RORO 船の船尾部波浪衝撃について

正員 道 本 順 一* 正員 今 吉 範 夫**

On the Stern Flare Impact Pressure of RORO Ship

by Jun-ichi Michimoto, *Member* Norio Imayoshi, *Member*

Summary

The after body of RORO ship or car ferry is characterized as follows; the frame line under water plane is very fine in order to improve the performance of propulsion, but the frame line upper water plane is very fat so as to take the broader deck area. Therefore the sectional form near the water plane becomes flat, and the angle between the water plane and the transverse section of ship is smaller than the other ship. These ship may suffer from the wave impact pressure on the stern flare. For this reason, the experimental and analytical studies on the stern flare impact pressure were carried out, and following results were obtained.

(1) The fairly good agreement was found between the impact pressure coefficients obtained from the experiment in regular waves with those by Wagner's method. The magnitude of the coefficient was about 10~20.

(2) The maximum impact pressure which was predicted in irregular head waves from 3 to 11 Beaufort wind scale was about 20~30 t/m² for actual ship. This magnitude is smaller than the bow flare impact pressure, but the probability of occurrence of impact pressure is large. So it seems to be probable that the noise and fatigue due to transient vibration induced by the impact force becomes a problem.

1 緒 言

荒天航行中の船舶は時として船首甲板上への海水打ち込みによる青波衝撃、船首船底の露出による船首底衝撃および船首外板衝撃を受ける。これらの衝撃圧は局部構造の凹損の原因となるのみならず衝撃力により発生する船体過渡振動モーメントが静水および波浪曲げモーメントに重畳するため合理的な船体縦強度を考えるうえで重要となる。したがって、従来から数多くの研究^{1)~7)}がなされている。

一方、近年数多く建造されている、軽量貨物を多量に運搬することを目的とした、Car ferry、自動車専用運搬船および船尾部にランプウェイを有する RORO 船は推進性能の面から水線下形状はやせ形であるが、十分な甲板面積を確保するため著しく平坦なフレアーを持つ船尾構造となっている。船首部に比べ船尾部は、船体と波面との相対変位、相対速度は小さい。しかし、水線近傍が著しく平坦で波面と船体横断面のなす角度が小さい船尾形状の船では船尾部においても波浪衝撃が発生する危

険性がある。船尾構造は船首部のように補強が施されていないのが一般的であり、発生する波浪衝撃の大きさおよび強度に対して検討を加えておく必要がある。本研究では、船尾にランプウェイを有する RORO 船を例にとり、正面規則波中および不規則波中の模型実験を行い、船尾部の波浪衝撃現象に検討を加え、その結果をもとに実船の衝撃圧の短期予測を行った。

2 実験対象船

本研究では、 $L=98\text{m}$ の比較的小型の RORO 船の 3m 模型船を用いて波浪中の実験を行った。対象船の主要目を Table 1 に示す。船尾形状の特徴の略略は A.P. における横断面形状で把握できる。そこで、本研究で対象とした RORO 船と、著者らが船首部の波浪衝撃実験に用いた鉱石運搬船、コンテナ船および一般貨物船⁶⁾の A.P. における横断面形状を各船の長さを等しくして比較した。その結果を Fig. 1 に示す。RORO 船の横断面形状は他の船種のものに比べ著しく平坦で幅広であるが、Car ferry の中には、より一層平坦な船尾形状に設計された船も少なくない。この模型船を用い、上下揺および縦揺のみを自由にして正面規則波中および正面不規

* 広島大学工学部

** 川崎重工業(株)坂出工場

Table 1 Principal particulars of model ship

Item		
Length between P.P.	L	3.000 m
Breadth	B	0.490 m
Depth	D	0.373 m
Draft	d	0.133 m
Displacement	Δ	121.0 kg
Block Coefficient	C _b	0.662
C.G. from Midship	$\bar{X}_G$	0.019 m aft
Radius Gyration for Pitching Motion		0.257 L
Scale		3/98

則波中を曳航し、船体運動、出会波、船尾における船体と波面の相対運動および Fig. 2 に示す P11~P53 の点において波浪から受ける圧力を計測した。なお、船尾部の波浪衝撃の発生仕易さを考え 80% バラストの等吃水

— Ro-Ro ship
 --- Ore carrier
 - - - Container ship
 ---- General cargo ship

Fig. 1 Sectional ship form at A.P.

Fig. 2 Pressure gage arrangement

状態で実験を行った。

3 規則波中の船尾部波浪衝撃圧

衝撃圧力の大きさを推定する方法としては von Kármán⁸⁾, Wagner⁹⁾, Chuang¹⁰⁾ らのものがある。それらは表現に多少の違いはあるが、船体が波面に突入するときの相対速度と、船体と波面のなす角度の2つのパラメータにより衝撃圧の大きさが決定される。

出会波が船体により乱されないとしたときの船体と波面の相対変位 Z_r および相対速度 Z_v は、

$$Z_r = \zeta + (x - x_G)\phi - h = Z_{r0} \cos(\omega_e t + \varepsilon_r) \quad (1)$$

$$Z_v = \dot{\zeta} + (x - x_G)\dot{\phi} - V\phi - \dot{h} = Z_{v0} \cos(\omega_e t + \varepsilon_v) \quad (2)$$

で与えられる。ただし、

ζ : 上下揺, ϕ : 縦揺, h : 波隆起, x : 船の長さ方向座標, x_G : 重心位置, Z_{r0} : 相対変位振幅, ε_r : 相対変位位相差, Z_{v0} : 相対速度振幅, ε_v : 相対速度位相差, V : 船速, ω_e : 出会波の円振動数, t : 時間。

静水面から船体の任意点までの鉛直距離を d とすると、その点が接水する条件は $d \leq Z_{r0}$ であり、接水する時刻 t_0 は、

$$t_0 = \frac{1}{\omega_e} \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{d}{Z_{r0}} \right) - \varepsilon_r \right\} \quad (3)$$

で与えられる。接水時の相対速度は (3) 式の接水時刻を (2) 式に代入すれば得ることができる。O.S.M. により計算した上下揺および縦揺を用い、A.P. の中心線上の点が接水するときの相対速度を求めた結果を Fig. 3 に示す。一般に、船速が増せば、波に対する上下揺および縦揺の位相は遅れてくる。その結果、相対変位が最小となる船の長さ方向の位置は船尾方向に移動し、船首部の相対変位は大きくなるが、逆に船尾では小さくなる。したがって、Fig. 3 に示すように船尾部においては船速

Fig. 3 Relative velocity at instant of impact

の増加にともなう、接水時の相対速度は小さくなり、また接水が発生する波長・船長比 λ/L の範囲も狭くなる。このような結果を考慮して、波長・船長比 $\lambda/L = 0.8 \sim 1.2$ 、波高・船長比 $h/L = 0.02, 0.03, 0.04$ の規則波中で、船速については $Fn = 0.075 \sim 0.175$ の範囲を 0.025 間隔で変化させて模型実験を行った。

限られた幅の水槽で模型船を低船速で曳航した場合には水槽の側壁影響は避けられず、船首部で造られた波が水槽壁で反射され船尾部に伝播して出会波に重畳する。さらに、出会波は船体により乱されるために、船体近傍の波隆起は、それらの影響のない船の前方の波隆起とは異なってくる。したがって、出会波を用いて (1), (2) 式で船尾部の相対変位、相対速度を求めることは厳密には十分とはいえない。船尾部における出会波の乱れを検討するため A. P. 後方 0.11 L に船体に固定した波高計を設置して相対水位を計測し、実験より得られた船体運動および出会波を (1) 式に代入して計算した相対変位振幅と比較した。その結果を Fig. 4 に示す。図中の直線上に点があれば計測値と (1) 式による計算結果が完全

Fig. 4 Comparison of experimental results with calculated results of relative motion

に一致していることになる。船速が小さいときに側壁影響が現われ易く、計測値と計算値の対応は良くないが文献 11) により本研究で実験を行った波長の範囲では側壁影響がないとされる $Fn = 0.15$ 以上の船速のときにも船速が小さい場合に比べ顕著な違いは見られない。なお、図中の直線はほぼ平均的な値を示している。出会波が船体により乱された影響を考慮して船尾部での相対変位を求めることは必要以上に取り扱いを複雑にするだけでなく、規則波中の模型実験は衝撃圧係数の平均値を求めることを主な目的としていることおよび出会波が乱されないとして求めた相対変位が計測値の平均的な値を与えていたことより船尾部の相対変位、相対速度も出会波が乱されないとして (1), (2) 式で計算する。

船尾底部が波浪水面に衝突し没入後、再び露出する過程で船尾部は波浪外力を受ける。波面に衝突するとき発生する衝撃圧力 P_0 が船首底衝撃圧力の場合と同様に次のように表わせるとする。

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho k v_n^2 \quad (4)$$

ここで、 ρ : 水の質量密度、 v_n : 接水時鉛直方向相対速度。また、 k は断面固有の無次元係数で衝撃圧係数と呼ぶ。接水時の相対速度は実験で計測した出会波および船体運動を用い (2) 式に代入して計算する。衝撃圧係数を得るため衝撃圧力 P_0 と v_n^2 の関係を調べた一例を Fig. 5 に示す。実験点はばらついていて最小二乗法により図中の直線を求め直線の傾きから衝撃圧係数を決めた。

局部構造模型の落下衝撃実験結果によると、船体と水面のなす角度が 10 度以上であれば、次式で与えられる Wagner の理論⁹⁾ による衝撃圧係数は実験結果と良く一致している。

$$k = 1 + (\pi \cot \beta / 2)^2 \quad (5)$$

ここで、 β : 船体と水面のなす角度。

Fig. 2 に示す対象船の船尾横断面で中心線近傍を除いた部分の静水面に対する傾斜角は 10 度以上あるので (5) 式で衝撃圧係数を計算し、実験結果と比較した。その結果を Fig. 6 に示す。計算値と実験値は良く一致しており船尾部の波浪衝撃圧の推定にも Wagner の方法が使えることがわかる。著者らが模型実験から得た船首底衝撃の衝撃圧係数⁹⁾ と比較すると、船尾部の衝撃圧係数の大きさは船首底における値の 1/2~1/5 位の値である。

3 不規則波中の船尾部波浪衝撃圧

短期の不規則海面における波高および波に対する線形な系の応答の振幅は Rayleigh 分布に従うといわれている。船体と波面との相対変位 z が Rayleigh 分布に従うとき、その確率密度関数 $f_T(z)$ は、

Fig. 5 Relation between impact pressure and square of relative velocity at P21

Fig. 6 Comparison between experimental and calculated impact pressure coefficient

$$f_r(z) = \frac{z}{R_r^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2R_r^2}\right) \quad (6)$$

と表わされる。ただし、 R_r^2 は相対変位分散である。船尾部が波面に突入するためには考えている点から静水面までの距離 d より相対変位振幅が大きくなければならない。その確率 P_r は (6) 式を d から無限大まで積分して得られ、

$$P_r = \exp\left(-\frac{d^2}{2R_r^2}\right) \quad (7)$$

となる。Fig. 7 に示される波スペクトルの不規則波中における衝撃圧の発生確率の実験結果と (7) 式による計算値とを比較した結果を Fig. 8 に示す。水槽側壁および波が船体により乱される影響で規則波中の相対変位の計測値と計算値との間には多少の相異が見られたにもかかわらず不規則波中の衝撃圧の発生確率は良く一致してい

Fig. 7 Wave spectrum

た。これは不規則波中の実験結果はさまざまな周波数成分が含まれた 100 個以上の出会波に対して得られたものであり、船尾部の相対変位振幅に対する水槽側壁および波が船体により乱される影響が平均化されたためと考えられる。

相対変位と相対速度がそれぞれ独立の確率過程に従うと仮定すると衝撃圧力の確率密度関数 $f(p)$ は船首底衝撃の場合と同様に次のように与えられる。

Fig. 8 Probability of occurrence of impact pressure along 7m W.L. in irregular head waves

$$n = P / \left(\frac{1}{2} \rho g H \right) ; \quad \rho : \text{Mass Density of Water, } P : \text{Impact Pressure,}$$

$$g : \text{Acceleration of Gravity, } H : \text{Significant Wave Height.}$$

———— : Calculated

Fig.9 Histogram of impact pressure in irregular waves

$$f(P) = \frac{1}{\rho k R_v^2} \exp \left[- \left(\frac{P}{\rho k R_v^2} + \frac{d^2}{2 R_r^2} \right) \right] \quad (8)$$

ただし, R_v^2 : 相対速度分散。

規則波中の模型実験から得られた衝撃圧係数 k を用いて (8) 式で計算した衝撃圧力の確率分布と不規則波中の模型実験結果を比較した。比較対象は Fig.7 に示す波スペクトルの不規則波中における Fig.2 の圧力計測位置 P21, P22, P23 での衝撃圧力であり, その結果を Fig.9 に示す。計算結果である図中の実線は実験結果のヒストグラムの傾向を良く表わしており, 船尾部の衝撃圧力の短期予測にも (8) 式を用いてさしつかえないことが確認された。

4 実船の船尾部波浪衝撃圧の短期予測

規則波中および不規則波中の模型実験はすべて正面波であり船体運動は上下揺および縦揺のみを考えた。しかし, 実際の波浪海面はさまざまな方向からくる波が合成しており, 厳密には6自由度すべての船体運動を考える

必要がある。特に横揺は衝撃の発生が問題となる船尾部が横揺中心線からあまり離れていないので相対変位, 相対速度振幅にはほとんど影響を及ぼさないと考えられるが, 横揺により船体と波面のなす角度が変化するため衝撃圧の大きさも横揺を考慮しない場合と異なってくる。しかしながら, 一般に横揺は正面波から斜向波では小さく, 斜向波から斜追波の状態であつた海域を航行することは希である。また, 比較的小波高の横波による船尾フレアーのスラッシングは本論文で取り扱った衝撃現象と異なるため除外すると, 正面波のときの衝撃圧の短期予測を行うことで, その船が受ける最大衝撃圧を推定できると考えられる。以上の考えにもとづき正面波中の船尾部波浪衝撃圧の短期予測を行う。ある圧力値 P よりも大きな衝撃圧が発生する累積確率 $F(P)$ は (8) 式を $P \sim \infty$ の範囲について積分して得られる。

$$F(P) = \exp \left[- \left(\frac{P}{\rho k R_v^2} + \frac{d^2}{2 R_r^2} \right) \right] \quad (9)$$

不規則波中を T 時間航行するときの波の出会い回数 N は

次のようになる。

$$N = \frac{3600}{2\pi} T \frac{R_v}{R_r} \quad (10)$$

N 個の出会い波の中で最大の衝撃圧力 P_M を累積確率 $1/N$ の衝撃圧力とするとそれは次のように与えられる。

$$P_M = \rho k R_v^2 \left(\ln N - \frac{d^2}{2R_r^2} \right) \quad (11)$$

統計的性質がほぼ一定である短期波浪海面の継続時間は 30 分程度と考えられているため時間 T を 0.5 時間として船尾端の P 11 の点における最大衝撃圧力の予測を行った。その結果を Fig. 10 に示す。なお、波スペクトラムとしては ISSC の波スペクトラムを用いた。図の横軸には風速およびビューフォート風力階級を取っており、(7) 式による衝撃圧の発生確率も合わせて示している。風速 U (m/sec) と有義波高 H および平均波周期の関係式として次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} H &= 0.02135 U^2 \text{ (m)} \\ \bar{T} &= 0.5641 U \text{ (sec)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

最大衝撃圧は船速の増加により大きくなる傾向があり、その値は $20 \sim 30 \text{ t/m}^2$ 位の値である。この位の大きさの圧力値では強度上特に問題となることはないが、衝撃圧の発生確率が $60 \sim 80\%$ と高いため騒音、振動による疲労損傷の原因となる可能性がある。最大衝撃圧およびその発生確率共に海象が荒れてくると急激に増加するが、

Fig. 10 Predicted maximum impact pressure and probability of occurrence of impact pressure during 0.5 hour operation

その後の変化は小さい。

5 結 言

RORO 船、自動車専用運搬船などのように船尾部の水線近傍が著しく平坦な船の船尾部波浪衝撃現象を調べるため RORO 船の 3m 模型船を用いて正面規則波中および不規則波中の曳航実験を行った。そして、衝撃圧の大きさの推定および不規則波中の衝撃圧力の短期分布の推定が既存の解析手法を用いて可能か否かを検討した。その結果を要約すると、

(1) 規則波中で船速が早くなれば波に対する上下揺、縦揺の位相が遅れるため船尾部の相対変位、相対速度振幅は小さくなる。したがって、船首部とは逆に船尾では船速が小さい方が衝撃も発生し易く、また衝撃圧力値も大きい。

(2) Wagner の理論により計算した衝撃圧係数は規則波中の模型実験から得た値とほぼ一致しており、対象船程度の横断面形状の船尾部の衝撃圧力の推定には Wagner の理論が適用できる。

(3) 不規則波中の相対変位および相対速度振幅が Rayleigh 分布に従い、しかもそれらが統計的に独立であると仮定して計算した衝撃圧の発生確率および衝撃圧の確率分布は模型実験結果と良く一致していた。したがって実船の衝撃圧力の予測にもその考え方が適用できる。

(4) 正面不規則波中を 0.5 時間航行したときの実船の最大衝撃圧力を推定したところ、衝撃圧力の大きさは約 $20 \sim 30 \text{ t/m}^2$ であり局部強度上特に問題となる大きさではないが、衝撃圧の発生頻度が大きいため騒音、振動による船尾構造の疲労損傷等が問題となる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) 渡辺恵弘：船底衝撃の性質と Whipping について，西部造船会会報，第 32 号 (1966)。
- 2) M.K.Ochi: Extreme Behavior of a Ship in Rough Seas-Slamming and Shipping of Green Water-, TSNAME, Vol.72 (1964)。
- 3) M.K.Ochi, L.E.Motter: Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design, TSNAME, Vol.81 (1973)。
- 4) 川上益男，田中一雅：船首甲板の青波衝撃圧の統計予測，西部造船会会報，第 53 号 (1977)。
- 5) 山本善之，藤野正隆，深沢塔一：非線型性を考慮した波浪中の船体運動および縦強度，日本造船学会論文集，第 143, 144 号 (1978)，第 145 号 (1979)。
- 6) 川上益男，田中一雅，道本順一，新田茂樹，金沢求：一般貨物船の船首底衝撃による過渡振動について，西部造船会会報，第 60 号 (1980)。

- 7) 守 国夫：高速艇の船首船底板の衝撃水圧による
応答，日本造船学会論文集，第 142 号 (1977)。
 - 8) Th. von Kármán：The Impact of Seaplane
Floats During Landing, NACA, TN No. 321
(1929)
 - 9) H. Wagner：Über Stoss-und Gleitvorgänge an
der Oberfläche von Flüssigkeiten, ZAMM Vol.
12 (1932).
 - 10) Sheng-Lun Chuang：Slamming Tests of Three-
Dimensional Model in Calm Water and Waves,
Naval Ship Research and Development Center
Report 4095 (1973).
 - 11) G. Vossers, W.A. Swaan：Some Seakeeping
Tests with a Victory Model, International
Shipbuilding Progress, Vol.7, No.69 (1960).
-