EXPERIMENTAL VERIFICATION OF MOVEMENT OF OBJECT SUBJECTED TO UNDERWATER NONCONTACT EXPLOSION

Zbigniew Powierża, Beata Wojciechowska

Gdynia Maritime University
Faculty of Marine Engineering
ul. Morska 83-87, 81-225 Gdynia, Poland
tel.: +48 58 6901 331, fax.: +48 58 6901 399
email: bearud@am.gdynia.pl

Abstract

Developed with the distribution method of boundary parameters with usage of S function to structure strength calculation by percussive loads from non-contact underwater explosions. Euler-Bernoulli beam equation is used as a model with an arbitrary variation of mass, rigidity and dimensions which floats on free surface of water. Beam model was loaded with shock wave caused by underwater explosion. Beam models used in shipbuilding, give apart from simple and clear description, great approximation in general structure strength range and in hull vibration calculation. Load is assumed in a form of pressure behind the return wave assuming non-deform wall. On the basis of derived dependences the bending moment and stress were calculated in individual sections. Research took place in the testing ground in the Bay of Gdansk, where the explosive charge was installed in the centre plane of longitudinal beam. PMW-8 was used as a blasting material. On the basis of measurements the stresses in appropriate sections of beam were define. Stress quantities theoretically calculated with this method and defined on the basis of experiment studies are presented in table determining their percentage relative difference.

Additionally the effect of explosive material density on velocity, detonation pressure and on pressure change along with cylindrical diameter increase of material is presented.

***Keywords**: explosion, pressure, shock wave*

WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA RUCHU OBIEKTU OBCIĄŻONEGO PODWODNĄ FALĄ UDERZENIOWĄ

Streszczenie

Opracowano operatorowo dystrybucyjną metodę parametrów brzegowych z wykorzystaniem S funkcji do obliczeń wytrzymałości ogólnej kadłuba okrętu przy obciążeniach udarowych od niekontaktowych wybuchów podwodnych. Modelem jest belka Eulera-Bernoulliego o dowolnie zmiennej masie, sztywności i wymiarach pływająca swobodnie na powierzchni wody, obciążona falą uderzeniową wywołaną wybuchem podwodnym. Modele belkowe rozpowszechnione w okrętownictwie dają obok prostego i przejrzystego opisu dużą dokładność w zakresie wytrzymałości ogólnej jak i w odniesieniu do pierwszych form drgań kadłuba. Jako obciążenie przyjęto ciśnienie za falą odbitą traktując przegrodę nieodkształcalną. Na podstawie wyprowadzonych zależności obliczono momenty gnące oraz naprężenia w poszczególnych przekrojach. Badania poligonowe wykonano w akwenie przybrzeżnym Zatoki Gdańskiej, umieszczając ładunki w płaszczyźnie wzdłużnej belki. Użyto materiał wybuchowy PMW-8. na podstawie pomiarów określono naprężenia w odpowiednich przekrojach belki. Odpowiednie wartości naprężeń obliczonych teoretycznie przedstawioną metodą oraz określonych na podstawie badań doświadczalnych zestawiono w tabeli wyznaczając ich procentową różnicę względną.

Dodatkowo przedstawiono wpływ gęstości materiału wybuchowego (TNT) na prędkość i ciśnienie detonacji, oraz zmianę ciśnienia wraz ze wzrostem średnicy ładunku walcowego.

***Słowa kluczowe**: wybuch, ciśnienie, fala uderzeniowa*

1. Uwagi wstępne

Przedmiotem badań jest belka Eulera-Bernoulliego o dowolnie zmiennej masie, sztywności i wymiarach pływająca swobodnie na powierzchni wody, obciążona falą uderzeniową wywołaną wybuchem podwodnym.

Modele belkowe służące między innymi do obliczeń ogólnej wytrzymałości kadłuba statku zarówno przy obciążeniach statycznych jak i dynamicznych są bardzo rozpowszechnione w okrętownictwie i dają obok przejrzystego opisu dużą dokładność w odniesieniu do pierwszych form drgań kadłuba [2, 3, 4, 8, 10].

2. Równanie i metoda rozwiązania

Podstawowe równanie linii ugięcia przyjęto w postaci:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left\{\left[EI_0\sum_{i=0}^{n}\xi_i H_0(x-x_i)\right]\frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial x^2}\right\}+\left[m_0\sum_{i=0}^{n}\zeta_i H_0(x-x_i)\right]\frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2}+p(x,t)+$$
$$+\left[\gamma B_0\sum_{i=0}^{n}\upsilon_i H_0(x-x_i)\right]z(x,t)+q(x,t)=0 \quad , \qquad (1)$$

gdzie:

EI_0, m_0, B_0 – sztywność, masa i szerokość belki przy $0<x<x_1$,

ξ, ζ, υ - parametry zmiany EI(x), m(x), B(x) dla $x=x_i$,

przy czym dla i=0 $\xi_0 = \zeta_0 = \upsilon_0 = 1$, $x_0 = 0$

$$H_0(x-x_i)=\begin{cases}0 \; dla \; x<x_i\\ 1 \; dla \; x>=x_i\end{cases},$$

p(x, t) – siły tłumienia,

q(x, t) – obciążenia impulsowe od podwodnej fali uderzeniowej.

Rozwiązanie analityczne przyjętego równania (1) jest możliwe przy zastosowaniu operatorowo-dystrybucyjnej metody parametrów brzegowych z wykorzystaniem S – funkcji służącej jedynie do odpowiednich przekształceń.

Rozdzielając zmienne x i t otrzymano równania:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[EI(x)z_k^{'2}(x)\right]-\left[\omega_k^2 m(x)-\gamma B(x)\right]z_k(x)=0\,, \qquad (2)$$

$$\ddot{F}_k(t)+2\bar{\alpha}_k\dot{F}_k(t)+\omega_k^2(t)=-q_k(t). \qquad (3)$$

W celu analitycznego rozwiązania równania (2) zastosowano przekształcenie przy pomocy „S" funkcji 1-szego stopnia

$$x=u+\sum_{i=1}^{n}(u-b_i)\gamma_i H_0(u-b_i), \qquad (4)$$

gdzie:

$$\gamma_i=\left(\sum_{j=0}^{i}\xi_j\right)^{\frac{1}{4}}\left(\sum_{j=0}^{i}\zeta_j\right)^{-\frac{1}{4}}+\left(\sum_{j=0}^{i-1}\xi_j\right)^{\frac{1}{4}}\left(\sum_{j=0}^{i-1}\zeta_j\right)^{-\frac{1}{4}}.$$

Przekształcenie odwrotne ma postać

$$u=x+\sum_{i}^{n}(x-x_i)\chi_i H_0(x-x_i), \qquad (5)$$

gdzie:

$$\chi_i = -\gamma_i \left(\sum_{j=0}^{i} \gamma_j\right)^{-1} \left(\sum_{j=0}^{i-1} \gamma_j\right)^{-1}.$$

Równanie (2) po przekształceniach z wykorzystaniem S-funkcji ma postać

$$z_{ku}^{IV} - k_k^4 z_k = \sum_{r=1}^{3}\sum_{i=1}^{n} \bar{K}_{ri}\, H_{4-r}\left(\mu - \mu_i\right), \qquad ..(6)$$

$$\bar{K}_{ri} = \bar{\varepsilon}_{ri}\, z_{ku}^{(r)}\left(b_i - 0\right), \qquad r = 1, 2, 3,$$

$$\bar{\varepsilon}_{1i} = \gamma_i \left(\sum_{j=0}^{i-1} \gamma_j\right)^{-1},$$

$$\bar{\varepsilon}_{2i} = \left[1 - \xi_i \left(\sum_{j=0}^{i} \xi_j\right)^{-1}\right]\left[1 + \gamma_i \left(\sum_{j=0}^{i-1} \gamma_j\right)^{-1}\right]^2 - 1$$

$$\bar{\varepsilon}_{3i} = \left[1 - \xi_i \left(\sum_{j=0}^{i} \xi_j\right)^{-1}\right]\left[1 + \gamma_i \left(\sum_{j=0}^{i-1} \gamma_j\right)^{-1}\right]^3 - 1.$$

Rozwiązanie równania (6) doprowadza do wzoru

$$z_k(u) = \sum_{r=0}^{3} z_k(0) Y_r(u) + \sum_{r=1}^{3}\sum_{i=1}^{n} \bar{K}_{ri} Y_r\left(u - u_i\right) H\left(u - u_i\right), \qquad (7)$$

co można zapisać

$$z_k(u) = \sum_{S=0}^{3} z_k(0) \bar{V}_S(u), \qquad (8)$$

gdzie:

$$\bar{V}_S(u) = Y_S(u) \sum_{r=1}^{3}\sum_{i=1}^{n} \bar{\varepsilon}_{ri}\, \bar{C}_{irS} Y_r\left(u - u_1\right) H_0\left(u - u_i\right),$$

$$\bar{C}_{irS} = Y_{Su}^{(r)}(Bi) + \sum_{S=1}^{3}\sum_{j=1}^{i-1} \bar{\varepsilon}_{Sj}\, \bar{C}_{jSr} Y_{Su}^{(r)}\left(b_i - b_j\right),$$

Y(u) – funkcje Kryłowa.
Warunki brzegowe:

dla $u = 0 \quad z_k'''(0) = z_k''(0) = 0$,

$u = u_{\max} \quad z_k'''\left(u_{\max}\right) = z_k''\left(u_{\max}\right) = 0$.

Wartości własne oblicza się z równania charakterystycznego

$$\overline{V}_s^{(r)}(b) \cdot \overline{V}_{s+r_1}^{(r+r_1)}(b) - \overline{V}_s^{(r+r_1)}(b) \cdot \overline{V}_{s+r_1}^{(r)}(b) = 0 \qquad (9)$$

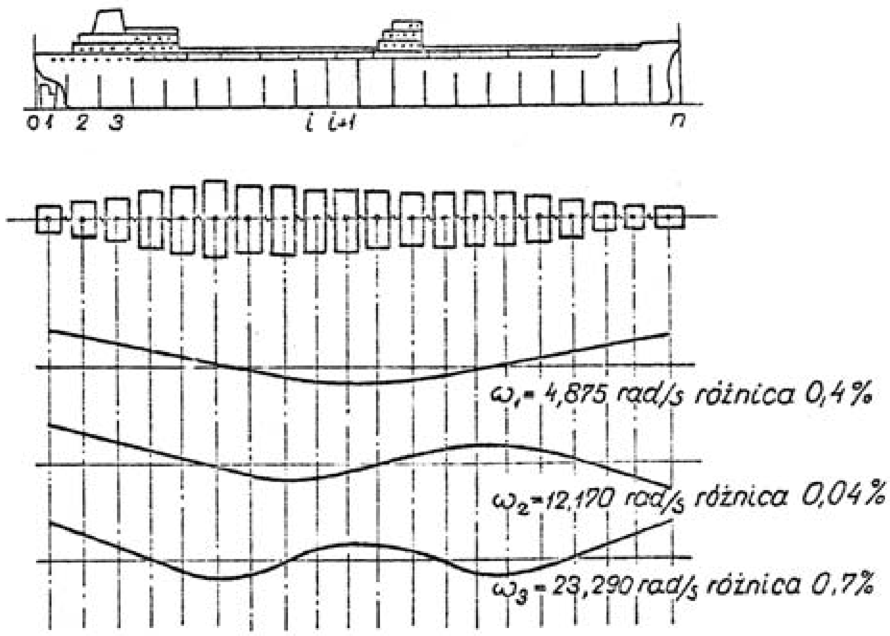
i funkcje własne wyraża się w postaci

$$z_k(u) = H\left[\overline{V}_s(u) \cdot \overline{V}_{s+r_1}^{(r)}(b) - \overline{V}_s^{(r)}(b) \cdot \overline{V}_{s+r_1}(u)\right]. \qquad (10)$$

Dla belki o końcach swobodnych warunki

s=0,   r=2, r_1=1,   H - dowolna stała, zaś b= u_{max}.

Potwierdzeniem prawidłowości przedstawionej metody analitycznej przy obliczaniu drgań własnych belek o dowolnie zmiennej masie i sztywności może być kadłub statku (zbiornikowiec o M=53000 t, L_{pp}=226,2 m). Dane liczbowe pochodzą z art. [1].



Rys. 1. Częstość drgań własnych
Fig. 1. Proper vibration frequency

Współczynniki ς_i zmienności masy obliczono osobno dla każdej formy z uwagi na zmienność masy wody towarzyszącej. To samo dotyczy ciężarów odcinków kadłuba wraz z wodą towarzyszącą. Kadłub podzielono, w obu przypadkach, na 20 odcinków, co stanowi optymalną wielkość w tego typu obliczeniach. Otrzymane wyniki z obu metod zestawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Zestawienie wyników z metody analitycznej (MA) oraz sztywnych elementów skończonych (SES)
Tab. 1. Comparison of analytical method (MA) and rigid finite element method results (SES)

rad/s	MA	SES	Różnica w %
ω_1	4,875	4,845	0,4
ω_2	12,170	12,165	0,04
ω_3	23,290	23,134	0,7

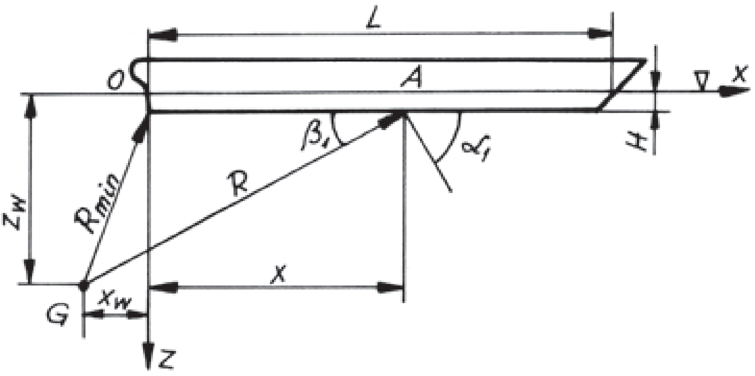
Metoda SES w porównaniu z analityczną daje różnice wyników poniżej 1%, co zaznaczono na rys. 1.

3. Obciążenie

Ciśnienie na czole fali uderzeniowej wg. powszechnie znanych zależności [5]:

$$p_1(t) = p_m \exp(-\beta\tau) \quad ; \qquad p_m = 52{,}3\left(\sqrt[3]{G}R^{-1}\right)^{1,13} \quad [\text{MPa}],$$

$$\beta = \frac{1}{\theta} \qquad ; \qquad \theta = 0{,}093\sqrt[3]{G}\left(\frac{\sqrt[3]{G}}{R}\right)^{-0,22} \quad [\text{ms}].$$



Rys. 2. Określenie odległości
Fig. 2. Distance determination

Przy obciążeniu w płaszczyźnie symetrii wzdłużnej kadłuba (Rys. 2) odpowiednie zależności mają postać:

$$p_1(x,t)=52{,}3\left(\sqrt[3]{G}\right)^{1,13}\left[\sqrt{(x_w-x)^2+(2w-H)^2}\right]^{-1,13}\cdot\exp\left[\frac{-\left(\sqrt[3]{G}\right)^{0,22}\cdot\tau}{0{,}093\sqrt[3]{G}\left[(x_w-x)^2+(z_w-H)^2\right]}\right]. \quad (11)$$

Kąt padania α_1

$$\alpha_1=\frac{\pi}{2}-arc\cos\frac{|x-x_w|}{\sqrt{(x_w-x)^2+(z_w-H)^2}}. \quad (12)$$

Mając kąt padania α_1 oraz $p_1(t)$ można obliczyć kąt odbicia α_2 i ciśnienie $p_2(t)$ za falą odbitą, a następnie współczynnik odbicia. Wielkość ciśnienia za falą odbitą stanowi obciążenie poszycia dna, w tym przypadku przyjęto przegrodę nieodkształcalną [9].

Rozwiązanie równania (3) składa się z całki ogólnej równania jednorodnego oraz całki szczególnej równania niejednorodnego i ma postać

$$F_{jk}(t)=\frac{1}{M_{1k}}\cdot\frac{A_jL_{jc}}{\left(\overline{\alpha}-\beta_j\right)^2+\overline{\omega}_k^2}\cdot\frac{1}{\overline{\omega}_k}\cdot\left\{\exp\left(-\overline{\alpha}\tau_j\right)\cdot\left[\left(\overline{\alpha}-\beta_j\right)\sin\overline{\omega}_k\tau_j+\overline{\omega}_k\cos\overline{\omega}_k\tau_j\right]-\exp\left(-\rho_j\tau_j\right)\overline{\omega}_k\right\}, \quad (13)$$

przy czym

$$A_j=\eta_jB_jp_{mj},$$

$$L_{jc}=\int_{x_{jc}-d}^{x_{jc}+d}z(x)dx,$$

a $d=\frac{l}{2n}$ - czyli połowę długości odcinków na jakie został podzielony kadłub.

Równanie linii ugięcia przy obciążeniu udarowym od niekontaktowego wybuchu podwodnego przy przyjęciu form m drgań oraz działaniu obciążenia na N odcinkach ma postać

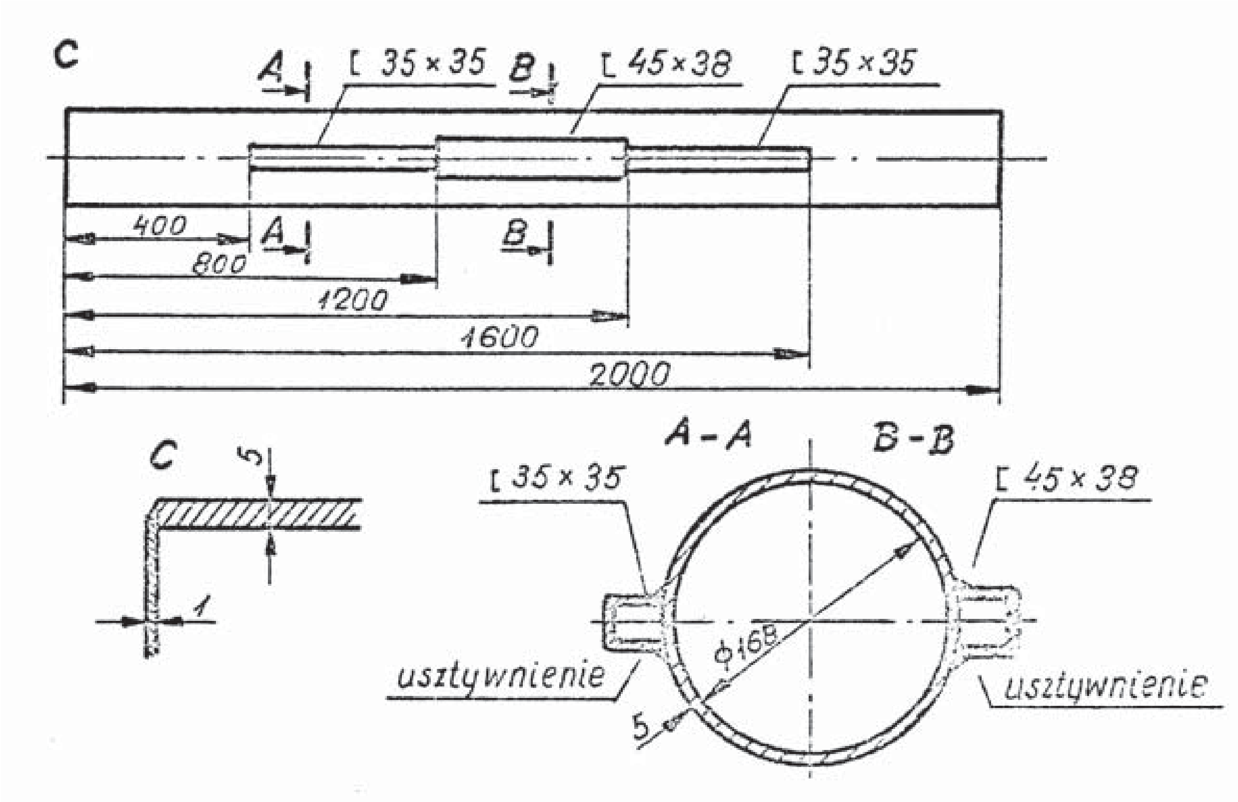
$$z(x,t)=\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}z_k(x)F_{jk}(t), \quad (14)$$

zaś moment gnący

$$Mg(x,t)=-EI(x)\sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{N}F_{jk}(t)z_k^{"}(x). \quad (15)$$

4. Część doświadczalna

W celu doświadczalnego sprawdzenia przedstawionej metody obliczeń, zarówno w zakresie częstości drgań własnych, jak i naprężeń, wykonano uproszczony model pływający. Model został zbudowany z rury stalowej zamkniętej z obu końców przyspawanymi krążkami cienkiej blachy. W celu uzyskania modelu odpowiadającego kadłubowi statku o zmiennym kształcie (o zmiennej sztywności giętnej) i zmiennym rozkładzie masy wzdłuż osi statku, do rury przyspawano obustronnie w środkowej płaszczyźnie poziomej odcinki ceowników o różnych wielkościach przekroju poprzecznego – rys. 3.



Rys. 3. Model do eksperymentalnej weryfikacji metody obliczeniowej
Fig. 3 Experimental model of mathematical verification relations

Zachowano symetrię wzdłużną rozmieszczenia jednakowych odcinków (przedziałów) modelu ze względu na łatwą możliwość kontroli spodziewanych równych wartości mierzonych naprężeń występujących w symetrycznych odcinkach modelu, a wywołanych wybuchem podwodnym ładunku wybuchowego umieszczonego pod środkiem długości modelu.

Parametry konstrukcyjne i obliczeniowe modelu zestawiono w tablicy 2.

Pomiary wykonano dwukrotnie przy dłuższym odstępie czasowym i nieco innym zestawie aparatury. W obu przypadkach na akwenie przybrzeżnym Zatoki Gdańskiej, w pobliżu Portu Wojennego w Gdyni przy stanie morza 1.

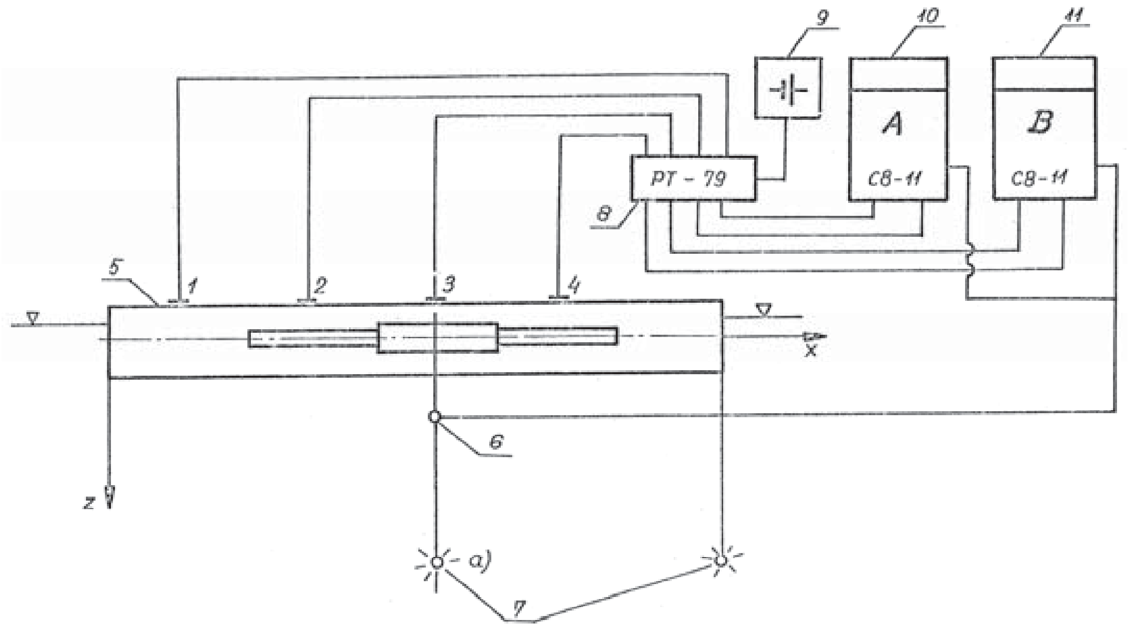
Ładunki materiału PMW-8 o masie 50 g umieszczono pod modelem w środku jego długości (x_w=1m) i pod jednym końcem (x_w=2m), zmieniając głębokość (z_w=5m) i (z_w=3m).

Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 4.

Wg. przedstawionej metody obliczono dla wszystkich wariantów umieszczenia ładunku momenty gnące Mg(x_w, z_w) występujące w przekrojach poprzecznych belki oraz odpowiadające im naprężenia (tab. 3).

Tab. 2. Parametry konstrukcyjne i obliczeniowe modelu
Tab. 2.Design parameters and model calculation

wielkość obliczana	oznaczenia	Numer odcinka modelu				
		1	2	3	4	5
długość odcinka	$l_i\ [m]$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
powierzchnia przekroju	$F_i\ [m^2]$	27,17 $*10^{-4}$	37,71 $*10^{-4}$	39,99 $*10^{-4}$	37,71 $*10^{-4}$	27,17 $*10^{-4}$
moment bezwł. przekroju	$J_i\ [m^4]$	1017,49 $*10^{-8}$	1039,99 $*10^{-8}$	1057,09 $*10^{-8}$	1039,99 $*10^{-8}$	1017,49 $*10^{-8}$
masa odcinka na jedn.dług.	$m_i \left[\frac{kg}{m}\right]$	21,33	29,61	31,39	29,61	21,33
współcz.zmiany sztywności	$\xi_i\ [-]$	-	0,02211	0,016806	-0,016806	-0,02211
współcz.zmiany masy	$\zeta_i\ [-]$	-	0,38818	0,08345	-0,08345	-0,38818
masa odcinka * na jedn.dług.	$m_i \left[\frac{kg}{m}\right]$	33,73	42,01	43,79	42,01	33,73
współcz.zmiany masy	$\zeta_i\ [-]$	-	0,24548	0,05277	-0,05277	-0,24548
wskaźnik przekroju	$W_i\ [m^3]$	1,1432 $*10^{-4}$	1,1685 $*10^{-4}$	1,1877 $*10^{-4}$	1,1685 $*10^{-4}$	1,1432 $*10^{-4}$
* z uwzględnieniem masy wody towarzyszącej						



Rys. 4.Schemat układu pomiarowego
Fig. 4.Meter circuit diagram

Oznaczenia:
1, 2, 3, 4 – tensometry,
5 –badany model,
6 – piezoelektryczny czujnik wyzwalający,
7 – ładunek wybuchowy,
8- pulpit tensometryczny PT-79,
9 – zasilacz,
10, 11 – oscyloskopy pamięciowe dwukanałowe C8-11.

Tab. 3. Obliczone wartości momentów Mg i naprężeń
Tab. 3. Calculated bending moment Mg quantities and stress quantities

punkty pomiarowe / współrzędne ładunku	1	2	3	4
Wariant 1	x_w = 1m		z_w = 5m	
Mg_{max} [kNm]	227,8	990,3	1536,9	990,3
σ_g [MPa]	2,9	8,32	12,93	8,32
Wariant 2	x_w = 1m		z_w = 3m	
Mg_{max} [kNm]	424,1	1422,4	2197,6	1422,4
σ_g [MPa]	3,68	12,19	18,49	12,19
Wariant 3	x_w = 2m		z_w = 3m	
Mg_{max} [kNm]	965,5	1894,1	2381,2	1652,9
σ_g [MPa]	8,44	16,21	20,03	14,4

Obliczenia Mg wykonano dla danych:

$$a_0 = 1480\ \frac{m}{s};\quad \overline{\alpha} = 600\ s^{-1};\quad E = 2{,}1 \cdot 10^5\ MPa;$$

$$\eta = 2;\qquad G^* = 50\ g;\quad \rho = 1 \cdot 10^3\ \frac{kg}{m^3}.$$

Uwzględniono wpływ wody towarzyszącej [6], oraz współczynnik kształtu [7].

Zmierzone wartości naprężeń odczytano opracowując zdjęcia fotograficzne przebiegów oscyloskopowych. W kolejności zarejestrowane wartości wychyleń oscylogramu i uwzględniając nastawę czułości oscyloskopu obliczono kolejne wydłużenia względne $\varepsilon\left[{}^{0}\!/_{00}\right]$ i naprężenia od zginania $\sigma_g\ [MPa]$, które zestawiono w tab. 4.

W tab. 5 zestawiono obliczone i określone z pomiarów średnie wartości naprężeń dla poszczególnych punktów pomiarowych oraz wariantów rozmieszczenia ładunków wybuchowych, co umożliwia ich łatwe porównanie. W celu określenia wzajemnego stosunku wartości naprężeń obliczonych do otrzymanych w wyniku pomiarów (τ_Z) została obliczona różnica względna jak stosunek wartości naprężeń obliczonych σ_0 i zmierzonych σ_z w odniesieniu do wartości zmierzonych.

$$\Delta\sigma = \frac{|\sigma_0 - \sigma_z|}{\sigma_z} \cdot 100 \quad [\%].$$

Tab. 4. Tabela wyników - zmierzone wartości naprężeń σ_g
Tab. 4. Result table - measured stress quantities σ_g

nr wybuchu	Parametry wybuchów			Punkty pomiarowe (nr tensometrów)					
				2		3		4	
	G [g]	x_w [m]	z_w [m]	ε [$^0/_{00}$]	σ [MPa]	ε [$^0/_{00}$]	σ [MPa]	ε [$^0/_{00}$]	σ [MPa]
1	50	1	5	-	-	0,070	14,7	0,057	11,9
2		jw.		0,050	10,5	0,060	12,6	0,047	9,9
3		jw.		0,053	11,1				
4	50	1	3	0,076	15,9	0,095	19,9	0,076	15,9
5		jw.				0,098	20,6	0,079	16,6
6	50	2	3	0,101	21,2	0,104	21,8	0,095	19,9
7		jw.		0,095	19,9	0,098	20,6	0,092	19,3
8		jw.		0,095	19,9	0,101	21,2	0,089	18,6
9		jw.		0,092	19,3	0,095	19,9	0,089	18,6

Tab. 5. Porównanie wartości naprężeń obliczonych i zmierzonych
Tab. 5.Comparison of calculated and measured stress values

nr wybuchu	parametry wybuchów	porównanie wartości naprężeń [MPa]	Punkty pomiarowe (nr tensometrów)			
			1	2	3	4
1 2 3	x_w=1m z_w=5m	σ_0 - obliczona	1,9	8,32	12,93	8,32
		σ_z - zmierzona śred.	-	10,8	13,7	11,3
		Δσ [%]		22,96	5,6	1,7
4 5	x_w=1m z_w=3m	σ_0 - obliczona	3,68	12,19	18,49	12,19
		σ_z - zmierzona śred.	-	15,9	20,3	16,3
		Δσ [%]		23,3	8,9	25,0
6 7 8 9	x_w=2m z_w=3m	σ_0 – obliczona	8,44	56,21	20,03	14,4
		σ_z - zmierzona śred.	-	20,1	20,9	18,6
		Δσ [%]		19,3	4,2	22,5

5. Uwagi końcowe

Na podstawie pomiarów można stwierdzić dużą zgodność wyników obliczeń i pomiarów. Różnice względne w najważniejszych przekrojach na owrężu i w sąsiedztwie nie przekraczającej na ogół 20 %. Powodem jest przyjęcie oddziaływania fali uderzeniowej na model jak dla przegrody sztywnej.

Ponadto z różnych względów badania przeprowadzono poza basenem portowym. Przy stanie morza 1 i minimalnych prądach umiejscowienie ładunku może podlegać pewnym odchyleniom od punktów planowanych.

Literatura

[1] Andersson, G., Norrand, K., *A Method of the Calculation of Vertical Vibration with Several Modes and some other Aspects of Ship Vibration*, Transactions of RINA 111, s. 367-383, 1969.
[2] Bishop, R. E. D., Price, W. G., *Gidrouprugost'sudov*, (tłum. z ang.) Sudostr. Leningrad 1983.
[3] Bishop, R. E. D., Price, W. G., *On model analysis of ship distortions in still water*, Transactions of RINA, s. 151-160, 119 1978.
[4] Bishop, R. E. D., Price, W. G., *The dynamical charakteristics of some dry hulls*, Journal of Sound and Vibration 54, s. 29-38, 1977.
[5] Cole, R. H., *Underwater explosions*, Princeton New Jersey 1948.
[6] Korotkin, A. J., *Prisojedinennyje massy sudna*, Sudostr. Leningrad 1986.
[7] Krzewiński, R., *Dynamika wybuchu*, Cz. I, WAT 1982.
[8] Postnov, V. A., Kalinin, V.S., Rostovcec, D.M., *Vibracja korablja*, Sudostr. Leningrad 1983.
[9] Powierża, Z., *Wytrzymałość ogólna kadłuba okrętu przy niekontaktowych wybuchach podwodnych*, Zeszyty Naukowe AMW nr. 108A, Gdynia 1991.
[10] Putov, N. E., *Projektirovanije konstrukcji korpusa morskich Sudoł*, Cz. 2. Izd. Sudostr. Leningrad 1977.