(昭和 48 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

波浪衝撃水圧発生装置の試作開発に関する研究

正員 安 藤 文 隆* 正員 阪 田 正 信****
 正員 新 田 顕** 塩 沢 晃***
 中 島 賢 一 郎*** 正員 竹 本 博 安*

Development of Impulsive Wave-Load Simulating System

by Noritaka Ando, *Member* Masanobu Sakata, *Member*
 Akira Nitta, *Member* Akira Shiozawa
 Ken-ichiro Nakajima Hiroyasu Takemoto, *Member*

Summary

In this paper, the authors have investigated into the development of a new system of generating and controlling impulsive water pressure, that can be used for simulated model tests on the strength of structural components of ships subjected to impulsive wave-load.

This hydraulic loading system is of a new design based on a unique principle and with simple devices. It is composed of two hydraulic chambers A and B, both of which are filled by water with nitrogen gas in A-chamber only and are separated by a test specimen such as a stiffened plate model of side shell plating of ships. Since the water pressure in both chambers is, in the initial stage, kept at the same level as of the prescribed peak value of the impulsive wave-load, the test specimen is balanced as being free of load.

Subsequently, the water in B-chamber is forced to be quickly discharged through a rupture disc located at an end of the chamber, the pressure being dropped down to atmospheric pressure in some milli-seconds, while the pressure in A-chamber remains almost at the initial value by the effect of the accumulator; thus causing an impulsive water pressure "gifle" acting on the test specimen.

Then another rupture disc attached to A-chamber is broken by means of a shot-gun, and the water pressure is decreased to a certain level, corresponding to "bourrage" as usually observed in the patterns of impulsive wave-load.

Performance test is first made on a small scale preliminary testing device, and then a pilot testing apparatus for 1 meter $\times$ 1 meter plate specimens is manufactured and examined on the characteristics of the water pressure vs. time relations of the system, which primarily depend on the size of the chambers, diameter of the rupture discs and the rigidity of the test specimens, etc.

Theoretical study is also made on the mechanism of generating the impulsive water pressure in this system by analyzing the motion of water, the chambers and the test specimen, by taking into account of compressibility and damping of water as well as elastic and plastic deformations of the specimens. The results of the analysis have indicated a similar tendency in the pressure

* 運輸省船舶技術研究所
 ** 日本海事協会技術研究所
 *** 三井造船(株)千葉研究所
 **** 三井造船(株)原子力事業室

vs. time characteristics of the system to those obtained by the experimental results on the pilot testing apparatus.

Thus, it is concluded that the impulsive wave-load simulating system of this type can be used for the structural model tests under load condition of a controlled pressure pattern similar to those experienced on actual ships.

1 は し が き

航行中の船体に作用する波浪衝撃荷重の実態を把握し、これに応答する船殻構造部材の強度を確認することは、船舶の建造に際して最も基本的な問題であり、また安全かつ合理的なしかも経済性の高い船体構造設計を行なうために解決しておかなければならない重要課題の一つと考えられる。しかしながら、いうまでもなく、航海中の船体が遭遇する波浪衝撃荷重は、突発的かつ不規則に作用するものと考えられ、しかもその作用時間が極めて急激であるため記録がかなり困難となり、系統的な計測による資料もほとんど報告されていない。一方、船体構造部材の波浪衝撃応答に関しては、実船における各種の損傷と関連して、個々の問題として調査が行なわれているにすぎず、構造物の動的挙動を普遍的に解明した研究はまだ完成されていない現状である。

日本造船研究協会第133研究部会においては、現在、上述の問題を含む船体構造強度に関する総合的な研究を実施しており¹⁾、その一環として、波浪衝撃水圧発生装置の開発研究に着手している。すなわち、船側外板構造などが波浪衝撃荷重を受けた場合の破壊強度に関する模型実験を行なうために、実船の構造部材に作用する波浪衝撃荷重と類似な水圧特性を有する荷重を発生しうる装置の製作を開始した。本論文においては、その試作装置についての作働原理と、性能上の問題点について種々行なった検討の結果を報告する。

2 波浪衝撃水圧の特性ならびに従来の衝撃試験法

2.1 波浪衝撃水圧の実測例

航海中の船体構造部材に作用する衝撃的な荷重としては、通常、船首船底の衝撃、甲板への波浪の打込み、載貨物の船体運動による衝撃力、および船側外板構造に加わる波浪衝撃水圧などに分類される。これらのうち、前者の二つについては、比較的多くの研究が従来から行なわれており、実船に関する計測例も発表されている²⁾。

一方、船側外板構造などに作用する波浪衝撃水圧に関しては、これと類似な問題ともみなされる防波堤についての研究例³⁾あるいは模型船による水槽試験⁴⁾などが発表されているが、実船構造については、計測記録がかなり困難であり系統的な実測資料に乏しい。したがって、その作用位置、発生頻度、水圧パターン、海象および船

(a) 実船計測例 (b) シミュレーション波形

Fig. 1 波浪衝撃水圧の時間特性

空気、受圧部構造部材の剛性などにより影響をうけるであろうことが容易に想像されるので、これを画一的に定めることは妥当でない。むしろ、それらの実態についての詳細な資料が得られるまでは、水圧-時間特性の形状のみを Fig.1 (b) のように仮定する。(2.2 参照)

2.2 衝撃試験法

従来から行なわれている構造模型についての衝撃水圧実験の方法としては、船首船底衝撃の場合は試験体を水面に落下させ⁶⁾、青波の甲板への打込現象についての実験に際しては水塊を落下させ⁷⁾、また艦艇については水

体運動との関連など、波浪衝撃水圧の実態を十分把握することはむずかしく、さらにその発生機構を理論的に解明することも現在のところやや困難である。近年実施された実船試験の少数ない計測結果⁵⁾から得られた圧力-時間特性 (Fig.1(a)) を参考として、これを波浪衝撃水圧の代表パターンとみなす。これらの水圧パターンは、波浪と船体との相対運動に左右されるほか、波浪中に吸入される

ここに, A_0 および A_L は, それぞれ試験体の受圧部面積および破裂板 B の有効破孔面積を表わし, また L_A, L_B は A 室および B 室の有効長さとし, $L(=L_A+L_B)$ は系のみかけの全長とする。

流体の連続性と, 上記断面の変化を表わす(2)式により, 流体の体積歪 e は, その初期歪を e_0 として, 次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{\partial Y}{\partial x} + e_0 & (\text{A室}) \\ e &= \frac{\partial Y}{\partial x} - \alpha \frac{Y}{L_B} + e_0 & (\text{B室}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

さらに, 流体を弾性体 (体積弾性率 E_W) とみなして圧力と歪の関係を次式で表わす。

$$P = E_W e \quad (4)$$

なお, 計算上, P の値が -1.0 kg/cm^2 以下 (真空状態) になる場合については本解析を適用することは無意味であるので, 異常圧状態とみなす。

つぎに, 試験体については, その圧力差 $\bar{P}$ と撓み変位 $\bar{Y}$ との関係を, Fig. 3 に示すような弾塑性変形 $\bar{P} = f(\bar{Y})$ で仮定する (弾性状態および Unloading 時の比例係数を k , 塑性変形開始後 ($P \geq P_Y$) の Loading 時のそれを k' とする)。試験体の質量を m (密度 ρ_s), 厚さを S とすれば, その運動方程式は次式で与えられる。

$$m \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\bar{Y} + Y_0) = - \frac{\partial P}{\partial x} S - f(\bar{Y}) \quad (5)$$

ただし, $\bar{Y} = Y \quad (x=L_A) \quad (6)$

Fig. 3 試験体の圧力-撓み変形の関係

さらに, 装置全体については, その質量を M , 支持部のバネ常数を K , 装置の減衰係数を R とし, 匡体内壁に作用する流体圧力の x 軸方向成分の合計と試験体からの反力との和を F とすれば, 運動方程式として次式が成立する。

$$M \frac{d^2 Y_0}{dt^2} + R \frac{dY_0}{dt} + KY_0 = F \quad (7)$$

以上の関係から, (7) 式および (4) 式を (1), (5) 両式に代入して, それらを差分方程式に書きあらためる。さらに (7) 式から得られる強制振動の解 Y_0 を用い, 逐次繰返し近似法によって数値的にこれを解くことができる。

この場合, 境界条件として, A 室の N_2 ガスと接する端部 ($x=0$) で圧力が常に初期設定圧 P_0 に等しく ($P=P_0$), また破裂板 B の位置 ($x=L$) で大気圧に等しい ($P=0$) とする。さらに, 初期条件として, $t=0$ で $Y = \frac{\partial Y}{\partial t} = 0$ ($0 \leq x \leq L$), および $Y_0 = \frac{dY_0}{dt} = 0$ とする。

なお, 数値計算を行なうに際して, 次のような無次元変数を用いる。

$$\xi \equiv X/L, \quad \eta \equiv Y/L, \quad \phi \equiv P/P_0, \quad \tau \equiv t/t_0$$

ただし, $t_0 = \sqrt{\rho/P_0} L \quad (8)$

3.2.2 計算結果

前項で述べた解析法にもとづき, 差分法による数値計算を行なって, 本装置における衝撃圧発生に至るまでの機構を近似的に追跡することとした。

今回実施した数値計算においては, (i) 試験体の剛性および質量 (k, k', m), (ii) 破裂板 B の開孔面積と試験体の受圧面積との比 (A_L/A_0), (iii) B 室の長さとの比 (L_B/L), (iv) 抵抗係数 (β), (v) 試験体の塑性化の開始 (P_Y) が衝撃立ち上がり時間などの衝撃圧特性に及ぼす影響について調査するため, それらのパラメータの値を二, 三変化させて計算を行なった。

なお, 差分繰返し計算においては, x 座標のきざみ $\Delta \xi = 10^{-2}$, 時間きざみ $\Delta \tau = 10^{-4}$ とした。

計算結果の一例として, A, B 両室内における圧力分布の時間経緯を Fig. 4 に示す。

すなわち, 同図において, 破裂板 B ($\xi=1.0$) が破壊し, $P=0$ となった後, 圧力波の伝播により次第に B 室内の圧力は下がり, 試験体位置 ($\xi=0.6$) において, B 室側の圧力は次第に低下する。一方, A 室側では, 試験体位置と N_2 ガス蓄圧室 ($\xi=0$) との間を圧力波は伝播往復し, したがって試験体には差圧として A 室側からの衝撃的な圧力が作用することが示されている。

つぎに, 試験体に作用する圧力 (A 室側圧力 P_A と B 室側圧力 P_B との差圧) の時間的推移を示した一例を

Fig. 4 装置内圧力分布の時間的変化
(理論解析)

Fig. 5 (b) の破線で示す。同図から明らかなように、破裂板Bの破壊後、試験体に作用する圧力は、途中、数個の山が現われるが、全体的にはほぼ直線的に初期設定圧 P_0 とほぼ等しい圧力まで衝撃的に上昇する。

今回実施したシリーズ計算の結果によれば、衝撃圧発生の上立ち上がり時間 t_0 に及ぼす上記のパラメータの影響について、次のような事柄が明らかになった。

- (i) 衝撃圧発生現象の時間を表わすパラメータ t_0 についての(8)式の関係から、本装置による衝撃立ち上がり時間は、他のすべてのパラメータが一定の場合、装置のみかけの全長 L に比例し、また設定圧力 P_0 の平方根に逆比例する。
- (ii) 試験体の剛性が大になるほど衝撃立ち上がり時間は顕著に早くなり、また試験体の塑性変形を開始する圧力 P_Y が低いほど、立ち上がり時間はおくれる(後述 6.2.1 項の Fig.10(a) 参照)。
- (iii) 破裂板Bの有効断面積が大きいくほど、衝撃立ち上がり時間は早い(6.2.2 項の Fig.10(b) 参照)。
- (iv) 流体の流れに対する抵抗 (β の値) が大きくなるほど、立ち上がり時間はおくれるが、その減衰作用により、最高圧力 P_g の値が初期設定圧 P_0 に近づく。

4 小型の予備試験装置による検討

4.1 予備試験装置

本装置の作動原理の確認と、基礎的な問題点に対する検討を行なうため、試作装置の製作に先き立って、小型の予備試験装置による試験を実施した。

予備試験装置は、A室とB室の二つの水圧匡体からなり、両室の間のB匡体側に試験体(受圧面は 250 mm×250 mm)がボルトにより取り付けられている。試験体寸法、設定圧力、破裂板(または強化ガラス)の破壊方法、ならびに後続圧テストとその発生方法などの試験条件については、一括して Table 1 に示す。

4.2 試験結果

予備試験においては、i) 試験体の剛性、ii) 破裂板の種類とその破壊方法、iii) 後続圧の発生方法などについて検討を行ない、衝撃水圧の時間特性に及ぼす上記の諸因子の影響を調査した。

試験結果の一例として、A-2-2(平板)およびB-1-3(防焼板)についての水圧-時間特性を Fig. 6 に示す。同図の上段の記録は、衝撃圧発生から後続圧の終了までの経過を示したもので、下段は衝撃圧立ち上がり時につい

(a) A, B 両室側圧力 (P_A , P_B)

(b) 差圧 ($P_A - P_B$)

Fig. 5 試験体に作用する衝撃圧力(実験および理論解析結果)

Table 1 小型予備試験項目一覧表

試験番号	試験体	設定最高圧 (kg/cm ²)	B室側破裂板または 強化ガラス	破 壊 方 法	後続圧発生の有無と 発生方法
A-1-1	(A-1 平板 320×320×9)	14	DV	自然破壊*	な し
A-1-2		8.5	RG (1)	打撃破壊**	な し
A-1-3		10	RG (1)	"	電 磁 弁
A-1-4		13	RG (2)	"	"
A-1-5		14	RG (2)	"	な し
A-1-6		15	RG (2)	"	電 磁 弁
A-2-1	(A-2 平板 2)	15	RG (2)	"	"
A-2-2		15	BV	"	強化ガラス*
B-1-1	(B-1防撓板 320×320×2 10×30×2/2 T)	15	RG (2)	"	電 磁 弁
B-1-2		14	DV	自然破壊*	強化ガラス*
B-1-3		15	BV	打撃破壊**	"
B-2-1	(B-2防撓板 320×320×9 20×40×6/6 T)	14	DV	自然破壊*	な し
B-2-2		14	DV	"	な し
B-2-3		14	DV	"	な し
記号説明			DV=8''DV 型破裂板 BV=8''BV 型破裂板 RG=強化ガラス 260φ 板厚 15	* A室 N ₂ ガス圧漸増 による自然破壊 ** ハンマーによる打撃 破壊	* 連結パイプ強化ガラ ス方式

て時間軸を拡大して再生したものである。

予備試験の結果から、次の二点が確認された。

(i) 衝撃立ち上がり時間 t_0 に対しては、前述の理論解析による検討結果でも明らかであったように、試験体の剛性による影響が最も著しい。BV 型破裂板の打撃破壊による場合は、平板試験体につき 5 msec 程度であるのに対し、防撓板試験体の時は約 2 msec であった。

(a) 平板試験体 (A-2-2)

(b) 防撓板試験体 (B-1-3)

Fig. 6 小型予備試験装置の試験結果

(ii) 市販の電磁弁による後続圧の発生方法は、最高圧 P_0 の低下開始までに要する時間が 0.3 sec 程度で、本装置に使用することは不適当と考えられる。一方、連結パイプ内の強化ガラスの自然破壊による方法によれば、10 msec 程度で衝撃後の圧力低下が開始し、70 mm ϕ のパイプからの N_2 ガスの放出により、後続圧の経続時間 t_b は 100 msec 程度であった。

5 試作装置の構成と要目

前項で説明した原理による衝撃水圧発生の実現が可能であることを、小型の予備試験装置で確認した。大型の試験体についても衝撃水圧を作用させることを実証するために、試験装置（以後試作装置と呼ぶ）を製作し、各種の性能確認を行なった。なお、試験体としては 1,000 mm $\times$ 1,000 mm の受圧面積をもつ平板を用いた。試作装置の構成ならびに計測記録装置は次の通りである。

5.1 試作装置の本体および附属装置

試作装置は、次の要素から構成されている。

(i) 水圧荷重装置

水圧匡体（試験体前面側A室および N_2 ガス蓄圧室、背面側B室、Fig. 7 参照）、破裂板および同保持装置、

Fig. 7 試作装置の概要

①抵抗線歪計圧力計 ②ストレインゲージ
③半導体圧力計 ④動歪計 ⑤直流増幅器
⑥加減算増幅器 ⑦データ・レコーダ
⑧オシログラフ ⑨周波数発振器

Fig. 8 計測機器の構成

給排水タンク、 N_2 ガス供給装置、水供給装置、繰返し変動水圧発生装置、基礎および装置組立治具。

(ii) 制御装置

初期圧設定装置、供給水量制御装置、破裂板破壊制御装置、繰返し変動水圧発生制御装置、監視板

水圧匡体 (Photo 1) は、最高使用圧力 10 kg/cm 2 であり、第 2 種圧力容器の規準を満足している。とくに、容器の変形量を小さくおさえ、さらに衝撃的荷重にも十分耐えるため、各部の設計応力は、同規準よりも小さく、1 kg/mm 2 程度以下にとっている。

5.2 計測記録装置

計測記録装置は、次の要素から構成されている (Fig. 8 参照)。

(i) 水圧検出部

ブルドン管型圧力計、半導体型圧力変換器、ストレインゲージ型圧力計、増幅器、差圧演算器

(ii) 試験体歪検出部

ストレインゲージ

Photo 1 波浪衝撃水圧発生試作装置の全景

(iii) 試験体変位検出部

電気容量型高速度水中変位計

(iv) 記録および再生部

データ・レコーダ、シンクロ・スコープ、ビジ・グラフ、低周波発信器

5.3 破裂板とその破壊方法

破裂板の機能は、衝撃立ち上がり時間 t_0 を所定の値に制御するうえに重要な役割を演じ、試験体の変形量ならびに水および匡体の弾性変形量に見合う水量を、短時間に放出しえなければならない。そのために、まず破裂板の種類ならびに破壊方法を確立する必要がある。

破裂板の種類および破壊方法としては、前述の予備試験装置による試験で試みたように、金属薄板型破裂板（ラプチャー・ディスク）あるいは強化ガラスの打撃破壊が考えられるが、今回の実験においては、主として後者による方法を採用した。すなわち、強化ガラスが焼き入れによる高い内部応力の下で衝撃的な打撃を与えられると、瞬間的に全面にひび割れが進行し、容易に全面破壊に至ることが予備的な試験によって確認された。とくに、自然破壊圧力に近い水圧が作用している時は、わずかな衝撃によっても容易に全面破壊をさせることができ、また強化ガラスの破壊応力は約 $11 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$ であり、ロットごとのばらつきはあるが、実用上さしつかえない程度の範囲であった。

- ①電磁石 ②破裂板破壊装置支持棒
③衝突子 ④衝突子案内筒
⑤衝突板(強化ガラス) ⑥破裂板支持リング

Fig. 9 破裂板の破壊装置

強化ガラスは、厚み 15 mm、口径 610 mmφ を使用し、A, B 両室の端面のフランジに周辺固定し、さらに中央部をリング状金物で支持した。強化ガラスの破壊は、Fig.9 に示す装置を使用し、ガラス中央に機械的打撃を加える方法を採用した。この破壊装置は、不銹鋼製の案内筒をわずかな隙間をもって滑る衝突子ならびにこれを吸引しておく電磁石とからなっている。衝突子は、電磁石の電流を切ることにより、筒内に供給されている高圧の N_2 ガスによって急速に打ち出される。

5.4 試験方法

水圧匡体に、試験体、破裂板および計測装置を取り付けた後、給水ポンプにより A, B 両室に規定量の水を充填する。 N_2 ガス蓄圧室には、試験体の変形および後続圧の発生時期を考慮して、適量の水を入れて浮き子を浮かせておく。ついで、 N_2 ガス蓄圧室に N_2 ガスを送入し、A, B 両室を同時に昇圧する。両室が規定圧力 (10 kg/cm^2) に達すると、A, B 両室をつなぐ給水管の途中に設けてある弁を閉じて両室を分離し、初期圧を設定する。給水ならびに N_2 ガスの封入による初期圧の設定は、制御器ならびに監視板による遠隔操作で行なわれる。

実験開始とともに、監視板上のスイッチにより、B 室側強化ガラス破壊装置の電磁石電流を切る。衝突子が破裂板を破壊すると、B 室内の水が放出され、B 室の圧力が急激に低下する。A 室の N_2 ガスは、緩衝体の役目を果たし、A 室がほとんど初期設定圧に保たれるので、試験体に衝撃的な差圧が作用する。つづいて、後続圧を発生させるために、A 室側の強化ガラスが破壊される。この際、A 室の圧力を急激に降下させるには、 N_2 ガスの膨脹を抑制する必要があるため、 N_2 ガス蓄圧室の浮き子は、格子によって止められる (Fig.7 参照)。

6 試作装置の性能試験とその結果

6.1 試験項目

装置の操作、安全性および試験結果の再現性についての確認が行なわれた後、衝撃圧発生特性に影響する各種因子ならびに試作装置の性能把握を目的として、次の項目について試験が実施された。

(i) 衝撃立ち上がり時間 t_0 に及ぼす試験体の剛性、破裂板の大きさ、B 室の長さ (水量)、ならびに A 室内に水または空気を入れた場合の差異などの影響。

(ii) 後続圧発生と波形制御法

(iii) 低周期での繰返し変動水圧試験

6.2 性能試験結果ならびに考察

Table 2 試作装置の試験条件および試験結果

試験項目	試験番号	試験体板厚 (mm)	B室長さ (mm)	B室破裂板絞り口径		異常圧		
				(mm)	(msec)	発生時期 (msec)	周期 (msec)	発生圧力 (kg/cm ²)
試験体剛性の影響	B-1	9	730	610	17.0	58.9	22.6	2.5
	C-1	4.5	730	610	25.5	13.1	14.2	小
	C-2	20	730	610	9.0	23.0	15.0	小
	C-3	14	730	610	10.5	45.0	13.3	小
	C-4	38	730	610	4.8	13.0	—	圧力計破壊
	C-5	38	730	610	5.0	17.0	—	圧力計破壊
	C-6	9	730	610	20.5	66.9	23.7	小
B室破裂板絞り径の影響	E-1	9	730	458	20.3	59.2	12.6	4.4
	E-2	9	730	310	21.5	41.6	—	3.5
	E-3	9	730	205	36.0	発生せず		
	E-4	9	730	205	36.5	発生せず		
	E-5	9	730	458	16.0	63.7	20.6	5.8
B室長さの影響	G-1	9	1230	610	22.1	115.4	26.4	8.3
	G-2	9	2230	610	26.3	164.4	31.6	—
	G-3	9	3230	610	32.3	243.5	58.0	11.0
	G-4	9	1730	610	25.0	158.0	28.7	10.0
	G-5	9	2730	610	29.8	213.0	40.1	10.0
	G-6	9	3230	610	33.8	250.0	63	—
A室空気の影響	J-1	9	730	610	40.2	発生せず		
	J-2	38	730	610	22.6	発生せず		

試作装置において実験した性能試験の諸項目および試験結果を、一括して Table 2 および 3 に示す。

衝撃圧発生経過を表わす水圧-時間特性の一例として、実験 C-3 の結果を前掲の Fig.5(a) および (b) に実線で示した。A, B 両室の圧力は、試験体表面において検出した値であり、両室の差圧は、水圧計の壁面において検出した値である。なお、試験体表面と水圧計の壁面の検出圧力には、大きな差は認められなかった。

Fig.5(a) および (b) 中の破線は、理論計算結果である。実験結果に比べ、A, B 両室の圧力の変動は大きい。試験体に作用する差圧の波形は両者ともに、かなりよく一致しており、理論解析は現象の概要をよく表わしていると言える。ただし、解析に

Table 3 後続圧試験条件および結果

試験番号	試験体板厚 (mm)	B室長さ (mm)	破裂板絞り口径		衝撃圧立ち上がり時間 (msec)	後続圧 降下時間 (msec)	最高圧 持続時間 (msec)	異常圧		
			A室 (mm)	B室 (mm)				発生時間 (msec)	周期 (msec)	発生圧力 (kg/cm ²)
H-1	9	730	310	610	22.5	42.5	0	79	—	6
H-2	38	730	310	610	5.1	11.5	25.8	45	—	5.6
H-3	38	730	310	610	4.5	8.7	0	18.8	—	5.5

において用いたパラメータの値は、図中に示したものであるが、系のみかけの全長 L あるいは流体の抵抗係数 β の値の取り方などについては、まだ検討の余地が残されている。

以下、結果をまとめるに際して、衝撃圧立ち上がり時間は、差圧が初期設定圧に達するまでの時間と定義する。

6.2.1 試験体剛性の影響

衝撃圧立ち上がり時間 t_0 に及ぼす試験体剛性の影響を定量的に把握するため、Table 2 に示すように、試験体の厚さを 4.5 mm のものから 38 mm の厚板まで 5 種類変化させて実験を行なった。

試験体の板厚が、4.5 mm あるいは 9 mm のように剛性の低いものでは、衝撃圧によって大きい塑性変形を生じ、その衝撃圧立ち上がり時間は、それぞれ 27 および 18 msec であった。一方、実験終了後において、ほとんど永久変形のみられない 20 mm ならびに 38 mm の厚板試験体の場合は、衝撃圧立ち上がり時間が極端に短くなり、それぞれ 9 および 5 msec になっている。このように、衝撃圧立ち上がり時間は、試験体の剛性の増大とともに短縮されるが、ある限度に飽和していく傾向にあり、試作装置では、より大きい剛性をもつ場合においても、ほぼ 3~4 msec 程度であろうと想像される。

理論計算による比較検討を行なった結果を Fig.10(a) に示す。同図の破線および鎖線は、それぞれ、抵抗係

(a) 試験体剛性

(b) 破裂板口径

(c) B室の長さ

Fig. 10 衝撃立ち上がり時間, t_g に及ぼす諸因子の影響

小さい範囲では衝撃立ち上がり時間は流路の断面積にほぼ反比例して短縮しているが、310 mm ϕ 程度以上に口径を増大させても衝撃立ち上がり時間は飽和してゆき、口径の増加による影響が顕著でなくなる。すなわち、口径が 600 mm ϕ から 350 mm ϕ および 200 mm ϕ へと絞られた場合、衝撃立ち上がり時間は、それぞれ約 1.2 および 2 倍となる。一方、前述の理論計算の結果でも、同様の傾向が認められ、上記の場合、衝撃立ち上がり時間は 1.5 倍および 3.5 倍になり、実験結果に比べて増加割合はやや大きいが破裂板口径の影響を明瞭に示している。

6.2.3 B室の長さ（水量）の影響

試作装置におけるB室の容積と寸法は、対象とする試験体の大きさにより支配され、用途の面からはなるべく大きいものが要求される。一方、理論解析結果によれば、衝撃立ち上がり時間の短縮の面から、系のみかけの全長をできる限り小さくする必要のあることは明らかである。そこで、この問題を解決するため、試作装置のB室端にノズル（500, 1,000, 1,500, 2,000 および 2,500 mm の長さ）を取り付けて、B室水量および長さが衝撃立ち上がり時間に及ぼす影響を調査した。

衝撃立ち上がり時間は試作装置本体の場合、約 19 msec である。一方、B室を延長するに従い、それぞれ約 22, 24, 26, 29 および 33 msec と増加している。この関係は、横軸に無次元長さ L_B/L ($L=2,100$ mm) をと

数 $\beta=0$ および $\beta=0.3$ の二例につき、試験体の剛性 kL/P_0 の値と衝撃立ち上がり時間 t_g との関係を示している（パラメータの値は同図中に示す）。両例とも、剛性が大きくなるにつれて衝撃立ち上がり時間が顕著に短くなっている。また、抵抗係数の増大が、衝撃立ち上がり時間を長くし、とくにこの影響は、剛性の小さい程顕著である。

理論解析結果の傾向は、全体的には実験結果とよく一致している。ただし、試験体の剛性を表わす係数 k の値は、周辺固定の正方形平板の撓み変形から算定（体積変化量を等値とする）したものを用い、また塑性域における係数 k' については、板厚 9 mm の試験体の高速変位計による撓みの実測値から逆算し、 $k'=1/5 k$ と定めた。なお、流体の抵抗係数 β の値については、適切な資料が得られないので、試行的にその値を変化させて水圧-時間特性の解析を行ない、その結果と実験結果を比較して、便宜的に $\beta=0$ および 0.3 の場合を図中に示した。

6.2.2 破裂板の大きさの影響

破裂板Bの口径が大きいほど、衝撃立ち上がり時間の短縮が予想されるので、その口径を、610, 458, 310 および 205 mm ϕ と変化させて、その影響を定量的に調査した。ただし、610 mm ϕ 以外の場合は、上記寸法の絞りリングを強化ガラスの前面（試験体側）に取り付けて実験を行った。

実験結果を Fig. 10 (b) に示す。口径の

り, Fig.10(c) に示されている。

理論計算においても衝撃立ち上がり時間はB室長さの増大とともに大きくなっていく傾向を示している (L_B/L が 0.35 における値と, 0.7 における値とを比較すると, 実験結果では約 1.8 倍, 理論計算で約 2.6 倍となり, 後者がやや大きくなっているが, 傾向は類似である)。

6.2.4 A室内に水または空気を入れた場合の差異

A室に水または空気を入れた場合の衝撃立ち上がり時間の差異を, 板厚 9 mm および 38 mm の試験体について調べた。

衝撃立ち上がり時間は, いずれの試験体に対しても, A室に空気を入れた場合が著しく大きくなっている。さらに, 両者の水圧波形にもかなりの差が観察される。すなわち, A室に水を入れた場合, Fig. 5 (b) のように高周波成分を含みながらも, 差圧は急激に上昇するのに反し, 空気を入れた場合には, Fig. 11 に示すように, 大きな振動が差圧波形上に見られる。

A室に水を入れた場合には, 試験体A室側表面の圧力が衝撃立ち上がりの初期において降下し, 変動する現象がみられる。このA室圧の変動が差圧波形に階段状の平行部を生じ, 衝撃立ち上がり時間を長くし, また波形が鋭くならない原因の一つとなっている。

一方, 空気を入れた場合には, A室圧に変動がまったくなく, 一定圧が保持されている。したがって, 波形に階段状部分が観察されない。

6.2.5 後続圧発生とその波形の制御

波浪衝撃水圧特性の第2の問題点, すなわち, 衝撃最高圧に達した後, 急激に圧力が低下して Bourrage に相当する後続圧が発生する場合, その圧力波形および継続時間などの制御方法が課題となる。この場合, まず, 所定の後続圧波形を得るために, A室破裂板の破壊時期を確実に制御しうする方法を確立する必要がある。試作装置では, その破壊時期を次の方法により決定した。

剛性が大きく, 短い衝撃立ち上がり時間をもつ試験体については, A, B 両室の破裂板破壊用の衝突子を固定している電磁石の回路を同時に切断する。A室水圧の降下開始, すなわち後続圧発生開始時期は, N_2 ガス蓄圧室の浮き子移動距離の調節によって制御する。一方, 立ち上がり時間が長い場合には, この方法では N_2 ガス蓄圧室の浮き子移動距離を長くしなければならず, 構造的に難点が多い。そこで, A室破裂板破壊用の電磁石回路の一部にアルミ箔を用い, それをB室破裂板の衝突子により切断して, A室の衝突子発射時期を遅延させる方法を併用した。この場合, 電磁石切断からアルミ箔および破裂板までの衝突子飛翔の時間, 強化ガラスの破壊時間(ヒビ割れの進行時間), N_2 ガス蓄圧室浮き子の移動時間, A, B両室の圧力降下時間などが前もって, 実験的に

Fig. 12 後続圧発生の実験例

Fig. 11 試験体に作用する衝撃圧力 (A室内に空気を入れた場合)

調査されていると, これらの所要時間から N_2 ガス蓄圧室の浮き子の位置およびアルミ箔の位置を調節することにより, 後続圧波形の制御が可能になる。試作装置においては, 衝撃立ち上がり時間に及ぼす諸因子の影響ならびに衝突子の飛翔時間を含めた破壊装置の構造に基づく時間遅れが十分把握されている。

後続圧に関する実験の一例として, 厚さ 9 mm の平板試験体について, 最高圧持続時間がほぼ 0 になるよう制御した実験結果を Fig. 12 に示す。同図に見られるように, 振動波を含む波形ではあるが, ほぼ満足な制御のことが確認された。

なお, 後続圧の降下時間の制御は, A室の破裂板口径あるいは絞りの口径を変えることにより可能である。

また、新規に装置を製作する場合、あるいは剛性の明確でない試験体に対しては、あらかじめ各因子の特性関係を把握しておく必要がある。

6.2.6 試験体に作用する異常圧力

試作装置による実験において、衝撃圧発生後、Table 2 および 3 に示されているように、試験体の表面に異常に高い圧力の作用していることが記録されている (Fig.12 参照)。この異常圧の絶対値、発生時期ならびに周期については、装置の構造および試験体の剛性などと一定の関係が認められる。すなわち、異常圧の絶対値は、剛性の大きいほど、また B 室長さの長いほど大きくなる傾向にある。また、破裂板口径については、絞り込まれるにつれて小さくなっている。なお、使用した圧力計は、測定範囲 10 kg/cm^2 および破壊圧力 15 kg/cm^2 のものである。

異常圧の発生時期は、試験体の剛性の増加とともに短くなり、破裂板口径ならびに B 室の長さの大きくなるにつれて長くなる傾向がみられる。

発生周期については、試験体剛性および破裂板口径の影響は顕著ではないが、B 室の長さの増加とともに長くなる傾向は認められる。

このように、B 室の圧力が降下した後に、異常に高い圧力が試験体に作用する原因としては、水撃作用、B 室の水の慣性による試験体 B 室側表面上での負圧の発生 (極端な場合キャビテーション) などいろいろ考えられるが、現在のところその原因について十分に確かめられていない。いずれにしても、衝撃立ち上がり時間に影響する因子と密接な関係が認められることは興味深い。

この異常圧の発生時間は、衝撃立ち上がり時間に比べて短かく、また条件によっては、初期設定圧よりも大きい衝撃的圧力を発生する場合があるため、衝撃水圧実験の結果を解析する際には注意する必要がある。

6.2.7 繰返し変動水圧試験

航行中の船舶に作用する外力として、衝撃的な圧力のほかに、周期的な繰返し変動水圧があり、これに対する船体構造物の疲労強度実験をも容易に行なえる試験装置であることが望ましい。今回の試作装置においては、低周期ではあるが、平板あるいは防撓板試験体についての繰返し変動水圧を加える実験も行なうことのできる機能も具えている。

繰返し変動水圧は、A 室を一定の圧力に保ち、一方 B 室の圧力をそれに接続された小さなガス室に N_2 ガスを供給あるいは排出することによって発生させる。

繰返し変動水圧実験の一例として、A 室圧力を 5 kg/cm^2 に保ち、B 室圧力を 0 から 10 kg/cm^2 、すなわち試験体には $\pm 5 \text{ kg/cm}^2$ の変動水圧を作用させた。

9 mm および 20 mm 板厚の平板試験体につき、それぞれ 200 および 300 回の繰返しを加え、その周期は 19 sec (昇圧 12 sec, 降圧 7 sec)、および 10 sec (昇圧 9 sec, 降圧 1 sec) であった。

7 結 言

波浪衝撃を受ける船体構造の強度に関する模型実験用の荷重装置として、実際の船体に作用する衝撃水圧と類似な特性を有する水圧を発生し、制御しうる装置の試作開発に着手し、衝撃水圧発生に関する理論的考察ならびに試作装置による実験的研究を実施した。

本装置による衝撃水圧発生の方法は、従来の衝撃水圧実験装置と異なり、全く新しい作働原理と機構にもとづくもので、衝撃立ち上がり時間、最高圧力および後続圧波形などの水圧-時間特性を近似的に制御しうるよう考慮されている。

まず、装置の作働原理を確認するために、小型の予備試験装置により基礎的な実験を行なった。さらに、装置を構成する匡体、流体および試験体からなる系をモデル化して、衝撃水圧発生の過渡的現象についての理論解析を試みた。差分法による数値計算を行なって、圧力波の伝播状況と試験体に作用する圧力の時間的経緯を明らかにした。さらに、衝撃立ち上がり時間に及ぼす装置および試験体の諸因子の影響を調査した。

ついで、試作装置 (試験体受圧部 $1,000 \text{ mm} \times 1,000 \text{ mm}$) を製作し、衝撃立ち上がり時間の大きさ、および後続圧波形などの制御性能について系統的な実験を行なった。その結果、衝撃立ち上がり時間は、i) 使用する試験体の剛性の増加により著しく短縮されることが認められた (試作装置においては、板厚 38 mm の平板試験体の場合、5 msec 程度であった)。また、ii) 装置を構成する破裂板の有効断面積が大きいほど、あるいは、

iii) 匡体B室の長さが短いほど衝撃立ち上がり時間は短縮されることが判明した。以上の結果は、上記の理論解析結果とも傾向的には良好な一致を示している。さらに、A室側の破裂板を破壊させることにより、精度よく後続圧を発生させうることが確認された。なお、試作装置においては、最高圧力に到達した後に、試験体背面(B室)側にかなり大きい異常圧の作用することが認められた。

以上の結果から、本方式による波浪衝撃水圧発生装置の性能が確認され、さらにより大型の構造物模型についての衝撃水圧荷重装置を製作するうえでの問題点に関する基礎資料を得ることができた。したがって、今後、波浪衝撃の実態とその発生機構が解明され、船体構造部材に作用する衝撃水圧の時間特性が明らかにされれば、本方式による波浪衝撃水圧発生装置を利用して、それらの直接的なシミュレーションを行なうことができる。さらに、波浪衝撃水圧の最大値、分布および発生頻度などが判明すれば、構造物に対する有意な衝撃強度模型実験の実施が将来可能となろう。その際、本研究の成果の一部たりとも参考に供しうるところがあれば幸いである。

本研究の一部は、日本造船研究協会第133研究部会の研究項目の一つとして実施された。研究の遂行にあたり、部会長山本善之教授、寺沢一雄教授はじめ、委員各位からご指導ならびに有益なご討論を賜わった。ここに厚く感謝の意を表する。さらに、本研究は、運輸省船舶技術研究所、日本海事協会および三井造船株式会社の協同により実施された。研究の遂行に際して、絶えずご鞭達をいただいた三井造船千葉研究所長土屋九一氏、日本海事協会技師長秋田好雄氏、同研究所長渋谷享氏、同船体部研田吉郎氏、運輸省船舶局尾花皓氏、三井造船千葉研究所安東重美氏に厚く感謝するとともに、実験にご協力いただいた関係各位に心からの謝意を表明する次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第133研究部会：「船体構造強度に関する研究」，研究資料 No. 165，(昭和47年3月)。
- 2) 小杉隆祥，末長一志，宮本洋一：「穂高山丸によるスラミング実船計測」，造船協会論文集第105号，(昭和34年7月)。
- 3) 合田良実：構造物に働く波力，土木学会水理委員会水工学シリーズ，67-10，(1967)。
- 4) 日本造船研究協会第131研究部会：「波浪外力に関する水槽試験」，研究資料 No. 163，(昭和47年3月)。
- 5) 日本造船研究協会第124研究部会：「大型鉾石運搬船の船首部波浪荷重および鉾石圧に関する実船試験」，研究資料 No. 156，(昭和47年3月)，p. 83。
- 6) J. H. G. Verhagen：「The Impact of a Flat Plate on a Water Surface」，J. of Ship Research，Vol.11，No. 4，(December，1967)。
- 7) 渡辺恵弘：「波浪衝撃をうける甲板の圧力および過渡応力に関する基礎的実験」，西部造船会会報第16号，(昭和33年)。
- 8) C. M. Harris & C. E. Crede：「Shock and Vibration Handbook」，Vol.3，McGrawhill，(1961)．p. 46. 1.