

METODY REDUKCJI OBCIĄŻEŃ HYDRODYNAMICZNYCH DLA ODMORSKICH ŚCIAN MASYWNYCH FALOCHRONÓW STROMYCH

Obciążenia odmorskich ścian falochronów masywnych są złożoną funkcją warunków falowych oraz geometrii samej konstrukcji. W opracowaniu rozpatrzono sześć metod obliczeniowych, zakładając losowość występowania fal niezałamanych lub załamujących się. Przeprowadzona analiza porównawcza pozwala na wybór optymalnego rozwiązania oraz wyraźnie zaznacza kierunki rozwoju dla masywnych falochronów o ścianach stromych.

Słowa kluczowe: falochron masywny, ściana pionowa, oddziaływanie fali, modele matematyczne.

WSTĘP

Falowanie powierzchniowe wywiera największy wpływ na zachowanie się budowli inżynierskiej w morzu. Bez odpowiedniego zabezpieczenia przed falowaniem prawidłowa praca portów morskich nie byłaby możliwa. Podstawowymi konstrukcjami hydrotechnicznymi osłaniającymi przybrzeżny obszar wodny i brzeg morski przed działaniem fali są falochrony. Falochrony występujące na polskim wybrzeżu mają pod względem konstrukcyjnym charakter stałych budowli nieruchomych, posadowionych na dnie lub w gruncie zalegającym poniżej dna. Projektowane są jako budowle zwarte o ścianach stromych lub pochyłych, przy czym falochrony o ścianach stromych występują w postaci falochronów sprężystych i masywnych. Oddziaływanie falowania morskiego na odmorskie strome ściany falochronów masywnych jest przedmiotem niniejszej analizy.

1. FALOCHRONY O ŚCIANACH STROMYCH – RODZAJE KONSTRUKCJI

Historia projektowania falochronów pionowościennych sięga setek lat p.n.e. Najstarsze, zbudowane w rejonie Morza Śródziemnego, miały formę drewnianych kaszyc wypełnionych kamieniem. Natomiast pierwsze falochrony kesonowe zbudowane zostały na Bliskim Wschodzie w okolicach Cezarei, ok. 20 lat p.n.e. Część podwodna takiej konstrukcji składała się z drewnianych form wypełnionych

zaprawą betonową, które opuszczane były na dno morskie za pomocą koszy. Szerszy opis starożytnych przykładów falochronów można znaleźć w pracach: [2], [3], [5], [7] i [9].

Do nowożytnych konstrukcji pionowościennych należą klasyczne monolityczne falochrony pionowościennie posadowione zwykle na warstwie podsypki o niewielkiej miąższości, spoczywającej bezpośrednio na dnie morskim, oraz ich modyfikacje przede wszystkim w zakresie kształtu odmorskiej stromej ściany falochronu. Oprócz wspomnianej typowej pionowościennej konstrukcji ściany odmorskie mogą być także pochyle (o kącie nachylenia względem podstawy falochronu większej niż 70°), pionowościennie z pochyloną koroną oraz pionowościennie wzmocnione na przedpolu narzutem z bloków betonowych lub kamiennych o odpowiednim ciężarze. Ten ostatni typ konstrukcji jest szczególnie popularny w Japonii, gdzie nazywany jest poziomym falochronem mieszanym (z ang. *horizontally composite breakwater*).

2. OBCIĄŻENIA HYDRODYNAMICZNE OD FALOWANIA NA KONSTRUKCJE PIONOWOŚCIENNE

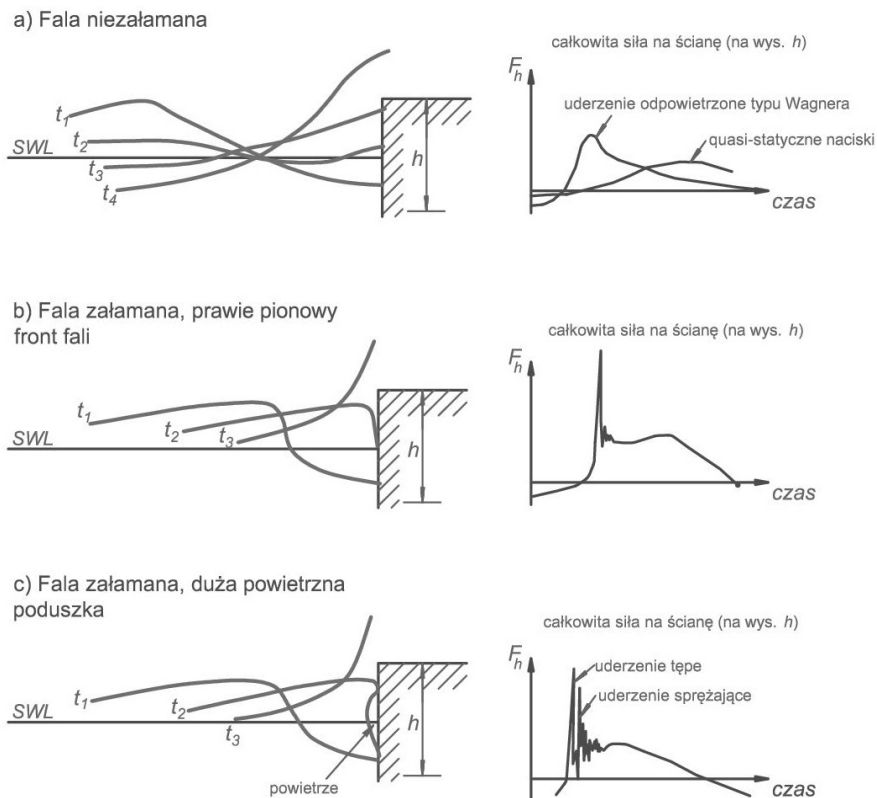
Obciążenia dynamiczne działające na budowlę są złożoną funkcją warunków falowych oraz geometrii samej konstrukcji. Obciążenia budowli morskich falowaniem powierzchniowym są klasyfikowane jako obciążenia od naporu fal niezalamanych oraz obciążenia od naporu fal załamanych.

Jeżeli na konstrukcję oddziałuje fala niezalamana, to ciśnienie wywierane na ścianę falochronu ma łagodny przebieg w czasie i jest prawie w pełni skorelowane z fazą fali (rys. 1a). Ten rodzaj obciążeń nazywany jest obciążeniami pulsacyjnymi lub zamiennie quasi-statycznymi, ponieważ okres fali jest znacznie większy niż okres drgań konstrukcji. Warto w tym miejscu zaznaczyć, iż drgania własne falochronów skrzyniowych mają częstotliwość co najmniej o rząd większą od częstotliwości wymuszenia, a tym samym nie istnieje możliwość powstania drgań rezonansowych. Największy napór fali występuje przy jej zupełnym odbiciu, w chwili gdy na ścianę oddziałuje grzbiet fali, dlatego też taki przypadek bierze się pod uwagę do obliczeń falochronów morskich w praktyce projektowej. Dodatkowo tego rodzaju obciążenie jest szczególnie niekorzystne w wypadku posadowienia falochronu na gruntach drobnoziarnistych, słaboprzepuszczalnych.

W przypadku fal załamanych wyróżnia się dwa zasadnicze rodzaje ich oddziaływania, w zależności od charakteru fal podchodzących do ścian pionowych. Jeżeli fala załamuje się nie bezpośrednio przy ścianie budowli, lecz w pewnej odległości od niej, na ścianę oddziałuje fala załamana. Może ona podchodzić do konstrukcji z „poduszką powietrzną” (ang. *air pocket*) i wtedy pojawia się podwójny „pik” ciśnienia (ang. *peak load*). Pierwsze i większe uderzenie jest indukowane przez grzbiet fali, zaraz po nim następuje drugie uderzenie związane z maksymalną kompresją ciśnienia (rys. 1c). Czas trwania podwójnego uderzenia waha się między 0,2–1,0 sekundą.

Silniejsze oddziaływanie hydrodynamiczne na budowlę pojawia się wówczas, gdy fale nadbiegają z kierunku prostopadłego do osi wzdłużnej ściany falochronu, za najbardziej zaś niebezpieczne dla konstrukcji, z punktu widzenia jej stateczności, uważa się pojawienie się fali załamanej o prawie pionowym froncie (rys. 1b). Wywołuje ona pojedynczy „pik” siły z bardzo małymi oscylacjami. Uderzenie fali tego typu wzbudza bardzo wysokie ciśnienie hydrodynamiczne o ekstremalnie krótkim czasie trwania.

Impulsowe obciążenie od fali załamanej może osiągać bardzo duże wartości, a ryzyko wystąpienia obciążenia ekstremalnego rośnie wraz z liczbą obciążeń. Należy też pamiętać, iż charakter takich obciążeń jest dalece nieregularny i mocno skomplikowany w opisie matematycznym, stąd też nie jest łatwe opracowanie wiarygodnych formuł określających impulsywne obciążenia od fal załamanych.



Rys. 1. Rodzaje oddziaływań na konstrukcję pionowościenneą od fali niezalamanej i załamanej

Fig. 1. Vertical wall wave forces from nonbreaking and breaking waves

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

3. SIŁY WYWOŁANE FALOWANIEM NA ODMORSKIE STROME ŚCIANY FALOCHRONÓW

Poniższy rozdział przedstawia metody obliczeniowe do wyznaczania rozkładu ciśnień wywieranych na przybrzeżne konstrukcje falochronów od fal załamanych i niezałamanych. Większość schematów obliczeń opiera się na metodzie opracowanej przez Godę [6]. Proponowane metody stanowią ujednolicony sposób podejścia do projektowych obciążeń od falowania na konstrukcje o ścianach stromych.

W tabeli 1 zaprezentowano zestawienie metod obliczeniowych, pozwalających wyznaczyć rozkłady ciśnień dla przyjętej fali projektowej. Wszystkie formuły oparte są na badaniach dla modeli zeskalowanych. W następnej kolejności przedstawione schematy omówiono w sposób szczegółowy.

Tabela 1. Zestawienie metod obliczeniowych

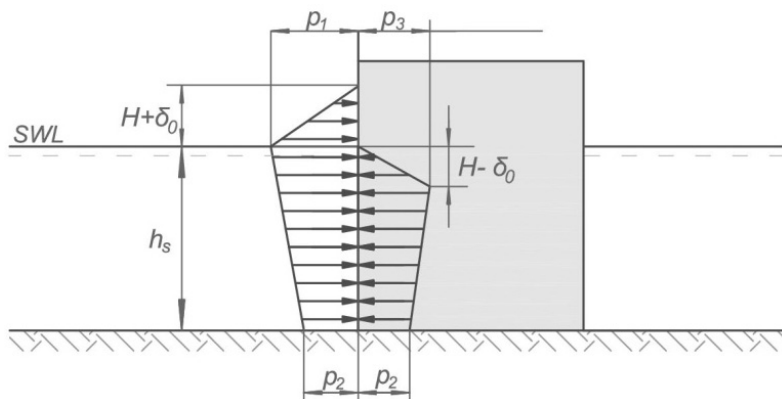
Table 1. Calculation methods

Schemat	Metoda	Fala	Konstrukcja
I	Metoda Sainflou	Fala stojąca	Pionowa nieprzepuszczalna ściana
II	Metoda Gody	Fala dwuwymiarowa – podchodzi ukośnie do ściany	Pionowa nieprzepuszczalna ściana
III	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Tanimoto i Shimosako	Fala załamana	Pionowa nieprzepuszczalna ściana
IV	Metoda Gody zmodyfikowana przez Tanimoto i Kimura	Fala dwuwymiarowa – podchodzi prostopadle do ściany	Pionowa nieprzepuszczalna ściana
V	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi i Hosoyoamada	Fala dwuwymiarowa – podchodzi prostopadle do ściany	Nieprzepuszczalna pochyła głowa konstrukcji
VI	Metoda Gody zmodyfikowana przez Takahashi, Tanimoto i Shimosako	Fala dwuwymiarowa – podchodzi prostopadle do ściany	Pozioma złożona konstrukcja

Pierwsze dwa schematy odnoszą się do obciążeń falą niezałamaną, kolejne cztery zaś – do obciążeń falą załamaną. Dodatkowo schemat II stanowi punkt wyjścia dla kolejnych formuł, które stanowią jego modyfikację.

Schemat I. Metoda Sainflou dla fali podchodzącej prostopadle do konstrukcji. Pełne odbicie, fala stojąca regularna [8]

Metoda Sainflou została wyprowadzona w sposób teoretyczny dla przypadku fal regularnych przy działaniu grzbietu fal od strony morza i doliny fali od strony portu na pionowościenną konstrukcję. Niniejsza metoda nie może być stosowana w przypadku oddziaływania fal załamanych oraz gdy ma miejsce przelewanie wody przez konstrukcję.



Rys. 2. Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja pionowościenne, metoda Sainflou

Fig. 2. The Sainflou formula for head-on, fully reflected, standing regular waves

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1].

$$p_1 = (p_2 + \rho_w g h_s) \frac{H + \delta_0}{h_s + H + \delta_0} \quad (3.1)$$

$$p_2 = \frac{\rho_w g H}{\cosh(2\pi h_s / L)} \quad (3.2)$$

$$p_3 = \rho_w g (H - \delta_0) \quad (3.3)$$

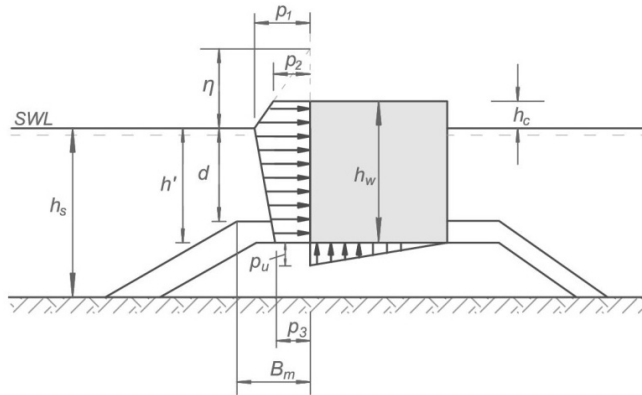
$$\delta_0 = \frac{\pi H^2}{L} \coth\left(\frac{2\pi h_s}{L}\right) \quad (3.4)$$

gdzie:

- H – wysokość fali [m],
- p_1 – ciśnienie falowe w poziomie spokoju w fazie grzbietu fali [kPa],
- p_2 – ciśnienie falowe w podstawie konstrukcji pionowościennej [kPa],
- p_3 – ciśnienie falowe w poziomie spokoju w fazie doliny fali [kPa],
- δ_0 – wzniesienie poziomu falowania ponad poziom spokoju [m],
- ρ_w – gęstość wody morskiej [kN/m^3],
- h_s – głębokość przy konstrukcji [m],
- L – lokalna długość fali [m].

Schemat II. Metoda Gody dla fal nieregularnych [6]

Schemat dotyczy obciążeń falą niezałamana. Stanowi punkt wyjścia dla innych metod obliczeniowych, przedstawionych w kolejnych schematach.



Rys. 3. Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja pionowościenna, metoda Gody

Fig. 3. Goda formula for irregular waves, wave load on vertical construction

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1].

$$p_1 = 0,5(1 + \cos \beta)(\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha_* (\cos \beta)^2) \rho_w g H_{proj} \quad (3.5)$$

$$p_2 = \begin{cases} \left(1 - \frac{h_c}{\eta}\right) & \text{dla } \eta > h_c \\ 0 & \text{dla } \eta \leq h_c \end{cases} \quad (3.6)$$

$$p_u = 0,5(1 + \cos \beta) \lambda_3 \alpha_1 \alpha_3 \rho_w g H_{proj} \quad (3.7)$$

gdzie:

H_{proj} – wysokość fali projektowej zdefiniowana jako najwyższa fala na przedpolu konstrukcji. Goda (1985) dla strefy przyboju zaleca w praktycznym projektowaniu przyjęcie wartości $1,8 H_s$, która odpowiada 0,15% prawdopodobieństwa przewyższenia w przypadku przyjęcia rozkładu Rayleigha [m],

β – kąt padania fali (kąt między grzbietem fali a frontem konstrukcji) [°],

α_* – współczynnik $\alpha_* = \alpha_2$ [-],

$\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ – współczynniki określane wg wzorów [-],

$$\alpha_1 = 0,6 + 0,5 \left[\frac{4\pi h_s}{\sinh(4\pi h_s)} \right],$$

$$\alpha_2 = \min \left(\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{proj}}{d} \right)^2; \frac{2d}{H_{proj}} \right),$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h_w - h_c}{h_s} \left[1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h_s / L)} \right],$$

L – długość fali na głębokości h_b , odpowiadająca okresowi fali znacznej $T_S \approx 1,1 T_m$, gdzie T_m jest średnim okresem fali [m],

h_b – głębokość wody w odległości $5 H_s$ w kierunku morza od ściany konstrukcji [m],

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – parametry zależne od typu konstrukcji; dla konwencjonalnych pionowych ścian,

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 1 [-],$$

h_s – głębokość wody przy konstrukcji [m].

Schemat III. Metoda Gody zmodyfikowana przez uwzględnienie prostopadłej, impulsowej siły od załamującej się fali [11]

Modyfikacja metody Gody dotyczy ciśnienia p_1 w poziomie spokoju. Współczynnik α_* został zmodyfikowany w następujący sposób:

$$\alpha_* = \text{większe z dwóch wartości: } \alpha_1 \text{ lub } \alpha_2 \quad (3.8)$$

$$\alpha_* = \text{mniejsze z dwóch wartości: } \left(\frac{h_b - d}{3h_b} \left(\frac{H_{proj}}{d} \right)^2 \right); \quad \frac{2d}{H_{proj}} \quad (3.9)$$

$$\alpha_1 = \alpha_{I0} \cdot \alpha_{I1} \quad (3.10)$$

$$\alpha_{I0} = \begin{cases} H_{proj}/d & \text{dla } H_{proj}/d \leq 2 \\ 2,0 & \text{dla } H_{proj}/d > 2 \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\alpha_{I1} = \begin{cases} \cosh \delta_2 / \cosh \delta_1 & \text{dla } \delta_2 \leq 0 \\ \frac{1}{\cosh \delta_1 (\cosh \delta_2)^{\frac{1}{2}}} & \text{dla } \delta_2 > 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

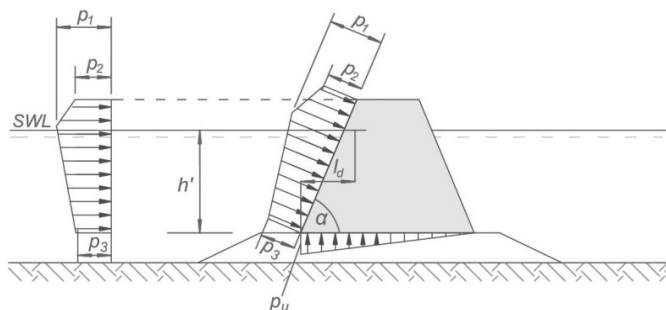
$$\delta_1 = \begin{cases} 20 \cdot \delta_{11} & \text{dla } \delta_{11} \leq 0 \\ 15 \cdot \delta_{11} & \text{dla } \delta_{11} > 0 \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\delta_{11} = 0,93 \left(\frac{B_m}{L} - 0,12 \right) + \left(\frac{h_s - d}{h_s} - 0,6 \right) \quad (3.14)$$

gdzie oznaczenia parametrów H_{proj} , L , h_s , h_b , B_m zgodne ze schematem II.

Schemat IV. Obciążenie od falowania nieprzepuszczalnej pochylonej ściany [12]

Wyniki zbadanego przez Tanimoto i Kimurę [12] modelu wskazują, iż przedstawiona w schemacie II metoda Gody [6] może być zastosowana dla ściany pochylonej o kącie $\alpha \geq 70^\circ$. Zasada obliczeń polega na zrzutowaniu ciśnień falowych obliczonych dla pionowej ściany według schematu II (rys. 4).



Rys. 4. Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja z nieprzepuszczalną pochyloną ścianą

Fig. 4. Wave loads on impermeable inclined walls

Ciśnienie generujące wypór w podstawie konstrukcji jest mniejsze w porównaniu do pionowego lica ściany podmorskiej falochronu. Matematycznie, współczynnik λ_3 służący do wyznaczenia ciśnienia (albo wyporu) p_u określa się zależnością:

$$\lambda_3 = \exp[-2,26(7,2l_d/L)^3] \quad (3.15)$$

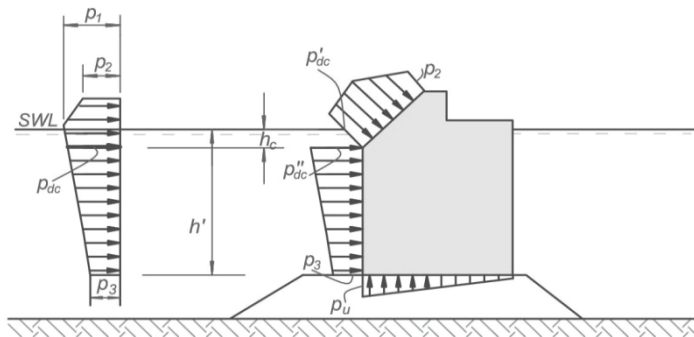
gdzie:

l_d – współczynnik określony zależnością: $l_d = h' \cot \alpha$ [m],

L – długość fali [m].

Schemat V. Obciążenie od falowania konstrukcji pionowościenną z pochyloną koroną [10]

Zasada taka sama jak w poprzednim schemacie – zrzutowanie ciśnień, przetworzono sekcje o kącie nachylenia 45–56 stopni.



Rys. 5. Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja pionowościenna z pochyloną koroną

Fig. 5. Wave loads on sloping top structures

Źródło: opracowanie własne na podstawie [4].

$$p'_1 = \lambda_{SL} p_1 \sin \alpha \quad (3.16)$$

$$p'_2 = \lambda_{SL} p_2 \sin \alpha \quad (3.17)$$

$$p'_{dc} = \lambda_V p_{dc} \sin \alpha \quad (3.18)$$

$$p'''_{dc} = \lambda_V p_{dc} \quad (3.19)$$

$$p'_3 = \lambda_V p_3 \quad (3.20)$$

gdzie:

λ_{SL} – współczynnik określony zależnością:

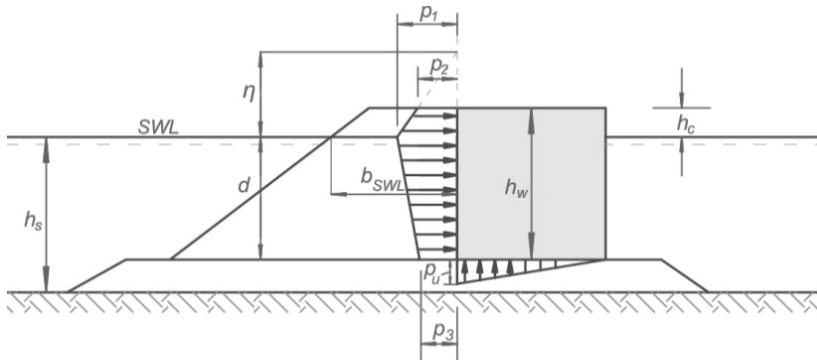
$$\lambda_{SL} = \frac{1}{\sin^2 \alpha} \min \left[1,0, \max \left(\sin^2 \alpha, 1 + 0,46 \cos^2 \alpha - 23 \frac{H}{L} \cos^2 \alpha \right) \right],$$

λ_v – współczynnik określony zależnością:

$$\lambda_v = \min\left[1, 0; \max\left(1, 1; 1, 1 + 11 \frac{d_c}{L} - 5, 0 \frac{H}{L}\right)\right]$$

p_1, p_2, p_3, p_{dc} & p_u – wartości obliczone według wzorów podanych w schemacie II.

Schemat VI. Obciążenie falą na konstrukcję pionowościaną umocnioną narzutem [11]



Rys. 6. Rozkład ciśnień na ścianie falochronu, konstrukcja pionowościaną umocnioną narzutem z bloków kształtowych

Fig. 6. Wave loads on vertical walls protected by a rubble-mound structure

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1].

Przyjęto, że narzut złożony jest z bloków kształtowych (tetrapodów lub dolo-sów). Szerokość umocnienia narzutowego na szczycie pionowej nie powinna być mniejsza niż podwójny wymiar bloku. Nachylenie skarpy – 1:1.5. Model został zba-dany dla następujących przedziałów charakterystycznych: $h_s/L_{1/3} = 0,07 \div 0,11$; $b_{\text{poz.spok.}}/L_{1/3} = 0,046 \div 0,068$.

Współczynniki obliczane w poprzednich schematach są zmodyfikowane w sposób następujący:

$$\lambda_1 = \lambda_3 = \begin{cases} 1,0 & \text{dla } H_{proj}/h_s < 0,3 \\ 1,2 - 0,67(H_{proj}/h_s) & \text{dla } 0,3 \leq H_{proj}/h_s \leq 0,6 \\ 0,8 & \text{dla } H_{proj}/h_s > 0,6 \end{cases} \quad (3.21)$$

$$\lambda_2 = 0 \quad (3.22)$$

Poniżej znajdują się wartości statystyczne wartości średniej $\mu\lambda_1$, procentowe-go współczynnika wariacyjnego $\frac{\sigma\lambda_1}{\mu\lambda_1}$, dla określonego współczynnika λ_1 :

$$\mu\lambda_1 = \begin{cases} 0,90 & \text{dla } H_{proj}/h_s < 0,4 \\ 0,90 - (H_{proj}/h_s - 0,4) & \text{dla } 0,3 \leq H_{proj}/h_s \leq 0,7 \\ 0,6 & \text{dla } 0,7 < H_{proj}/h_s < 0,8 \end{cases} \quad (3.23)$$

$$\frac{\sigma\lambda_1}{\mu\lambda_1} = 5\% - 10\% \quad (3.24)$$

4. PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIE METOD DO OBLICZANIA OBCIĄŻEŃ HYDRODYNAMICZNYCH

Wśród wszystkich dostępnych metod do wyznaczania obciążeń hydrodynamicznych od oddziaływającego falowania nie znaleziono jeszcze metody, której wyniki byłyby dokładnym odzwierciedleniem obciążeń rzeczywistych. Niezwykle istotnym elementem w czasie projektowania morskiej konstrukcji hydrotechnicznej jest dokonanie wyboru metody obliczeniowej, która wiąże się z określeniem, z jakiego rodzaju falowaniem mamy do czynienia, tzn. czy fala jest niezałamana, czy załamująca się. Niniejszy rozdział stanowi analizę porównawczą wyników obliczeń dla schematów przedstawionych w poprzednim rozdziale.

W przeprowadzonych obliczeniach przyjęto takie same warunki falowania dla wszystkich metod, zakładając, że wystąpienie fali załamującej się może mieć charakter losowy. Obciążenie od parcia hydrostatycznego zostało pominięte, ponieważ w przypadku analizowanych konstrukcji falochronów masywnych siły hydrostatyczne przy poziomie spokoju znoszą się.

Przyjęte dane obliczeniowe:

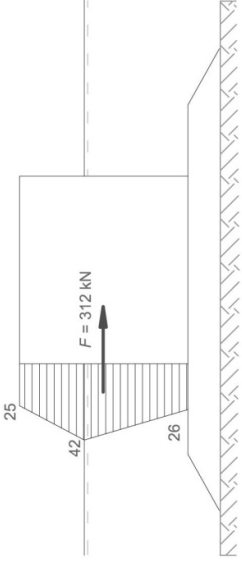
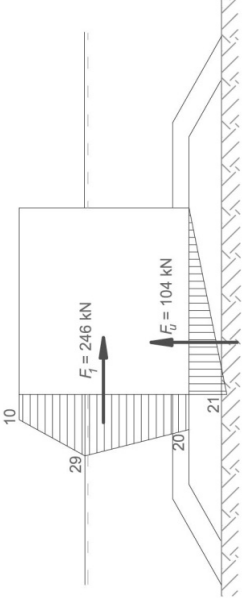
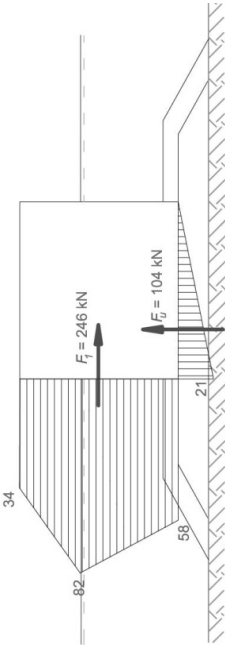
- wysokość fali projektowej $H_{proj} = 3,5$ m,
- okres fali $T = 6,0$ m,
- głębokość wody $h_s = 7,5$ m,
- nachylenie dna 1:50,
- konstrukcja posadowiona na podsypce o nachyleniu 1:2,
- kąt nachylenia ściany w schemacie IV $\alpha = 80^\circ$,
- kąt nachylenia korony w schemacie V $\alpha = 45^\circ$,
- nachylenie narzutu w schemacie VI 1:1,5.

W tabeli 2 zaprezentowano zestawienie wyników obliczeń wypadkowej siły poziomej wywieranej na strome ściany podmorskie falochronów, zgodnie z przedstawionymi wcześniej schematami obliczeniowymi. Zamieszczone w tabeli rysunki pokazują charakter obciążenia oraz wartości obciążeń. Pierwsze dwie pozycje dotyczą obciążeń od fali niezałamanej, kolejne cztery – od fali załamującej się.

W przypadku obciążeń falą niezałamana z rezultatów obliczeń wynika, iż zalecana przez amerykański przewoźnik CEM [4] metoda Gody [6] wyznacza mniejsze obciążenie od powszechnie stosowanej w praktyce projektowej metody Sainflou. Oznacza to jednoczesne przełożenie na redukcję kosztów realizacji budowli.

Przedstawione w tabeli 2 wyniki wypadkowej siły poziomej, wywieranej na konstrukcję przez oddziaływanie fali załamującej się (schemat III–VI), wyraźnie wskazują na zdecydowanie większą wartość obciążenia w porównaniu do obciążeń od fali niezałamanej. Dodatkowo z przeprowadzonych obliczeń wynika, że na redukcję siły wypadkowej ma wpływ zarówno geometryczny kształt konstrukcji, jak i jej rodzaj.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń
Table 2. The results of calculations

Schemat	Metoda	Pozioła siła wypadkowa	Rodzaj konstrukcji	Postać graficzna
I	Metoda Sainflou (obciążenie falą niezatamaną)	$F = 312 \text{ kN}$	Pionowościenna, posadowiona na podsypce	
II	Metoda Gody (obciążenie falą niezatamaną)	$F = 246 \text{ kN}$	Pionowościenna, posadowiona na podsypce	
III	Metoda zmodyfikowana Gody (obciążenie falą zatamaną)	$F = 603 \text{ kN}$	Pionowościenna, posadowiona na podsypce	

<p>IV</p>	<p>Metoda zmodyfikowana Gody (obciążenie falą zatamaną)</p>	<p>$F = 603 \text{ kN}$</p>	<p>Z pochyloną ścianą posadowioną na podsypce</p>	
<p>V</p>	<p>Metoda zmodyfikowana Gody (obciążenie falą zatamaną)</p>	<p>$F = 552 \text{ kN}$</p>	<p>Pionowościenna z pochyloną koroną posadowiona na podsypce</p>	
<p>VI</p>	<p>Metoda zmodyfikowana Gody (obciążenie falą zatamaną)</p>	<p>$F = 178 \text{ kN}$</p>	<p>Pionowościenna z umocnieniem w postaci bloków ochronnych typu: Dolos, Tetrapod</p>	

Zaskakujący jest fakt, iż pochylenie całej odmorskiej ściany konstrukcji (schemat IV) nie ma znaczącego wpływu na zmniejszenie obciążeń na ścianie budowli. Należy jednak pamiętać, że w tym przypadku zredukowane jest obciążenie u podstawy falochronu w porównaniu do konstrukcji pionowościennych oraz zredukowany jest współczynnik odbicia fali.

Natomiast zastosowanie pochyłej przedniej ściany lica konstrukcji (schemat V) od poziomu spokoju do poziomu korony jest korzystne w celu zmniejszenia obciążeń od fal załamanych bezpośrednio na stopie konstrukcji oraz wobec ogólnej stateczności konstrukcji. Wadą tego typu rozwiązań, niezależnie od stopnia redukcji obciążenia, jest umożliwienie łatwiejszego przelewania się fal ponad koronę, w porównaniu do konstrukcji w całości pionowościennych.

Jak wynika z obliczeń przedstawionych w tabeli 2, największą redukcję wypadkowej siły poziomej otrzymano poprzez zastosowanie konstrukcji pionowościennych z umocnieniem w postaci narzutu ochronnego typu dołos lub tetrapod. Modyfikacja formuły Gody [6] została wprowadzona na podstawie wyników badań dla prefabrykowanych bloków kształtowych.

PODSUMOWANIE

Masywne falochrony o ścianach stromych stanowią silną konkurencję dla konstrukcji narzutowych. Niemniej inwestorzy i projektanci wciąż poszukują konstrukcji, których koszt inwestycji przy zakładanym współczynniku bezpieczeństwa będzie jak najmniejszy.

Z przeprowadzonej powyżej analizy wynikają dwa zasadnicze wnioski:

- 1) pierwszym rozwiązaniem jest stawianie falochronów na takich głębokościach, gdzie na ściany odmorskie konstrukcji nie będą oddziaływać fale załamane, przy czym w celu dodatkowej redukcji kosztów należałoby się zwrócić zapewne w kierunku metody obliczeniowej Gody [6],
- 2) drugim rozwiązaniem jest modyfikacja kształtu odmorskiej ściany. Także w tym przypadku wyraźnie wyłania się jedno rozwiązanie – konstrukcja pionowościenna z narzutem ochronnym, gdzie redukcja obciążeń jest niezwykle duża.

Należy pamiętać, że każda z przedstawionych metod dotyczy wyłącznie obliczeń obciążeń odmorskiej ściany falochronu. Na ostateczny wybór rodzaju i kształtu falochronu morskiego mają wpływ jeszcze inne dodatkowe czynniki, jak choćby prądy morskie, nawigacyjna analiza toru podejściowego czy rodzaj gruntu, na którym posadowiony zostanie falochron.

LITERATURA

1. Agershou H. i in., *Planning and design of ports and marine terminals*, Thomas Telford Books, 2004.
2. Allsop N.W.H., Bray R.N., *Vertical breakwaters in the United Kingdom: historical and recent experience*, Proc. Int. Workshop on Wave Barriers in Deep Waters, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka 1994, p. 76–100.
3. Bray R.N., Tatham P.F.B., *Old waterfront walls: management, maintenance and rehabilitation*, CIRIA / E & FN Spon, London 1992.
4. Coastal Engineering Manual – Part V, 2002.
5. Franko L., Verdesi G., *Ancient Mediterranean harbours: A heritage to preserve*, [In:] Özhan, *MEDCOASTÖ93, Turkey*, Vol. 1, International Conference on Mediterranean Coastal Environment, METU, Ankara 1993, p. 255–272.
6. Goda Y., *New wave pressure formulae for composite breakwater*, Proc. of 14th International Conference Coastal Engineering Copenhagen, Denmark, ASCE, New York 1974, p. 1702–1720.
7. PIANC PTC II WG28, *Breakwaters with Vertical and Inclined Concrete Walls*, Report of Working Group 28 of the Maritime Navigation Commission, International Navigation Association 2003.
8. Sainflou M., *Essai sur les Diguees Maritimes Verticales*, Annales des Ponts et Chaussees, Vol. 98, t. 1, Tome 11, 1928.
9. Takahashi S., *Design of vertical breakwaters*, Revised Version of Reference Document, No. 34, PHRI, 2002.
10. Takahashi S., Hosoyamada S., *Hydrodynamic characteristics of sloping-top caissons*, Proceedings of International Conference on Hydro-technical Engineering for Port and Harbour Construction PHRI, 1994.
11. Takahashi S., Tanimoto K., Shimosako K., *A proposal of impulsive pressure coefficient for the design of composite breakwaters*, Proceedings of the International Conference on Hydro-Technical Engineering for Port and Harbour Construction, Yokosuka 1994, p. 438–457.
12. Tanimoto K., Kimura K., *A Hydraulic Experiment Study on Trapezoidal Caisson Breakwaters*, Technical Note N.528, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka 1985.

METHODS OF REDUCING HYDRODYNAMIC LOADS ON VERTICAL-FRONT STRUCTURES

Summary

Wave generated pressures on structures are complicated functions of the wave conditions and geometry of the structure. Six different schemes of vertical-front structure loading and responses are presented: the Sainflou formula for head-on, fully reflected, standing regular waves; Goda formula for irregular waves and four modifications of Goda's formula for breaking waves and different geometry of a structure.

Keywords: caisson breakwater, vertical wall, wave loading, mathematical models.