

## Wybrane aspekty charakterystyki i analizy pracy pali w szczególnych przypadkach fundamentów głębokich

Mgr inż. Przemysław Łysiak  
Budimex – BT Projekt, Pracownia Mostowa

W praktyce projektowania pali do opisu wymagań projektowych określana jest nośność obliczeniowa pala w ramach projektowanego fundamentu. Jednak w kontekście analizy statyki konstrukcji obiektu niemniej istotnym szczegółem jest sztywność osiowa pala opisywana jako krzywa *obciążenie – osiadanie* ( $Q/s$ ), wyrażająca przyrost osiadania wraz ze wzrostem obciążeń osiowych.

Aktualnie, wraz z rozwojem nowoczesnych metod obliczeniowych, możliwe stało się tworzenie złożonych modeli oraz analiza w ramach jednego zadania kilku współpracujących elementów konstrukcji. W przypadku ustrojów posadowionych głęboko niezbędne jest możliwie świadome i trafne oszacowanie przedmiotowej sztywności pali. Zagadnienie to jest kluczowe w przypadku w miarę precyzyjnego określenia przemieszczeń, rozkładu sił, wymiarowania elementów posadowienia i opisanie interakcji fundamentu z konstrukcją.

Nawet przy powszechności stosowania oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych (MES), poświę-

conego geotechnice, nadal istotne i praktyczne pozostają metody analityczne służące określeniu charakterystyki pracy pali. Analiza numeryczna zagadnień tego rodzaju wymaga wysublimowanej wiedzy w celu prawidłowego określenia niezbędnych parametrów do modeli konstytutywnych gruntu, zaimplementowania właściwości towarzyszącej danej technologii palowej i doświadczenia. W złożonych przypadkach, celowe pozostaje wielotorowe, doświadczalne, numeryczne czy analityczne weryfikowanie przyjmowanych w modelach sztywności.

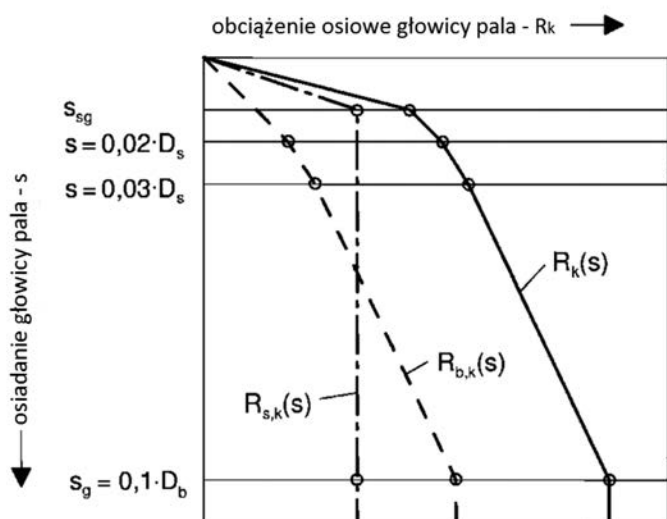
### METODY OCENY SZTYWNOŚCI PALA

Doświadczalną, podstawową informacją o możliwej szacowanej sztywności pala jest, jak w przypadku nośności, wynik próbnego obciążenia statycznego pala. Przeprowadzenie wspomnianego badania uzasadnione jest jako część rozpoznania warunków na etapie przygotowania projektu bądź jako element

usystematyzowanych, kompleksowych badań mających dostarczyć wiarygodne informacje przez analizę szerszego zbioru pomiarów. Dopiero wyniki odpowiednio przygotowanych, udokumentowanych i opracowanych badań stanowią punkt odniesienia przy wyborze i kalibracji zarówno metod analitycznych jak i analizy numerycznej. W ocenie Autora próbnie obciążenie statyczne jako podstawowe badanie kontroli jakości robót nie dają wystarczających informacji projektowych. Brak ilościowych i jakościowych procedur dla przeprowadzanych badań sprawia, że pomimo mnogości i powszechności wyniki uzyskiwane z badań nie dają cennego doświadczenia dla geotechników, między innymi w zakresie wyznaczania przedmiotowych sztywności.

Wybrane metody analityczne i empiryczne prognozowania krzywej osiadania i sztywności pojedynczych pali:

- z użyciem wzorów funkcji transformacyjnych, uzyskując dzięki nieliniowym funkcjom transformacyjnym dla poboczniczy  $t$ - $z$  i podstawy pala  $q$ - $z$  ciągłą krzywą osiadania pala dla każdego punktu wzdłuż elementu. Szczegółowy opis metody według [3];
- według EA Pfähle [2], gdzie w zależności od technologii wykorzystania pala określone wartości graniczne oporów gruntu odpowiadają wartości osiadania uzależnionej od średnicy pala i charakterystycznej nośności poboczniczy pala (rys. 1);
- według K. Sahajdy [9], metoda opisana dla pali wbijanych. Autor podaje wartości osiadania pośredniego dla określonych, mobilizowanych oporów podstawy i poboczniczy pala;
- według PN-83/B-02482 [15], metoda oparta na rozwiązaniu zagadnienia teorii sprężystości według Poulos (1980). Jednak wartości osiadań uzyskiwane z tego rozwiązania okazały się istotnie wyższe od doświadczalnych, przez co wyliczane sztywności są często zaniżone;
- według metody uogólnionej [6], gdzie Autor przedstawia kompleksowe podejście w celu określenia sztywności osiowej pali, opisując zasady między innymi uwzględniania technologii, ujęcia pracy pali w grupie czy wpływ



Rys. 1. Przykład składania krzywej obciążenie – osiadanie dla pali wbijanych według [2]

obciążeń cyklicznych. W najprostszym podejściu określenie sztywności pala:

$$K_z = N/0,01D \quad (1)$$

gdzie:

$N$  – nośność pala dla wartości charakterystycznych oporów według [15],

$0,01D$  (średnicy pala)  $> 0,005$  m opisane jako przybliżony zakres osiadań sprężystych podstawy pala;

- według materiałów A. Krasieńskiego [7], sztywność pala określona jako:

$$K_z = N_t/0,01D \quad (2)$$

gdzie:

$N_t$  – nośność obliczeniowa pala

- według materiałów IBDiM [5] dla pali wielkośrednicowych: sztywność pali wciskanych określona jest nie wprost jako:

$$K_z = Q/s_Q \quad (3)$$

gdzie:

$Q$  – obciążenie pala  $< Q_n$  – obciążenie charakterystyczne pala według [15],

$D$  – średnica pala

$h_n$  – zagłębienie pala w gruncie nośnym

$s_Q$  – osiadanie od siły  $Q$

$$s_Q = (40 \pm 12,5) \frac{Q}{Dh_n} \quad (4)$$

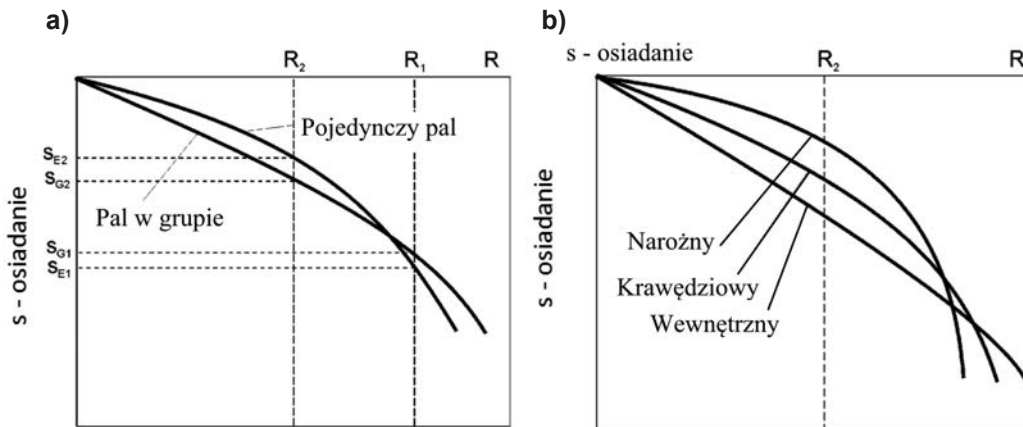
Wyczerpujący przegląd metod empirycznych, doświadczalnych i opartych na rozwiązaniach teorii sprężystości można znaleźć w książce *Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia* [3].

Numerycznie, najprostszą metodą wyznaczania sztywności pala pojedynczego jest model osiowo-symetryczny. Kalibrację analizy w danych warunkach, ze względu na technologię, realizuje się przez przyjęcie odpowiednich elementów kontaktowych, wymodelowanie obszaru podstawy pala i ewentualne ujęcie płyty, oczepu czy innych warstw konstrukcyjnych w rejonie głowicy.

Aktualnie, ze względu na brak w oprogramowaniu do obliczeń statycznych modeli geotechnicznych oraz z powodu stosowania częściowych współczynników bezpieczeństwa, informacja z modeli geotechnicznych dotycząca interakcji konstrukcji z gruntem jest najczęściej odwzorowywana przez podpory o sprężystości –  $K_z$ . W przypadku pali są to zazwyczaj podpory o sztywnościach zastępczych w miejscu głowic palowych bądź podpory sprężyste na końcu elementu prętowego (pala), opcjonalnie wzdłuż. Rozszerzeniem takiego podejścia może być także wymodelowanie w środowisku geotechnicznym podpory i użycie dla analizy statycznej warunków brzegowych oddających warunki podparcia w określonym zakresie obciążeń.

## ANALIZA KONSTRUKCJI

Przy zastosowaniu projektowej sztywności pali do obliczeń konstrukcji, na przykład obiektu mostowego, istotne jest, aby zakładana relacja  $Q/s$  odnosiła się możliwie do zakresu linio-



Rys. 2. Krzywe  $Q/s$  dla pala pojedynczego i pala w grupie (a), sztywność pali w grupie przy małych przemieszczeniach według [8, 11] (b)

wego pracy pala. Dotyczy to także przyjmowanych sztywności poziomych, gdyż analizy nieliniowe, przy złożonej kombinatoryce obciążeń i przy wyłączeniu działania zasady superpozycji, stanowią skomplikowane zagadnienie, nawet przy ewentualnym zastosowaniu globalnych współczynników bezpieczeństwa. Biorąc pod uwagę, że w przypadku pracy poboczniczy pala poziom odkształceń sprężystych stanowi około  $1 \div 2\%$  średnicy pala, zatem dla takich wielkości osiadań uzyskujemy pożądany zakres pracy.

Wskazane jest korzystanie z metod mających do dyspozycji pełen zakres krzywej *obciążenie – osiadanie*, jak na przykład wzory transformacyjne i określenie zakładanych osiadań pala odpowiednich do podejmowanych założeń i rodzaju prowadzonej analizy konstrukcji. Wartość sztywności, przykładowo według [2], określa się wtedy jako sieczną do danego punktu na wykresie  $Q(s)$ . Celowe także jest określenie poziomów oszacowania dolnego i górnego dla przedmiotowych wartości i wariantowa weryfikacja obliczeń.

Pożądany, w ocenie Autora, jest rozwój i rozpowszechnienie podejścia projektowego wskazanego w publikacji krajowych autoritetów w dziedzinie fundamentów palowych [4]. Opisane podejście obliczeniowe zakłada wykorzystanie odpowiedniej krzywej w zależności od rodzaju analizy: krzywej charakterystycznej do sprawdzenia warunków SLS – odkształceń i przemieszczeń oraz krzywej projektowej do sprawdzenia warunków stanu granicznego ULS STR. W metodzie nie zachodzi potrzeba weryfikacji nośności obliczeniowej pali ULS GEO.

Do kompleksowej oceny sposobu pracy fundamentu, poza określeniem sztywności pala pojedynczego, znaczenie ma opis towarzyszących oddziaływań. Szczególnie istotny jest efekt funkcjonowania pali w grupie oraz wpływ odkształceń bądź zmiana stanu naprężenia w gruncie w otoczeniu projektowanego posadowienia. W artykule ograniczono się do analizy charakterystyki pali w grupie.

W kontekście obliczeń grupy pali istotne jest rozróżnienie pracy pali w SGU i SGN (rys. 2)

W SGN grupa pali na skutek postępujących istotnych przemieszczeń zachowuje się jak fundament blokowy, osiadania pali są jednolite, zakres strefy uplastycznienia i wzrostu naprężeń w ośrodku gruntowym rośnie. Taki sposób pracy pali stanowi istotę sprawdzania nośności grupy pali wymaganą przez EC7 [14].

W SGU, przy stosunkowo małych przemieszczeniach, charakter pracy pojedynczych pali jest różny (rys. 2b). Dodatkowo występują osiadania wywołane przez obciążenia z konstrukcji sprowadzone do umownej podstawy grupy pali, generowane na głębokości aktywnej, istotnie większej niż zakres oddziaływań wokół pojedynczego pala. Przemieszczenia te stanowią składowy komponent osiadań przy określeniu sztywności pali w grupie [4].

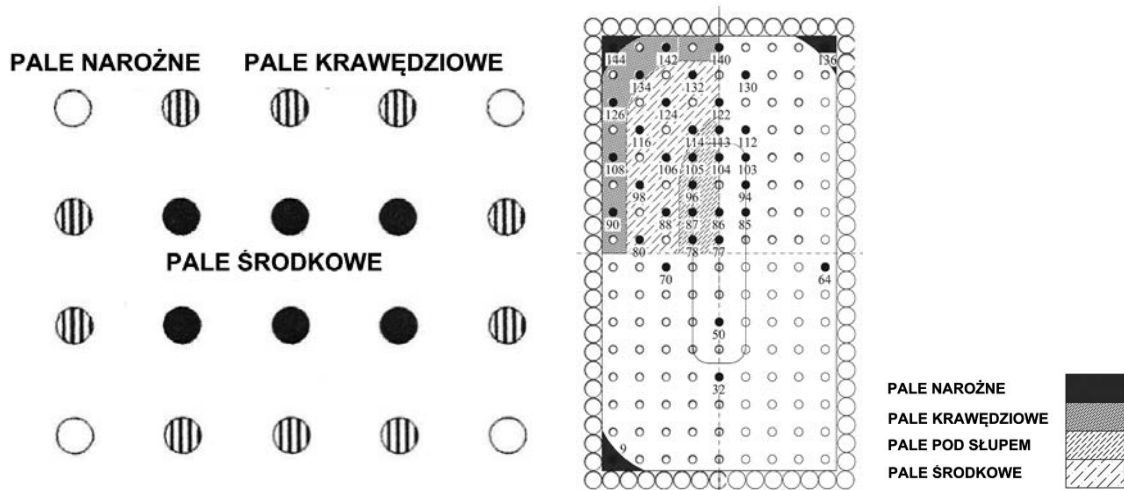
Szacowanie średniego osiadania grupy pali prowadzi się na podstawie osiadań pojedynczego pala lub zakładając w analizie fundament zastępczy. Metody ujmujące te podejścia opisano kompleksowo w książce *Nośność i osiadanie fundamentów palowych* [12] lub w niemieckich wytycznych [2]. Zwraca się jednak uwagę na duży rozrzut wartości uzyskiwanych w obliczeniach współczynnika korelacyjnego do określania osiadania grupy pali na podstawie opisu pala pojedynczego. Według [4] dużą zgodność z doświadczeniami zachowują obliczenia przy użyciu metody fundamentu zastępczego.

Obserwowany sposób rozkładu naprężenia/odkształcenia w elementach posadowienia i ośrodku gruntowym poniżej pali, przy stosunkowo małych przemieszczeniach, wskazuje jako celowe zróżnicowanie szacowanej sztywności pali w ramach jednej grupy. Opis i przykładowe analityczno-empiryczne metody określania sztywności pali w grupie można znaleźć w [1, 2, 4, 8, 13]. W przytoczonych pracach wprowadzono umowny podział na strefy pali o stosunkowo zbliżonej sztywności (rys. 3). Grupa pali podzielona jest na pale wewnętrzne, krawędziowe i narożne.

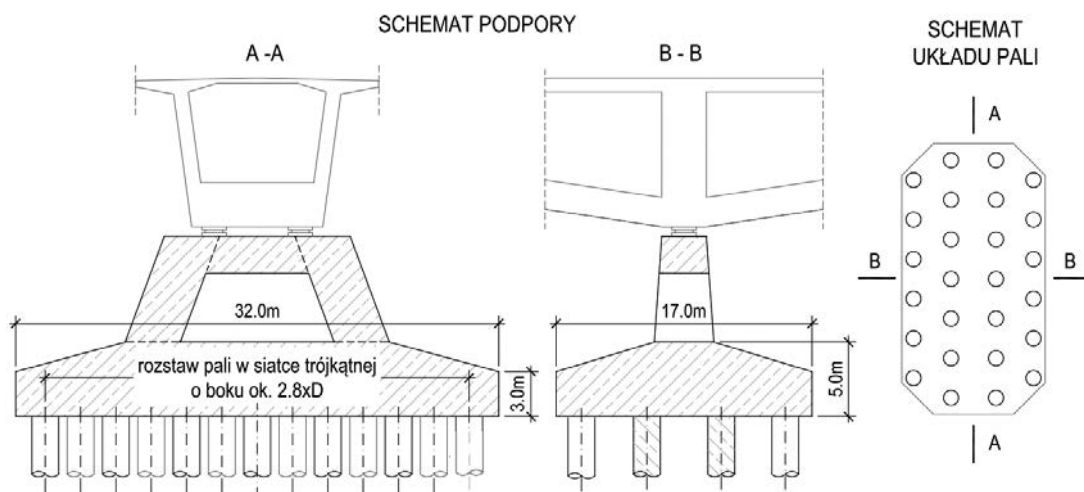
Wpływ zróżnicowanej sztywności jest w swojej naturze złożony, zależny od kilku czynników, przez co trudny w ujęciu metodologicznym. Ewentualny nierównomierny rozkład obciążeń w oczępie jest zależny od wielkości osiadań – najbardziej zauważalny jest w przypadku stosunkowo małych prze-

Tabl. 1. Dystrybucja obciążeń między palami w czasie według [13], schemat monitorowanych pali (rys. 3b)

Pale:	narozne	krawędziowe	środkowe	pod słupem
Koniec budowy	1,30	1,00	0,80	0,90
Po 3 latach	1,16	0,96	0,90	0,98
Po 10 latach	1,10	0,93	0,94	1,03



Rys. 3. Wydzielone strefy odmiennych sztywności pali w grupie



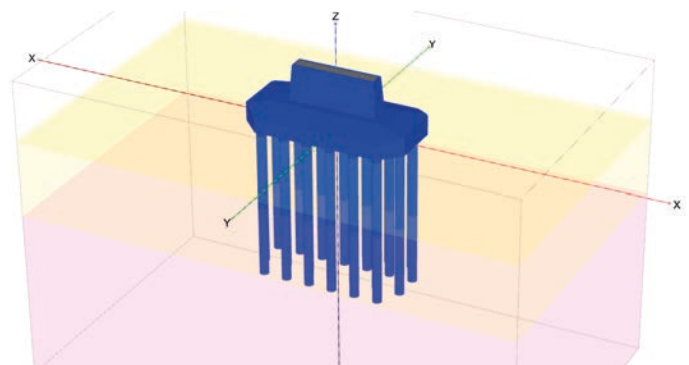
Rys. 4. Schemat analizowanej podpory obiektu

mieszceń fundamentu. Wraz z rosnącymi osiadaniami układu następuje redystrybucja sztywności. Zależy ona także, według [13], od efektów pełzania, co obrazuje tabl. 1 przedstawiająca zmianę relacji sztywności pali w czasie, czyli także wraz z postępującymi osiadaniami (rys. 3b). Stosunek rozkładu sił na pale zmienia się wraz z wielkością grupy palowej, rozstawem pali i sztywnością oczepu. Według [2] zjawisko jest także zależne od technologii wykonania pali i szczególnie istotne w przypadku pali wierconych, a może być pomijalne dla pali przemieszczeniowych. Wytyczne niemieckie [2] wprost wskazują na potrzebę numerycznej analizy grupy pali, przy odpowiedniej kalibracji modelu, w przypadku prowadzenia analizy wymagającej precyzyjnych wyników.

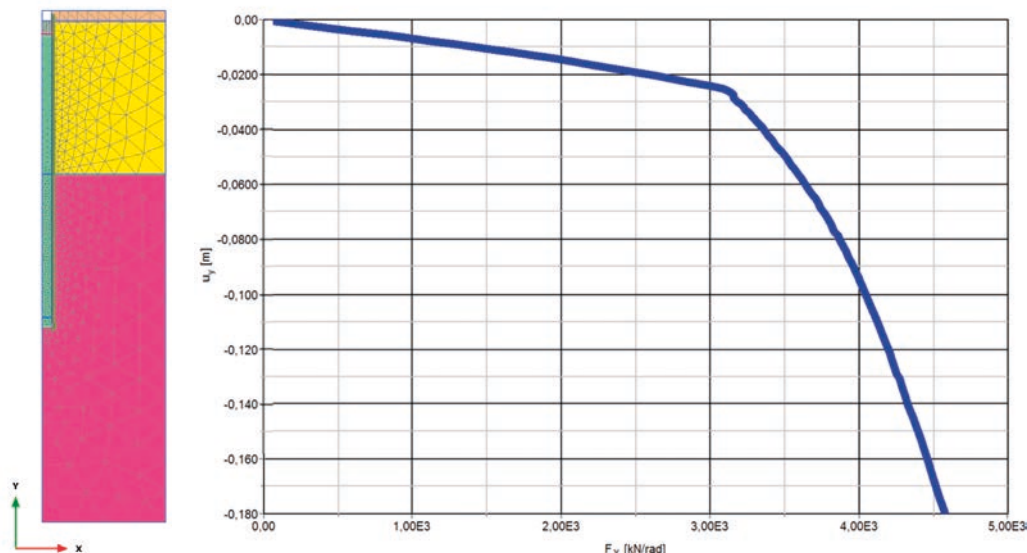
### PRZYKŁAD

Przykładem obrazującym omawiane zagadnienie jest posadowienie podpory drogowego obiektu mostowego (rys. 4), analizowanego w Budimex – Pracowni Mostowej BT Projekt [10]. Przywoływana podpora stanowi podporę do budowy mostu w technologii betonowania nawisowego. Posadowienie podpory stanowi grupa 26 pali wielkośrednicowych.

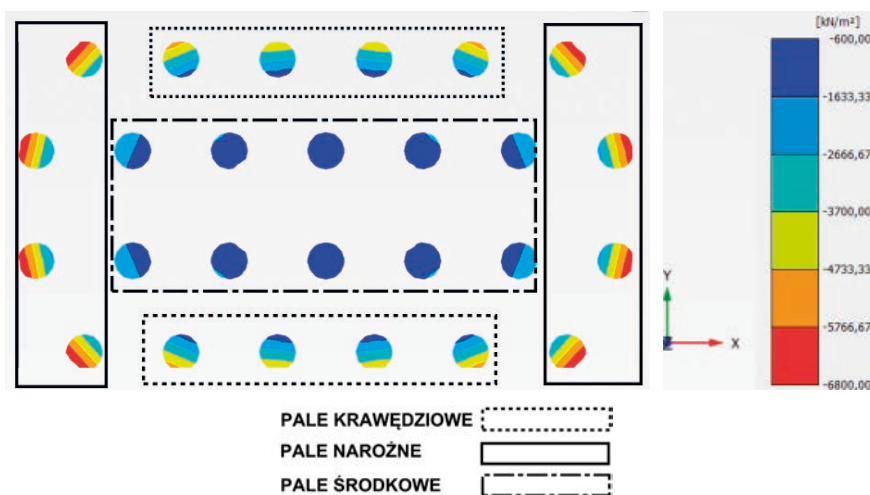
W rozpatrywanym przypadku w pierwszej kolejności określono skalę dopuszczalnych maksymalnych osiadań podpory ze względu na wymagania formalne, doświadczenie i zakres wpływu na analizę statyki obiektu. Korzystając z wytycznych [2] oszacowano pożądane osiadanania pala pojedynczego oraz odpowiadające mu graniczne obciążenie SGU i wyznaczono liniowy  $K_z$  pala. W kolejnym kroku spodziewaną charakterystykę pracy pala zweryfikowano co do założeń z wykorzystaniem dostępnych wyników próbnego obciążenia statycznego pali. Badanie



Rys. 5. Widok modelu numerycznego 3D



Rys. 6. Model numeryczny i odtworzona krzywa  $Q/s$  przy skalibrowanych parametrach modelu



Rys. 7. Rozkład naprężeń na pale w modelu 3D dla jednolitych osiadań w zakresie SGU wraz z podziałem pali

odbyło się w ramach czynności przedprojektowych, stanowiąc doświadczenie do ustalenia ostatecznego podejścia obliczeniowego. W celu weryfikacji założeń co do szacowanych osiadań i rozkładu sztywności pali pod oczepem opracowano model numeryczny 3D (rys. 5) w programie *Plaxis3D*.

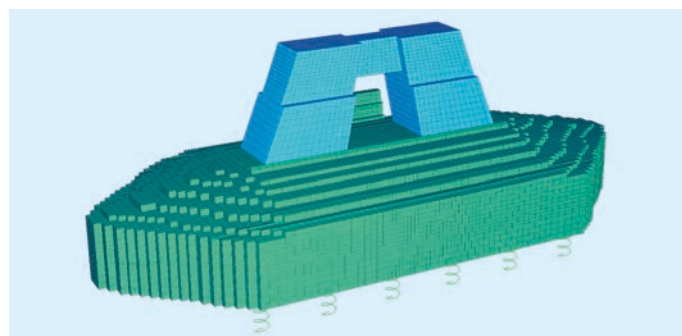
Parametry modelu 3D skalibrowano, bazując na osiowosymetrycznej numerycznej analizie pala pojedynczego, odniesionej do wyników próbnego obciążenia (rys. 6).

W celu weryfikacji założeń co do sposobu przyjmowania sztywności pali w modelu podpory obiektu przeanalizowano rozkład naprężeń w głowicach pali poniżej spodu oczepu przy obciążeniach i osiadaniach właściwych dla stanu SGU (rys. 7).

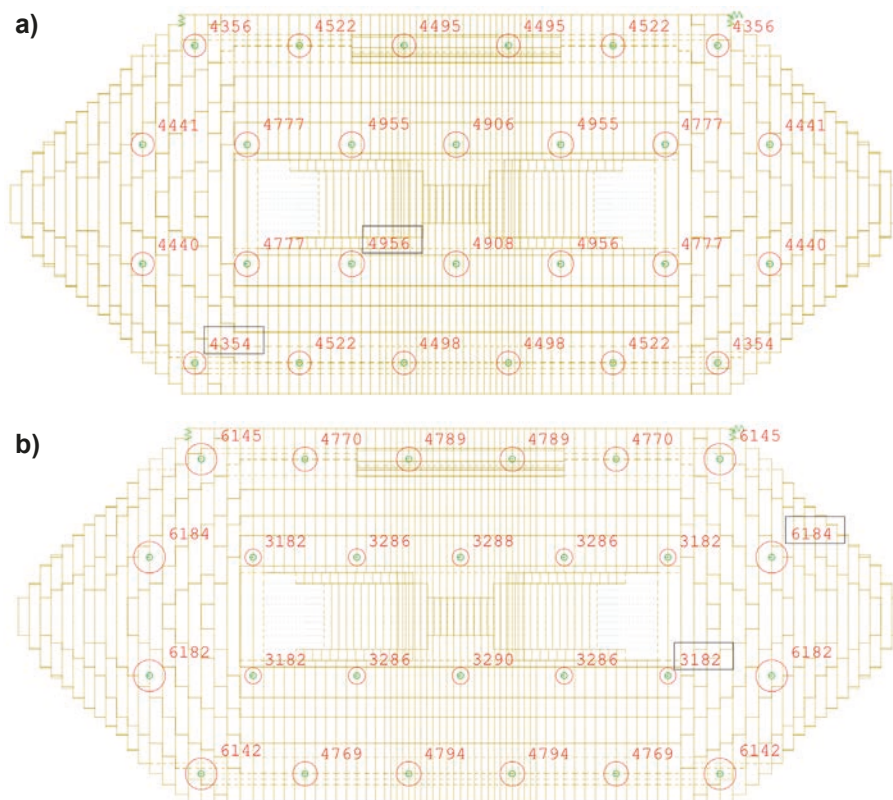
Uzyskane wyniki obliczeń potwierdziły zasadność zróżnicowania sztywności pali w ramach oczepu dla SGU i w przypadku jakościowego sposobu doboru zależności. Zwraca się uwagę na zaklasyfikowanie w konsekwencji analizy numerycznej pali krawędziowych, wysuniętych jako pale narożne (rys. 7). W wyniku dyskusji wyników obliczeń analitycznych i numerycznych przyjęto założenia co do wartości i rozkładu sztywności pali.

Ostatecznie określone sztywności wprowadzono jako podpory liniowo sprężyste do modelu bryłowego konstrukcji realizowanego w programie *Sofistik* (rys. 8).

Sposób prowadzenia obliczeń w przypadku podpory był dostosowany do potrzeb analizy w złożonych fazach montażowych, uwzględniając sprężenie elementów i miał umożliwić bieżącą weryfikację odkształceń konstrukcji przy realizacji.



Rys. 8. Widok modelu podpory



Rys. 9. Reakcje na pale: a) jednolite sztywności pali, b) zróżnicowane sztywności pali

Na rys. 9 przedstawiono poglądowo reakcje w głowicach pali w przypadku symetrycznego obciążenia łożysk. W celu zobrazowania istoty omawianego zagadnienia zróżnicowanej sztywności pali w grupie obliczono reakcje w dwóch podejściach. Wyniki przy założeniu przyjęcia jednakowej sztywności pali pokazano na rys. 9a i dla dostosowanych, zmiennych sztywności podparć na rys. 9b. Uzyskane reakcje w palach pozostają spójne z wynikami geotechnicznej analizy numerycznej.

## WNIOSKI

Przy badaniu złożonych modeli konstrukcji, posadowionych w złożonych i skomplikowanych warunkach geotechnicznych, gdy wyniki analiz geotechnicznych i doświadczeń wskazują na nieliniową interakcję gruntu z konstrukcją, istnieje potrzeba wypracowania usystematyzowanego podejścia obliczeniowego. Pożądany jest rozwój metod na przykład według [4], zakładających dostosowanie przyjmowanych w modelu założeń do warunków brzegowych wynikających ze współpracy z ośrodkiem gruntowym, w sposób dostosowany do rodzaju analizy stanu granicznego SGN, czy SGU.

Celowy jest także rozwój podejścia zakładającego oszacowanie dolne i górne wybranych parametrów, pozwalający na ocenę wrażliwości projektowanej konstrukcji na poprawne ustalenie wartości sztywności w toku obliczeń. Zasadne w tym kontekście wydaje się też określenie globalnych współczynników bezpieczeństwa do analizy elementów konstrukcji współpracujących z gruntem. Istotne jest zwrócenie uwagi na to, że badania kontrolne elementów posadowienia, jak pale, powinny być ukierunkowane na analizę charakterystyki pracy elementu, jak

przykładowo krzywa  $Q/s$ . Popularne obciążenie statyczne pali powinno w pierwszej kolejności dostarczyć informację o przebiegu zależności obciążenie – osiadanie w pożądanym zakresie, a nie określić nośności obliczeniowej pala.

Wskazane jest także wykorzystanie wyników analizy numerycznej gruntu przy prowadzonych obliczeniach konstrukcji. Brak dostatecznego usystematyzowania zasad w zakresie poprawnego stosowania modeli gruntowych i zbioru dobrych praktyk projektowych, zazwyczaj niedobór informacji o ośrodku gruntowym wskazuje jednak na palącą potrzebę popularyzacji wiedzy w tym temacie i ustalenie sposobu wykorzystania wyników analizy geotechnicznej przez konstruktora. Pożądane pozostaje, poza prostymi przypadkami, prowadzenie wielotorowej analizy: numerycznej, analitycznej z użyciem metod empirycznych oraz doświadczalnej.

Przy bardzo zmiennej naturze gruntu, kluczowy w przypadku pożądanego rozwoju metod obliczeniowych i wiedzy o sposobie pracy fundamentów jest monitoring. Składa się na to kompleksowe przygotowanie, prowadzenie i interpretacja pomiarów. Odpowiednio zaplanowany monitoring pozwala na prowadzenie procesu projektowania metodą obserwacji według [14], bieżące dostosowanie podejścia obliczeniowego i kalibrację założonych parametrów. Poza tym, mając do dyspozycji dostępne technologie, istnieje możliwość zbierania i analizy pomiarów. Dają to możliwość ewolucji informacji o gruncie, metod projektowania i zarządzania ryzykiem. Nawet jeżeli dziś nie jesteśmy pewni, jak będzie wyglądało projektowanie w przyszłości, to można przypuszczać, że duże znaczenie będzie mieć posiadanie odpowiedniej jakości danych archiwalnych z obserwacji zachowania się konstrukcji. Brak rozwiniętych formalnych zasad prowadzenia monitoringu i sposobu zarządzania wynikami w skali kraju

przekreśla ewentualne wykorzystanie w przyszłości systemów samouczących się w projektowaniu, kontroli bezpieczeństwa i w kierowaniu projektem, szczególnie że warunki geotechniczne mają charakter regionalny.

#### LITERATURA

1. Fleming, K., Welman A., Randolph M., Elson K., Piling Engineering. Taylor & Francis, 2009.
2. German Geotechnical Society: Recommendations on Piling (EA-Pfähle). Ernst & Sohn, 2012.
3. Gwizdała K.: Fundamenty palowe, Tom 1. Technologie i obliczenia. Wydawnictwo naukowe PWN, 2010.
4. Gwizdała K., Krasieński A.: Fundamenty palowe, obliczenia z zastosowaniem Eurokodu 7 i doświadczeń krajowych. Acta Sci. Pol. Architectura 15 [2], 3-22, 2016.
5. Kłosiński B.: Wytoczne techniczne projektowania pali wielkośrednicowych w obiektach mostowych. IBDiM, 1993.
6. Kosecki M.: Statyka ustrojów palowych. PPH ZAPOL, 2006.
7. Krasieński A.: Obliczenia statyczne fundamentów palowych. Seminarium „Zagadnienia posadowień na fundamentach palowych”, Gdańsk, 2004.
8. Rudolf M.: Beanspruchung und Verformung von Gründungskonstruktionen auf Pfahlrosten und Pfahlgruppen unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes. Universität Kassel, 2005.
9. Sahajda K.: Obliczanie osiadań i nośności pali na podstawie sondowań statycznych CPT. Inżynieria i Budownictwo Nr 2/2010.
10. Smolnik M. Wewnętrzne opracowanie biura BUDIMEX. Warszawa 2019.
11. Smolczyk U.: Geotechnical Engineering Handbook. Ernst & Sohn, 2002.
12. Tejchman A. Gwizdała K., Dyka I., Świniański J., Krasieński A.: Nośność i osiadanie fundamentów palowych. Politechnika Gdańska, 2001.
13. Viggiani C., Mandolini G., Russo G.: Piles and Piles Foundations. Spon Press, 2012.
14. PN-EN 1997-1:2008, Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne - Część 1. Zasady ogólne.
15. PN-83/B-02482 Nośność pali i fundamentów palowych.