三次元水中衝撃波と浮体構造物の衝撃応答 シミュレーション

正員 米田 尚弘* 正員 岩田 節雄*
正員 谷川 雅之* 正員 Sherif M. H. Rashed**
河原 充**

Simulation of Under Water Explosion Experiments

by Naohiro Yoneda, *Member* Setsuo Iwata, *Member*
Masayuki Tanigawa, *Member*, Sherif M. H. Rashed, *Member*
Atsushi Kawahara

Summary

In the design of floating structures against under water explosion, it is important to predict the expected damage in different explosion scenarios with a reasonable accuracy. Two dimensional computer codes capable of accurately simulating such explosion events are available. Actual explosion events are, however, three dimensional. Recently, a three dimensional code, MSC/DYTRAN, capable of such three dimensional simulation became available. The authors have established a procedure to accurately simulate realistic three dimensional explosion events using the computer code. Experimental verification of this procedure is also carried out.

In this paper, under water explosion experiments are described, numerical simulation of one of these experiments is reported, and a comparison of simulation results to experimental results is also presented.

1. 緒 言

水中爆発の衝撃波を受ける浮体構造物の設計では、種々の爆発条件での損傷程度を精度よく推定できることが重要である。

水中衝撃波による損傷程度を把握するために従来から各種の試験が実施され、衝撃圧の実験式などが作成されてきた。また、衝撃解析コードが開発され、衝撃解析シミュレーションなどが可能になってきた¹⁾。

最近、MSC 社 (The MacNeal Schwendler Corp.) によって流体の解析コード (MSC/PISCES) と構造物の衝撃解析コード (MSC/DYNA) を統合した連成解析プログラム (MSC/DYTRAN, 以下、DYTRAN とする)²⁾が開発され、流体と構造物との連成挙動を考慮した 3 次元衝撃応答解析が可能になってきた。この解析プログラムを用いて

水中の円筒構造物の動的応答が解析され、変形に対する衝撃圧力及びバブルパルスの影響などについて報告されている³⁾。

本研究では、浮体模型を用いて水中爆発試験を実施し、衝撃波による浮体の衝撃応答及び破壊状況を調査すると共に、DYTRAN を用いて浮体の 3 次元衝撃応答解析を実施し、衝撃波が水中を進行し、浮体に到達する状況、及び浮体の変形や応力、歪状態を明らかにすることによって新しい解析コード DYTRAN が水中爆発の衝撃波を受ける浮体の挙動をシミュレーションできることを確認する。

2. 模 型 実 験

試験に用いた浮体模型は Fig.1 に示すように長さ 1800 mm, 幅 200 mm 高さ 140 mm とし、船側外板は厚さ 0.53 mm の鋼板で製作した。また、浮体内部は厚さ 3.2 mm の鋼板を用いて船軸方向中心に Longl. Bhd を取り付け、船軸直角方向に 9 枚の Trans. Bhd を取り付け、浮体重量は 20.2 kg で吃水は、75 mm であった。浮体の鋼板は、極薄の鋼板で溶接が難しいので外板は折り板加工し、内部の Longl. と Trans. とはエポキシ系の接着剤で接着した。浮

* 日立造船(株)技術研究所

** 日本エムエスシー(株)

Fig. 1 Test model for under water explosion test

体の甲板は、船側外板と同様に厚さ 0.53 mm の 1 枚鋼板とし、船側外板に取り付けた 15×15 mm のアングル材と結合した。浮体中央に加速度計を設置し、打撃試験を行った結果、浮体の固有振動数は 145 Hz であった。

船側外板に用いた 0.53 mm 鋼板の応力と歪の関係を Fig. 2 に示す。降伏応力は 0.2% 耐力の 190 MPa とした。鋼板の引張強度は 316 MPa で、伸びは 37.8% であった。

浮体には浮体中央の船底パネルに 2 軸歪ゲージを貼り付けパネルの歪変化を計測すると共にパネル中央及び Trans. Bhd 位置に圧力計を取り付け、浮体に作用する衝撃圧を計測した。また、加速度計を取り付け衝撃時の加速度を計測した。歪ゲージにはゲージ長 3 mm を用いた。また、圧力計には共和電業製の PS 型小型圧力計容量 4.9 MPa を用いた。加速度計には、PCB 社の圧電式加速度計 (容量 10,000 G, 応答周波数 60 kHz) を用いた。

Fig. 3 に試験条件を示す。浮体は、直径 36 m、深さ 8 m の試験池の中央に浮かべて設置した。浮体は、爆発が生じるまで移動しないように池の 4 ヶ所からロープを張り拘束した。そして、浮体中央から水平方向に 1 m 及び水深 1.5 m の位置に爆薬を設置した。従って、浮体と火薬の離隔距離は、1.8 m である。薬量は 100 g である。

爆薬には産業用爆薬であるエマルジョン爆薬を用いた。エマルジョン爆薬の特性については文献⁹⁾に示されているが、密度は 1.1 g/cm³、衝撃波エネルギーは、0.99 MJ/kg、バブルエネルギー 1.7 MJ/kg、爆速 3 390 m/s (条件: $\phi = 25$ mm 鋼管) である。

Fig. 4 に計測システムを示す。歪ゲージ及び圧力計のアンプとして共和電業製のシグナルコンディショナー (CDV 230 C, 応答周波数 200 kHz) を用いた。また、加速度計については PCB 社のチャージアンプ PCB 483 B 03 を用いた。計測されたデータは、共和電業製データレコー

Fig. 2 Stress-strain relation of steel plate

Fig. 3 Test condition

Fig. 4 Measuring system

ダ (RTP 670 A, 周波数帯域 0-80 kHz) で 75 cm/sec のテープスピードで記録し、試験後に 4.5 cm/sec の速度で再生し、A/D 変換を行った。

Fig. 5 及び Fig. 6 に爆発時の試験状況を示すが、衝撃波による水柱と水面の盛り上がりが見られる。Fig. 7 に計測された圧力 P1 と歪 S1 のタイムヒストリーを示す。Trans. Bhd の位置の圧力 P1 の最大値は 7.5 MPa である。また、模型軸方向歪 S1 の最大値は 4500 μ から 4 600 μ であり、鋼板の降伏歪 3 190 μ を越えているために永久変形が生じた。

Fig. 8 に試験終了後の浮体の変形状況を示す。爆薬側の船底外板中央部の面外永久変形量は 5.5 mm であり、浮体

Fig. 5 Setting scene of ship model

Fig. 6 Explosion test

Fig. 7 Measured time history of pressure and strain

底部全体に外板の永久変形が生じた。

3. 数 値 解 析

この章では前章で示した水中爆発実験を次の項目に着目して数値解析を行った。

- (1) ショックウェーブの伝播状況
- (2) バブルの生成と成長
- (3) 衝撃荷重による浮体の応答

3.1 解析理論

固体の衝撃解析ではラグランジュの定成化に基づく陽解法を用いている。

ラグランジュの定式化では座標系は物質の変形にともな

Fig. 8 Test model after failure by explosive test

Fig. 9 Flow chart of explicit time integration scheme

って移動するので、構造解析に適している。

運動方程式は次式で表される。

$$MX'' + CX' + KX = f_{ex} \quad (1)$$

ここで、

M : 質量マトリックス

C : 減衰マトリックス

K : 剛性マトリックス

f_{ex} : 外力ベクトル

X'' , X' , X : 加速度, 速度, 変位のベクトル

DYTRAN ではコンピュータのメモリー容量と計算時間を小さくするために次式に示すように陽解法を用いて中心差分法に基づく時間積分を行っている。

$$MX'' = f_{ex} - fin(X, X') \quad (2)$$

ここで, $fin(X, X')$ は, 内力ベクトルで表される。

$$fin(X, X') = CX' + KX \quad (3)$$

この解析法のフロチャートを Fig.9 に示す。

構造物の質量を質点系として取り扱うと質量マトリックスは対角マトリックスになるために(2)式の運動方程式は各自由度で独立になり, 逆行列の演算をせずに加速度などを求めることができる。

なお、時間積分の増分は次式に示すように要素の最小距離 L を音波が通過する時間よりも短くする必要がある。

$$\Delta t \leq \min(\Delta t_{cr}) \quad (4)$$

ここで、 $\Delta t_{cr} = \frac{L}{C}$ 、 C は音速である。

流体の衝撃解析ではオイラーの定式化に基づく陽解法を用いる。オイラーの定式化では、座標系は空間に固定され、物質はこの座標系を通り抜けて移動するため流体の流れや高速の衝撃を受ける固体の大変形問題などに適している。DYTRAN では有限体積法を用いて流体の領域を多数のセルで分割するが、各セルにおいて質量保存則、運動保存則及びエネルギー保存則が成立している。

DYTRAN では流体と構造物との連成を考慮するため、両者を結合する方法としてジェネラルカップリングと ALE (Arbitrary Lagrange Euler) の2つの方法が用意されている。ジェネラルカップリングの場合、オイラー要素とラグランジュ要素とは独立して作成されるが、それらの連成はラグランジュ要素に張付けられた多面体のカップリング面を通して行われる。カップリング面は構造物の運動と共に空間に固定されたオイラー要素の中を移動し、移動境界となる。流体の圧力に対する構造物の応力境界条件となっている。

ALE の場合、カップリング面はラグランジュ要素とオイラー要素の共通の境界に張付けられる。従って、オイラー要素は構造物と共に移動し変形する。従って、広い範囲にオイラー要素を広げなくとも構造物が大きく移動する問題の解析が可能で、計算時間も非常に短縮することができる。

3.2 数値解析

Fig.10 に数値解析に用いた浮体の要素分割図を示す。浮体は船軸方向に対称条件を考慮して1/2とし、対称境界条件を設定した。モデル化に用いたシェル要素は、浮体と共に移動するラグランジュシェル要素で、Balychiko-Tsai の矩形要素を用いた。浮体の内部もシェル要素で分割した。

シェルの材料特性は Von Mises の降伏条件と塑性流れ理論に従う bi-linear 型の弾塑性体とする。シェル要素は板厚方向に5点の積分点を設け、それぞれの点において塑性化の判定を行っている。本解析では材料特性を次の特性値をもつ弾塑性体とした。また、応力の歪速度依存性は考慮していない。

Fig. 10 Finite element idealization of ship model

- (1) 縦弾性係数 $E=160,000 \text{ MPa}$
- (2) 降伏応力 $\sigma=190 \text{ MPa}$
- (3) 降伏後の縦弾性係数 $E_h=0 \text{ MPa}$

浮体はその重量と浮力が平衡した状態で浮かんでいて、外力に対しては運動が拘束されないものとしている。

Fig.11(a) に浮体と流体との要素分割図を示す。流体部は空間に固定されたオイラー要素で分割した。流体の範囲は水の部分の他、水面から上の空気層の部分も分割し、水面の上方向への動きを可能とした。流体も X - Y 面、 Y - Z 面、 Z - X 面に対称条件を考慮した分割になっている。従って、流体の要素分割範囲は、全体の1/8の体積となっている。Fig.11(b) は、流体の内部を消去し、境界対称面と浮体モデルとの組み合わせの状況を分かりやすく示したものである。

Fig. 11 Finite element model for explosion analysis

$X=L$ 及び $Y=B$ の境界面では無反射条件を設定した。水面は、オイラー要素内での動きを自由にするため境界条件を設けていない。

水はせん断強度を持たない圧縮性流体でモデル化し、要素の圧力は次に示す状態方程式で計算することができる。

圧縮状態では ($\mu > 0$)

$$p = a_1\mu + a_2\mu^2 + a_3\mu^3 + (b_0 + b_1\mu + b_2\mu^2)\rho_0 E \quad (5)$$

引張状態では ($\mu \leq 0$)

$$p = a_1\mu + (b_0 + b_1\mu)\rho_0 E \quad (6)$$

ここで、

$$\mu = \eta - 1$$

$$\eta = \rho/\rho_0$$

ρ : 密度

ρ_0 : 圧力 0 での密度 $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$

E : 単位質量当たりの内部エネルギー

$a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$: 圧縮性流体としてモデル化するための係数

爆薬の部分の要素も水と同様に圧縮性流体としてモデル化した。エマルジョン爆薬の爆発生成気体の特性は JWLL の状態方程式を用いている。

$$p = A \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1} \right) e^{-R_1/\eta} + B \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2} \right) e^{-R_2/\eta} + \omega\eta\rho_0 E \quad (7)$$

ここで、 A, B, ω, R_1, R_2 は、定数で文献⁹⁾を参考にして決定した。

爆薬と水は共にオイラー要素中に置かれているために両者の境界面を介して爆薬の影響は水のオイラー要素に自動的に伝えられる。

本計算では浮体をラグランジュ要素、流体をオイラー要素で要素分割し、カップリング面にはジェネラルカップリングを用いた。また、静水圧を考慮し、また重力の作用がラグランジュ及びオイラー要素の両方に及ぶようにした。この結果、流体の自重と初期圧力のもとで流体の平衡状態が成立し、浮体についてもその自重と浮力との間で平衡が成立する。

解析は、爆薬を解析の最初 (Time=0) に爆発するようにし、衝撃波が水中を進行して、浮体に到達し、浮体に変形が生じるまでの 4.3 msec について行った。

4. 解析結果及び考察

Fig.12 は、 $X-Z$ 面及び $Y-Z$ 面に現れる圧力の等高線図で、爆発によって衝撃波が発生し、浮体に到達するまでの衝撃圧の進行状態及び分布を示しているが、衝撃波が爆発によって球状に生成し、半径方向に展開して進行していく状況及び水面に置いて衝撃圧が消滅する状況がよく現れている。

Fig.13 に衝撃波による流速のベクトル図を示すが、衝撃波の広がる方向に水の粒子が運動する様子がわかる。

Fig.14 にバブルが生成する状況を示す。図ではバブルの表面を黒色で表している。バブルの部分は気体であるので周囲の流体と密度が異なるように表されている。

Fig.15 に 1.6 msec 経過後の浮体に生じた応力分布をパネルの内面及び外面について示す。浮体の中央部分以外は要素分割程度が粗いため剛性が高くなり応力が小さくなっているが、爆薬に近いパネルに大きな応力が発生する傾向が現れている。

Fig.16 に時間 4.3 msec の浮体の歪の分布を内面と外面について示す。歪は Mises の相当塑性ひずみである。衝撃波は通過した後であるので残留歪の状態が現れている。

Fig.17 にパネル中央の応力 σ_{xx} の時間変化を示す。衝撃波によってパネルは曲げ変形をするが、パネルの中央部は変形の結果引っ張りの膜応力が生じている。応力はパネルが塑性変形しているために降伏応力付近で頭打ちになっている。

Fig.18 にさく葉から距離 1.8 m における模型実験と解析結果の衝撃圧力の時刻歴を示す。解析値は、実験値のピーク値の 42% であるがインパルス (力積) は良く合っている。解析による衝撃圧のピーク値が実験値よりも低くなった理由として要素分割が粗いためであると考えられる。

Fig.19 は浮体の最終変形状態を表している。底板及び側板のパネルに曲げ永久変形が観測される。底板パネルの変形モードは Fig.8 と比較してわかるように実験結果とよく一致していることがわかる。また、底板パネルの面外変形量も 4 mm で計測値とほぼ一致している。

5. 結 言

水上に浮かべた浮体模型に水中爆発による衝撃波を作用させる実験を実施し、浮体に作用する衝撃圧力、歪及び変形の計測を行った。また、MSC社で開発された 3 次元流体-構造連成衝撃解析コード MSC/DYTRAN を用いて水中爆発実験のシミュレーション計算を行い、衝撃波の伝播、バブルの生成など流体内部の現象と浮体に生じる歪、応力、変形などの構造の応答を検討した。その結果、以下のことがわかった。

(1) 衝撃波が爆心より球状に伝播する挙動、水面において衝撃圧が消滅する挙動及びバブルの発生と成長の初期過程をシミュレートすることができた。

(2) 浮体の衝撃応答による変形モードは実験結果とよく一致することがわかった。

6. 謝 辞

本研究の模型実験は日本油脂(株)の試験池を使用して行ったもので、試験に際してはご助言及びご援助をいただいた PX 開発グループの高橋勝彦氏及び村田健司氏に感謝いたします。

Fig. 12 Propagation of shock wave by explosion

(unit: Pa)

Fig. 13 Water velocity vectors

Fig. 14 Growth of bubble

Fig. 15 Stress distribution (Von Mises, σ_{eq} , $t=1.6$ msec)

(a) inner side

(b) outer side

Fig. 16 Plastic strain distribution (E_p , $t=4.3$ msec) Fig. 17 Calculated time history of stress σ_{xx}

Fig. 18 Shock Wave at 1.8 m

Fig. 19 Calculated deformed shape

参 考 文 献

- 1) The MacNeal Schwendler Corp., "MSC/PISCES V.5 user manual", USA, 1991.
 - 2) The MacNeal Schwendler Corp., "MSC/DYTRAN V2.1 user manual", USA, 1993.
 - 3) 木村延, 丹, 浅田, 井田, 井上, 山内, "衝撃波が作用する構造物の動的応答に関する研究", 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 1993.11
 - 4) M. Yoshida, "Detonation Behavior of Emulsion Explosions Containing Glass Micro-balloons", in 8th Symp. (international) on Detonation, p 993, 1985.
 - 5) 中山良男ほか, "細長比の大きいエマルジョン爆薬による水中爆発の数値解析", 平成2年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1990.
-