水面衝撃を受ける円筒殻の構造応答解析

正員 渋 江 唯 司* 正員 伊 東 章 雄*
中 山 英 治*

Structural Response Analysis of a Cylinder under Water Impact

by Tadashi Shibue, *Member* Akio Ito, *Member*
Eiji Nakayama

Summary

This paper gives one method to estimate the structural response of ship structures under water impact pressure.

A series of drop tests of a cylinder with diameter of 312 mm is carried out to measure water impact pressures and strains on the surface of a cylinder.

Numerical analyses are carried out for one of the drop tests to reproduce the structural response under measured time history of pressures. In spite of the existence of large local vibrations shown in the numerically estimated strain values, the numerically estimated strain values and the measured values show the same tendency on the whole. This result shows the numerical method, we employed here, can be used for this purpose.

Then we tried to evaluate the effects of maximum impact pressure on the maximum strain value. Two kinds of pressure histograms are used to estimate the maximum strain values. The strain values obtained from the pressure histogram with maximum impact pressure show less effects than that without maximum impact pressure.

Finally, we modified the maximum impact pressure value of the measured time history of pressures to be used for numerical analysis. One is with the value of twice as much as measured value and the other is with the mean value of before and after the peak value. The results show that the maximum impact pressure value itself has little effects on the maximum strain value, while the time integration of pressure seems to have more effects than that of maximum impact pressure.

1. 緒 言

スラミングなどにより水面衝撃力を受ける船舶の構造応答を推定する1解法について紹介する。

従来、水面衝撃圧力を推定するための研究^{1)~4)}が行われてきており、水面衝撃力を受ける構造物の設計は、これらの研究で推定された水面衝撃圧力をもとに行われてきた。設計段階では、最大水面衝撃圧力に注目し、静的構造解析を行って構造強度の推定を行っている。近年、様々な形状

の物体が水面と衝突する場合の水面衝撃圧力分布を、数値解析的に推定する方法⁵⁾も開発され、実用化されようとしている。また、船体を1本の変断面梁として取り扱い、船体の弾性応答の効果を含めて波浪中の応答を解く方法⁶⁾も開発され、船体断面に作用する衝撃力の大きさが求められ、縦強度の観点から動的構造応答を評価することが可能となった。

一方、水面衝撃力を受ける局部構造の強度評価を行うためには、水面衝撃力のように、短い時間内に大きく変化する荷重のもとで、実際に構造に発生する歪みの推定を行う必要がある。高木ら⁷⁾は平板モデルにBagnold Modelを適用し、構造板の固有周期と衝撃の作用時間との関係を述べている。

本論文では、局部構造に注目し、数値解析により水面衝

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所, 船舶海洋開発部

原稿受理 平成5年7月9日

秋季講演会において講演 平成5年11月9, 10日

撃圧力のもとで、発生する歪みの大きさを推定する方法を示す。また、従来、重要な指標とされている最大衝撃圧力値が歪みの大きさに及ぼす影響を数値解析により調べ、最大発生歪みの大きさに及ぼす要因について考察する。

まず、2次元水路に円筒殻を落下させる実験を行い、円筒殻に作用する水面衝撃圧力と円筒殻に発生する歪みの時刻歴変化を同時に計測する。次に、数値解析法による推定精度を検証するために、計測された水面衝撃圧力の時刻歴変化を用いて有限要素法により過渡応答解析を行って歪みを計算し、計測された歪みと比較する。また、計測された水面衝撃圧力の時刻歴変化のうち、ピーク圧力を示す部分と、それ以外の部分の、発生歪みに対する寄与を求めるために、それぞれの圧力部分を用いた過渡応答解析を行い、発生歪みの大きさを調べる。最後に、発生歪みに及ぼす最大水面衝撃圧力の影響を定量的に調べるために、ピーク圧力の値を変更した水面衝撃圧力を用いて過渡応答解析を行い、発生歪みの大きさを調べる。この結果、発生歪みの大きさに対する最大水面衝撃圧力の寄与は比較的小さく、水面衝撃圧力の時間積分値の寄与が大きいことを示す。

2. 水面落下模型実験

直径 312 mm、長さ 600 mm の軟鋼製の円筒殻を 2 次元水路に落下させる実験を行った。試験装置を Fig. 1 に示す。円筒殻の自由落下を実現するために、円筒殻は支持梁から 2 本のひもで吊り下げ、水面落下後は慣性力と衝撃荷重により自由に運動しうものとした。円筒殻を水平に保つ目的で、円筒殻を吊り下げる支持梁は、水面と平行を保つように 2 本の垂直柱に計 4 個のガイドを用いて接続した。また使用した深さ 1.8 m の 2 次元水路には、3 次元影響を抑えるために、幅 600 mm となるように水路内部に仕切り板を設置した。

実験に使用した円筒殻を Fig. 2 に示す。円筒殻は板厚 5.1 mm、落下時の質量、23.8 kg である。センサの取り付け

Fig. 1 Drop Test Setup

Fig. 2 A Cylinder with Sensors

け位置は最初の接水位置を 0 度とするとそれぞれ -10, 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90 度の角度の位置とし、板厚 5.1 mm の円筒殻には長さの中心から 75 mm 離れた断面位置にそれぞれ圧力センサおよび歪みセンサを取付けた。

圧力センサは Druck の PDCR-81, および共和電業の PGM-5 KC および PGM-2 KC を使用した。歪みセンサは共和電業の KFG-2-120-D 16-11 L 5 M 3 S を使用した。計測値は動歪み計を通して最大変換周波数 200 kHz の A/D 変換器でコンピュータに収録した。圧力センサおよび圧力センサ用動歪み計の最大応答周波数は 100 kHz であるので、圧力に対する最大応答周波数は 100 kHz である。歪みセンサ用動歪み計の最大応答周波数は 5 kHz であるので、歪みに対する最大応答周波数は 5 kHz である。

実験では落下高さを 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m の 3 段階に変化させて実施した。

落下高さ 1.0 m の実験により計測された水圧と歪みの時刻歴変化の一例を Fig. 3 に示す。また、水面衝突時の写真を Fig. 4 に示す。実験結果から、円筒殻に発生する最大歪み値は、歪みの第 1 半波であられること、歪みの応答周期は約 8 msec であることなどが分かる。最初の接水位置である 0 度では、圧力波形は 0.05 msec ほどの非常に短い時間で最大値に達し、急激に減少しつつ腰掛け圧を表す。また歪み波形は比較的緩やかに増大し、接水後 4 msec で最大値に達する。一方、10 度の位置では歪みの波形は 0 度の場合とほぼ一致するが、圧力波形は明らかな時間遅れが見られ、0 度の場合に比べて最大値に達する時間は 0.3 msec 遅い。

一連の実験で得られた水圧の値を Wagner および Chuang の推定式により求められる値と比較して Fig. 5 に示す。この結果、実験結果は Chuang の推定式により精度良く推定できることが分かる。

一方、円筒殻の撓み振動の固有周波数を (1) 式⁸⁾により求めると、波数が $2(i=2)$ の場合に 133 Hz となり、この実験で計測された歪みの最低次周波数と良く一致する。

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{I}{Ar^4} \frac{i^2(i^2-1)^2}{i^2+1+\nu}} \quad (1)$$

Fig. 3 Measured Time Histories of Pressures and Strains

3. 構造応答解析

3.1 概要

最初に、数値解析法による推定精度を検証するために、計測された水面衝撃圧力の時刻歴変化を用いて有限要素法により過渡応答解析を行って歪みを計算し、計測された歪みと比較し、考察を行う。

また、計測された水面衝撃圧力の時刻歴変化のうち、ピーク圧力を示す部分と、それ以外の部分の、発生歪みに対する寄与を求めるために、それぞれの圧力部分を用いた過渡応答解析を行い、ピーク圧部分により発生する最大歪み値とピーク圧以外の部分により発生する最大歪み値を実験で計測された歪み値と比較し、考察を行う。

最後に、発生歪みに及ぼす最大水面衝撃圧力の影響を定量的に調べるために、ピーク圧力の値を変更した水面衝撃圧力を用いて過渡応答解析を行い、発生歪みの大きさを調べる。この結果、発生歪みの大きさに対する最大水面衝撃圧力の寄与は比較的小さく、水面衝撃圧力の時間積分値の寄与が大きいことを示す。

3.2 モデル

構造応答解析に用いる2次元有限要素解析モデルをFig. 6に示す。円筒殻に左右対称条件を適用して、円筒殻の上端と下端(0度と180度)で水平方向変位を拘束し、垂直方向の剛性が高い90度で垂直方向変位を拘束した。円周方向には5度毎に36分割し、板厚方向は2分割した。合計の節点数は222、要素数は72である。荷重となる圧力は、

Fig. 4 A Photograph of a Drop Test

Fig. 5 Normalized Maximum Impact Pressures

円筒殻外面に加え、歪みは円筒殻内面の値を外挿により求めた。解析手法は、衝撃問題に使用される陽解法の有限要素法プログラムであるDYNA3Dで、8節点のソリッド要素を使用し、材料は線形弾性とした。解析で使用した円筒殻の材料特性値をTable 1に示す。

3.3 解析結果

実験で得られた圧力の時刻歴変化を与えて得られた歪みの解析結果を、実験で計測された歪みと比較してFig. 7に

Fig. 6 Finite Element Model of a Cylinder

Table 1 Mechanical Properties of a Cylinder

	STPG370
Young's Modulus(MPa)	206,000
Yield Stress(MPa)	215

Fig. 7 Time Histories of Strains

Table 2 Maximum Strain Values for Measured and Calculated Results

	Measured	Calculated	Cal/Mes
0deg	322	503	1.56
10deg	286	412	1.44
20deg	215	237	1.10
30deg	125	131	1.05

示す。解析結果は、実験結果に比べて、0度、10度で歪みの振動が大きく、第1半波の最大歪み値は、Table 2に示すように過大な推定値を与えるが、歪みの傾向は一致しており、実験で計測された歪みの変化を数値解析によって再現できることが分かった。

次に、Fig. 8に示すように実験で計測された圧力の時刻歴変化を、最大衝撃圧力値を含む部分と、最大衝撃圧力値以降の腰掛け圧を含む部分とに分離し、それぞれの部分の圧力を解析モデルに加えて解析を行った。求められた歪み

Fig. 8 Devided Time Histories of Pressures

Fig. 9 Time Histories of Strains for Two Different Pressure Models

の時刻歴変化を、分離前の実験で計測された圧力を加えて得られる歪みの時刻歴変化と比較して Fig. 9に示す。Table 3には、圧力の時間積分が最大歪みに及ぼす影響を調べるために、第1半波で現われる最大歪み値と、最大歪み値をそれぞれの部分の圧力の時間積分値で割った値を合わせて示す。この結果から、最大衝撃圧力を含む部分は、

Table 3 Maximum Strain Values for Two Different Pressure Models

		Peak	Without Peak	Total Pressure
0deg	T.I.P.	0.0654	0.168	0.233
	Strain	80.3	221	503
	S/T	1228.	1315.	2159.
10deg	T.I.P.	0.0485	0.152	0.201
	Strain	66.9	190	412
	S/T	1379.	1250.	2050.

T.I.P.:Time Integration of Pressure (MPa x ms)

S/I: Strain/T.I.P.

Fig. 10 Different Peak Pressure Models

最大衝撃圧力値以降の腰掛け圧を含む部分に比べて、最大歪みに及ぼす影響が小さく、発生歪み値と圧力の時間積分値はほぼ比例関係にあることが分かる。ちなみに、最大衝撃圧力値を示す部分の起振周期は 0.080 msec であり、円筒殻の固有周期 7.5 msec に比して十分に短い。

最後に、衝撃強度評価上重要な指標とされている最大衝撃圧力値が歪みの大きさに及ぼす影響を調べる目的で、Fig. 10 に示すように、0 度で発生した最大衝撃圧力値を前後圧力の平均値とした場合 (Peak * 0)、最大衝撃圧力値を 2 倍の値とした場合 (Peak * 2) について解析を行った。求められた歪みの時刻歴変化を比較して Fig. 11 に示す。Table 4 には、第 1 半波で現われる最大歪み値と共に、それぞれの場合について、最大歪み値を示す衝撃後 4.35 msec までの圧力の時間積分値 (T. I. P.) を合わせて示す。歪み値は時刻 1.70 msec で 1 度目の極値を示し、時刻 4.35 msec で最大値を示すが、今回行った 2 つの場合では 1 度目の極値には影響を及ぼすものの、最大歪み値には影響は見られなかった。この結果から、最大衝撃圧力値自体は、最大歪みに及ぼす影響が小さいことが分かる。

4. ま と め

以上の実験および解析により以下の結論が得られた。

① 水面衝撃を受ける円筒殻の過渡応答挙動を数値解析によりほぼ推定することができる。

Fig. 11 Time Histories of Strains for Different Peak Pressure Models

Table 4 Maximum Strain Values for Different Peak Pressure Models

		Peak*2	Peak	Peak*0
T.I.P.		0.256	0.233	0.211
Strain Values	1.70ms	313	277	261
	4.35ms	459	459	459
S/T	1.70ms	1223	1189	1237
	4.35ms	1793	1970	2175

T.I.P.:Time Integration of Pressure (MPa x ms)

S/T: Strain/T.I.P.

② 最大衝撃圧力値を含む部分が円筒殻に発生する最大歪み値に及ぼす影響は、それ以降の部分に比べて小さく、最大歪み値は圧力の時間積分値と関連がある。

③ 最大衝撃圧力値自体は、最大歪み値に対する影響が小さい。

これらは限定された条件のもとで得られた結論であり、さらに衝撃圧力の周波数特性による影響、非線形応答に対する影響などについて検討する必要がある。

現在、設計段階で用いられている差分法による衝撃圧力解析法は、全体のエネルギーを正確に評価するが、時刻刻みを細かくすると最大衝撃圧力が増加する特徴をもっており、従来の強度評価法では荷重の評価が困難であった。今回得られた知見をもとにして、これらの解析法による結果をより有効に利用できる環境を整備して行くことが必要であると考えられる。

本研究の最後にあたり、本研究の遂行にご援助いただいた石川島播磨重工業(株)技術研究所藤井克哉副所長、堤孝行部長および実験、解析にご協力いただいた船舶海洋開発部の方々に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) S. L. Chuang: Impact Pressure Disribution on Wedge Shaped Hull Bottoms of High Speed Craft, NSRDC, 2953 (Aug. 1969)
- 2) Von Karman: The Impact on Sea Plane Floats during Landing, NACA, TN321 (Oct. 1929)

- 3) J. H. G. Verhagen : The Impact of a Flat Plate on a Water Surface, J. of Ship Research, Vol. 11 (1967)
 - 4) 宮本武, 谷澤克治, 船首部に作用する衝撃荷重について (第 1 報), 日本造船学会論文集第 156 号, (1984)
 - 5) 例えば, 荒井誠, 他, 3D Numerical Simulation of Impact Load due to Liquid Cargo Sloshing, 日本造船学会論文集, 第 171 号, (1993)
 - 6) 山本善之, 他, 非線形性を考慮した波浪中の船体縦運動および縦強度, 日本造船学会論文集, 第 143-145 号, (198-79)
 - 7) 高木又男, 梅野佳子, 流体圧縮による衝撃圧に及ぼす周辺構造物の弾性変形の影響, 日本造船学会論文集, 第 132 号, (1972)
 - 8) S. Timoshenko, 工業振動学, 東京図書
-