

Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego

W zakresie obliczeń osiadań, a w szczególności wyznaczania krzywej osiadania pali, wciąż poszukiwane są dokładniejsze metody obliczeniowe.

W analizie pracy pali mamy do czynienia z wieloma zjawiskami o skomplikowanej naturze, które zachodzą w procesie przekazywania obciążenia przez pale do podłoża gruntowego. Zjawiska te są trudne do dokładnego zdefiniowania i teoretycznego opracowania. Tworzenie odpowiednich narzędzi do projektowania fundamentów palowych wymaga przede wszystkim dobrego poznania i zrozumienia procesów zachodzących w tak zmiennym ośrodku, jakim jest podłoże gruntowe wraz z przekazującymi obciążenie palami.

Głównym źródłem wiedzy o zjawiskach zachodzących w sferze oddziaływania między palem i ośrodkiem gruntowym są wyniki próbnych obciążeń, obserwacje budowli posadowionych na palach, wyniki badań modelowych oraz analiza obliczeniowa oparta na założeniach teoretycznych z wykorzystaniem technik numerycznych.

Badania modelowe ze względu na trudności w odwzorowaniu rzeczywistej pracy pali w podłożu gruntowym mogą służyć tylko do analizy jakościowej zjawiska.

Próbne obciążenia pali pojedynczych stanowią najlepsze źródło wiedzy zarówno jeśli chodzi o jakościowe, jak i ilościowe informacje.

W artykule przedstawiono metodę prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego w całym przedziale obciążenia, czyli do momentu osiągnięcia obciążenia granicznego.

W analizach obliczeniowych pracy pali, rozwiązania teoretyczne są wykorzystywane za pośrednictwem różnych procedur analitycznych. Procedury te korzystają dodatkowo z rozwiązań empirycznych i przyjętych założeń, wynikających z obserwacji pracy rzeczywistych obiektów w terenie oraz wykonanych badań.

Metody służące do wyznaczenia krzywej osiadania pala, czyli zależności między przyłożonym obciążeniem i wywołanym osiadań głowicy pala, wykorzystują zwykle tzw. funkcje transformacyjne. Temat ten szczegółowo został przedstawiony w [6]. Wykorzystanie funkcji transformacyjnych dla pala pojedynczego umożliwia dowolne modelowanie profilu gruntowego, a także zastosowanie dowolnej zależności pomiędzy odkształceniami i aktualnym stanem naprężenia. W większości przypadków funkcje transformacyjne powstały w sposób empiryczny i ich zastosowanie jest ograniczone. W artykule przedstawiono metodę, w której wykorzystuje się funkcje transformacyjne powstałe w oparciu o rozwiązania teoretyczne wraz z uwzględnieniem zmiany modułu odkształcenia z poziomem naprężenia. Funkcje teoretyczne mają szerszy zakres stosowania i są bardziej uniwersalne.

Opis metody

Pojedynczy pal przyjęto jako odkształcalny pręt osiowo ściskany. Pojedynczy pal w stanie równowagi, obciążony jest siłą skupioną na głowicy Q_0 , zrównoważoną przez opór gruntu wzdłuż poboczniczy pala oraz w jego podstawie. Dla poboczniczy reakcja gruntu rozłożona jest na obwodzie pala w postaci oporu tarcia τ_s między palem a otaczającym go ośrodkiem gruntowym. Dla podstawy w postaci równomiernie rozłożonego oporu normalnego podłoża q_b .

Elementarne równanie równowagi wycinka pala ma następującą postać:

$$E_t A_p \frac{d^2 s(z)}{dz^2} = \pi \cdot D \cdot \tau_s(z) \quad (1)$$

Tarcie na poboczniczy τ_s stanowi funkcję przemieszczenia s i może być modelowane za pomocą funkcji transformacyjnej t - z .

Zastępując opór tarcia gruntu przez reakcje podpór sprężystych równanie (1) może być przedstawione w postaci:

$$-E_t A_p \frac{d^2 s(z)}{dz^2} + k_s \cdot s(z) = 0 \quad (2)$$

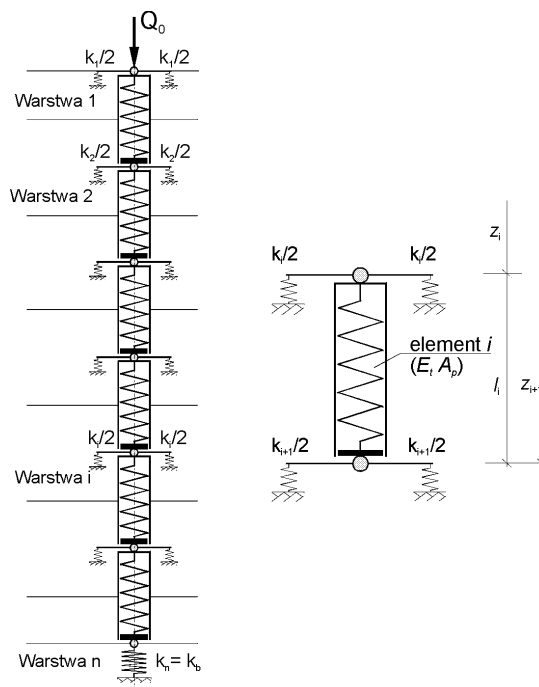
gdzie:

k_s – [kN/m] współczynnik sprężystości podpory sprężystej:

$$k_s = \frac{P_s(z)}{s(z)} = \frac{\pi \cdot D \cdot \tau_s(z)}{s(z)} \quad (3)$$

W celu wykorzystania numerycznej procedury analizy pracy pala z podporami sprężystymi na poboczniczy i w podstawie, pal podzielony jest na segmenty (elementy), rys.1. W węzłach umieszcza się podpory sprężyste modelujące opór gruntu.

Podpory sprężyste są wzajemnie od siebie niezależne i scharakteryzowane za pomocą współczynnika k_s (lub k_b dla podstawy). Wartość współczynnika k_s dla i -tej podpory sprężystej fizycznie określa wartość siły potrzebnej do jednostkowego jej odkształcenia.



Rys. 1. Dyskretny podział pala na elementy.

Wykorzystując metodę elementów skończonych dla zagadnienia jednowymiarowego, równanie (3) można przedstawić w zapisie macierzowym:

$$([K_p] + [K_s]) \{s_p\} = \{Q_0\} \quad (4)$$

gdzie:

- $[K_p]$ - macierz sztywności dla elementów pala;
- $[K_s]$ - macierz sztywności gruntu;
- $\{s_p\}$ - wektor przemieszczeń pionowych węzłów pala;
- $\{Q_0\}$ - wektor węzłowych obciążeń zewnętrznych.

Dla n elementów pala otrzymujemy układ $n+1$ równań liniowych. Pierwszy węzeł umieszcza się na głowicy pala, a wektor obciążeń zewnętrznych ma postać $Q_0 = \{1, 0, 0, \dots, 0\}^T$. Wielkości niewiadome stanowi wektor $n+1$ przemieszczeń węzłowych $\{s_p\}$.

Podłoże może być dowolnie uwarstwione.

W opisywanej metodzie, dla opisu reakcji podpór sprężystych, zastosowano rozwiązania teoretyczne wykorzystujące prace Randolph'a i Wroth'a [9].

Według Randolph'a i Wroth'a naprężenia styczne w gruncie wokół pobocznic pala maleją ze wzrostem odległości r od osi pala w następujący sposób: $\tau = \tau_0 R_0 / r$, gdzie R_0 oznacza promień przekroju pala a $\tau_0 = \tau(R_0)$ naprężenie styczne na poboczniczy pala. Zakładając, że istnieje pewien skończony promień R_{max} , przy którym wpływ obciążenia poboczniczy pala staje się pomijalnie mały, równanie określające przemieszczenie pionowe punktu znajdującego się w odległości r od osi pala może być zapisane w następujący sposób:

$$\left. \begin{aligned} s(r) &= \frac{\tau_0 \cdot R_0}{G(\gamma)} \ln\left(\frac{R_{max}}{r}\right), & R_0 \leq r \leq R_{max} \\ s(r) &= 0, & r > R_{max} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

gdzie:

τ_0 - naprężenie styczne na poboczniczy pala,

R_0 - promień trzonu pala,

R_{max} - zasięg oddziaływania pala.

G - moduł okształcenia postaciowego ośrodka gruntowego wzdłuż poboczniczy.

Wzajemna relacja między modułami G i E wynikająca z teorii sprężystości:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (6)$$

Podstawa pala działa jak sztywny stempel na powierzchni podłoża gruntowego. Przesunięcie podstawy s_b po wpływie przyłożonej siły P_b opisane jest przy wykorzystaniu rozwiązania Boussinesq'a dla obciążenia równomiernie rozłożonego na części brzegu półprzestrzeni sprężystej. Dodatkowo należy uwzględnić wpływ zagłębienia podstawy pala. Wynikające z tego rozwiązania równanie przedstawia się następująco:

$$s_b = \frac{P_b}{R_b \cdot G_b(\gamma)} \frac{(1 - \nu_b)}{4} \eta \quad (7)$$

gdzie:

P_b - wypadkowa siła działająca na podstawę pala;

G_b, ν_b - parametry gruntu pod podstawą pala;

R_b - promień podstawy pala;

η - współczynnik uwzględniający wpływ zagłębienia podstawy pala.

Dla występujących w praktyce stosunków średnicy pala do zagłębienia współczynnik korekcyjny na podstawie krzywej Fox'a przyjęto jako $\eta = 0.5$.

We wzorach (5) i (6) moduł okształcenia G przyjęto zmienny w funkcji okształcenia postaciowego γ . Empiryczne i przybliżone zmiany modułu G w funkcji γ zestawiono na rys. 3.

Maksymalny promień oddziaływania pala na otaczający go grunt - R_{max} obliczany jest według wzoru proponowanego przez Van Impe i De Clercq'a [12], zakładającego, w odróżnieniu od wzoru Randolph'a i Wroth'a [11], zmienność w funkcji zagłębienia z:

$$R_{max} = 2(1 - \nu) L \left(\frac{3}{2} - \frac{z}{L} \right) \quad (8)$$

gdzie L – całkowita długość pala w gruncie.

Praca pali w gruncie ma charakter nieliniowy. Nieliniowość ta wynika nie tylko z charakterystyki pracy podłoża gruntowego, ale również ze zjawisk zachodzących w warstwie kontaktu między palem a gruntem. Już w początkowym stanie naprężenia, wskutek przekroczenia oporów granicznych, mogą wyłączać się z pracy górne odcinki pali a mobilizacja oporów na poboczniczy szybko postępuje w kierunku podstaw. W ten sposób rośnie wielkość obciążenia przekazywana przez dolne części pali oraz podstawę. Dodatkowo, mamy tu do czynienia ze zmianą modułu okształcenia gruntu wraz ze zmianą stanu naprężenia (odkształcenia), [1].

W celu jak najwierniejszego opisu przekazywania obciążeń i współpracy pali z podłożem gruntowym, w proponowanej metodzie obliczeń uwzględniono nieliniową charakterystykę pracy pala w gruncie. Zastosowano model nieliniowosprężysto-plastyczny, w którym uwzględniono nieliniową charakterystykę pracy pala w zakresie naprężeń przed osiągnięciem oporu granicznego.

We wzorach (5) i (7) nieliniowe zachowanie odwzorowano poprzez hiperboliczną zależność między wartością modułu okształcenia a naprężeniem (rys.2):

$$G = G_{max} \left(1 - \frac{p \cdot R_f}{p_f} \right)^2 \quad (9)$$

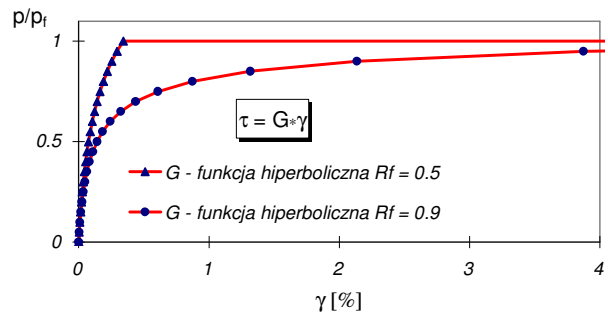
G - aktualny, styczny moduł ścinania,

G_{max} - początkowy moduł ścinania (dla małych odkształceń),

p - mobilizowany opór gruntu,

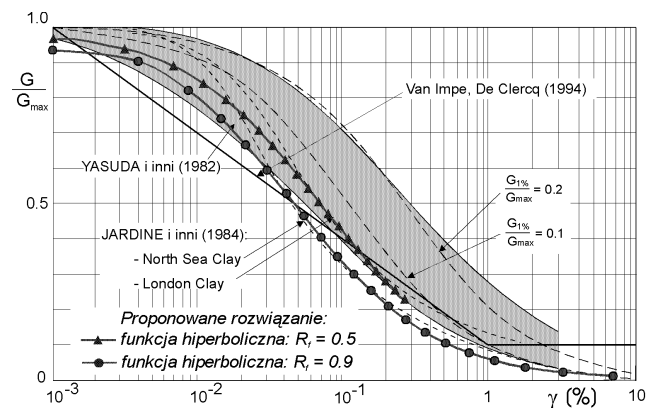
p_f - graniczny opór gruntu (w chwili zniszczenia)

R_f - stała krzywej hiperbolicznej,



Rys. 2. Hiperboliczna funkcja zmiany oporów gruntu w funkcji okształcenia.

Dla poboczniczy przyjęto $R_f = 0.5$, dla podstawy $R_f = 0.9$.



Rys.3. Porównanie proponowanego rozwiązania z innymi.

Do celów obliczeniowych opracowano program komputerowy. Poszczególne warstwy gruntu scharakteryzowane są przez dwa parametry: moduł okształcenia, oraz współczynnik Poissona.

Po dokonaniu dyskretyzacji układu pali, buduje się macierz sztywności o wymiarze N , gdzie N jest całkowitą liczbą węzłów wszystkich pali grupy.

Osiadania poszczególnych węzłów pali otrzymuje się w wyniku rozwiązania układu równań:

$$\{Q\} = [K]\{s\} \quad (10)$$

gdzie macierz sztywności $[K]$ jest sumą macierzy sztywności gruntu oraz pali: $[K] = [K_g] + [K_p]$, $\{Q\}$ jest wektorem obciążeń zewnętrznych węzłów układu, a $\{s\}$ wektorem poszukiwanych przemieszczeń węzłowych.

Obliczenia przeprowadza się dla kolejnych przyrostów obciążenia, w każdym kroku obliczana jest nowa wartość modułu odkształcenia dla aktualnego naprężenia w danym węźle.

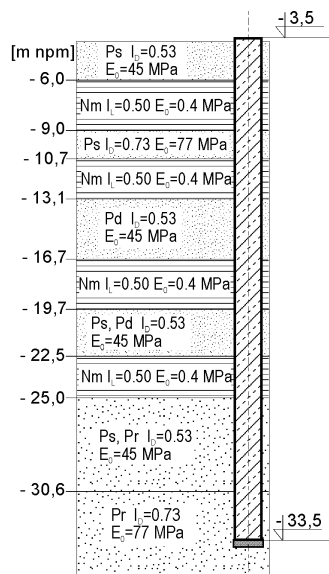
Dla inżynierskich rozwiązań można przyjmować początkową wartość modułu odkształcenia $E_{\max} = 4E_0$, gdzie E_0 jest to moduł odkształcenia ogólny jak dla ośrodka liniowosprężystego. Wraz ze wzrostem obciążenia następuje coraz większa mobilizacja oporów gruntu. W momencie osiągnięcia w którymkolwiek węźle oporu granicznego zakłada się brak dalszej pracy tego węzła przy kolejnych przyrostach obciążenia. Odzwierciedla się to brakiem dalszego wzrostu reakcji gruntu w danym węźle wskutek wystąpienia nieciągłości ośrodka w miejscu posłizgu.

Porównanie uzyskiwanych wyników obliczeń z wynikami próbnych obciążeń

Wyniki otrzymywane za pomocą opisanej metody zweryfikowano na podstawie wielu przeprowadzonych próbnych obciążeń pali pojedynczych. W artykule przedstawiono cztery wybrane przykłady.

Dla posadowienia pylonu mostu wawowego przez Martwą Wisłę na trasie Sucharskiego w Gdańsku zaprojektowano pale wielkośrednicowe o średnicy $\phi 1800$ mm i długości 30 m. Pod podstawami pali przeprowadzono iniekcję metodą komór iniekcyjnych opracowaną w Katedrze Geotechniki Politechniki Gdańskiej. Obciążenie charakterystyczne dla pojedynczego pala wynosi $Q_n = 9600$ kN.

W celu sprawdzenia nośności pali wykonano próbne obciążenie statyczne pala pojedynczego. Opis badania oraz wyniki prezentowane były w pracy [11].

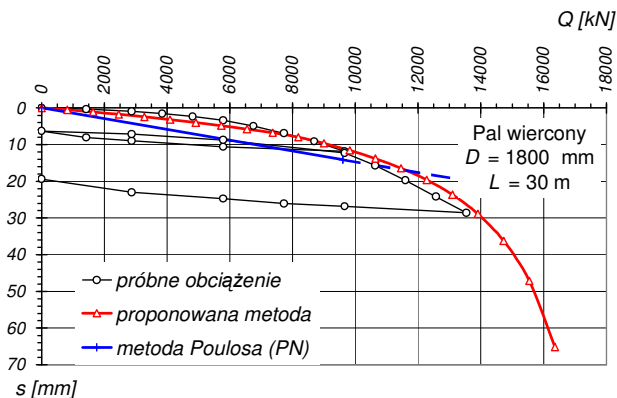


Rys. 4. Profil geotechniczny w pod fundamentem pylonu mostu wawowego przez Martwą Wisłę na Trasie Sucharskiego w Gdańsku.

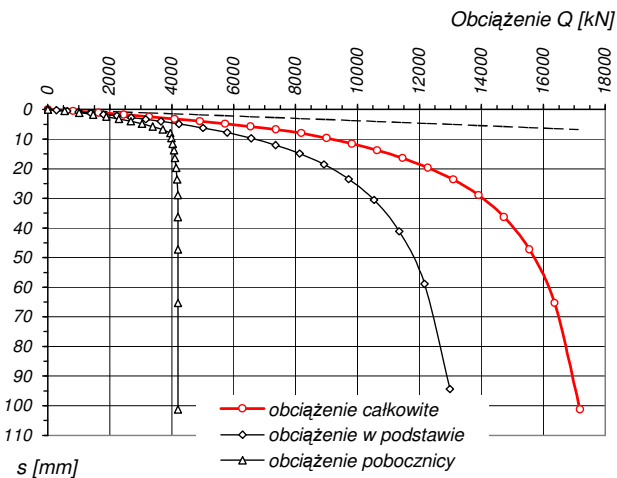
Na rys. 4 przedstawiono profil geotechniczny w rejonie rozpatrywanej podpory, a na rys. 5 porównanie otrzymanych

wyników próbnego obciążenia oraz obliczeń. W całym rejonie budowy mostu występuje podłoże silnie uwarstwione. Wzdłuż pobocznicy pala zalegają namuły na przemian z warstwami piasków. W procedurze obliczeniowej dokonano korekty oporów dla warstw gruntowych leżących powyżej warstw słabych.

Na rys. 5 naniesiono również zależność obciążenie-osiadanie według metody Poulosa, zawartej w PN-83/B-02482. Metoda Poulosa zakłada, że podłoże gruntowe zachowuje się jak jednorodny, izotropowy ośrodek liniowosprężysty.

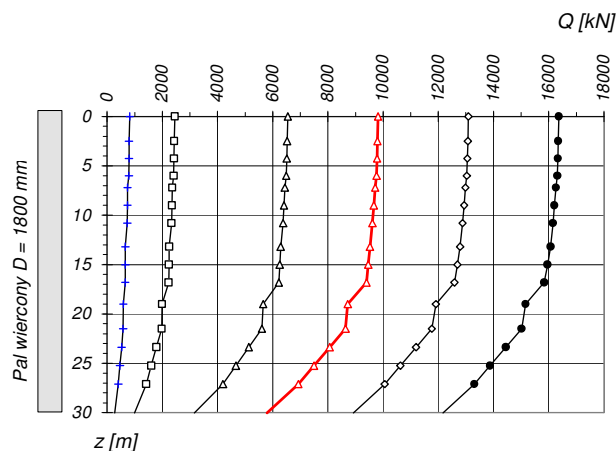


Rys. 5. Porównanie wyników próbnego obciążenia i obliczeń dla pali pojedynczych pylonu mostu wawowego przez Martwą Wisłę na Trasie Sucharskiego w Gdańsku.



Rys. 6. Porównanie krzywych osiadań dla pala pojedynczego

Proponowaną metodą można również wyznaczyć rozdział obciążenia na pobocznicy i podstawę oraz skrócenie pala. Na rys. 6 przedstawiono otrzymany rozdział obciążeń dla pala pojedynczego i porównanie z obciążeniem całkowitym. Obciążenie podstawy pala odniesione jest do przemieszczenia podstawy pala. Na podstawie kształtu krzywej dla pobocznicy pala wyraźnie widać moment, w którym opór tarcia wzdłuż pobocznicy zostaje całkowicie zmobilizowany. Można przyjąć, że w tym przypadku pełna mobilizacja oporu pobocznicy nastąpiła dla przemieszczenia głowy 10 mm.

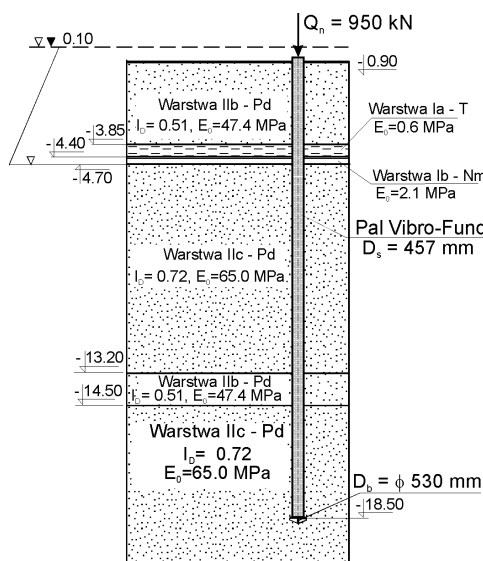


Rys. 7. Krzywe rozkładu obciążeń wzdłuż pala dla poszczególnych stopni obciążeń

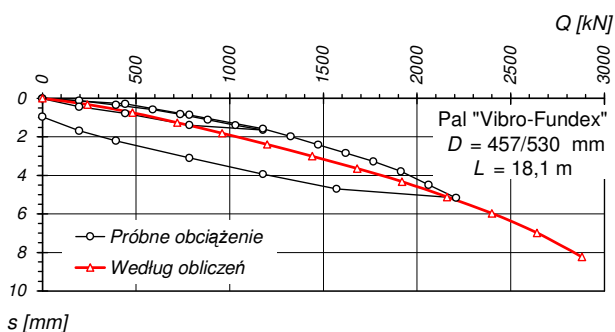
Na podstawie otrzymanych wyników można również śledzić postępowanie mobilizacji oporów dla kolejnych stopni obciążenia i na tej podstawie wykreślić rozkład siły w palu z głębokością, rys. 7.

Na terenie Elektrociepłowni Gdańsk wzniesiono dwa zbiorniki retencyjne popiołu posadowione na palach Vibro-Fundex o średnicy trzonu $D_s = 457$ mm, podstawy $D_b = 530$ mm. Wykonano próbne obciążenie pal o długości $L = 18.1$ m.

Na rys. 8 przedstawiono profil geotechniczny przyjęty do obliczeń na podstawie istniejącej dokumentacji geotechnicznej.



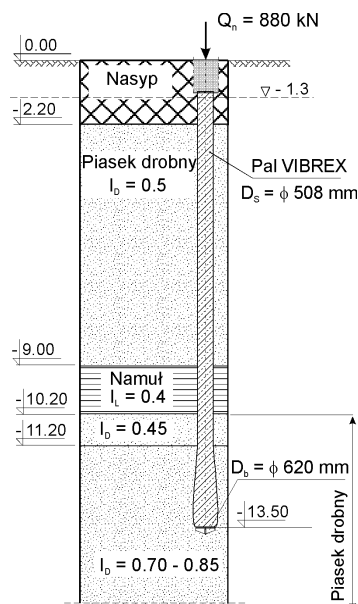
Rys. 8. Uśredniony profil geotechniczny podłoża gruntowego dla pali pod zbiornikami EC Gdańsk.



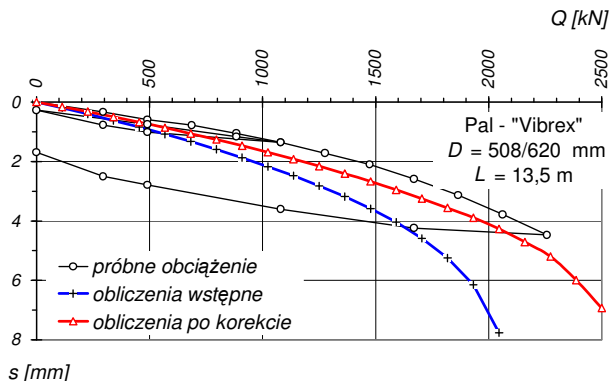
Rys. 9. Porównanie wyników próbnego obciążenia i obliczeń krzywej osiadania dla pali pod zbiornikami EC Gdańsk.

Pod fundament Silosów Fabryki Słodu w Gdańsku zaprojektowano pale „Vibrex” o średnicy trzonu $D_s = 508$ mm, podstawy $D_b = 620$ mm, długości $L = 13.5$ m.

Na rys. 10 przedstawiono uśredniony profil geotechniczny w miejscu lokalizacji pala próbnego, a na rys. 11 wyniki próbnego obciążenia oraz obliczeń.



Rys. 10. Uśredniony profil geotechniczny podłoża gruntowego. Fundament silosów Fabryki Słodu – Nabrzeże Bytomskie, Gdańsk



Rys. 11. Porównanie wyników próbnego obciążenia i obliczeń krzywej osiadania dla pali pod Silosami Fabryki Słodu.

Parametry dla pali Vibrex początkowo przyjęto zgodnie z PN-83/B-02482, jak dla pali Vibro. Korekty parametrów podłoża dla pali Vibrex dokonano na podstawie doświadczeń Zespołu z tego rodzaju palami na różnych budowach. Pale stosowane tutaj wykonano z jednokrotnym podciąganiem rury i powtórny "dobiciem" oraz uzupełnianiem betonu. Technologia taka znacznie polepsza parametry pali Vibrex w stosunku do pali Vibro.

Wyniki otrzymywane przedstawioną metodą porównano również uwzględniając wyniki próbnych obciążeń pali wykonanych metodą wysokociśnieniowej iniekcji strumieniowej (jet-grouting).

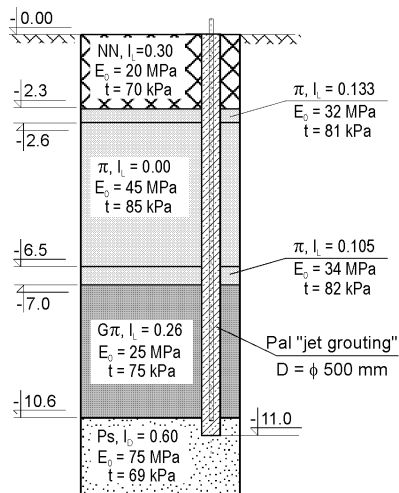
Badania pali wykonanych metodą iniekcji wysokociśnieniowej były bardzo szeroko analizowane między innymi w pracach [2, 3, 4, 7]. Poniżej przytoczono szczegółową analizę według proponowanej metody, dla jednego z pali.

Do wykonania pala zastosowano zaczyn cementowy $c/w = 1.2$, sporządzony z cementu P-45, o gęstości 1.586 g/cm^3 . Zaczyn tłoczony był pod ciśnieniem 38 MPa.

Teoretyczne wymiary pala: średnica $D = 0.50 \text{ m}$, długość części nośnej $11.0 + 0.3 \text{ m}$ (naddatek technologiczny).

Pal został zbrojony rurą $\phi 102/10$ ze stali R-35, wprowadzoną w osi pala do głębokości 10.2 m, której górny koniec znajdował się na wysokości 0.50 m powyżej poziomu posadowienia, stanowiąc zbrojenie głowicy pala.

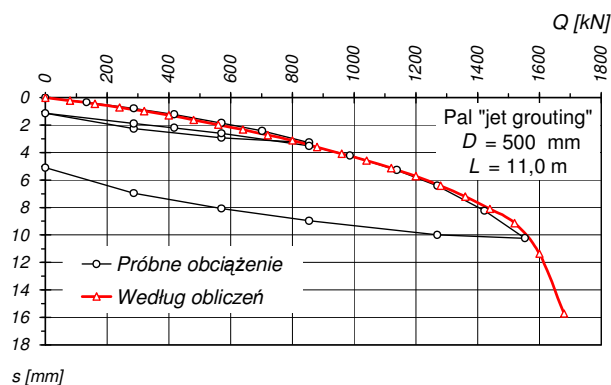
Uśredniony profil geotechniczny przedstawiono na rys. 12.



Rys. 12. Uśredniony profil geotechniczny dla badanego pala "jet-grouting".

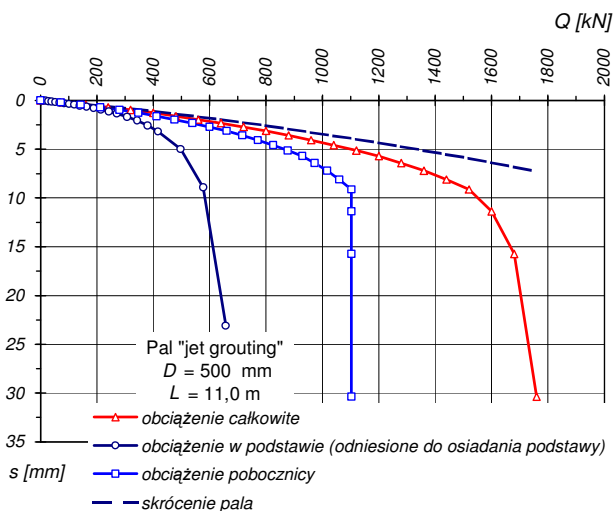
Moduł odkształcenia tworzywa gruntowo cementowego przyjęto $E = 5400 \text{ MPa}$.

Zastępczy moduł odkształcenia trzonu pala z uwzględnieniem sztywności stalowej rury $\phi 102/10$ oszacowano jako: $E_t \approx 10000 \text{ MPa}$.

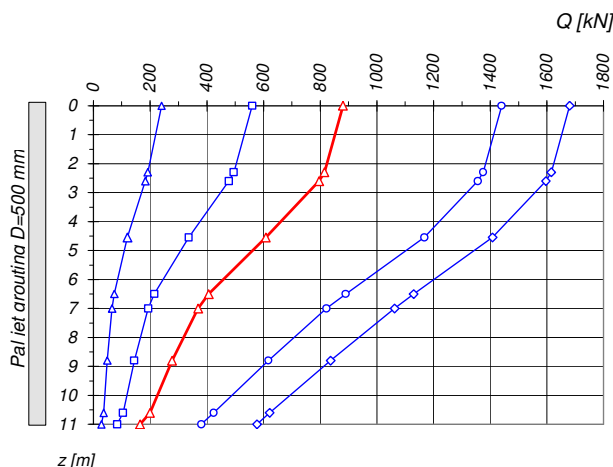


Rys. 13. Porównanie wyników próbnego obciążenia i obliczeń krzywej osiadania dla pala "jet-grouting".

W obliczeniach przyjęto parametry oporów granicznych na pobocznicy według propozycji przedstawionych w [4].



Rys. 14. Rozkład obciążenia całkowitego na część przenoszoną przez pobocznice oraz część przenoszoną przez podstawę dla badanego pala "jet-grouting".



Rys. 15. Krzywe rozkładu obciążeń wzdłuż pala dla poszczególnych stopni obciążeń

Podsumowanie

W procedurze obliczeniowej przedstawionej w niniejszej pracy w sposób przybliżony przyjęto wartość początkową modułów odkształcenia jako cztery razy większą od modułów, standardowo używanych dla ośrodka liniowo sprężystego.

W tak złożonym problemie, jakim jest współpraca pala z otaczającym, niejednorodnym, często silnie uwarstwowym, gruntem wymagane jest szeroko rozumiane "wyczcucie inżynierskie", poparte wszystkimi dostępnymi wynikami badań podłoża i pali. Bardzo pomocne w tym celu mogą być wyniki próbnych obciążeń pali pojedynczych. Jako przykład można podać specjalne badania pala wielkośrednicowego w Porcie Północnym [5], które wykazały znacznie większe opory jednostkowe na pobocznicy, niż wynikałoby to z przyjęcia według PN-83/B-02482.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Dyka I.: Analityczne metody obliczania osiadania grup palowych. Materiały I Krajowej Konferencji Młodych Geotechników "Rozwój badań i modelowanie w geotechnice", Warszawa, 9-10 luty 2001, *Przegląd Naukowy SGGW w Warszawie*, Zeszyt 20, s. 141-150.
- [2] Gwizdała K., Kokotkiewicz P., Motak E.: Skrócenie trzonu wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. Materiały XLV Konferencji Naukowej, Wrocław-Krynica, 1999.
- [3] Gwizdała K., Motak E.: Analityczna i doświadczalna ocena nośności pali fundamentowych nowych technologii. Materiały XI Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, Gdańsk, 25-27 czerwca 1997.
- [4] Gwizdała K., Motak E.: Ocena krzywej osiadania wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. Materiały XLII Konferencji Naukowej, Kraków-Krynica, 1996.
- [5] Gwizdała K., Tejchman A.: Specjalne badania terenowe nośności pala wielkośrednicowego", *Inżynieria Morska i Geotechnika*, Nr 6/1999.
- [6] Gwizdała K.: Analiza osiadań pali przy wykorzystaniu funkcji transformacyjnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, Nr 532, Budownictwo Wodne Nr 41, Gdańsk, 1996.
- [7] Motak E., Rawicki Z.: Badania tworzywa gruntowo-cementowego wysokociśnieniowych pali iniekcyjnych. Materiały XLII Konferencji Naukowej, Kraków-Krynica, 1996.
- [8] Poulos H.G., Davis E.H.: *Pile Foundation Analysis and Design*. John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [9] Praca zbiorowa: Nośność i osiadanie grup palowych. Monografia, Politechnika Gdańska
- [10] Randolph M.F., Wroth C.P.: Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No GT12, December 1978, s. 1465-1488.
- [11] Tejchman A., Gwizdała K.: Badanie nośności pali wielkośrednicowych pod pylonem mostu podwieszonego przez Martwą Wisłę w Gdańsku. "Inżynieria i Budownictwo", nr 12/2000.
- [12] Van Impe W.F., De Clercq Y.: A Piled Raft Interaction Model. *Proc. 5-th International Conference and Exhibition on Piling and Deep Foundations - DFI'94*, Bruges, Belgium, 13-15 June 1994.
- [13] PN-83/B-02482. *Fundamenty budowlane. Nośność pali i fundamentów palowych*.

Notka bibliograficzna

Analityczna metoda prognozowania krzywej osiadania pala pojedynczego

The analytical method for the prediction of load-settlement curve of single pile