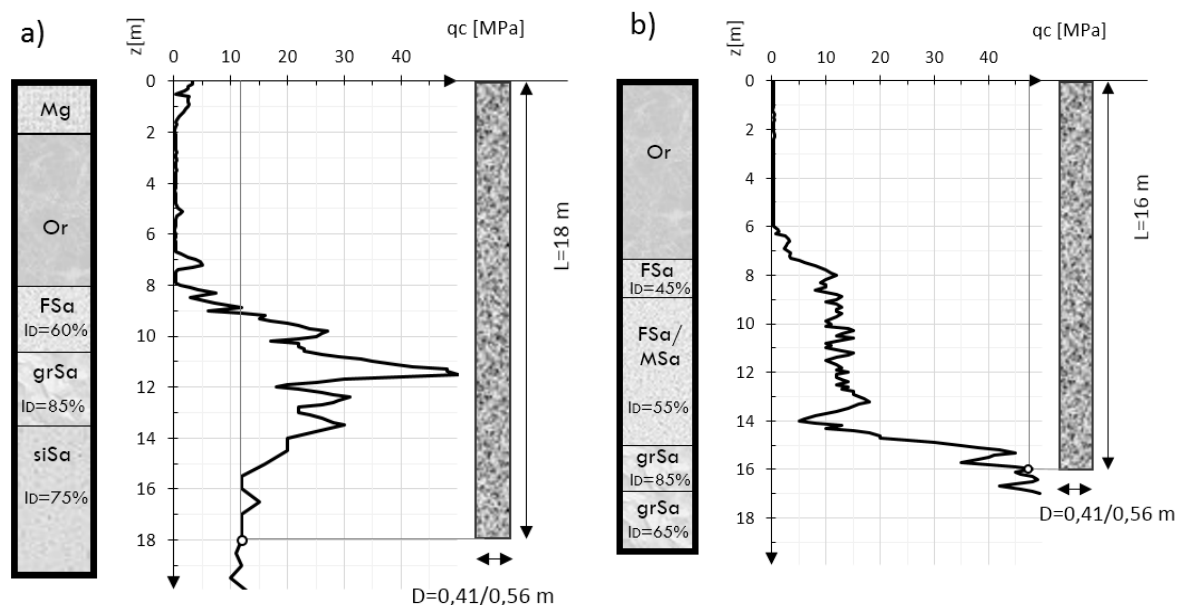
gdzie:

$\sigma_{1,\max}$  – maksymalne naprężenia pod podstawą pała. Dla celów praktycznych:  $\sigma_{1,\max} = q_c$

### 3. Przykład obliczeniowy

Na podstawie wyznaczonych zależności, z badań modelowych, przeprowadzono analizę nośności rzeczywistych pali. Analizie poddano pale Tubex, które należą do grupy pali przemieszczeniowych. Wykonywanie pali Tubex polega na wkręcaniu stalowej rury zakończonej ostrzem. Podczas wiercenia pompuje się iniekt cementowy pod ciśnieniem, który ułatwia wiercenie i dodatkowo cementuje grunt pod podstawą i na pobocznicy pała. Po wwierceniu rury, do jej wnętrza wprowadza się zbrojenie i zalewa betonem. W ten sposób pale Tubex uzyskują bardzo dużą wytrzymałość wewnętrzną trzonu. W poniższej analizie użyto dwa pale Tubex wykonane pod przyczółki mostu w rejonie Szczecina.

Pale o średnicy 0,41/0,56 m i długości 16 m i 18 m wykonano w gruntach organicznych, a ich podstawy zostały wwiercone w grunty niespoiste, składające się z piasków i żwirów w stanie od średniozagęszczonego do bardzo zagęszczonego. Projektowane nośności pali wynosiły  $N_{proj} = 2104$  kN dla pała „A” o długości 18 m i  $N_{proj} = 1880$  kN dla pała „B” o długości 16 m. Warunki gruntowe przedstawiono na rys 3.



Rys. 3. Profile gruntowe wraz z wynikami sondowań CPT: a) pal „A”, b) pal „B”

W celu sprawdzenia dostatecznej nośności pali wykonano próbne obciążenia statyczne. Wyniki testów aproksymowano metodą Meyera i Kowalowa. Geometrie pali wraz z parametrami aproksymacji M-K zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry pali i wyniki aproksymacji M-K

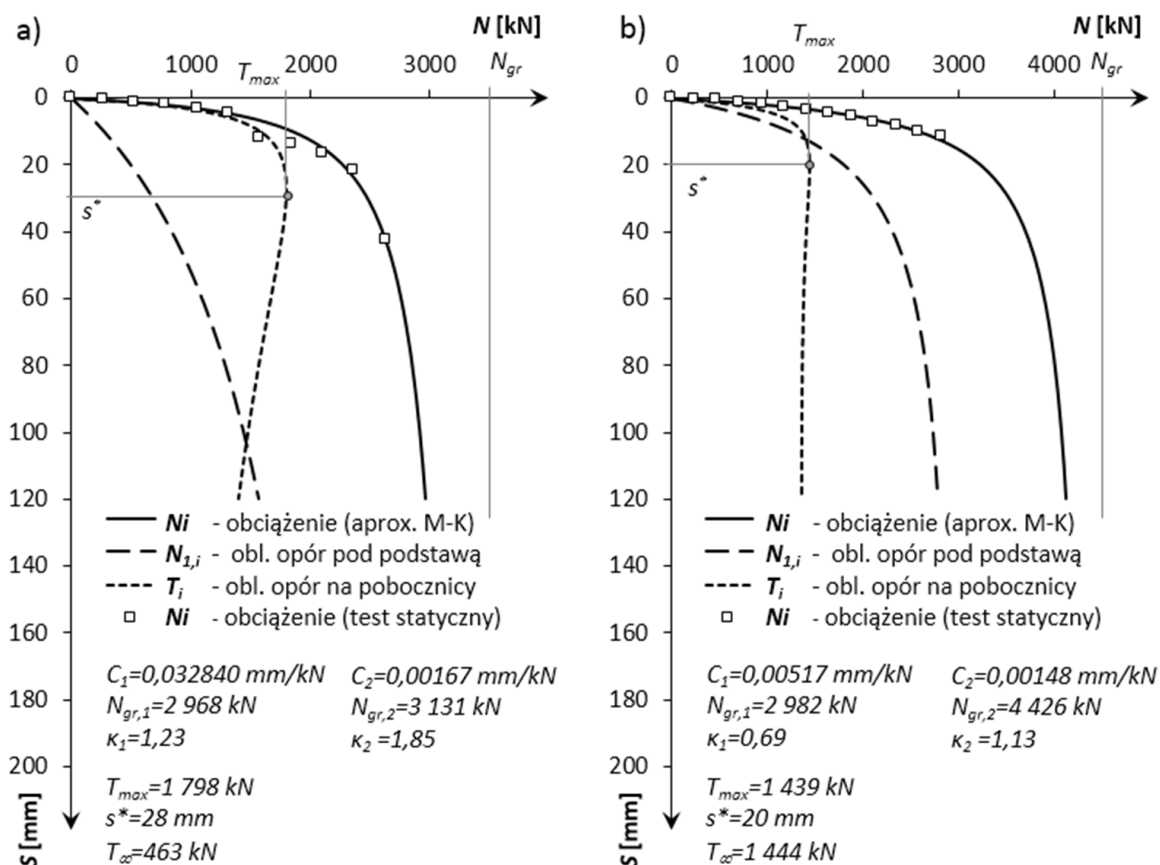
| Symbol pala | Geometria pala |         | Nośność proj. | Parametry aproksymacji wyników próbnego obciążenia |                 |                |
|-------------|----------------|---------|---------------|----------------------------------------------------|-----------------|----------------|
|             | $D$ [m]        | $L$ [m] |               | $C_2$ [mm/kN]                                      | $N_{gr,2}$ [kN] | $\kappa_2$ [-] |
| A           | 0,41/0,56      | 18      | 2104          | 0,00167                                            | 3430,78         | 1,85           |
| B           |                | 16      | 1880          | 0,00149                                            | 4425,87         | 1,13           |

Na podstawie znanych warunków gruntowych oraz parametrów aproksymacji wyników próbnego obciążenia statycznego pali wykorzystując zależności (9–12) określono kolejne parametry określające mobilizację oporu pod podstawą pala. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń mobilizacji oporu na pobocznicy i pod podstawą pala

| Symbol pala | Parametry aproksymacji wyników próbnego obciążenia |                 |                | Warunki gruntowe pod podstawą pala |             | Parametry krzywej M-K dla oporu podstawy pala |                 |                | Rozkład oporów |
|-------------|----------------------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
|             | $C_2$ [mm/kN]                                      | $N_{gr,2}$ [kN] | $\kappa_2$ [-] | $I_D$ [%]                          | $q_c$ [MPa] | $C_1$ [mm/kN]                                 | $N_{gr,1}$ [kN] | $\kappa_1$ [-] |                |
| A           | 0,00167                                            | 3430,78         | 1,85           | 75                                 | 12          | 0,03284                                       | 2968,06         | 1,23           | 0,135          |
| B           | 0,00149                                            | 4425,87         | 1,13           | 85                                 | 48          | 0,00517                                       | 2982,30         | 0,69           | 0,326          |

Parametry  $N_{gr,1}$ ,  $C_1$ ,  $\kappa_1$  umożliwiły wyznaczenie krzywej określającej opór gruntu pod podstawą pala przy zmieniającym się osiadaniu głowicy. Na podstawie znanych wartości siły przyłożonej w głowicy i zmobilizowanego oporu pod podstawą pala przy danym osiadaniu, na podstawie równania (4) określono opór na pobocznicy pala.



Rys. 4. Rozkład oporów wyznaczony na podstawie wyników próbnego obciążenia i badań CPT, a) pal „A”, b) pal „B”

#### 4. Podsumowanie

Analiza wyników obliczeń wskazuje, iż nośność graniczna obu pali różni się o około 1295 kN. Wyjaśnienie powodów, dla których wystąpiła tak duża różnica sugeruje, że w obu przypadkach mamy inny profil gruntowy, podany na rys. 3. Z rysunku widać wyraźnie, że podstawa pala „B” trafia na grunt znacznie lepszy niż podstawa pala „A”. Zdaniem autorów, może to być głównym powodem zróżnicowania nośności granicznych przedstawionych pali. Należy zwrócić uwagę, iż z rys. 4 wynika różna mobilizacja naprężeń na pobocznicy pala. Udział oporu gruntu na pobocznicy w ogólnej nośności pala, dla pala „A” jest znacznie większy niż dla pala „B”.

Obliczając nośność pala na wartościach maksymalnych bez uwzględniania współczynników bezpieczeństwa okazuje się, że nośność pala „A” jest około 340 kN większa od nośności pala „B”, co byłoby zgodne z obliczeniami projektowymi. Powyższa analiza wskazuje jednak, że zachowanie pali w zakresie próbnego obciążenia jest zupełnie inne, i aby poznać rzeczywistą charakterystykę współpracy pala w gruncie należy dokładnie rozpatrywać przebieg zależności obciążenie-osiadanie z uwzględnieniem rozkładu oporów na pobocznicy i pod podstawą pala.

#### 5. Wnioski

Próbne obciążenia statyczne pala mogą być wykorzystywane do statystycznej aproksymacji krzywej obciążenie-osiadanie w całym zakresie obciążeń, również poza zakresem próbnych obciążeń wykorzystując krzywą Meyera i Kowalowa.

Istotnym elementem w projektowaniu pali jest określenie sposobu w jaki następuje mobilizacja oporu poboczniczy i podstawy pala przy zwiększaniu osiadania.

Badania prowadzone w Katedrze Geotechniki ZUT wskazują, że wykres zmiany średnich naprężeń na poboczniczy pala wraz z osiadaniem może osiągać ekstremum już przy niewielkich osiadaniach. Po przekroczeniu tych osiadań nośność poboczniczy maleje i w określonych warunkach nośność poboczniczy dla dużych osiadań może być 3 krotnie mniejsza niż nośność maksymalna. Oznacza to, że maleją siły wzajemnego oddziaływania grunt-pobocznicza pala.

Badania modelowe, w których analizowano mobilizację naprężeń na poboczniczy i w podstawie pala potwierdzają możliwość przyjęcia, dla celów praktycznych, zasady superpozycji dwóch przypadków obciążeń (z udziałem i bez udziału poboczniczy). W badaniach modelowych, w prosty sposób, można było otworzyć sytuację, w której nie występuje reakcja na poboczniczy pala.

### Literatura

1. Meyer Z. : Analiza naprężeń na poboczniczy pala oraz pod podstawą pojedynczego pala w oparciu o liniową teorię Boussinesqa. XVIII Seminarium Naukowe. Regionalne Problemy Ochrony Środowiska. Szczecin 2010.
2. Meyer Z. : Obliczenia inżynierskie osiadania fundamentów. Monografia, Wyd. ZAPOL, Szczecin 2012.
3. Meyer Z., Kowalów M. Model krzywej aproksymującej wyniki testów statycznych pali. Inżynieria Morska i Geotechnika. 03/2010.
4. Meyer Z., Żarkiewicz K. Określenie maksymalnych składowych stycznych naprężeń na poboczniczy pala podczas badania statycznego. Inżynieria Morska i Geotechnika. 03/2014.
5. Szmechel G. Określenie nośności granicznej pali na podstawie próbnych obciążeń statycznych w ograniczonym zakresie. Rozprawa doktorska. Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie. Szczecin 2014.

### THE ANALYSIS OF PILE COOPERATION IN SOIL IN LARGE OF SETTLEMENT RANGE

**Abstract:** The paper presents results of static pile load test interpretation. The formula describing relation of skin friction and settlement of the head of the pile was formulated on the results of preliminary laboratory tests. The method of load transfer distribution on the skin friction and resistance under the base of the pile based on static load test and CPT's results was shown. Two piles Tubex of the foundation of the bridge abutments from Szczecin were analysed. The analysis involved determining the nature of the distribution of resistance to a large range of settlement, far beyond the static load test. It was shown that the proposed limit values of skin friction and soil resistance under the base of the pile is not always good to describe the real load-settlement behavior of the pile. Skin friction of the pile is mobilised very quickly and often has the most decisive role in the transmission of external load in the range of static pile load test.

**Keywords:** pile, settlement, static pile load test, skin friction, load distribution in piles.