スラミングに対するクロスデッキパネルの 弾性応答について

正 員 遠 山 泰 美*

Hydroelastic Responses of Cross Deck Panel to Slamming

by Yasumi Toyama, *Member*

Summary

The objective of this study is to reveal the hydroelastic behavior of the cross deck structure of a high speed catamaran subjected to slamming load. An analytical method using flat plate approximation is proposed to solve the slamming problem of the two dimensional structures where the hydroelastic effects as well as the pile up water on the free surface are accounted for.

Dynamic responses of simply supported seven-span panels penetrating the wave crest are analyzed. It is found that the maximum deflection and bending moment at the location of initial hit tend to be proportional to the impact velocity as far as the wave profile is relatively flat and the impact velocity is high enough. The results are similar to those obtained by Faltinsen et al. A simple equation to estimate the maximum deflection of the panel is obtained by considering the transformation of fluid kinetic energy into the strain energy.

1. 結 言

高速双胴船は比較的荒い海象のもとで、双胴間のクロスデッキ下面に波浪衝撃を受けることがある。安全性の評価は衝撃圧力の大きさだけでなく、構造に発生する変形や応力の応答に注目して行う必要があり、構造と流体との相互作用問題を解明することが重要である。波浪衝撃における弾性の影響についての最近の研究^{1)~7)}のうち、Faltinsenらはクロスデッキの衝撃問題を取り上げ、応力応答は落下速度の2乗ではなく1乗に比例するという新しい重要な見解^{4),5)}を模型実験及び計算によって示している。しかし、なぜ速度に比例するのかについては、あまり議論されていないようであり、本論文の1つの目的はこれを明らかにすることにある。

筆者はWagnerの衝撃理論⁹⁾を2次元任意形状物体の衝撃問題⁹⁾や3次元問題¹⁰⁾に拡張することを試みて来た。ここでは平板近似を用い、弾性変形を伴う2次元衝撃問題

に適用できる解析的手法の提案を行った。計算法の構築にあたり、Wagnerと同様の仮定、すなわち浅吃水、空気の影響の無視、重力無視、非圧縮性流体の仮定を置いた。

2. 弾性変形を考慮した2次元水面衝撃理論

2.1 自由表面上で上下に運動する2次元弾性平板まわりの流れ

Fig. 1に示すように半径 a の円柱を考え、円柱表面が外向き速度

$$V(\theta) = 2 \sum_{n=1,2,\dots} A_n \sin n\theta \quad (1)$$

でもって運動しているものとする。これに対応する速度ポ

Fig. 1 Transformation of a cylinder into a plate having distributed vertical velocity

* 三井造船(株)

テンシヤルは

$$\phi(r, \theta) = -2 \sum_{n=1,2} A_n a^{n+1} n^{-1} r^{-n} \sin n\theta \quad (2)$$

で与えられる。等角写像により、円柱を半幅 $c=2a$ の平板に変換し、平板表面の下向き速度 $v(x)$ を求めると

$$v(x) \sin \theta = \sum_{n=1,2} A_n \sin n\theta, \text{ ただし } x = c \cos \theta \quad (3)$$

となる。逆に $v(x)$ が与えられていると(3)式の左辺を Fourier Sine 級数展開することによって、係数 A_n を定めることができる。 A_n が定まると(2)式を利用して、流速や圧力を算定することができる。しかし時間ステップ毎に境界値問題を解くのは効率的でない。そこで平板表面上の下向き速度を有限個の三角形状の速度分布の重ね合わせで表現することを考える。すなわち速度分布を折れ線で近似することを考える。Fig. 2 に左右対称問題で接水半幅 c を2分割した場合 ($N=2$) の例を示す。三角形の頂点での速度をそれぞれ $v_k (k=0, 1, \dots, N)$ と表す。平板表面での速度ポテンシャルの値は(4)式で表される。

$$\phi(x) = \sum_{k=0}^N \phi_k = -c \sum_{k=0}^N v_k \cdot \phi_k(\xi), \xi = x/c \quad (4)$$

$N=10$ の場合の $\phi_k(\xi)$ の分布を Fig. 3 に示す。 k について合計したものは平板の剛体的上下動に対応するものであり、楕円形状の分布となる。平板の外側の自由表面上向き速度は Fig. 4 のように表される。

2.2 自由表面の盛上がり

自由表面の盛上がりは自由表面での上向き流速を時間で積分することによって求められる。 $k=0, 1, \dots, N$ に対応す

Fig. 2 Decomposition of symmetric velocity into the discrete basic functions

るそれぞれのポテンシャル流れに対し、無次元化された形で計算しておく。時刻 t_1 から時刻 $t_2 = t_1 + \Delta t$ に変化する間に接水端位置が c_1 から c_2 に移動したとする。このとき $x = c_2$ における自由表面の上昇量の増分を

$$\Delta\eta(c_1, c_2) = \int_{t_1}^{t_2} v_k(t) \cdot f\left(\frac{c_2}{c}\right) dt \quad (5)$$

で表す。ここに $f(\xi)$ は Fig. 4 に示した自由表面の無次元化上向き流速である。 $v_k(t)$ 及び接水幅拡大速度 dc/dt は時間に対し緩やかに変化するので微小な時間差 Δt に対しては(5)式は近似的に

$$\Delta\eta(c_1, c_2) \cong \frac{\bar{v}_k}{\dot{c}} \int_{c_1}^{c_2} f\left(\frac{c_2}{c}\right) dc = \frac{c_2 \bar{v}_k}{\dot{c}} \int_1^{c_2/c_1} \frac{f(\xi)}{\xi^2} d\xi \quad (6)$$

ここに

$$\bar{v}_k = [v_k(t_1) + v_k(t_2)]/2$$

$$\dot{c} = (c_2 - c_1)/(t_2 - t_1)$$

で算出できる。接水端から離れた任意の位置 x での自由表

Fig. 3 Velocity potential on the surface of a plate

Fig. 4 Vertical velocity on the free surface of the water outside the plate

面の上昇量増分 $\Delta\eta$ は(6)式を用い、

$$\Delta\eta = \Delta\eta(c_1, x) - \Delta\eta(c_2, x) \quad (7)$$

により求められる。(6)式の積分項は予め計算しておくことができ、Fig. 5 のように表される。

2.3 衝撃圧力算定式

(4)式を Bernoulli の式

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial\phi}{\partial t} - \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2, \quad \rho: \text{流体の密度} \quad (8)$$

に代入すると衝撃圧力算定式

$$p = p_{add} + p_{imp} \quad (9)$$

$$p_{add}/\rho = c \sum_{k=0}^N \dot{v}_k \varphi_k \quad (10)$$

$$\frac{p_{imp}}{\rho} = \dot{c} \sum_{k=0}^N v_k \left(\varphi_k - \xi \frac{\partial \varphi_k}{\partial \xi} \right) - \frac{1}{2} \left(\sum_{k=0}^N v_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial \xi} \right)^2 \quad (11)$$

を得る。(10)式は付加水質量力の項であり、衝撃現象だけに特有ではないことから、狭義の衝撃圧力(11)式とは分離して扱う。接水端で水平流速が無限大になることから、(11)式の第2項により、衝撃圧力が負となる領域が接水端のごく近傍に限り発生する。この場合、本モデルでは(11)式の負圧は零と置き換えて応答解析に利用する。

2.4 平板と流体との連成運動方程式

構造は有限要素法(FEM)によりモデル化を行い、非接水状態での固有値解析を行っておく。構造の上向き変位ベクトル $\{w\}$ をドライ固有モード $\{\Phi\}$ の線型重ね合わせ、

$$\{w\} = [\Phi]\{q\}, \quad \{q\}: \text{一般化変位ベクトル} \quad (12)$$

として表現すると、構造と流体との運動方程式は、

$$([M^*] + [M_a^*])\{\ddot{q}\} + [C^*]\{\dot{q}\} + [K^*]\{q\} = \{f^*\} \quad (13)$$

$$[M_a^*] = [\Phi]^T [M_a] [\Phi] = \rho c^2 [\Phi]^T [\bar{M}_a] [\Phi] \quad (14)$$

と表される。ただし $[M^*]$, $[M_a^*]$, $[C^*]$, $[K^*]$, $\{f^*\}$ はそれぞれ一般化構造質量、付加水質量、減衰、剛性、外力であり、 $[\Phi]$ は接水半幅 c を N 等分した点でのドライモードである。無次元化付加水質量マトリックス $[\bar{M}_a]$ は予め(4)式の $\varphi_k(\xi)$ を用いて計算しておくことができる。例えば $N=$

2 (Fig. 2 参照) の場合、

$$[M_a] = \rho c^2 [\bar{M}_a] = \rho c^2 \begin{bmatrix} 0.2008 & 0.2397 & 0.0488 \\ 0.2397 & 0.4611 & 0.1289 \\ 0.0488 & 0.1289 & 0.0741 \end{bmatrix} \quad (15)$$

となる。(13)式の一般化外力の計算には付加水質量力は含まれておらず、(11)式を使って算定する。運動方程式(13)式は Runge-Kutta 法によって時間領域で解く。接水半幅 c は(6)式を利用して接水端での構造表面と自由表面の z 座標が一致するように決定する。

3. 円筒殻の水面落下衝撃応答

本論文の計算手法の有用性を確認するため、既に発表されている実験結果との比較を行った。水面衝撃を受ける円筒殻の動的歪の計測結果は渋谷ら⁷⁾や荒井ら⁷⁾により報告されている。荒井らは差分法に基づく計算との比較を行い良好な結果を得ている。ここでは渋谷らの鋼製円筒殻(外径 312 mm, 厚さ 5.1 mm)の落下高さ 1 m に対する実験との比較を行う。Fig. 6 に下から 0°, 10°, 20° 位置での歪の時系列応答について計算値と計測値との比較を示す。計算では 6 個の固有モードを考慮し、各モードの減衰比を 0.05 とした。接水半幅の分割数は $N=10$ とした。弾性変形モードの他、剛体モードを取り入れており、衝撃力による減速効果が考慮されている。歪の最大応答値は計算の方が若干大

Fig. 5 Increment of free surface elevation at $x=c_2$ due to the change of wetted length c_1 to c_2

Fig. 6 Comparison between calculated and measured time histories of strains on the cylindrical pipe penetrating flat water surface

きくなっているが、時間に対する変動の様子は実測値と良好に対応している。本手法が実用的な精度を有していることが分かる。

4. クロスデッキの動的衝撃応答

4.1 計算モデル

Fig. 7 に計算モデルを示す。クロスデッキはスチフナー位置で単純支持された等間隔 7 スパンパネルとしてモデル化する。水面形状は放物線で表し、原点での曲率半径を R とする。クロスデッキは一定速度 V で水面に対し落下するものとし、衝撃力による減速を考慮しない。計算に用いた諸定数を Table 1 に示す。

4.2 計算結果

水面の曲率半径とパネルのスパンの比 R/L を 1, 2, 5, 10 と変化させ、落下速度 V を 0.25 m/sec から 4 m/sec まで変えてシミュレーションを行った。パネルの撓み w 、曲げモーメント M 、接水半幅 c 、接水部の相対速度 v 、パネルに作用する流体力 F の時系列の 1 例を Fig. 8 ($R/L=5$, $V=4$ m/sec) に示す。各時刻におけるパネルと自由表面の変形、および衝撃圧力分布を Fig. 9 に示す。スパン中央の相対速度 $v(0)$ は衝突の瞬間は V であるが、パネルの弾性変形のために低下し、最大撓みの発生時には再び V まで回復、その後パネルのスプリングバックにより増加する。衝撃圧力 (11) 式を接水幅にわたり積分した衝撃力 F_{imp} は、衝

Fig. 7 Simply supported seven-span continuous panel penetrating parabolic wave crest

Table 1 Parameters for the cross deck modeling

stiffener space (span)	$L = 400 \text{ mm}$
panel thickness	$h = 6 \text{ mm}$
Young's modulus	$E = 71000 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	$\nu = 0.34$
panel density	$\rho_s = 2.7 \text{ ton/m}^3$
fluid density	$\rho = 1.025 \text{ ton/m}^3$
number of natural modes	5 (1st to 5th)
modal damping ratio	$\zeta = c/c_0 = 0.02$

突の瞬間は

$$F_{imp} = 2\pi\rho RV^2 \quad (16)$$

となるが、その後の相対速度の低下のために急速に小さくなる。しかし最大撓み発生時を過ぎると逆に相対速度が増加し、剛体パネルを仮定した場合より大きな衝撃力となる。Fig. 8 で無次元化時刻 $tV/L=0.03$ 付近で F_{imp} が極大となっているが、これは接水端部のパネルの撓みにより、水面

Fig. 8 Time histories of structural responses of seven-span panels to slamming ($R/L=5$, $V=4$ m/sec)

Fig. 9 Elastic deformation, free surface profile and impact pressure distribution ($R/L=5$, $V=4$ m/sec)

との接水角が小さくなり接水長さの拡大速度が大きくなっているためである。スパン中央最大撓みと落下速度 V の関係を Fig. 10 に示す。スパン中央曲げモーメント (hog) 及び支持部曲げモーメント (sag) の最大値と落下速度の関係を Fig. 11 に示す。スパン中央部の最大撓みと曲げモー

Fig. 10 Relation between maximum central deflection and impact velocity

Fig. 11 Relation between maximum bending moment and impact velocity

ントは $R/L=5, 10$ の場合、落下速度に比例する傾向を示し、比例定数は R/L にあまり依存していない。一方、支持部の最大サグモーメントは必ずしも落下速度には比例しないようである。

4.3 計算結果に対する考察

パネルが準静的に応答すると仮定すると、水面との衝突の瞬間にスパン中央に (16) 式で表される集中荷重が作用することになり、静的なスパン中央撓みを計算すると、Fig. 12 の破線のように表される。すなわち落下速度が大きくなるにつれ、動的影響が大きく現れると考えられる。一般に荷重の作用時間が固有周期に比べ充分小さい時には動的応答倍率は 1 より小さくなり、作用時間に比例することが知られている。衝撃圧力ピークは接水端部にあり、落下速度に比例して高速で移動するので、ピーク圧力が中央スパンを通過する時間は落下速度に反比例する。また衝撃力は (16) 式で示すように落下速度の 2 乗に比例するので、動的応答倍率を静的応答に掛けると落下速度に比例するという定性的説明が可能となる。また水面の曲率半径を大きくすると (16) 式により衝撃力は比例的に大きくなるが、ピーク圧力が中央スパンを通過する時間は曲率半径に反比例する

Fig. 12 Comparison of maximum central deflection with quasi static response to a concentrated load at the panel center

Fig. 13 Natural vibration modes of one-side wetted seven-span panels

ため、動的応答は曲率半径にあまり依存しないという説明ができる。

別な解釈はエネルギーの観点からなされる。接水半幅 c を変化させてパネルの固有振動解析を行うと、固有振動モードは Fig. 13 のように表され、接水固有振動数 f_w は Fig. 14 のように変化する。1 次固有振動数は $1 < 2c/L < 3$ の範囲ではあまり変化しないことが Fig. 14 から分かる。1 次固有モードについて、撓み $w(0)$ で正規化し一般化付加水質量と一般化剛性を計算してみると、 $1 < 2c/L < 3$ の範囲では

Fig. 14 Natural frequencies of one-side wetted seven-span panels

近似的に一定値

$$M_w^* = 0.27 \rho L^2 \quad (17)$$

$$K_w^* = 94 D / L^3, D = E h^3 / 12 (1 - \nu^2) \quad (18)$$

で与えられることが分かる。スパン中央の撓みが最大値を取るときには付加水質量の持っていた運動エネルギーが全てパネルの歪エネルギーに変換されたときであるとする

$$M_w^* V^2 / 2 = K_w^* w(0)_{\max}^2 / 2 \quad (19)$$

より

$$w(0)_{\max} = 0.0536 V \sqrt{\rho L^5 / D} \quad (20)$$

となり、スパン中央の最大撓みは落下速度に比例するという式を得る。(20) 式を Fig. 10, Fig. 12 に記入したところ水面の曲率半径の大きい場合のシミュレーション結果と比較的良好に対応することが判明した。(20) 式には水面の初期形状や衝撃圧力のピーク値に関する情報が含まれておらず、注目に値する。

5. 結 言

3 角形状の鉛直速度分布を有する平板まわりのポテンシャル流れの解を利用した弾性影響を考慮する水面衝撃応答解析手法を提案した。円筒殻の水面落下実験による動的歪の計測結果と計算結果を比較したところ良好な対応が認められた。次に平坦なクロスデッキパネルが放物線形状の波頂に衝突する問題について動的応答シミュレーションを行った結果、次の点が明らかとなった。

1) パネルのスパン中央の最大撓みと曲げモーメントは水面の曲率半径が大きくなるにつれ落下速度に比例する傾向を示し、比例定数は水面の曲率半径にも依存しなくなる傾向を示す。

2) 衝撃圧力のピーク値はパネルの動的応答には直接大

きな影響を与えないと考えられる。また衝撃圧力を接水長さで積分した衝撃力は落下速度の2乗に比例するが、これを用いた準静的な応答は落下速度が大きい場合には実際の動的応答に比べ過大になる可能性がある。

3) スパン中央最大撓みが落下速度に比例する理由は動的応答倍率の低下によって説明できる。またエネルギー的考察から最大撓みが水面形状とは無関係に落下速度に比例するという関係式を導くことができた。

参 考 文 献

- 1) 洪江唯司, 伊東章雄, 中山英治: 水面衝撃を受ける円筒殻の構造応答解析, 日本造船学会論文集, 第174号 (1993)
- 2) 高木健: 水面衝撃問題における弾性の影響, 関西造船協会誌, 第222号 (1994)
- 3) Kvals vold, J., Faltinsen, O., M., Aarsnes, J., V.: Effect of Structural Elasticity on Slamming against Wetdecks of Multihull Vessels, Proc. 6th International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units (PRADS' 95) (1995)
- 4) Kvals vold, J., Faltinsen, O., M.: Hydroelastic Modeling of Wet Deck Slamming on Multihull Vessels, Journal of Ship Research, Vol. 39, No. 3 (1995)
- 5) Kvals vold, J., Faltinsen, O., M., Aarsnes, J., V.: Wave Impact on a Horizontal Elastic Plate, Journal of Marine Science and Technology, SNAJ (1997)
- 6) 角洋一, 岡田真三, 向井広樹, 井上弘一: 微小水撃角における弾性平板の水面衝撃の研究, 日本造船学会論文集, 第182号 (1997)
- 7) 荒井誠, 宮内達哉: 水面衝撃をうける円筒殻の流体・構造連成応答シミュレーション, 日本造船学会論文集, 第182号 (1997)
- 8) Wagner, V., H.: Über Stoß und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Band 12, Heft 4 (1932)
- 9) 遠山泰美: 任意形状物体の2次元水面衝撃計算法について, 日本造船学会論文集, 第173号 (1993)
- 10) 遠山泰美: 平板近似による3次元水面衝撃計算法について, 日本造船学会論文集, 第179号 (1996)