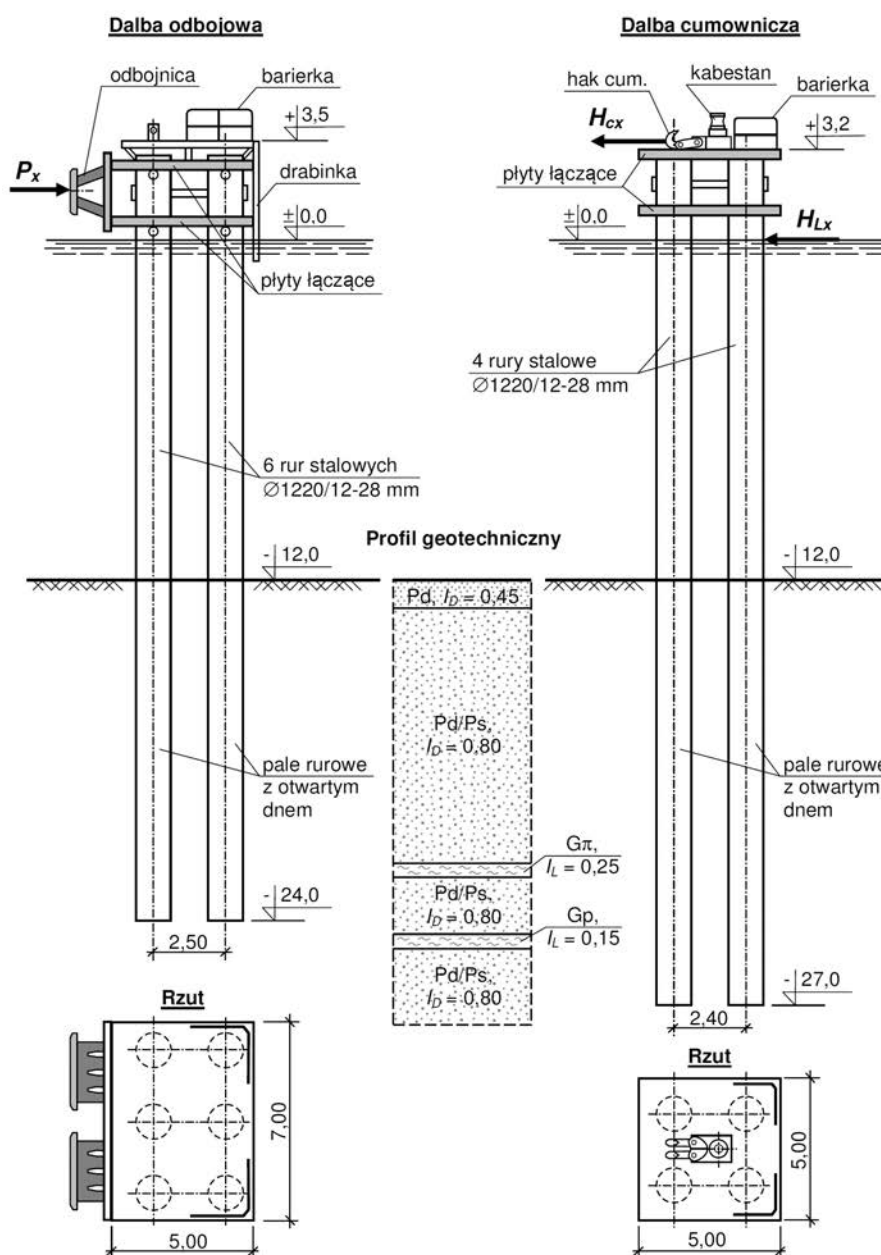


# Obliczanie statyczne palowych konstrukcji portowych obciążonych siłami poziomymi

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 ( $\varphi$ ) 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.



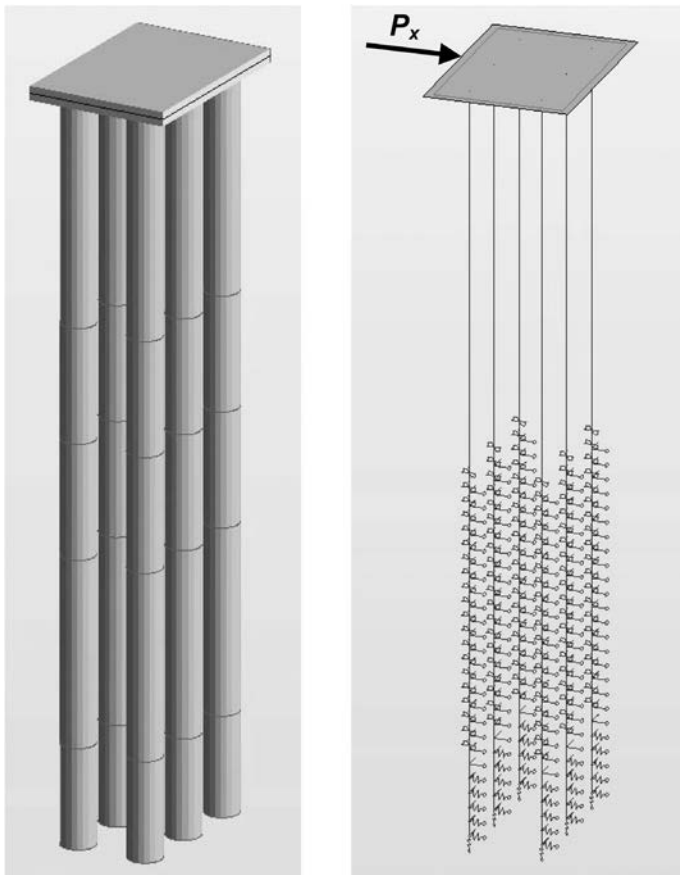
Rys. 2. Przykładowa dalba odbojowa, [6] (inna niż na rys. 1a)

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-

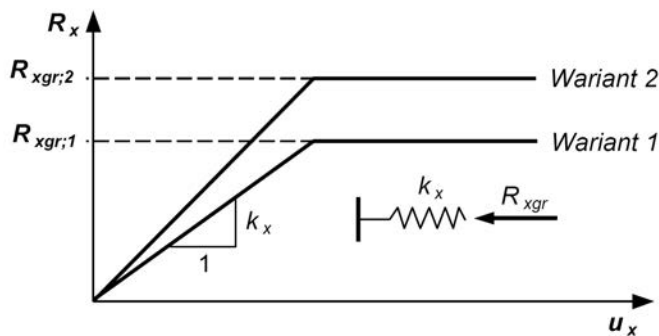


Rys. 3. Model geometryczny i schemat obliczeniowy dalby odbojowej

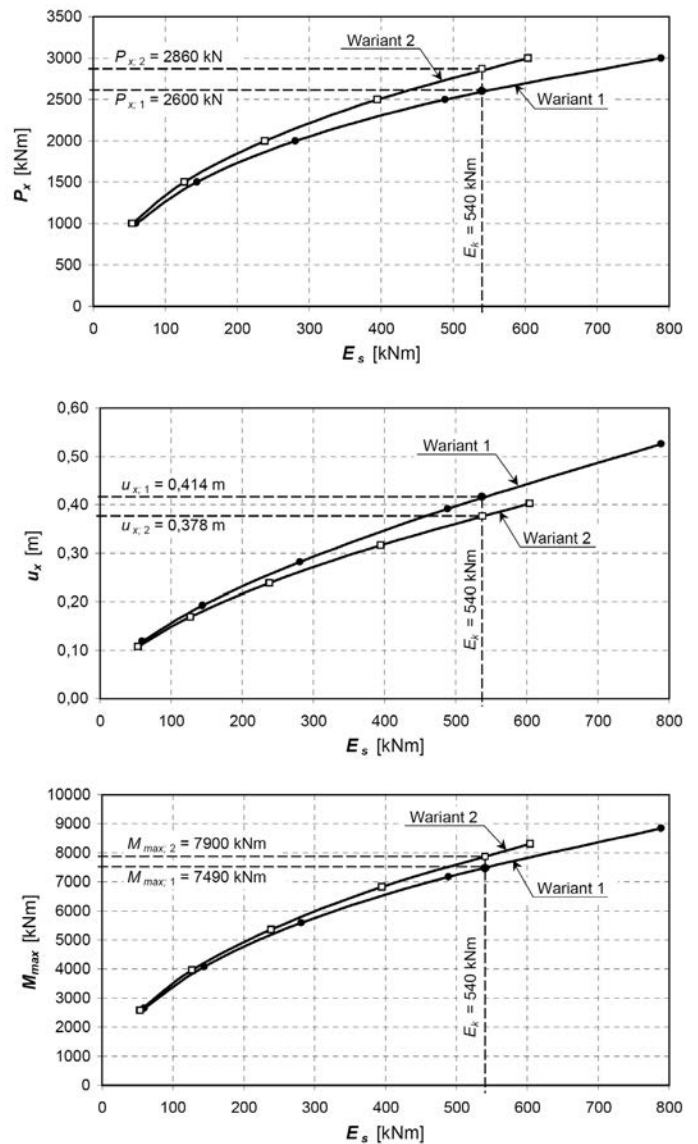
kach podpór sprężysto-plastycznych przedstawiono schematycznie na rys. 4. W obu wariantach zastosowano ponadto różne sztywności  $k_x$  podpór sprężystych w pierwszym i drugim rzędzie pali. W pierwszym rzędzie zastosowano według [3] współczynnik  $n_2 = 1,0$ , a w drugim rzędzie –  $n_2 = 0,73$ . Założenie 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

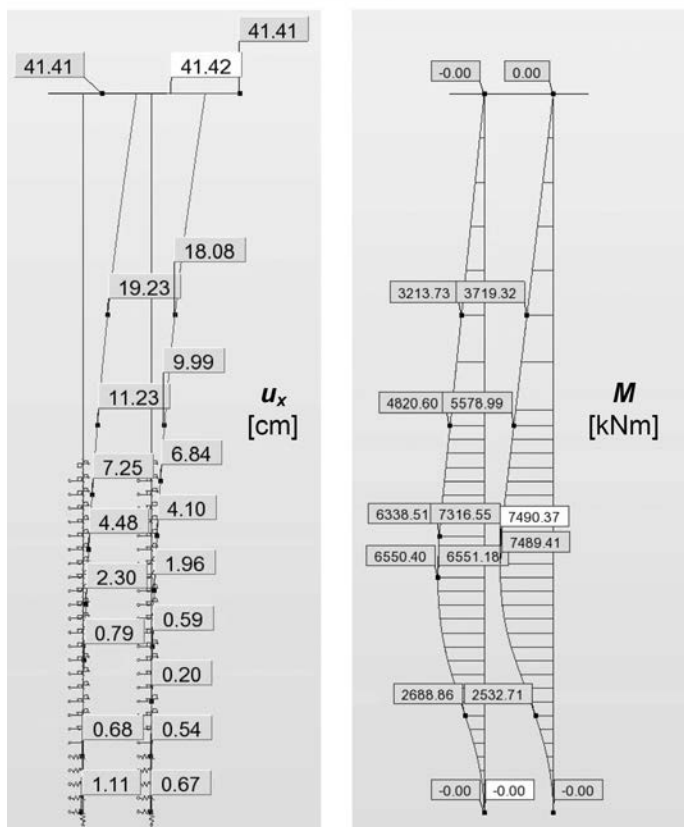


Rys. 5. Zależności otrzymane z obliczeń dalby odbojowej

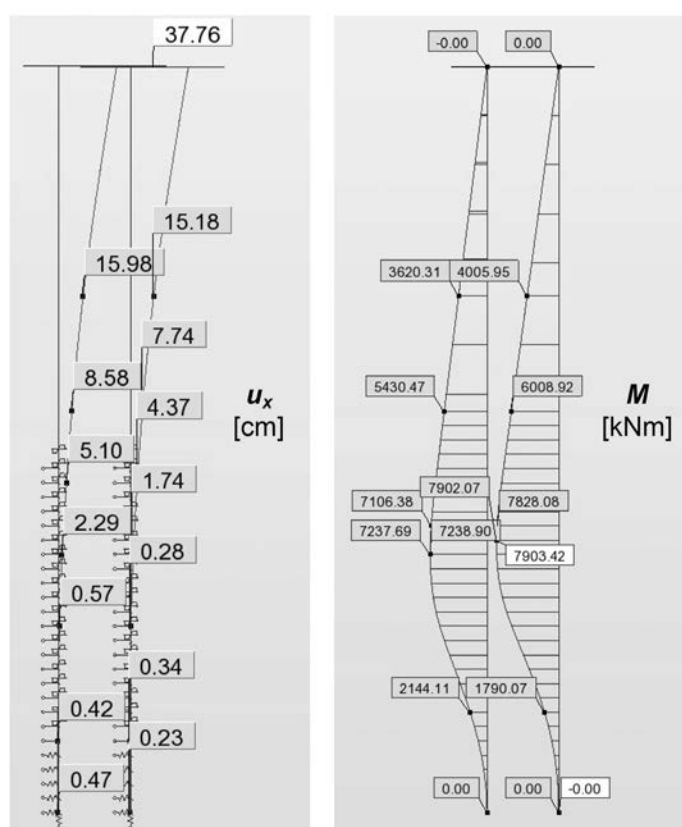
Otrzymane z prób obliczeniowych zależności  $E_s-P_x$ ,  $E_s-u_x$  oraz  $E_s-M_{max}$  przedstawiono na rys. 5, a końcowe wykresy przemieszczeń dalby i momentów zginających w palach, odpowiadające energii  $E_k = 540$  kNm, przedstawiono na rys. 6.

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 wariacie 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. Przeszczenia i momenty zginające w palach dalby odbojowej w końcowej fazie obliczeń

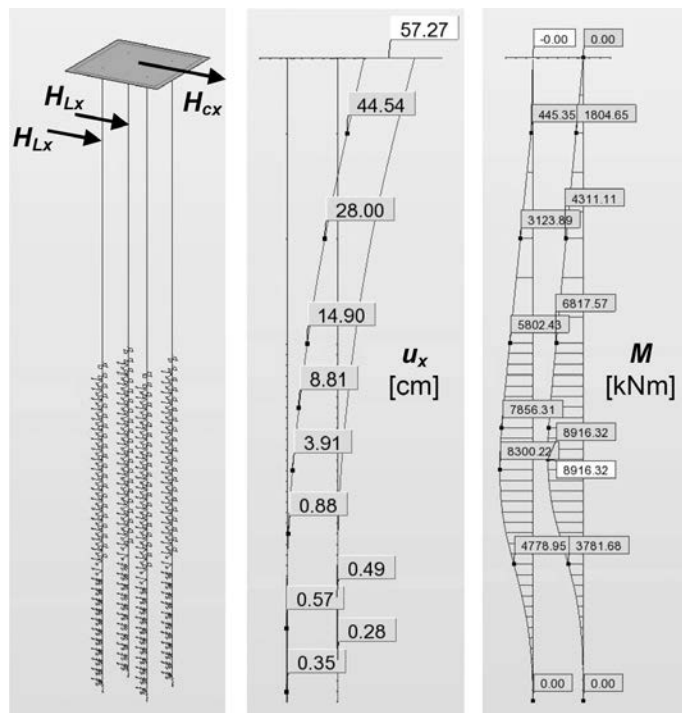
założeń i danych wejściowych nie jest tak oczywiste, jak w konstrukcjach obciążonych siłami o stałych wartościach.

### 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., Krasiński 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](http://www.aquaprojekt.pl)