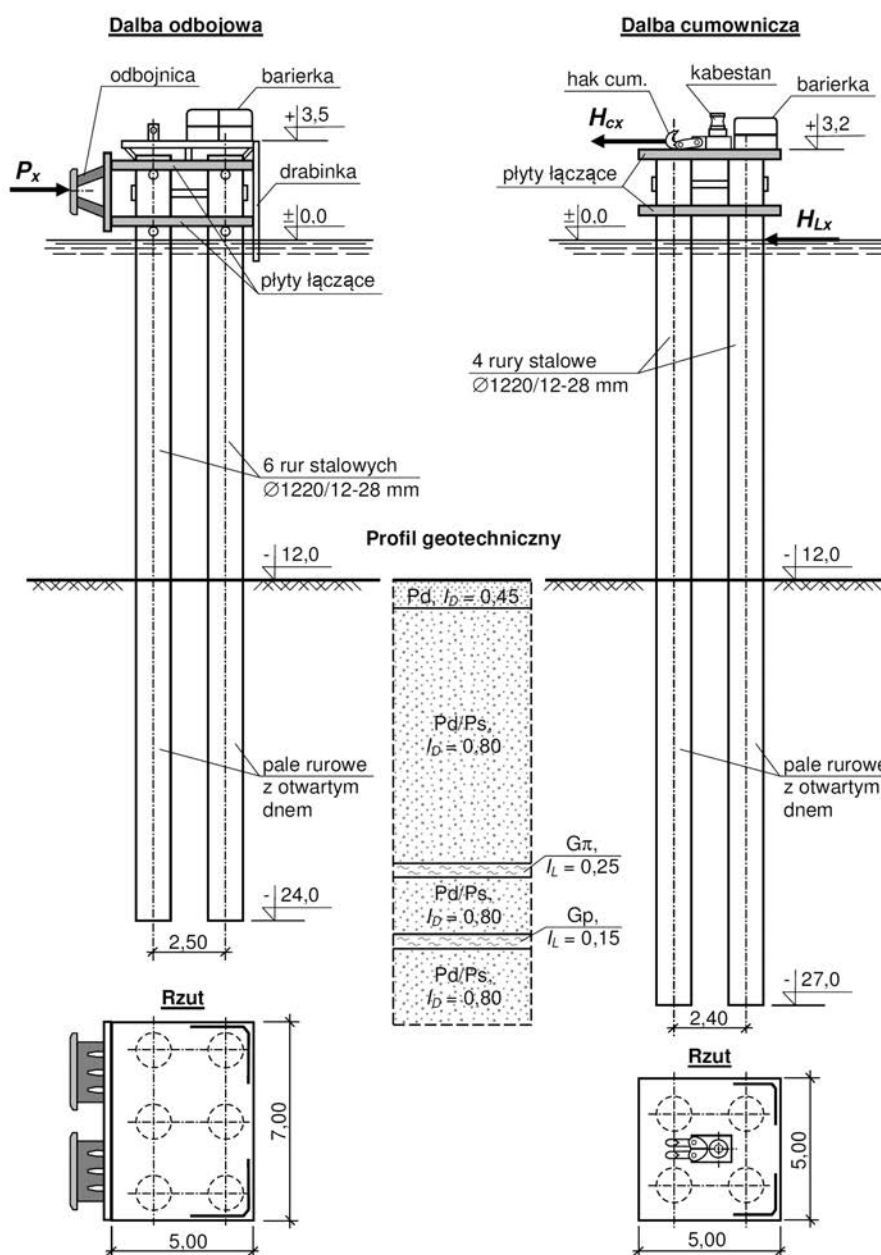


Obliczanie statyczne palowych konstrukcji portowych obciążonych siłami poziomymi

Dr hab. inż. Adam Kasiński, prof. dr hab. inż. Kazimierz Gwizdała
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Niektóre palowe konstrukcje portowe, morskie i śródlądowe, są obciążone głównie siłami poziomymi. Do takich konstrukcji możemy zaliczyć, między innymi, dalby odbojowe i cumownicze oraz podpory niektórych pirsów i pomostów. Obciążenia pionowe w tego rodzaju konstrukcjach mają często znaczenie drugorzędne ze względu na niezbyt duże wartości i mniej niekorzystny wpływ na konstrukcję. Obciążenia poziome z kolei, oprócz tego, że są dominujące, to dodatkowo mają przeważnie charakter dynamiczny lub cykliczny (powtarzalny). Głównym źródłem obciążeń poziomych są siły od dobijania lub cumo-

wania jednostek pływających oraz oddziaływania od falowania i przepływu wody, parcia wiatru oraz naporu kry lodowej. Obciążenia te są przekazywane w efekcie na grunt za pośrednictwem pali stalowych rurowych lub prefabrykowanych. Uwzględnienie w obliczeniach statycznych rozpatrywanych konstrukcji dynamicznego charakteru obciążeń zewnętrznych jest utrudnione ze względu na nieliniowy, sprężysto-plastyczny charakter reakcji gruntu. Najczęściej oddziaływania dynamiczne zastępuje się w obliczeniach ekwiwalentnymi oddziaływaniami statycznymi, odpowiednio powiększonymi przez współczynniki dynamiczne.



Rys. 1. Konstrukcje dalb przyjęte do analiz obliczeniowych [5]

Również cykliczność i powtarzalność działania obciążeń jest uwzględniana zastępczo, przez redukcję niektórych parametrów opisujących współpracę gruntu z konstrukcją. Zasadniczym zadaniem każdego obliczeń statycznych jest dostarczenie wiarygodnych wyników pozwalających na bezpieczne zaprojektowanie, a w konsekwencji niezawodne i długoletnie funkcjonowanie konstrukcji i budowli.

W niniejszym artykule przedstawiono przykładowe procedury obliczeniowe wraz z wynikami do wybranych rzeczywistych portowych konstrukcji palowych: dalby odbojowej i dalby cumowniczej (rys. 1). Są to konstrukcje jednego z terminali portowych, zlokalizowanych na terenie Portu Północnego w Gdańsku, przy których pracach obliczeniowych i projektowych uczestniczyli pracownicy Katedry Geotechniki PG (obecnie Katedry Geotechniki, Geologii i Budownictwa Morskiego).

OPIS OGÓLNY METODY OBLICZENIOWEJ I PRZYJĘTYCH ZAŁOŻEŃ

Celem prezentowanych obliczeń było oszacowanie sił wewnętrznych w trzonach pali (głównie momentów zginających) oraz przemieszczeń (głównie poziomych) analizowanych konstrukcji, jak również sprawdzenie zagłębienia pali w gruncie.

Rozpatrywane konstrukcje wymodelowano w postaci przestrzennych ram płytowo-prętowych, w których pale zastąpiono prętami współpracującymi z gruntem, wyrażonym za pomocą podpór sprężysto-plastycznych, rozmieszczonych wzdłuż trzonów i pod podstawami pali. Parametry podpór sprężystych określono według propozycji Koseckiego [3] (metoda uogólniona obliczania ustrojów palowych). Cykliczność i powtarzalność działania obciążeń poziomych jest uwzględniana w metodzie obliczeniowej przez zastosowanie współczynnika redukcyjnego (φ) przy określaniu sztywności $k_{x,i}$ podpór sprężystych. Bezpieczeństwo obliczeń jest zapewniane natomiast przez określenie reakcji granicznych $R_{x,gr,i}$ podpór sprężystych na podstawie zredukowanych (obliczeniowych) parametrów wytrzymałościowych gruntu ($\phi^{(r)}$, $c^{(r)}$, $\gamma^{(r)}$).

W artykule nie odniesiono się szczegółowo do metody określania poszczególnych obciążeń i oddziaływań analizowanych konstrukcji, podając jedynie ich ostateczne wartości, przyjęte do obliczeń. Ze względu na sprężysto-plastyczne charakterystyki podpór sprężystych, obliczenia statyczne ram przeprowadzono metodą iteracyjną.

OBLICZENIA DALBY ODBOJOWEJ

Głównym zadaniem dalby odbojowej (rys. 2) jest przejęcie (wygaszenie) energii kinetycznej dobijającej jednostki pływającej. Podczas napierania na dalbę odbojową energia kinetyczna E_k jednostki pływającej zamienia się w energię sprężystości E_s dalby, która wyraża się wzorem:

$$E_s = \frac{1}{2} P_x \cdot u_x \quad (1)$$

gdzie:

P_x – siła pozioma od naporu statku,

u_x – przemieszczenie poziome dalby na wysokości urządzenia odbojowego.



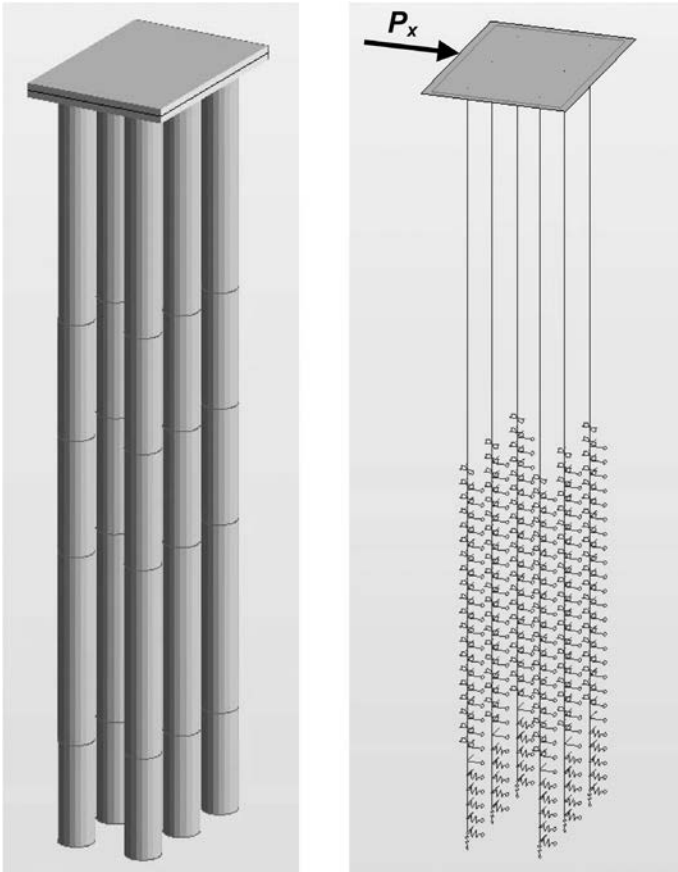
Rys. 2. Przykładowa dalba odbojowa, [6] (inna niż na rys. 1a)

Obie wymienione we wzorze (1) wielkości nie są początkowo znane. Należy je wyznaczyć metodą prób, przy wstępnie założonych parametrach sztywności poziomej dalby zagłębionej w podłożu gruntowym i przy założonej energii kinetycznej cumującego statku. W obliczeniach należy uwzględnić energię pochłoniętą przez urządzenie odbojowe, a także wskazane jest przeanalizowanie kilku (dwóch lub trzech) wariantów charakterystyk podpór sprężystych opisujących reakcję gruntu. Ze względu na sprzężenie zwrotne pomiędzy wielkościami P_x i u_x nie można stwierdzić bez obliczeń, który z wariantów sztywności gruntu będzie najbardziej niekorzystny. Kolejne próby obliczeniowe przeprowadzono przy coraz większej wartości siły P_x do momentu osiągnięcia energii sprężystej E_s o wartości przekraczającej energię kinetyczną E_k . Podczas każdej próby obliczeniowej należy na bieżąco przeprowadzać iteracje ze względu na sprężysto-plastyczną reakcję gruntu. Obecne aplikacje komputerowe umożliwiają automatyczny przebieg takiej iteracji.

Na podstawie wyników kilku prób obliczeniowych można skonstruować charakterystyki E_s - P_x , E_s - u_x oraz E_s - M_{max} (M_{max} – maksymalny moment zginający w trzonie pala), z których możemy następnie odczytać wartości poszukiwanych wielkości (P_x , u_x i M_{max}), odpowiadających wartości energii $E_s = E_k$. Kolejnym etapem obliczeń jest analiza uzyskanych wyników i sprawdzenie warunków stanów granicznych ULS i SLS. W przypadku nie spełnienia któregokolwiek z warunków lub braku akceptowalności wyników z innych powodów, należy przeprojektować konstrukcję dalby i opisaną procedurę obliczeniową przeprowadzić od nowa.

Przyjętą do przykładowych analiz obliczeniowych dalbę przedstawiono na rys. 1a, a model geometryczny i schemat obliczeniowy dalby przedstawiono na rys. 3.

Obliczenia przeprowadzono w dwóch wariantach charakterystyk określających reakcję gruntu (parametrów podpór sprężystych). W wariantcie 1. przyjęto wartości sztywności k_x podpór sprężystych uwzględniające długotrwałość i powtarzalność działania obciążeń (współczynnik $\varphi = 0,65$) oraz reakcje graniczne $R_{x,gr}$ obliczone na podstawie zredukowanych (obliczeniowych) parametrów gruntu. W wariantcie 2. przyjęto sztywności k_x odpowiadające stanowi krótkotrwałości (współczynnik $\varphi = 1,0$), a reakcje graniczne $R_{x,gr}$ obliczone na podstawie charakterystycznych parametrów gruntu. Różnice w charakterysty-

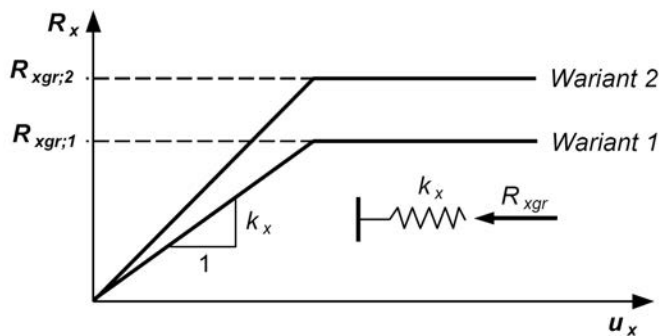


Rys. 3. Model geometryczny i schemat obliczeniowy dalby odbojowej

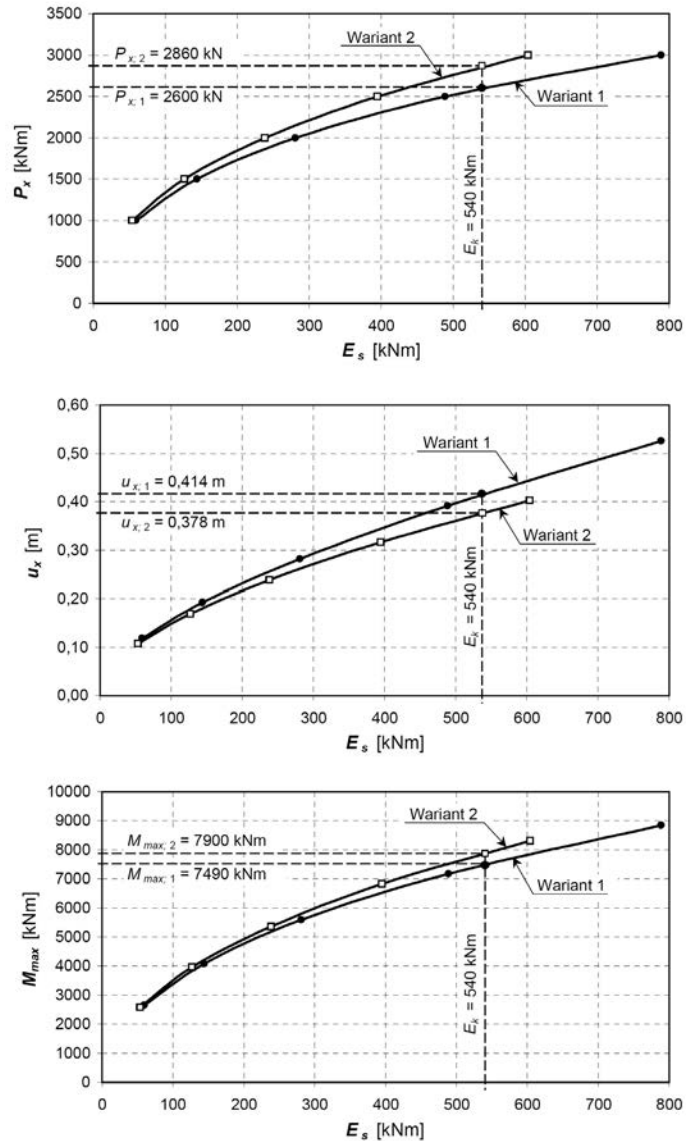
kach podpór sprężysto-plastycznych przedstawiono schematycznie na rys. 4. W obu wariantach zastosowano ponadto różne sztywności k_x podpór sprężystych w pierwszym i drugim rzędzie pali. W pierwszym rzędzie zastosowano według [3] współczynnik $n_2 = 1,0$, a w drugim rzędzie – $n_2 = 0,73$. Założenie takie jest po bezpiecznej stronie, gdyż w jego efekcie uzyskuje się nierównomierne zginanie pali w dalbie.

W obliczeniach analizowanej dalby przyjęto energię kinetyczną podchodzącego statku $E_{k,0} = 890$ kNm oraz urządzenie odbojowe o zdolności pochłaniania energii do $E_{odb} = 440$ kNm. Wartość efektywną energii, jaka przekazuje się na konstrukcję dalby określono z wyrażenia:

$$E_k = E_{k,0} - 0,8 \cdot E_{odb} = 890 - 0,8 \cdot 440 \approx 540 \text{ kNm} \quad (2)$$



Rys. 4. Przyjęte do obliczeń warianty charakterystyk podpór sprężysto-plastycznych

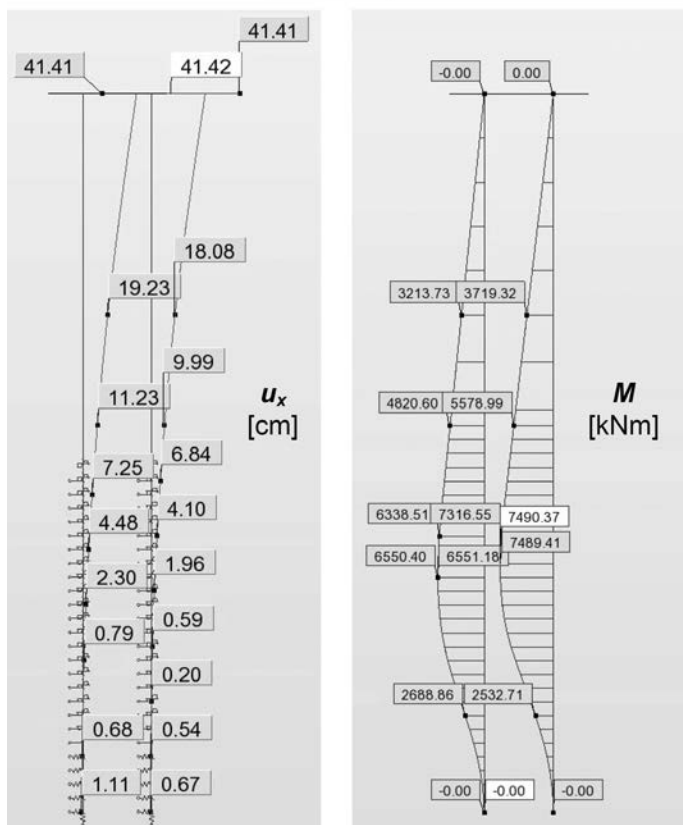


Rys. 5. Zależności otrzymane z obliczeń dalby odbojowej

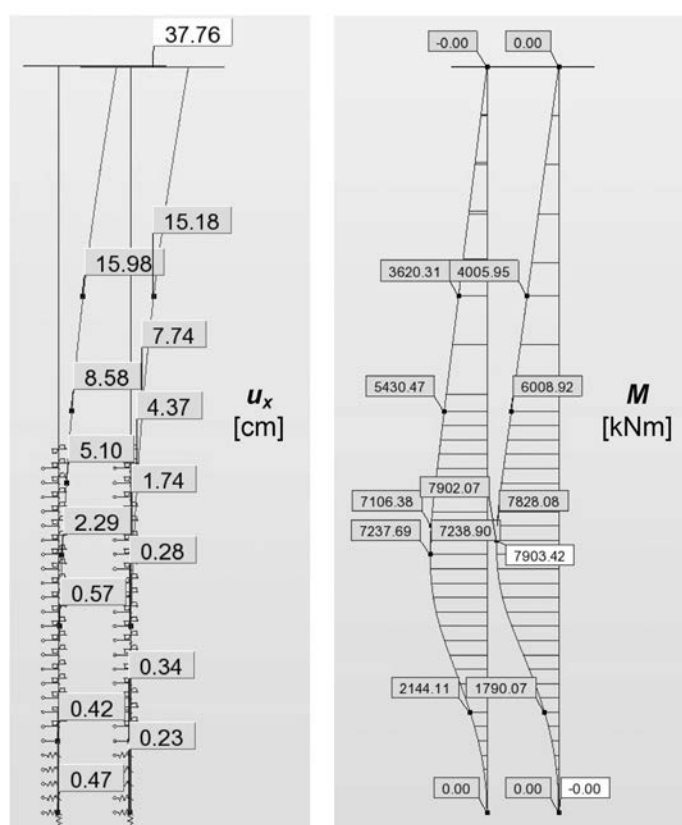
Otrzymane z prób obliczeniowych zależności E_s-P_x , E_s-u_x oraz E_s-M_{max} przedstawiono na rys. 5, a końcowe wykresy przemieszczeń dalby i momentów zginających w palach, odpowiadające energii $E_k = 540$ kNm, przedstawiono na rys. 6.

Przedstawione na rys. 5 i 6 wyniki analiz obliczeniowych wykazały, że wariant 2. jest bardziej niekorzystny dla konstrukcji dalby odbojowej. Otrzymano w nim większe wartości momentów zginających w palach niż w wariantcie 1., w którym, z oczywistych względów, otrzymano większe wartości przemieszczeń. Wynik analizy obliczeniowej jest nietypowy i dość interesujący. Zazwyczaj analizy obliczeniowe różnego rodzaju konstrukcji geotechnicznych wykazują, że przyjmowanie obniżonej sztywności i reakcji gruntu jest założeniem po bezpiecznej stronie i daje bardziej niekorzystny wynik obliczeń. Tak jest rzeczywiście w przypadkach, w których dana konstrukcja jest obciążona siłami i oddziaływaniami o określonych, zdeterminowanych wartościach. W przypadku dalby odbojowej obciążenie stanowi energia kinetyczna statku. Przy tego rodzaju oddziaływaniach występuje sprzężenie zwrotne między obciążeniem i reakcją konstrukcji, co sprawia, że wynik obliczeń jest trudniejszy do przewidzenia, a przyjmowanie

Wariant 1



Wariant 2



Rys. 6. Przesunięcia i momenty zginające w palach dalby odbojowej w końcowej fazie obliczeń

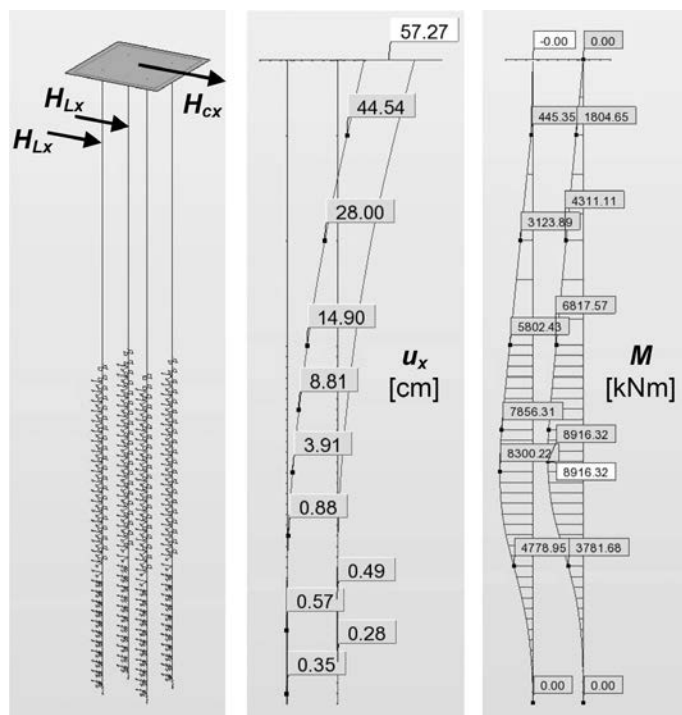
założeń i danych wejściowych nie jest tak oczywiste, jak w konstrukcjach obciążonych siłami o stałych wartościach.

OBLICZENIA DALBY CUMOWNICZEJ

Zadaniem dalby cumowniczej jest przejęcie sił od lin utrzymujących przycumowaną jednostkę pływającą. Dalby cumownicze stosuje się w przypadkach, gdy jednostki pływające nie cumują do nabrzeży, lecz do pomostów lub pirsów rozładunkowych (np. w przypadku jednostek przewożących materiały płynne lub masowe). Dalby cumownicze wraz z dalbami odbojowymi przejmują wówczas wszystkie oddziaływania od jednostki pływającej. Dzięki temu konstrukcja pirsu rozładunkowego może być mniej masywna. Siły z lin cumowniczych przekazywane na zaczepy cumownicze w dalbach lub nabrzeżach pochodzą głównie od parcia wiatru na jednostkę pływającą. Wartości tych sił zależą od wielkości jednostki pływającej i można je określać, np. według zaleceń [4].

Przyjęty do analiz obliczeniowych przykład dalby przedstawiono na rys. 1b. Zarówno w dalbie odbojowej, jak i w dalbie cumowniczej rury palowe mają ścianki o zmiennej grubości i dodatkowo na odcinku o długości 4,0 m, przechodzącym przez dno akwenu, wypełnione są betonem. Rozpatrywana dalba cumownicza wykonana jest z pali pionowych połączonych przegubowo z płytami oczepowymi. W praktyce często stosuje się dalby cumownicze z pali kozłowych, sztywno połączonych w głowicach z oczepem, co zwiększa ich sztywność i stateczność na siły poziome.

Schemat obliczeniowy dalby cumowniczej wraz z podstawowymi wynikami obliczeń przedstawiono na rys. 7. Wyniki dotyczą obliczeń dalby obciążonej siłami poziomymi: siłą od ciągnięcia statku $H_{cx} = 1250$ kN przyłożoną do oczepu i dwie-



Rys. 7. Schemat statyczny i wyniki obliczeń dalby cumowniczej

ma siłami od naporu kry lodowej $H_{Lx} = 410$ kN, działającymi bezpośrednio na pale. Przedstawione na rys. 7 wyniki dotyczą jednoczesnego działania wszystkich wymienionych obciążeń.

Konstrukcję dalby cumowniczej obliczono tylko w wariancie 1. sztywności i reakcji gruntu, gdyż wiadomo, że w tym przypadku jest to założenie po stronie bezpiecznej. W rzeczywistości siły H_{cx} i H_{Lx} również odznaczają się charakterystykami dynamicznymi i dużą zmiennością, jednak zazwyczaj przyjmuje się je o ekwiwalentnych i maksymalnych wartościach statycznych.

WNIOSKI

Przedstawione w artykule analizy obliczeniowe przykładowych palowych konstrukcji portowych wykazały, że ich obliczanie jest zadaniem złożonym. Bezpieczne i miarodajne obliczenie dalb palowych wymaga rozważenia i wycucia inżynierskiego. Przekonanie, że przyjęcie zredukowanych parametrów mechanicznych gruntu daje zawsze wynik obliczeń po bezpiecznej stronie, może być zawodne w przypadku takich konstrukcji jak dalby odbojowe. Obliczanie tego rodzaju ustrojów należy przeprowadzać wielowariantowo. Miarodajne określenie przedziału wartości parametrów geotechnicznych gruntów, przyjmowanych w poszczególnych wariantach jest jednym z trudniejszych elementów całej analizy obliczeniowej i wymaga dokładnych wyników badań podłoża gruntowego oraz dużego doświadczenia projektanta.

Zaprezentowane w artykule podejście obliczeniowe do analizy ustrojów palowych, w tym również palowych konstrukcji portowych, nie jest nowe. Jest ono znane od ponad trzydziestu lat, i stosowane praktycznie od momentu pojawienia się komputerowych technik obliczeniowych. Również obiekt portowy, którego przykładowe elementy konstrukcyjne przeanalizowano w artykule, zrealizowano prawie dwadzieścia lat temu [5]. Mimo to, efektywność oraz atrakcyjność metody obliczeniowej jest wciąż wysoka i całkowicie wystarczająca do wykorzystywania jej w celach praktycznych. Ewentualny, dalszy rozwój tej i po-

dobnych metod obliczeniowych powinien zmierzać w kierunku dokładniejszego uwzględnienia zjawisk zachodzących w gruncie podczas jego współpracy z palami, w tym przy oddziaływaniach dynamicznych i powtarzalnych. Jest to bardzo istotne w przypadku analiz konstrukcji portowych, które są szczególnie narażone na różnorodne i złożone oddziaływania zewnętrzne i których ranga jest dodatkowo bardzo wysoka.

Wadą metody jest nadal duża pracochłonność, dlatego dalszy jej rozwój powinien zmierzać również w kierunku tworzenia aplikacji komputerowych umożliwiających kompleksową analizę konstrukcji palowych. Alternatywą w stosunku do opisanej metody obliczeniowej jest oczywiście analiza z wykorzystaniem MES. Należy jednak zaznaczyć, że w przypadku przestrzennych układów palowych obciążonych złożonym układem obciążeń, w celu uzyskania miarodajnych wyników, konieczne jest wykorzystywanie aplikacji MES umożliwiających analizy w układzie 3D.

LITERATURA

1. Gwizdała K.: Fundamenty palowe, t. II, wyd. II. PWN, Warszawa 2014.
2. Hueckel S.: Budowle morskie, t. II, wyd. II. Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1978.
3. Kosecki M.: Statyka ustrojów palowych. Zasady obliczania metodą uogólnioną. PZITB Oddział Szczecin, Biuletyn nr 1/88.
4. Mazurkiewicz B. z zespołem: Zalecenia do projektowania morskich konstrukcji hydrotechnicznych Z1-Z46. Politechnika Gdańska, Katedra Budownictwa Morskiego, Studia i Materiały - zeszyt nr 21. Gdańsk 1997.
5. Szopowski Z.: Analityczne wymiarowanie dalb stalowych o pionowych palach rurowych. Inżynieria Morska, nr 5/1983.
6. Tejchman A., Gwizdała K., Brzozowski T., Krasieński A.: Obliczenia statyczne konstrukcji palowych do projektu Terminalu Przeladunkowego w Porcie Północnym w Gdańsku. Opracowanie wewnętrzne na zlecenie PP „Budmors”, Gdańsk 1995 (nie publikowane).
7. www.aquaprojekt.pl