高速艇の船首船底板の衝撃水圧による応答

正員 守 国 夫*

Response of the Bottom Plate of High Speed Crafts
under Impulsive Water Pressure

by Kunio Mori, Member

Summary

This report is concerned with the elasto-plastic response of the bottom plate of aluminum high speed crafts due to slamming pressure which sometimes causes damages among rough seas.

Drop test of full-scale model of the bottom plate on the water surface is carried out and experimental values are compared with theoretical results. At first, measured data are analyzed within frequency domain in order to get the linearity between water pressure and dynamic response. Then, assuming the damping effect caused by the air layer between the water surface and the plate, the dynamic response of the bottom plate is numerically calculated by using the finite strip method.

It is shown that experimental values are agree well with the theoretical results, by choosing reasonable damping factor.

1 緒 言

荒天中を航走する高速艇の船首船底板は、スラミング現象によって繰返しの衝撃水圧を受け、ときには局部的な凹損に至ることがある。このため、弾塑性領域における船底板と水圧との衝撃機構あるいは動的応答の解明が重要となり、実験的・理論的な検討が進められているが、塑性域の発達過程中的の水圧変化、応答特性などが複雑に絡みあって十分な成果を得るまでには至っていないと考えられる。

本文は、衝撃機構としては Verhagen¹⁾、永井²⁾等によるところの水圧と構造体の間に介在する空気層の緩衝作用を考え、実艇モデルの落下実験によって得られた水圧と応答の現象記録から、まず衝撃水圧と応答の関連性を周波数領域で調べた。さらに実験値と有限帯板理論および数値積分法による解析値とを比較することにより、弾塑性領域での応答特性について考察を行なった。

2 実 験

落下実験に用いた試験体の形状寸法および計測点を Fig.1 に示す。試験体の数量は 2 体で、1 体はアルミ合金製高速艇の船首船底板をモデル化したものである。以下では試験体 No.1 と記す。残る 1 体はスチフナー剛性

Fig.1 Specimen and measuring point

* (株)神戸製鋼所構造研究所

Table 1 Mechanical property

Material	Yield point	Young's modulus	Second modulus	Poisson's ratio
Al-Alloy 5083-0	13.7 kg/mm ²	7000 kg/mm ²	280 kg/mm ²	0.3

の差による応答特性への影響を調べるため、補足的に製作したもので、スチフナー剛性は試験体 No. 1 の半分となっている。以下ではこれを試験体 No. 2 と記す。材質はアルミ合金 5083-0 材で機械的性質を Table 1 に示す。

試験体の拘束条件は、中央部の応力が大きくなるようにスチフナー端部を支持、板パネル周辺を固定とした。

計測項目は水圧、変位、ひずみで、それぞれ P1~P2, D1~D2, S1~S3 とした。各計測点は Fig.1 に示したとおりであるが、スチフナーフランジのひずみ S3 は試験体 No. 1 のみで計測した。実験は落下高さを徐々に大きくし、各落下高さで得られる計測値を 6ch のデータレコーダで集録した。計測は試験毎にゼロ調整を行ない、残留値はビジコーダーあるいはデータレコーダによる再生値から求めた。

なお、試験体と浮体とを含めた全重量は 800 kg で、 $M/\rho l^2$ (ここに M は落下物体の単位長さ当り質量、 ρ は水の密度、 l は試験体の半幅) は約 4 である。

3 実験結果

3.1 水 圧

落下高さ H と最大水圧 $P_{\max}$ の関係を Fig.2 に示

Fig.2 Correlation between drop height and maximum water pressure

Fig.3 Correlation between drop height and permanent set

す。最大水圧は、試験体 No.1 では $H < 1\text{m}$ のとき高さと比例関係にあり、 $H > 1\text{m}$ になると水圧の上昇は小さくなり、端部に近い P1 で 4.5 kg/cm^2 、中央部 P2 で 3.5 kg/cm^2 近傍に収斂する傾向にある。試験体 No. 2 では P1 は $H = 0.3\text{m}$ まで、P2 は $H = 0.6\text{m}$ まで高さに比例し、それ以上の高さに対しては水圧の上昇が緩やかとなる。また P1 と P2 の差は落下高さが増すにつれ試験体 No. 2 すなわち剛性の小さい方に、やや大きくなる傾向にある。Fig.3 は落下高さで初期たわみ（落下前の残留たわみ）との関係を示した図であるが、初期たわみが急増するときの高さは水圧の上昇が少なくなるときの高さにはほぼ対応している。落下高さに比べて水圧上昇が少なくなるのは初期たわみによって水面と試験体の間にはさまれる空気層が増すことに関連していると考えられる。このことは同一高さによる繰返し落下実験で、初期たわみが増すと水圧の最大値が減少するという結果²⁾によって裏付けられると考える。

Fig.4 は水圧の Time History を落下高さをパラメータとして示したものである。最大水圧となる最初の波形は落下高さとともに最大水圧は大きくなるが、周期 T_1 は同一試験体ではほぼ一定である。しかし負圧以降の波形は初期たわみが大きくなるにつれて周期が長くなり、高

Fig.4 Time history of water pressure

Fig.6 Time history of deflection

Fig.5 Correlation between water pressure and total deflection

周波成分が重畳するようになる。

3.2 たわみ

落下高さと全たわみの関係を Fig.5 に示す。ただし、全たわみは落下毎のたわみの最大値と Fig.3 で示した落下前の初期たわみを合計した値である。

残留たわみが発生したときの落下高さおよび水圧（計測点 P1 と P2 の平均値） p_m は、試験体 No.1 で $H=$

1m, $p_m=2.2\text{ kg/cm}^2$ 、試験体 No.2 で $H=0.6\text{ m}$, $p_m=2.5\text{ kg/cm}^2$ である。試験体 No.1 の全たわみは残留たわみ発生後 $p_m=3.5\text{ kg/cm}^2$ まで、試験体 No.2 では $p_m=3.0\text{ kg/cm}^2$ まで水圧と比例関係にあり、それ以上の水圧になると急増する傾向にある。

Fig.6 はたわみの Time History を、落下高さをパラメータとして示したものである。落下高さの小さい弾性

(a) Frequency response of specimen No. 1

(b) Frequency response of specimen No. 2

Fig. 7

域では、たわみ波形が水圧と対応するが、高さが増し初期たわみが大きくなるにつれて負圧になる付近からのたわみは緩やかな波形になる。

4 考 察

4.1 周波数解析による水圧とたわみとの関連性の検討

動的応答解析を行なう前に、実験データから衝撃水圧とたわみの関連性を周波数領域で整理し、構造系が定係数系であるかどうかを調べた。弾性域では定係数系で、水圧とたわみの相関はほぼ線形であることを確認しているので³⁾、弾塑性域の特性に注目した。

Fig. 7 は水圧 P_2 とたわみ D_2 の実験データを YHP 2100 ミニコンで周波数解析し、横軸に振動数、たて軸にパワースペクトル S_p , S_d , クロスパワースペクトル S_{p-d} , 伝達関数 $|H(iw)|_{p-d}$, 関連度関数 r_{p-d}^2 をまとめて示した例である。ここで添字 p は水圧, d はたわみを意味する。解析に用いたデータ長は Fig. 5, 6 で示した波形の周期 T で, $\Delta F=5\text{Hz}$ とした。点線は最大値

を有する波形の 1 パルスのみで、同図の T_1 に対応するデータを用いた。

今回実施した落下高さ和水圧の範囲では、関連度関数 r_{p-d}^2 は試験体 No. 1, No. 2 とともにほとんどの場合 $r_{p-d}^2 \approx 1$ を得た。したがって、弾塑性領域においても、衝撃水圧によるたわみの解析は定係数系として取扱いうると判断される。

4.2 動的応答

4.2.1 有限帯板理論を用いた解析の手順

Fig. 8 Finite strip assemblage Fig. 9 Coordinate

応答は有限帯板理論を用い、運動方程式

$$[M]\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

を直接数値積分法により求めた。弾性域における解析法はすでに報告³⁾しているので、ここでは弾塑性域で考慮した点のみを述べる。帯板への分割は Fig. 8 の実線のように行ない、変位関数は板パネルおよびスチフナーについて次式を用いた。Fig. 9 に座標系を示す。

板パネルに対して

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{x}{d} \right) u_{j,q} + \frac{x}{d} u_{j+1,q} \right] \\ &\quad \times [\sin \lambda_q y - \sinh \lambda_q y + \mu_q (\cosh \lambda_q x \\ &\quad - \cos \lambda_q x)] \\ v &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{x}{d} \right) v_{j,q} + \frac{x}{d} v_{j+1,q} \right] \sin \beta_q y \\ w &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{3x^2}{d^2} + \frac{2x^3}{d^3} \right) w_{j,q} + \left(x - \frac{2x^2}{d} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x^3}{d^2} \right) \theta_{j,q} + \left(\frac{3x^2}{d^2} - \frac{2x^3}{d^3} \right) w_{j+1,q} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{x^3}{d^2} - \frac{x^2}{d} \right) \theta_{j+1,q} \right] [\sin \lambda_q y - \sinh \lambda_q y \\ &\quad + \mu_q (\cosh \lambda_q x - \cos \lambda_q x)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

スチフナーに対して

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{x}{d} \right) u_{j,q} + \frac{x}{d} u_{j+1,q} \right] \sin \alpha_q y \\ v &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{x}{d} \right) v_{j,q} + \frac{x}{d} v_{j+1,q} \right] \cos \alpha_q y \\ w &= \sum_{q=1,2,\dots}^r \left[\left(1 - \frac{3x^2}{d^2} + \frac{2y^3}{d^3} \right) w_{j,q} + \left(x - \frac{2x^2}{d} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{x^3}{d^2} \right) \theta_{j,q} + \left(\frac{3x^2}{d^2} - \frac{2x^3}{d^3} \right) w_{j+1,q} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{x^3}{d^2} - \frac{x^2}{d} \right) \theta_{j+1,q} \right] \sin \alpha_q y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の変位成分

$$\lambda_q = \frac{(2q+1)\pi}{2l}, \quad \mu_q = \frac{\sin \lambda_q l - \sinh \lambda_q l}{\cos \lambda_q l - \cosh \lambda_q l}$$

$$\beta_q = \frac{2q\pi}{l}, \quad \alpha_q = \frac{q\pi}{l}$$

弾塑性領域においては、求めた節線変位増分から、Mises の降伏条件式

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_y^2 \quad (4)$$

を用いて、塑性域の判定を行ない、同時に剛性マトリックスを作りかえて次の時間増分に対する計算を行なった。応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ は Fig. 8 の実線と点線で囲まれる要素の三次元格子内における応力の代表値を用いた。なお、板厚方向への分割は 6 層とした。

塑性域での応力増分とひずみ増分の関係は、

$$\{\Delta \sigma\} = [D^p] \{\Delta \epsilon^p\} \quad (5)$$

あるいは

$$\begin{Bmatrix} \Delta \sigma_x \\ \Delta \sigma_y \\ \Delta \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} - \frac{S_1^2}{S} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} - \frac{S_1 S_2}{S} & -\frac{S_1 S_3}{S} \\ & \frac{E}{1-\nu^2} - \frac{S_2^2}{S} & -\frac{S_2 S_3}{S} \\ & & \frac{E}{2(1+\nu)} - \frac{S_3^2}{S} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \Delta \epsilon_x^p \\ \Delta \epsilon_y^p \\ \Delta \gamma_{xy}^p \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここに

$$S = \frac{4}{9} \bar{\sigma}^2 H' + S_1 \sigma'_x + S_2 \sigma'_y + 2 S_3 \tau_{xy}$$

$$S_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\sigma'_x + \nu \sigma'_y), \quad S_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu \sigma'_x + \sigma'_y),$$

$$S_3 = \frac{E}{1+\nu} \tau_{xy}$$

H' : 加工硬化率, $\bar{\sigma}$: 相当応力, σ'_x, σ'_y : 偏差応力とする⁴⁾。素材の応力-歪関係は bi-linear とした。

なお水圧のデジタル量は 1.56 msec 毎の増分で入れ、速度、加速度の計算も $\Delta t = 1.56$ msec で求めた。逐次積分における β は 1/4, r は 1/2 とした³⁾。計算容量は 220 K バイトで、CPU は IBM 370-168 で約 4 分である。

4.2.2 たわみの実験値と計算値との比較

たわみの Time History を実験値と計算値とで比較すると、Fig. 10 のようになる。ただし、計算に用いた水圧は、実験値の P2 が一様に分布するものとした。減衰項は $[C] = 2\eta\omega_1[M]$ (ここに η は減衰係数, ω_1 は空中における 1 次の円振動数) とした。弾塑性領域では塑性域の広がりによって振動性状が変り、減衰項で用いる ω_1 も変化すると考えられるが、解析に取入れることは実際上困難なので、 ω_1 は一定で η の値を操作することとした。 η の値は 0.5 と 1.5 の 2 種類を選んだ。 $\eta = 0.5$ としたのは Fig. 7 で示した周波数解析による $|H(i\omega)|$ が振動数に対して平滑あるいはやや右上りという形を考慮したことによる。 $\eta = 1.5$ は臨界減衰状態に近い場合を想定して選んだ。

Fig. 10 よりまずたわみの最大値に注目すると、試験体 No. 1 では落下高さ $H = 1.3$ m まで実験値と計算値はよく一致し、計算においても η のとり方による差は少ない。落下高さがそれ以上になると、Fig. 10(c) で示すように計算値は $\eta = 0.5$ すなわち減衰項を小さくとした方が実験値に近づく傾向にある。このことは水圧とたわみ応答最大値との関係を実験値と計算値とで比較した図、Fig. 11 よりみると一層明らかで、実験値が水圧 P2 = 3.5 kg/cm² 付近から急増することに対しては計算における減衰係数を小さくの方が実験値に近づく。ここで P2 = 3.5 kg/cm² は $H = 1.3$ m のときの値に対応してい

(a)

(b)

(c)

Fig.10(a) Time history of deflection (Specimen No.1, $H=0.4\text{ m}$)(b) Time history of deflection (Specimen No.1, $H=1.3\text{ m}$)(c) Time history of deflection (Specimen No.1, $H=1.5\text{ m}$)

 Fig.10(d) Time history of deflection (Specimen No. 2, $H=0.6\text{m}$)

 Fig.10(e) Time history of deflection (Specimen No. 2, $H=1.0\text{m}$)

 Fig.11 Correlation between water pressure P_2 and maximum deflection

る。さらに Fig.11 では水圧の最大値が静的に作用したときの最大たわみの計算値も示しているが、静的計算値は $P_2 < 3.5 \text{ kg/cm}^2$ では実験値と比較的によく一致する。したがって、たわみの最大値は、初期たわみが増え、全たわみが急増するまでの水圧に対しては静的計算によってある程度まで予測できると考えられる。

試験体 No.2 のたわみの最大値は計算値が大きくなる。ただし、水圧が高くなると減衰係数 η を小さくすることによって実験値に近づく傾向にある。また、静的計算値は $\eta=0.5$ としたときの応答計算値とほぼ等しくなる。水圧をさらに高くすれば試験体 No.1 のときと同様に応答計算値と静的計算値の差が現われると予想される。

つぎに水圧が最大値から負圧になる付近からの応答および残留たわみのあらわれ方について検討する。この場合も計算値は上述の応答最大値と同様に減衰係数 η を 0.5 としたときに実験値に近づくようである。実験値と計算値の差が η のとり方以上に大きくあらわれることはたとえば、Fig.10(c) あるいは Fig.10(e) の場合につ

Fig. 12 Time history of stress
(a) Specimen No. 1, $H=1.3\text{m}$
(b) Specimen No. 2, $H=1.0\text{m}$

Fig. 13 Yield zone
(a) Specimen No. 1, $H=1.3\text{m}$
(b) Specimen No. 2, $H=1.0\text{m}$

Fig. 14 Correlation between water pressure and maximum stress

いては水圧の計測値 $P1$ と $P2$ の差が大きいことに起因するようである。今回の応答計算では水圧分布は一樣で、水圧および波形は試験体中央部の計測点 $P2$ で代表させたが、水圧分布をより厳密に考慮した計算を行えば、実験値に近い値が得られるものと考えられる。

4.2.3 応力の実験値と計算値との比較

Fig. 12 は初期たわみが相当大きくなり応力の最大値が塑性域にあるときの Time History を実験値と計算値で比較したものである。さらに Fig. 13 では、それぞれ Fig. 12(a), Fig. 12(b) に対応する塑性域の発達過程を計算で求めた場合について示している。ただし塑性域は黒い部分で示す。計測位置が中央部のみで、板周辺部の応力を調べることはできなかったが、計算による Time History は実験値によく一致していると考えられる。

Fig. 14 は応力の最大値を、実験値と $\eta=0.5$ としたときの計算値ならびに静的荷重による計算値とで比較したものである。応力の計算値は、水圧の最大値のほかには作用時間、波形および荷重ステップのとり方などが影響するので、静的計算のようになめらかな線を求めることができないが、大体において実験値と近い値を得ることが

できた。

5 結 言

以上、落下実験結果と有限帯板理論を用いた弾塑性応答解析との比較を行ない、大略つぎのような結論を得た。

(1) 周波数解析において、衝撃水圧と応答の関連度関数はほぼ 1 で、落下物体と水面との間に空気層をはさむと考えたときの衝撃現象は弾塑性領域においても定係数系であると推察される。

(2) 初期たわみが小さいときの応答の最大値は、実験値と計算値はよく一致する。その場合、応答解析による計算値は減衰係数の変動による差は小さいと考えられ、さらに水圧の最大値が静的に作用したときの値と近似的に一致する傾向にある。

(3) 初期たわみが大きくなり、水圧に対する応答の最大値が急増するようになると、計算値は減衰項を小さくする方が実験値に近づく。

(4) 実艇モデルに近い試験体の応答解析は、試験体中央部の水圧の実測値を用いた計算でも実験値に近い値が得られた。実艇モデルのスチフナーの剛性を小さくして全体の剛性を下げると、水圧分布がやや複雑になるものと予想され、応答計算ではより厳密な水圧および波形を用いる必要があると考えられる。

終りに臨み、本文の応答解析結果についてご検討いただいた大阪大学工学部八木教授に厚く感謝します。さらに、落下実験および応答解析において終始ご指導、ご協力いただいた防衛庁第 1 研究所の永井部長ならびに大阪大学工学部浜本助教授に深く謝意を表します。また、落下実験およびデータ解析において、防衛庁第 1 研究所伊東技官のご協力があったことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) J.H.G. Verhagen: The Impact of a Flat Plate on a Water Surface, Jr. of SHIP RESEARCH, (1967), p. 211.
- 2) 永井 保他: 長矩形平板の水面衝撃実験とその解析, 日本造船学会論文集, 第 131 号(昭 47), p. 195.
- 3) 守 国夫他: 衝撃水圧を受ける防撓板の周波数応答解析, 日本造船学会論文集, 第 140 号(昭 51), p. 175.
- 4) 上田幸雄: 薄板構造の最終強度解析(その 1)—有限要素法および有限帯板法による弾塑性大たわみ解析—, 日本造船学会誌, 第 555 号(昭 50), p. 13.