二次元模型実験による甲板水圧の研究

正員 郷 田 国 夫* 正員 宮 本 武*

A Study of Shipping Water Pressure on Deck
by Two-Dimensional Ship Model Tests

by Kunio Goda, *Member* Takeshi Miyamoto, *Member*

Summary

Shipping water pressures on deck were investigated by forced heaving tests of a two-dimensional ship model. Test results of the shipping water pressures on deck, the relative water elevations on the ship side, and the profiles of the shipping water on deck are shown and discussed. Approximate calculations of amount of shipping water were carried out.

1 緒 言

甲板上への海水打込みは耐航性および船体強度の面から重要な問題の一つとしてかなり多くの研究がなされている¹⁻⁹⁾。これらの研究は主に、向波および斜波中の船首部における海水打込みおよび横波中での船側からの海水打込みに力点が置かれているようである。

これまで行なわれた船体表面に働く波浪変動水圧の研究によって、船側、船底に働く波浪荷重の推定が実用上十分な精度でできるようになり、構造解析法のめざましい進歩と相まって船体横強度計算の精密化が進んだが、なお横強度計算に必要な甲板水圧に不明な点が残されている。

船体横強度解析の主要な対象となるのは船体平行部であり、船体横強度解析において想定される波浪状態は一般に大波高の苛酷な状態であって、そのような波浪状態では船体平行部における船側からの海水打込みが起ると考えられる。本研究は向波中の船体平行部の船側からの海水打込みによる甲板水圧を船体横断面内の二次元現象によるものであると仮定して、二次元模型の平水中強制上下揺実験によって調べたものである。

2 実 験

(1) 模 型

実験に用いた模型は Table 1 に示すような寸法の断面をもつ木製の二次元模型である。模型は三つの状態に実験に供された。1) 甲板上構造物がない場合、2) 甲板上構造物としてハッチを取付けた場合、3) 海水打込みを防ぐため付加乾舷を取付けた場合。ハッチを模した突起物の幅は $0.36B$ と $0.5B$ の 2 種とし、ハッチカバー上

Table 1 Principal Particulars

	2-DIMENSIONAL MODEL	SHIP (EXAMPLE)
LENGTH, L	(1.000) m	150.000 m
BREADTH, B	0.4027 m	23.077 m
DEPTH, D	0.2349 m	13.457 m
DRAUGHT, d	0.1712 m	9.807 m
FREEBOARD, f	0.0637 m	3.650 m
CAMBER HEIGHT	B/50	B/50
B/d	2.3530	2.3530
A/Bd *	0.9747	0.9747
d/D	0.7288	0.7288
f/D	0.2712	0.2712
HATCH HEIGHT	0.030 m	1.7187 m

* A = SECTIONAL AREA

面までの高さに相当する突起物の高さは 30mm とした。この高さは長さ 150m の一般貨物船に対応させると 1.7m となる。ブルワークは海水打込みに影響をおよぼす重要なものであるが、現象を単純化するために省いた。

(2) 計 測 項 目

1) 甲板水圧、船側水圧

Fig. 1 に丸印で示した位置に水圧計を配置した。水圧計は豊田工機製 PMS-5M-0.5H である。

2) 船側水位、甲板上流入水の水位

Fig. 1 に鉛直方向の実線で示した位置に電気容量式の水位計を配置した。さらに 16 ミリシネカメラによる水面形状を撮影する方法も併用した。

3) 甲板上の流入水量

上記の水位計を甲板上幅方向に等間隔に 7 本配置し出力を加算する方法により計測した。

4) 上 下 揺

Photo 1 に水位計、水量計、16 ミリシネ用目盛板等

* 船舶技術研究所

Fig. 1 Locations of Pressure Gauges and Water Level Meters

の取付状況を示す。

(3) 実験条件, 実験方法

実験は船舶技術研究所落下衝撃試験水槽（二次元水槽）において行なった。水槽の寸法は長さ 20m, 幅 1.0m, 水深 2.0m であって, その中央部に設けられた動揺装置によって模型を平水中で上下揺させた。動揺のモードは正弦波状であり, 動揺の中心は満載吃水 d で平水中に直立している位置である。

上下揺の周期 T は 1.587 sec, 1.296 sec, 1.122 sec の 3 種とした。これらに対する λ/B (λ は進行波の波長) はそれぞれ 9.75, 6.50, 4.88 となる。上下揺の振幅 Z_0 は周期 1.296 sec については 1.25 f , 1.50 f , 1.625 f を, 周期 1.587 sec と 1.122 sec については 1.625 f (f は乾舷) を目標値としたが実測値は多少ずれた値となった。

前述のように模型は, ハッチがない場合とある場合, 付加乾舷を取付けた場合の 3 状態で実験に供されたが, このひと組の 3 状態の実験は運動の状態および計測装置の状態が同一でなければ得られた実験結果の比較は困難である。海水打込みの実験は運動振幅のオーダーの量から乾舷のオーダーの量を差引いた残りの量を取扱う微妙なものだからである。本実験ではこの点に留意し, 一組の 3 状態の実験はなるべく順次連続して行なった。

3 実験結果と考察

実験結果を検討する前にデータ解析について述べる。実験結果は上下揺の 1 サイクルの前半, すなわち船体が動揺中心位置から沈下し始めて沈下最大値に達し再び動揺中心位置へもどるまでの時間 T_1 を 8 等分または 4 等分した各時点 (Fig. 2 参照) の値を順に羅列したものが大部分である。しかるに 1 run 中の記録波形は各サイクルで多少の差異がある。本実験においては動揺装置の始動方法, 記録採取の手順, オシロ記録の読み取り個所等を全実験を通じて一定にした。

次に実験における現象が完全に二次元でなく模型の長さ方向に変化が現われるという問題がある。これについては水位, 水量, 水圧等の計測断面を相互にできるだけ接近させ誤差を少なくするよう努め, そしてこの三次元流れの影響は小さいと仮定して後述の解析においてはこ

Photo 1 Model Set-up

の影響を省略した。

3.1 船側相対水位

海水打込みの問題を考える場合の基本量である船側相対水位について調べる。Fig. 2 は上下揺, 船側相対水位, 甲板上への流入水量のオシロ記録を時間および零ベースを一致させて示したものである。図中の f は乾舷の大きさを表わす。Fig. 3 (a), (b), (c) は 16 ミリシネの撮影フィルムから読み取った時点 ①～⑧ における流入水の水面断面形状を示す。さらに海水打込みを防いだ場合の船側の水面形状および静的相対水位をそれぞれ中細線, 太い実線で示す。Fig. 2 と Fig. 3 (a), (b) が同一運動におけるもので, これらの図から船側相対水位の挙動が

Fig. 2 Oscillograph Records

Fig. 3 (a) Profiles of Shipping Water
(Test Results)

Fig. 3 (b) Profiles of Shipping Water
(Test Results)

わかる。

海水打込みを防いだ場合の船側近傍の水位 ζ_n はだいたい水平を保って運動する。海水打込みを許した場合の船側相対水位 ζ_s は ζ_n より低くなり、 ζ_n が最大になる時刻近辺まで ζ_s/ζ_n は約 0.6 程度である。 ζ_n が時間に無関係に一定の場合には後述するように理論的には $\zeta_s/\zeta_n = 4/9$ と考えてよいであろう。

3.2 甲板上への流入水量

上下揺1サイクルの間に水は甲板上へ流入し、再び流出する。どのような時点で流入水量 Q が最大に達し、流出が始まるかを Fig. 2 で調べてみる。 ζ_s が ζ_n より小さい間は Fig. 3 (a) からわかるように水面は甲板上に向かって低く、 Q は増加の状態にある。 ζ_s と ζ_n が交わる時点では甲板縁付近の水面は水平であるが、まだ流入は続いているようである。 Q が最大に達し流入が止まる時点は ζ_s が ζ_n と交わる時点と ζ_n が f と等しくなる時点の間にあるようである。流出が始まってもその速度は小さく流入水はある時間滞留している観がある。 Q のオシロ記録をよく見ると台形状に近いこと、および Fig. 3 の水面形状の推移からそのようなことが見出される。ハッチがあるとこの滞留時間は短くなる。

文献 10) にダムの決壊時の水流の計算を水力学の理論によって行なった例が示されている。また海面での油

Fig. 3 (c) Profiles of Shipping Water
(Test Results)

Fig. 4 Water Surface at the Break on a Dam

の拡散の研究を報告した文献 11) にも同様の計算が示されている。文献 10) の計算は次のようである。

Fig. 4 に示すように、ダムでせき止められている水深 y_0 の水は破線のような形をしていて、 $t=0$ で突然ダムが取り除かれたとする。時刻 t においては水面形状は実線のような形となる。任意の断面における平均流速 v は、その断面における水深を y とすると

$$v = 2\sqrt{g}(\sqrt{y_0} - \sqrt{y}) \quad (1)$$

水面の形は

$$x = \sqrt{g}(2\sqrt{y_0} - 3\sqrt{y})t \quad (2)$$

$$y = \left(-\frac{x}{3\sqrt{gt}} + \frac{2}{3}\sqrt{y_0}\right)^2 \quad (3)$$

$x=0$ における水深は (3) 式から

$$y = \frac{4}{9}y_0 \quad (4)$$

また $x=0$ における平均流速は (1) 式から

$$v = \frac{2}{3}\sqrt{gy_0} \quad (5)$$

となる。

以上の式を本実験の流入水量の計算に適用してみる。

Fig. 4 に示した座標軸の原点を甲板縁に、 x 軸の正の向きを甲板中心の方にする。キャンパーの影響は無視する。(1)~(5) 式の y_0 は一定値であるが、ここで y_0 が時間の関数であっても (1)~(5) 式は成り立つと仮定し、 y_0 を $\zeta_n(t)$ で置きかえる。流入水量 $Q(t)$ は

$$Q(t) = \int_{t_0}^t v(t) \cdot (\zeta_s(t) - f) dt \quad (6)$$

$$v(t) = \frac{2}{3}\sqrt{g(\zeta_n(t) - f)} \quad (7)$$

$$\zeta_s(t) - f = \frac{4}{9}(\zeta_n(t) - f) \quad (8)$$

$$Q(t) = \frac{8}{27}\sqrt{g} \int_{t_0}^t (\zeta_n(t) - f)^{3/2} dt \quad (9)$$

(9) 式によって計算した値と実験値の比較を Fig. 5 (a), (b), (c) に示す。 $Q(t)$ は $2Q/B(\zeta_{n0} - f)$ と無次元化した。 ζ_{n0} は ζ_n の最大値である。また t による積分範囲は $\zeta_n(t) - f - h_r \geq 0$ の範囲とした。甲板上に流入した水は運動の 1 サイクルの間に完全に流出せず、次のサイクルの流入が始まる直前に少し残留している。この残留水の平均厚 h_r は流入変動分に対しては有効乾舷が増加したと同じ効果をもつものと考えた。なお水量の実験

Fig. 5 (a) Amount of Shipping Water

Fig. 5 (b) Amount of Shipping Water

Fig. 5 (c) Amount of Shipping Water

値は水位計による水面形状をプランメータで積分して求めた。

Fig. 5 でみると計算と実験は概略合っているようである。 $\zeta_n(t)$ はストリップ法で計算できるから流入水量 $Q(t)$ も計算できることになる。

3.3 甲板水圧

各時点における甲板水圧の分布を、流入水の水位分布と併せ示したものが Fig. 6 (a), (b), (c) である。船体

Fig. 6 (a) Shipping Water Pressure on Deck and Profiles of Shipping Water (Test Results)

Fig. 6 (b) Shipping Water Pressure on Deck and Profiles of Shipping Water (Test Results)

の運動加速度 (0.2g 程度) があるため、甲板水圧は流入水の水位に相当する水頭よりも大きくなると予想していたが、結果は同図からわかるように、両者の間に判然とした差異は認められず、水圧の分布は流入水の水位とだいたい対応している。ただし、流入水の先端がハッチコーミングに衝突する瞬間の水圧と水位の対応は明らかではない。

以上のことから、流入水量が最大の時、甲板に働く全荷重も最大で、しかもその時、流入水の水面はおおむね平坦であるから一様分布荷重としてさしつかえない。最大荷重の生じる時刻は流入水量の項で述べたように ζ_n が乾舷を越えている期間の終りに近く、船側相対水位最大の時刻からかなりの時間おくれがある。このことが横強度上どのような影響があるか興味あるところである。

Fig. 7 (a), (b) は時点 ①～⑧の間の甲板水圧と流入水水位の最大値の分布を示したものである。ハッチがあ

る場合はハッチコーミングの位置で、ハッチのない場合は甲板中心で大きく、しかもその大きさは $\zeta_n - f$ の最大値と同程度である。そして甲板幅の中間で小さく、甲板縁で再びやや大きくなる。

3.4 ハッチの影響

ハッチの影響についてはまだはっきりとした結論を得ていないが、一応、実験結果から見出された事項を列記する。

- 1) 流入水の甲板上滞留時間が短くなる。
 - 2) 残留水が少なくなる。
 - 3) 流入水量はやや多くなる傾向があるようである。
 - 4) 甲板上の水位、水圧の分布はやや大きくなる。
- 3) についての理由はよくわからないが、Fig. 2 の ζ_s をみるとハッチのある場合がやや大きめに出ている。運動1サイクルの間の船側の水の運動がハッチの存在によって少し変わるようである。

Fig. 6 (c) Shipping Water Pressure on Deck and Profiles of Shipping Water (Test Results)

4 結 言

以上、二次元模型の強制上下揺実験によって、船側相対水位、甲板上への流入水、甲板水圧等の相互関係の時間的経緯を調べるとともに、流入水量の計算法を提案した。またハッチの影響についても、いくつかの知見を得ることができた。得られた結論は次のようなものである。

- (1) 甲板上への流入水量の近似計算は模型実験結果を大略説明することができる。
- (2) 本実験結果によれば、甲板上の水圧分布は甲板上への流入水の水圧分布とほぼ一致する。

Fig. 7 (a) Maximum Pressure and Maximum Water Level on Deck (Test Results)

Fig. 7 (b) Maximum Pressure and Maximum Water Level on Deck (Test Results)

謝 辞

本研究を行なうに当っては東京大学工学部船舶工学科山本善之教授より懇切なご指導を賜わった。また東京大学工学部船舶工学科中野孝昭氏には参考資料をご提供いただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 田崎 亮：向い波中における甲板上への海水の打ち込みについて，日本造船協会論文集，第107号，(1960)
- 2) 福田淳一：波浪中の船の Deck Wetness に関する長期予測，日本造船学会論文集，第124号，(1968)
- 3) 田才福造 他：肥大船の耐航性能に関する研究，西部造船会会報，第37号 (1969)
- 4) 川上益男：船体の青波衝撃強度について，日本造船学会論文集，第125号 (1969)
- 5) 福田淳一 他：Deck Wetness の長期予測に基づく乾舷の検討，日本造船学会論文集，第128号 (1970)
- 6) 田才福造 他：一軸コンテナ船の縦波中の耐航性能に関する研究，西部造船会会報，第41号 (1971)
- 7) 雁野昌明：斜波中を航行する船への海水打ち込みに関する一計算，関西造船協会誌，第145号 (1972)
- 8) 高石敬史 他：斜め波中における船側相対水位変動について，日本造船学会論文集，第132号 (1972)
- 9) 高梨伊三夫：船舶への海水流入に関する研究，学位論文，東京大学工学部 (1975)
- 10) V. L. ストリータ，E. B. ワイリー著，竹中利夫監訳：流体過渡現象，日本工業新聞社 (1973)
- 11) 渡辺健次：重力不安定による液体の拡散——水面上への油の流出の研究，船舶技術研究所報告，第5巻，第6号 (1968)