高速半没水型双胴船の振動解析法に関する研究

正員 南 真 和* 正員 遠 山 泰 美*

Vibration Analysis of High Speed Semi-Submergeble Catamaran

by Masakazu Minami, Member Yasumi Toyama, Member

Summary

This report deals with a method for the natural vibration analysis of high speed semi-submergeble catamaran which is made up of two cylindrical lower hulls, struts and upper deck.

The exact evaluation of added mass of water is inevitable to estimate the natural frequencies for such a structure, because vibration modes are fully three dimensional and are much different from the ordinary ship hull vibration modes.

Therefore the authors present here a method to compose a three dimensional added mass matrix by use of J factor, which is well known as a three dimensional correction factor.

The exciting tests of the experimental model were carried out, and the measured results showed a fairly good agreement with the calculated values obtained by the proposed method.

1 ま え が き

本研究の対象としている高速半没水型双胴船は、水面下に2つの円筒状浮体を有し、これらと上部甲板とは水線面積の小さい流線型ストラットで結合されているという、比較的斬新な船体構造型式となっている。このため、従来の船体振動とは異なった3次元的な振動モードが考慮されなければならない。このとき、周辺流体が構造に及ぼす影響をいかに取扱うかという重要な問題が生じてくる。

また、軽構造の割には高出力の主機を搭載する関係上、大きな振動応答を示す可能性も考えられるため、船体固有振動数の正確な推定は重要な課題となっている。

本論文では、従来、梁状の船体振動に対して考案、研究されてきた3次元修正係数(J 値)の考え方に基づき、有限要素法による3次元接水構造物の固有振動解析に適合した付加水質量の一算定法を提示した。また、模型実験によって、計算法の妥当性についての検討を行なった。

2 解 析 方 法

2.1 有限要素法による接水構造物の固有振動解析法

連続体の一種である流体に対する有限要素法の適用は、近年盛んに試みられ、接水境界面の振動によって生じる動水圧の計算と構造系の固有振動計算を連成させて解く手法も確立されている¹⁾。したがって、ここでは要点的みの記述にとどめておく。

構造流体系の固有振動方程式は、 u を構造変位ベクトル、 $[M]$ を構造質量マトリックス、 $[m]$ を付加水質量マトリックス、 $[K]$ を構造剛性マトリックスとすると、(1)式で表わされる。

$$([M] + [m])\ddot{u} + [K]u = 0 \quad (1)$$

ここで、 $[m]$ は、(2)式に示す周辺流体の動水圧有限要素法解析結果から求められる。

$$[H]p = \rho a \quad (2)$$

すなわち、 ρ を流体密度とし、接水部の自由度数に應じ、 a_i なる加速度振幅を持つ接水振動を考え、動水圧振幅 p_i を、(2)式の解として求め、接水面での節点力に換算することによって計算される。

振動数が十分大きい時には、自由表面における波の影響は無視され、 $[m]$ は振動数と無関係に一意的に定められる。上記の解析法は、原理的には確立されているものの、3次元接水構造物を流体も含め、有限要素法で計算することは計算量からいっても必ずしも実用的な手段とはいえない。

そこで筆者らは、流体の有限要素法による解析は2次元問題への適用にとどめ、3次元流れの影響は、従来より考案されている3次元修正係数(J 値)の考え方に従い、2次元付加水質量マトリックスから、(1)式の $[m]$ に相等するものを近似的に組立てる方法を考案した。

2.2 3次元修正係数

3次元修正係数は(3)式によって定義されている。

$$J_t = T_{II}/T_{II} \quad (3)$$

ただし T_{II} : 周辺流体の2次元運動による運動エネルギー

* 三井造船(株)千葉研究所

T_{II} : 周辺流体の3次元運動による運動エネルギー

丸棒, Lewis断面棒, 回転槽円体などについての J 値は, Lewis, Taylor, 熊井らによって求められているが, 本船のような接水構造に対するものはほとんど知られていない。上記の J 値を代用することも考えられるが, ここでは実験的に求める手法を示す。

2.2.1 空中と水中での固有振動の比較より J 値を求める場合

水中および空中における i 次固有振動方程式は, それぞれ,

$$\omega_i^2 \phi_i^T [M+m] \phi_i - \phi_i^T [K] \phi_i = 0 \quad (4)$$

$$\omega_{ai}^2 \phi_{ai}^T [M] \phi_{ai} - \phi_{ai}^T [K] \phi_{ai} = 0 \quad (5)$$

で表わされる。ここに, 添字 a は空中での値を意味し, ω_i, ϕ_i はそれぞれ i 次固有振動数, 振動モードを示す。また, (3) 式は2次元付加水質量マトリックスを $[m_{II}]$ とすると, (6) 式で表わされる。

$$J_i = \phi_i^T [m] \phi_i / \phi_i^T [m_{II}] \phi_i \quad (6)$$

いま, 水中と空中のモードが近似的に等しいと仮定すれば, $\phi_i \doteq \phi_{ai}$ とおいて, (4), (5), (6) 式より,

$$J_i = \left(\frac{\omega_{ai}^2}{\omega_i^2} - 1 \right) \frac{\phi_{ai}^T [M] \phi_{ai}}{\phi_{ai}^T [m_{II}] \phi_{ai}} \quad (7)$$

を得る。 ω_i は実測値を用いるが, ω_{ai}, ϕ_{ai} は計算値を使うことも考えられる。

2.2.2 $[m_{II}]$ を用いた計算値と水中実測値の比較より J 値を求める場合

(7) 式は空中と水中モードが近似的に等しいとみなしがない場合には適用できない。このような場合でも, 水中振動モードを2次元付加水質量マトリックス $[m_{II}]$ による計算モード ϕ_{II} で近似することは容認しやすい。すなわち, (5) 式の代りに

$$\omega_{IIi}^2 \phi_{IIi}^T [M+m_{II}] \phi_{IIi} - \phi_{IIi}^T [K] \phi_{IIi} = 0 \quad (8)$$

を用い, $\phi_i \doteq \phi_{IIi}$ とおくことにより, (4), (6) 式から,

$$J_i = 1 - \left(1 - \frac{\omega_{IIi}^2}{\omega_i^2} \right) \frac{\phi_{IIi}^T [M+m_{II}] \phi_{IIi}}{\phi_{IIi}^T [m_{II}] \phi_{IIi}} \quad (9)$$

を得る。

2.3 J 値による付加水質量マトリックスの合成

J 値を有限要素法に適用する場合, 付加水質量マトリックスは一般に便宜上(10)式で計算されることが多い。

$$[m] = J_i [m_{II}] \quad (10)$$

本式では, i 次以外のモードに対しては, 正しい3次元修正がなされない点や, J_i 自体が求めようとしている固有振動モードに依存している量であることに留意せねばならない。これらの不都合を避けるためには, むしろ3次元修正を行わずに固有値解析を行ない, 得られた固有振動数 ω_{IIi} とモード ϕ_{IIi} に応じた適当な J_i 値を用いて, (9) 式から ω_i を求めた方がよいと思われる。

しかし, 本船のように複数個の接水部を有した構造全体系の振動モードのおおのに対し, 適切な J_i 値を定めることは困難である。そこで, 1つの接水部に注目し, いくつかの基本的な振動モードに対する J 値を用いてあらかじめ付加水質量マトリックス自体に修正を加えておく方法を次に示す。

水中時および $[m_{II}]$ を用いたときの固有振動モデルマトリックスを, それぞれ次式で表わす。

$$[\Phi] = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (11)$$

$$[\Phi_{II}] = [\phi_{II1}, \phi_{II2}, \dots, \phi_{IIn}] \quad (12)$$

ただし, n : 構造の全自由度数

このとき, 一般化質量マトリックスは, それぞれ次式の対角マトリックスで表わされる。

$$[M^*] = [\Phi]^T [M+m] [\Phi] \quad (13)$$

$$[M_{II}^*] = [\Phi_{II}]^T [M+m_{II}] [\Phi_{II}] \quad (14)$$

(13), (14) および (6) 式より

$$[M+m] = [\Phi]^{-1T} [M^*] [\Phi]^{-1} + J_i \phi_i^T [m_{II}] \phi_i [\Phi]^{-1} \quad (15)$$

$$[M+m_{II}] = [\Phi_{II}]^{-1T} [M_{II}^*] [\Phi_{II}]^{-1} + \phi_{IIi}^T [m_{II}] \phi_{IIi} [\Phi_{II}]^{-1} \quad (16)$$

を得る。また (14) 式の両辺に右から $[\Phi_{II}]^{-1}$ を掛けることにより,

$$[\Phi_{II}]^{-1} = \left[\frac{1}{M_{II}^*} \right] [\Phi_{II}]^T [M+m_{II}] \quad (17)$$

を得る。ここで, 水中振動モードは未知であるので, 2.2.2 項の場合と同様に, $[\Phi] \doteq [\Phi_{II}]$ なる近似を仮とし, (17) 式を用いて (15) 式-(16) 式を求めると,

$$[m] - [m_{II}] = [M+m_{II}] [\Phi_{II}] \left[\frac{1}{M_{II}^*} \right] \cdot [J_i - 1] \phi_{IIi}^T [m_{II}] \phi_{IIi} \cdot \left[\frac{1}{M_{II}^*} \right] [\Phi_{II}]^T [M+m_{II}] \quad (18)$$

となる。(18) 式を書き改めると, (19) 式のように表わされる。

$$[m] = [m_{II}] - \sum_{i=1}^n [\mu_i] \quad (19)$$

ただし

$$[\mu_i] = \frac{(1-J_i) \phi_{IIi}^T [m_{II}] \phi_{IIi}}{(\phi_{IIi}^T [M+m_{II}] \phi_{IIi})^2} \cdot [M+m_{II}] \phi_{IIi} \cdot \phi_{IIi}^T [M+m_{II}] \quad (20)$$

ここで $[\mu_i]$ マトリックスのことを, J_i に対応させて, 3次元修正マトリックスと呼ぶことにする。式の展開にあたっては, $[\Phi], [\Phi_{II}]$ は n 自由度の正方マトリックスとしたが, 最終的には (19) 式の総和記号は, 必ずしも, 全自由度にわたる必要はなく, J_i 値を考慮しようとするモードに対してだけでよい。(20) 式からわかるように, $J_i = 1.0$ のモードに対しては, 3次元修正マトリッ

Fig. 1 Arrangement for exciting test of end fixed model

クスは零マトリックスとなり、このモードの3次元修正はなされないことを意味する。

3 模型実験

3.1 片舷ストラット基部固定模型実験

3次元修正係数を計測するため、Fig. 1に示す片舷ストラット基部固定模型を用いて、空中および水中での起振実験を行なった。

ストラットは2枚の4.5mm鋼板、ローアールはSGP25Aを芯材に、発泡スチロールで円筒状に成形した。吃水 $d=40$ cm の場合の共振曲線の1例を Fig. 2に示す。

3.2 全体系船体模型実験

1枚の8mm鋼板でモデル化した上部甲板と、3.1節で示したストラットとローアールからなる全体系船体模型を用いて、空中および水中での起振実験を行なった。

Fig. 2 Resonance curve of end fixed model in water

浮遊体としての境界条件が満たされるよう、Fig. 3に示すように門型の架台上にスポンジおよびゴムを介して模型を支え、架台を加振することによって起振実験を行なった。水中における共振曲線の1例を Fig. 4に示す。

Fig. 4 Resonance curve of full model in water

4 実験結果および計算値との比較

4.1 片舷ストラット基部固定モデルによる固有振動

計算は吃水が40cmの場合に対し、2次元付加水質量を用いて行なった。2次元付加水の算定は、Fig. 5に示すLewis Formで近似した場合と、2.1節に示した流体有限要素法による場合の2ケースについて行なった。有限要素としては、要素内速度ポテンシャルが2次関数で表わされる6節点3角形要素²⁾を用いた。水平並進振動に対する動水圧分布を Fig. 6に示す。この結果より算定した水平付加水質量係数は、 $C_H=0.400$ となった。これに対し、Fig. 5に示すLewis Formの場合、 $C_H=0.444$ となった。各断面の水平、上下振動に対する2次

Fig. 3 Arrangement for exciting test of full model

Fig. 5 Lewis form for submerged section

Fig. 6 Distribution of hydrodynamic pressure by F.E.M.

元付加水質量から、節点に集中された2次元付加水質量マトリックスを作成し、構造データとともに固有値解析を行なった結果が、Table 1 および Fig. 7 である。Fig. 7 には実測されたモードを太い矢印で示してある。2次元付加水をを用いた上記 F.E.M 計算と、実測値の違いから (9) 式によって計算された J 値を Table 1 に併記した。なお、振動モードの名称は船用機関の架構振動にならない、ここでは低次から順に H, X, α 型とした。H 型モードに対する J 値はほぼ 1.0 であり、3次元流れの影響が少ないことがわかる。

4.2 全体系船体モデルによる固有振動

水中の計算は、4.1 節で用いた2次元付加水マトリックスをそのまま用いた場合 (CAL 1) と、(20) 式により H, X, α 型の3つのモードに対し、Table 1 に示した J 値で修正を加えた場合 (CAL 2) の2ケースについて行なった。空中での計算モードと CAL 2 による吃水 40cm の水中モードを Fig. 8 に示す。また、固有振動数の実

測値と計算値の比較を Table 2 に示す。片舷ストラット基部固定の場合の H, X, α 型モードに相等するものが、左右舷で逆相 (A 型)、同相 (B 型) の対になって現われていることがわかる。この他、片舷モデルでは現われなかった捩れモード (TORS)、上甲板の曲げ主体モード (DECK) が含まれている。

2次元付加水質量マトリックスを J 値で修正した場合、3次元流れの影響はモードに応じ自動的に考慮され、H 型モードや上甲板の曲げモードについては、CAL 1 と CAL 2 の固有振動数に大差がないことがわかる。

実測値と計算値を比較すると、全般的に良い一致がみられるが、とくに左右舷同相型 (B 型) モードに関しては、計算による固有振動数の方が実測値よりも低くなっているのがめだつ。このことは、 J 値がほぼ 1 に近いと考えられる H-B 型モードについてもいえることから、原因は3次元流れの影響というよりは、むしろ2次元付加水の算定法にあると考えられる。すなわち、2次元付加水の算定は、片舷のモデルに対し行なったために、両舷の相互作用の影響が入っていない。また、断面形状が剛としての上下・左右振動から付加水質量を算定したが、実際には Fig. 8 からわかるように、断面内でストラットが弾性変形しているばかりでなく、水中 H-B 型、X-B 型モードでは吃水下に振動の節があり、これらの影響が計算では十分反映されていないものと考えられる。

5 あとがき

従来、梁状の船体振動に対し、考案された3次元修正係数の考え方を、有限要素法による固有振動解析に適用するため、2次元付加水質量マトリックスを直接修正する手法を考案し、3次元の接水構造物である半没水型双胴船の模型実験によってこの有用性を確めた。

7つの振動モードに対し、実測固有振動数と計算値を比較したところ、空中、水中ともに全般的に比較的良好一致が認められた。

なお、固有値解析および (2) 式の連立方程式の計算は、MSC-NASTRAN を用いて行なった。

謝 辞

本研究に関して、種々のご助言をいただきました吉識雅夫 東京大学名誉教授、熊井豊二 九州大学名誉教授、

Table 1 Comparison of natural frequencies for endfixed model and measured J value

Draft Mode	In Air (Hz)		In Water (Hz)
	d = 0		d = 200	d = 300	d = 400					
	EXP.	CAL.	EXP.	EXP.	EXP.	CAL. F.E.M.	CAL. Lewis F.	J		
H	12.5	12.8	5.7	4.6	4.3	4.3	4.2	0.994		
X	24.4	24.0	12.3	10.1	9.0	8.3	8.2	0.840		
α	52.5	53.2	26.5	22.5	21.1	17.5	17.2	0.646		

藤田 譲 東京大学教授に、厚くお礼申し上げます。

また、実験および計算に協力された、当社解析技術室の金広和彦氏に感謝します。

参考文献

- 1) O. C. ツィエンキヴィッツ：マトリックス有限要素法，培風館（1970），p. 235.
- 2) 寺前哲夫：有限要素構造解析法の研究（第6報），石川島播磨技報 Vol.12, No.5（1972），p. 466.

Fig. 7 Natural vibration modes and frequencies for end fixed model

Table 2 Comparison of natural frequencies for full model

Mode	In Air (Hz)			In Water d=400 (Hz)				
	EXP	CAL	CAL/EXP	EXP	CAL1 2-Dim.	CAL2 3-Dim.	CAL/EXP	CAL2/EXP
H-A	14	14.7	1.05	4.6	4.6	4.6	0.99	0.99
TORS	19	17.0	0.89	13.1	11.4	11.5	0.87	0.88
H-B	21	20.9	1.00	12.3	9.6	9.6	0.78	0.78
X-A	27	28.7	1.06	10.2	9.3	10.0	0.91	0.98
X-B	35	34.0	0.97	20.3	16.4	16.7	0.81	0.82
DECK	48	48.1	1.00	32.4	31.9	31.9	0.98	0.98
X-A	58	63.3	1.09	—	18.8	22.7	—	—
X-B	60	63.8	1.06	24.9	18.9	22.8	0.76	0.92

Fig. 8.1 Natural vibration modes and frequencies for full model in air

Fig. 8.2. Natural vibration modes and frequencies for full model in water