

Wykorzystanie metody funkcji transformacyjnych do analizy nośności i osiadań pali CFA

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała – Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Dr inż. Maciej Stęczniewski – Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Pale CFA są zaliczane do pali wierconych. Formuje się je za pomocą ciągłego świdra ślimakowego, wwierca w grunt na pełną długość świdra, powodując częściowe rozpychanie gruntu na boki oraz częściowe wynoszenie gruntu na powierzchnię. Po zakończeniu wiercenia podczas wyciągania świdra przez rurę rdzeniową pod ciśnieniem jest tłoczona mieszanka betonowa, która powinna wypełnić przestrzeń pod świdrem. Zbrojenie pala jest wprowadzane bezpośrednio po betonowaniu. W związku z częstymi błędami stwierdzonymi w wykonawstwie należy zachować właściwe rygory technologiczne wykonawstwa. Jest to szczególnie istotne w przypadku wykonywania pali w gruntach

niespoistych. Praktyczne doświadczenia i próbne obciążenia statyczne wskazują na bardzo duże trudności w prognozowaniu pełnej krzywej osiadania na podstawie badań geotechnicznych gruntu. Rzeczywiste krzywe charakteryzujące pale CFA mogą znacząco różnić się nawet w podobnych warunkach geotechnicznych i zbliżonych parametrach geometrycznych. W artykule przedstawiono analizę pracy pali CFA wykonanych w gruntach niespoistych, gruntach niespoistych przewarstwionych namułami oraz gruntach spoistych. Do analizy wykorzystano metodę funkcji transformacyjnych. Obliczenia wykonano programem PALOS [1].

Ze względu na bardzo zróżnicowany charakter pracy pali CFA w zależności od warunków gruntowych w artykule przeprowadzono analizę pali, w których podstawa znajduje się w gruntach niespoistych, na pobocznicy występują grunty niespoiste oraz niespoiste przewarstwione namułami (16 pali) i grunty niespoiste przewarstwione gruntami spoistymi (2 pale). Dodatkowo wykonano wstępne obliczenia do pali, których podstawy posadowiono w gruntach spoistych (3 pale). W wyniku obliczeń ustalono, że należy wykonać pełną analizę pracy pali w gruntach spoistych przy odpowiednio dużej liczbie pali w celu uzyskania miarodajnych wyników. Wykorzystano wyniki próbnych obciążeń statycznych pali wykonanych zgodnie z zaleceniami normy PN-83/B-02482 [5]. Rozpatrywano pale o średnicy 0,40/0,42 m o długościach 12,5 ÷ 14,4 m (6 pali), średnicy 0,50 m o długościach 7,5 ÷ 16,0 m (7 pali), średnicy 0,60/0,63 m o długościach 8,1 ÷ 13,0 m (5 pali), średnicy 0,70 m o długościach 17,0 m i 20,0 m (2 pale) oraz pal o średnicy 1,02 m i długości 13,6 m. W sumie do analizy wykorzystano łącznie badania 21 pali. Wszystkie pale wykonano jako tzw. "produkcyjne" w normalnym cyklu budowy do przenoszenia obciążeń od konstrukcji. Warunki geotechniczne ustalono na podstawie wierceń, sondowań i badań laboratoryjnych.

OKREŚLENIE KRZYWEJ OSIADANIA PALA

W przeprowadzonej analizie do ustalenia pełnej krzywej osiadania pala oraz rozdziału nośności na podstawie i pobocznicy w zależności od obciążenia wykorzystywano krzywoliniowe funkcje transformacyjne. Są to funkcje opisujące zależność pomiędzy oporem na pobocznicy pala a przemieszczeniem jego dowolnego punktu (krzywa t - z) oraz zależność pomiędzy oporem pod podstawą pala a jej przemieszczeniem (krzywa q - z). Pełną krzywą osiadania można zbudować na podstawie znajomości funkcji t - z i q - z oraz odkształcalności własnej pala. Do obliczeń przyjęto funkcje potęgowe.

Dla podstawy pala:

$$q = q_f \cdot \left(\frac{z}{z_f} \right)^\beta \quad \text{dla } z \leq z_f$$

$$q = q_f \quad \text{dla } z > z_f$$

gdzie:

q – opór podstawy,

z – przemieszczenie podstawy,

q_f – graniczny, jednostkowy opór pod podstawą pala,

z_f – przemieszczenie pala, przy którym następuje umowna mobilizacja maksymalnych oporów pod podstawą.

Dla pobocznicy pala:

$$t = t_{\max} \cdot \left(\frac{z}{z_v} \right)^\alpha \quad \text{dla } z \leq z_v$$

$$t = t_{\max} \quad \text{dla } z > z_v$$

gdzie:

t – opór pobocznicy,

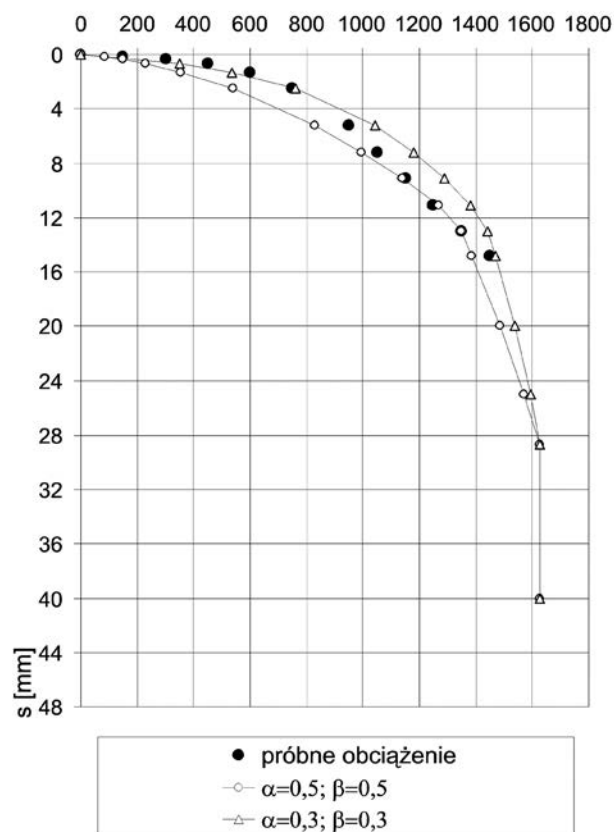
z – przemieszczenie pobocznicy,

$t_{\max}$ – graniczny, jednostkowy opór na pobocznicy pala,

z_v – przemieszczenie pala, przy którym następuje umowna mobilizacja maksymalnych oporów tarcia na pobocznicy.

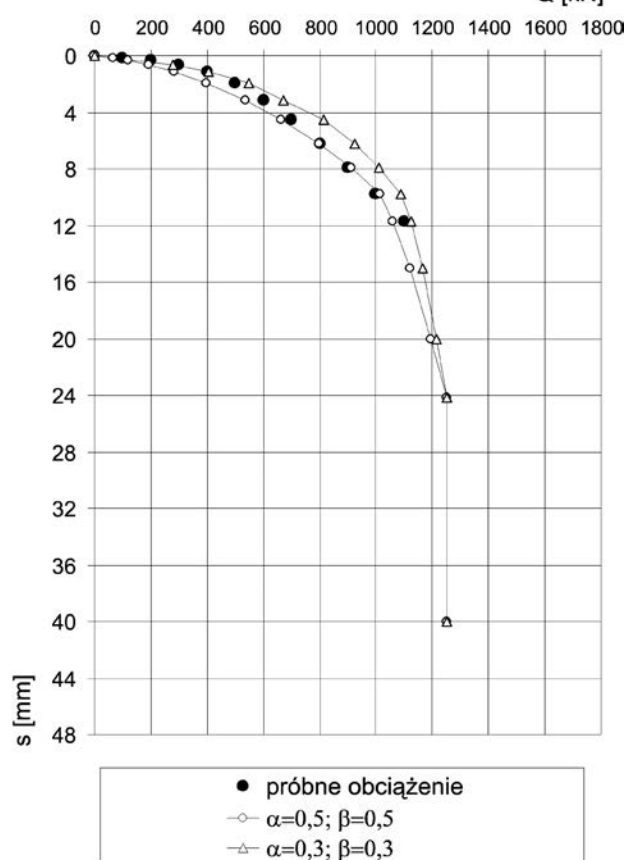
Pal 1, D = 0,5 m, L = 13,5 m

Q [kN]

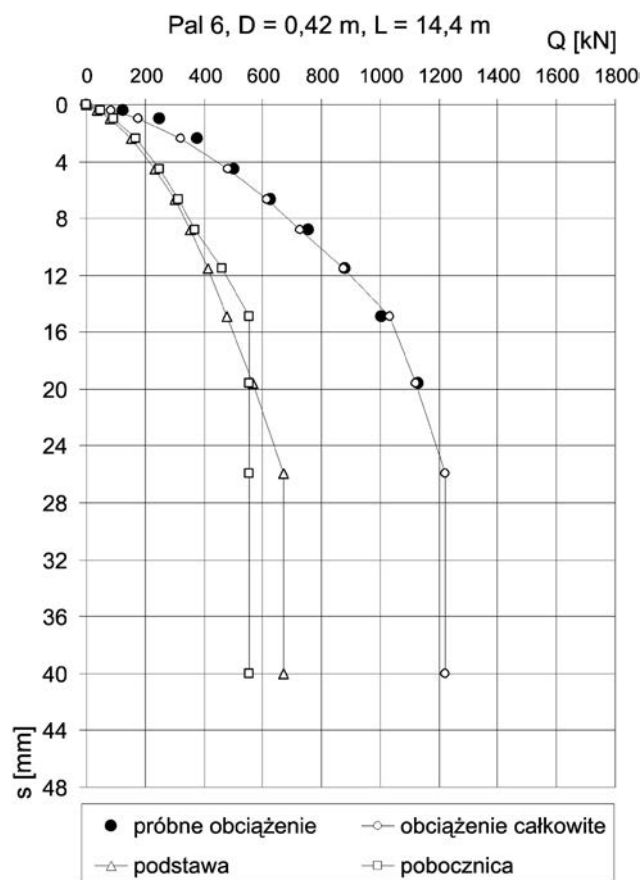
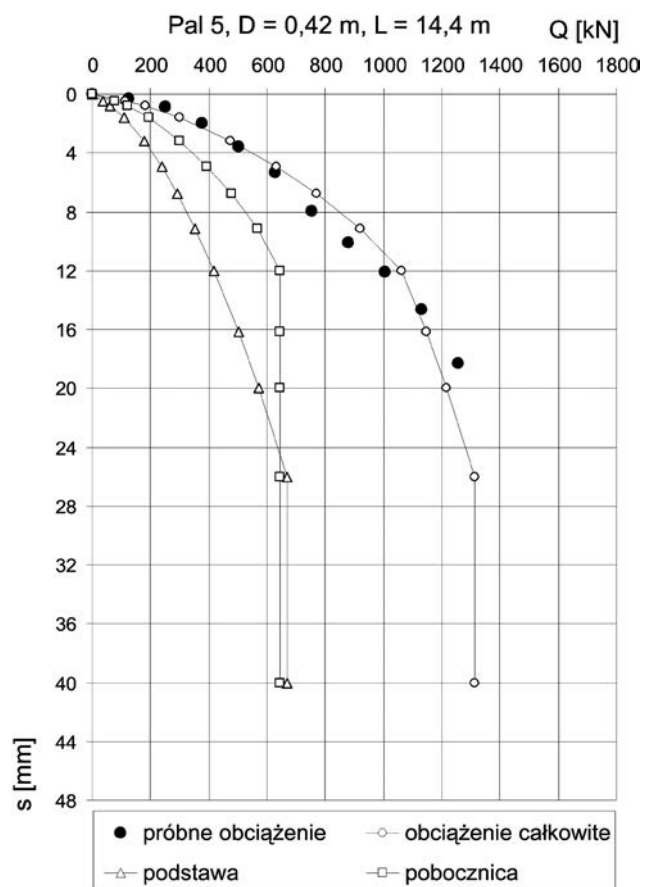
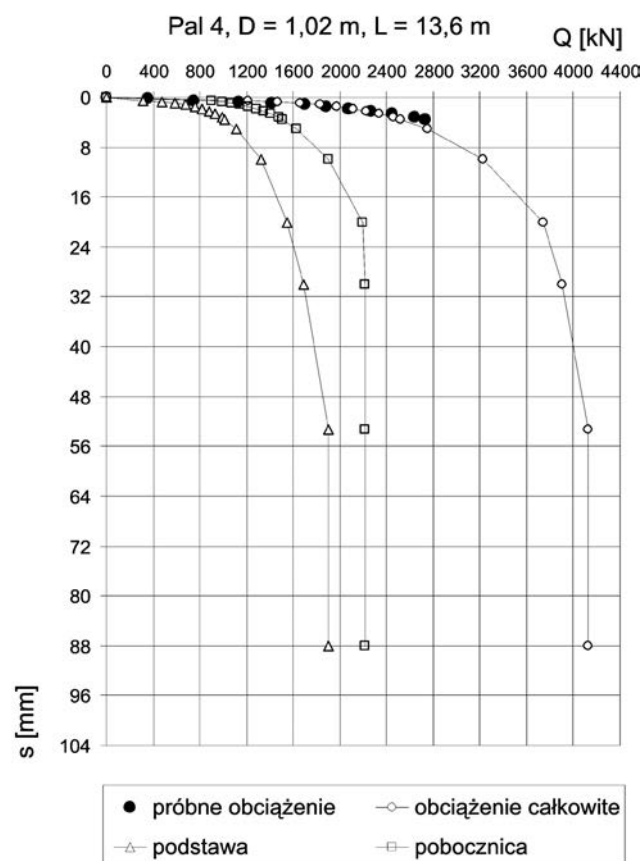
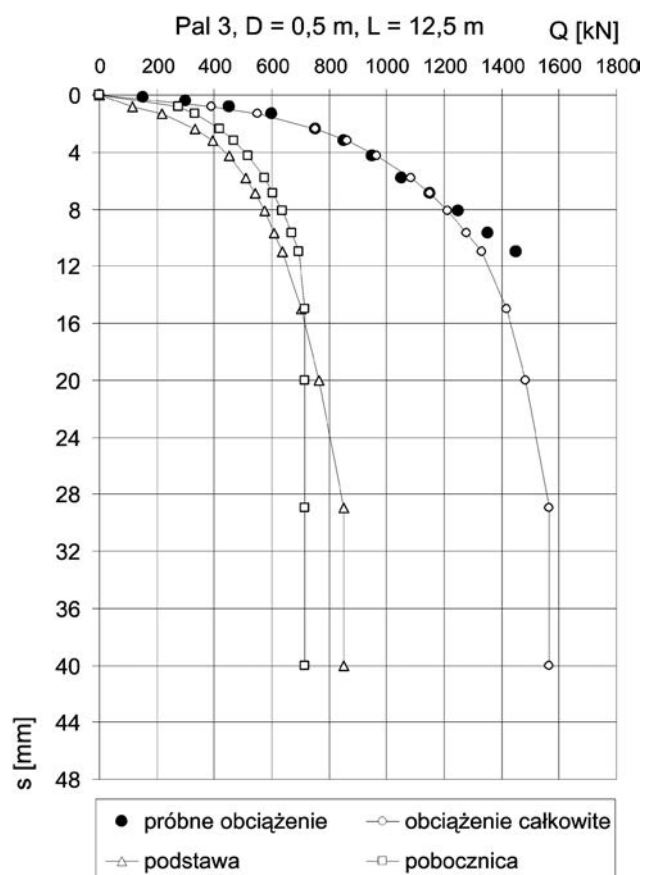


Pal 2, D = 0,4 m, L = 12,5 m

Q [kN]



Rys. 1. Krzywe osiadania, pale w gruntach niespoistych



Rys. 2. Krzywe osiadania, pale w gruncie niespoistym, rozdział nośności na podstawę i pobocznice

Założenia do metody funkcji transformacyjnych przedstawiono szczegółowo w [1, 2]. Obliczenia wykonano programem PALOS [1]. W trakcie obliczeń pal jest dzielony na skończoną liczbę odkształcalnych elementów współpracujących w węzłach z podłożem gruntowym poprzez opisane funkcje potęgowe t - z i q - z . W sposób iteracyjny oblicza się zależność między obciążeniem a przemieszczeniem pala.

OBLICZENIA I ANALIZA WYNIKÓW

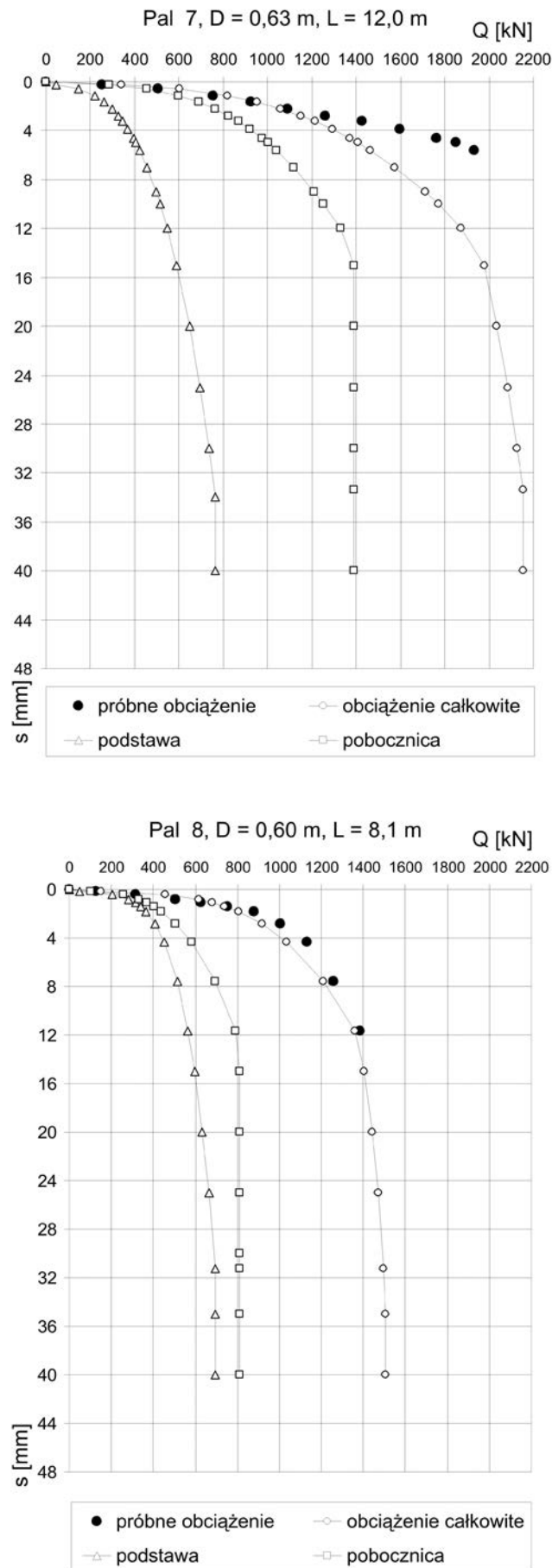
W celu przeprowadzenia analizy pracy pali CFA było niezbędne określenie nośności granicznej oraz rozdział nośności na pobocznicy i podstawę pala. Wykorzystano metodę funkcji transformacyjnych opisaną powyżej. Do obliczeń przyjmowano zróżnicowane wartości jednostkowych oporów na pobocznicy i pod podstawą pala w celu ustalenia ich rzeczywistej wartości. W odniesieniu do normy PN-83/B-02482 pozwoliło to na określenie wartości współczynników technologicznych dla podstawy i pobocznicy pali CFA. W analizie zastosowano współczynniki technologiczne w zakresie $0,8 \div 1,3$ dla pobocznicy pali oraz $0,8 \div 1,4$ dla podstaw pali (w stosunku do wyjściowych wartości oporów jednostkowych według PN-83/B-02482). W celu określenia pełnej krzywej osiadania parametry funkcji potęgowych rozpatrywano w szerokim zakresie. Wartości wykładników potęgowych α i β ustalano w zakresie $0,2 \div 0,7$. Zakres przemieszczeń niezbędnych do mobilizacji oporów pod podstawą rozpatrywano w zakresie $z_f = 0,05 \div 0,10 D$ i w zakresie $z_v = 0,01 \div 0,03 D$ dla pobocznicy (gdzie D jest średnicą pala).

Warunki gruntowe w analizowanych obiektach to piaski drobne, średnie i grube, średnio zagęszczone i zagęszczone (w kilku przypadkach przewarstwione namułami), piaski gliniaste, gliny piaszczyste i ropy, w stanie plastycznym, twardoplastycznym i półzwardłym.

Do analizy wykorzystano kilkadziesiąt wariantów obejmujących zmienne wartości współczynników technologicznych i parametrów funkcji transformacyjnych. W każdym wariantcie przyjęto wartości $z_f = 0,05 D$ i $z_v = 0,02 D$ ustalone na podstawie analizy rzeczywistych krzywych osiadania. Na rys. 1 ÷ 3 przedstawiono przykładowe krzywe osiadania uzyskane w trakcie próbnych obciążeń statycznych i wybrane warianty przybliżeń.

Na rys. 1 przedstawiono, poza rzeczywistą krzywą osiadania, krzywe osiadania przy współczynnikach technologicznych 1,0 (pal 1) i 1,1 (pal 2). W pierwszej fazie pracy pali stwierdzono dobrą zgodność krzywej rzeczywistej z krzywą o wartościach parametrów funkcji transformacyjnych $\alpha = 0,3$ i $\beta = 0,3$, co odpowiada osiadaniom głowicy $0,004 \div 0,006 D$. Powyżej tych osiadania, aż do nośności granicznej, stwierdzono zgodność krzywej rzeczywistej z krzywą o wartościach parametrów funkcji transformacyjnych $\alpha = 0,5$ i $\beta = 0,5$. Na rys. 2 przedstawiono dodatkowo rozdział nośności na podstawę i pobocznicy w 4 wybranych palach (pale 3 ÷ 6). Osiadania zgodne z tymi wariantami stwierdzono w 12 palach posadowionych w gruntach niespoistych. Dla 4 pali posadowionych w gruntach niespoistych ustalono współczynnik technologiczny o wartości 0,9, a dla 2 pali o wartości 0,8.

Na rys. 3 przedstawiono krzywe osiadania pali posadowionych w gruncie spoistym wraz z rozdziałem nośności na podstawę i pobocznicy. W obu palach przyjęto współczynnik technologiczny 1,3 dla pobocznicy i 1,4 dla podstawy. Przyjęte



Rys. 3. Krzywe osiadania, pale w gruncie spoistym

parametry funkcji transformacyjnych: $\alpha = 0,3$ i $\beta = 0,3$ (pal 7) oraz $\alpha = 0,3$ i $\beta = 0,2$ (pal 8). W trzecim palu stwierdzono podobne parametry.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że za pomocą funkcji transformacyjnych można, w wystarczającym dla inżynierskich zastosowań zakresie, oszacować nośność i osiadanie pali wraz z rozdziałem nośności na podstawę i pobocznice. Oszacowanie musi odnosić się do konkretnych warunków gruntowych. W gruntach spoistych obserwuje się współczynniki technologiczne o większych wartościach niż w gruntach niespoistych. W przypadku pali CFA jest istotny nadzór nad wykonawstwem. Świadczą o tym nośności pali wykonanych w jednym obiekcie w zbliżonych warunkach gruntowych. Ze względu na szeroki zakres uzyskanych wartości α i β ($0,2 \div 0,7$) należy ustalić wpływ istotnych czynników na te parametry. Przykłady ustalenia wpływu istotnych czynników na parametry funkcji transformacyjnych przy wykorzystaniu analizy regresji wielokrotnej przedstawiono w innych pracach autorów [3, 4].

Do oszacowania nośności pali posadowionych w gruntach niespoistych analizy wykonane w ramach obecnej pracy wskazują, że można przyjmować wartości współczynników technologicznych przy wykorzystaniu wartości oporów jednostkowych określonych według normy PN-83/B-02482 dla podstawy i pobocznic, o wartości 1,0 (uzyskana wartość średnia przy $n = 18$ pali posadowionych w gruntach niespoistych i niespo-

istych przewarstwionych namulami wyniosła 0,97, współczynnik zmienności $v = 0,09$).

Pale CFA posadowione w gruntach spoistych będą przedmiotem następnych analiz.

Zgodnie z zasadami przyjętymi w Eurokodzie 7 [6] szczególnie zaleca się wykorzystanie doświadczeń lokalnych. Wykonane w szerokim zakresie analizy tego rodzaju przyczynią się do harmonizacji doświadczeń krajowych z zaleceniami Eurokodu 7.

LITERATURA

1. Gwizdała K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Nr 532, Budownictwo Wodne Nr 41, Gdańsk, 1996.
2. Gwizdała K.: Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Tom 1. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011
3. Gwizdała K., Stęczniewski M.: Determination of the bearing capacity of pile foundations based on CPT test results. Proceedings of the 3rd International Seminar on Soil Design Parameters from In Situ and Laboratory Tests. Poznań, September 2006. *Studia Geotechnica et Mechanica*, No. 1-2/2007, 55-67.
4. Stęczniewski M., Gwizdała K.: Obliczanie nośności i osiadania pali pojedynczych na podstawie badań sondą statyczną CPT. Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Budownictwo, z. 97. XIII Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania. Szczyrk, czerwiec 2003, 267-278.
5. PN-83/B-02482, Nośność pali i fundamentów palowych.
6. PN-EN 1997-1:2008 – Eurokod 7: Projektowanie Geotechniczne. Część 1. Zasady ogólne.