

大規模弾性浮体の固有振動解析

EIGENVALUE ANALYSIS OF LARGE-SCALE FLEXIBLE FLOATING STRUCTURES

渡邊英一*、宇都宮智昭**、谷垣信吉***、中井幸治****、関田欣治*****

Eiichi WATANABE, Tomoaki UTSUNOMIYA, Shinkichi TANIGAKI, Koji NAKAI and Kinji SEKITA

*Ph.D., 工博 京都大学教授 工学部 土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

**工博 京都大学助手 工学部 土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

***京都大学大学院 工学研究科 交通土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

****工修 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 (〒229 相模原市西橋本5-9-1)

*****工博 新日本製鐵(株) 鉄構海洋事業部 (〒229 相模原市西橋本5-9-1)

This paper presents the eigenvalue analysis of large-scale flexible floating structures such as floating runway. For large-scale offshore structures, the elastic deformation due to waves can not be eliminated in the wave-response analysis, and the interaction effect of the elastic body with fluids should be considered. The former studies about the mat-like floating structures have indicated that the natural periods of such structures may fall into the range of the incident wave periods, and in such a case resonance phenomena will be observed. Therefore, the eigenvalue analysis of the floating structures are found to be important. In this paper, the eigenvalue analysis of the floating structures including added mass and hydrodynamic damping are performed. The numerical results are compared with the experimental results, in which the good agreement is obtained.

Key Words: eigenvalue analysis, flexible floating structure, hydroelasticity

1. 序言

浮体式構造物は、海洋の特定の場所に長期間係留されるためその間常に波浪や風による自然外力を受けることになる。そのため施設としての機能性や安全性を検討する上で、波浪による動揺・応答特性を把握することは極めて重要である。従来の小規模な浮体構造物では、構造物を剛体とみなし、波浪入力に対する6成分の剛体運動を求め、これをもとに断面力の算出を行っている。しかし、浮体式海上空港のような超大型浮体においては、構造物の高さに比べて水平方向の寸法が大きく相対的に曲げ剛性が低下するため、構造物の弾性変形の影響を考慮した解析が必要不可欠となる¹⁾。そこで近年、浮体の弾性変形と流体との相互作用を考慮した波浪応答解析についての研究が数多くおこなわれるようになった^{2)~8)}。

著者らも、超大型ポンツーン浮体の断面2次元モデルに関して、一体弾性浮体模型を用いた実験ならびに直接周波数応答解析による波浪応答解析を実施してきた⁷⁾⁸⁾。その中で、大規模弾性浮体の低次の固有周期は数秒～数10秒となり、入射波の周期と重なるため、流体中での固有振動数及び固有モード(Wet mode)の把握が特に重要となることがわかってきた。しかし、境界要素法(BEM)により生成される流体力マトリクス(付加質量及び造波減衰)は周波数依存性を有するため、通常の固有値解析手法をそのまま用いることはできず、若干の工夫を要する。また流体中での弾性構造物の固有振動解析に関する研究は従来より多くみられるが⁹⁾、大型弾性浮体に関して実験的検証までおこなった研究は余りみあたらないようである¹⁰⁾。

そこで本論文では、ポンツーン大型浮体に関して、その流体中での固有振動解析ならびにその検証実験の結果について報告する。また水深が固有周期に与える影響や、モード解析手法の適用性についても報告する。

2. 解析方法

2.1 弾性浮体の流体力マトリクスの計算法

本研究では鉛直面に関する断面2次元問題を考える。解析に使用する座標系を図-1に示す。一定水深 h の海域に浮体構造物があり、 x 軸の負の方向から角周波数 ω の規則波が構造物に入射するものとする。この時、浮体運動は入射波と同じ角周波数 ω を有する調和振動となり、次式で表せる。

$$X_j = \bar{X}_j e^{-i\omega t} \quad \text{for } j=1,2,\dots,N \quad (1)$$

ただし、 X_j は節点の j 自由度に対する運動変位を、 $\bar{X}_j$ は運動変位振幅を、 i は虚数単位を表す。浮体を剛体として扱うときには $N=3$ (2次元)または $N=6$ (3次元)となるが、ここで扱う2次元弾性浮体においては、浮体没水部表面における節点の総自由度を N とする。

流体の粘性と圧縮性を無視し、また流体運動は非回転であるとする。この時、速度ポテンシャル Φ が存在し、場の流体運動はこれによって表現できる。固有振動解析を実施する上においては入射波を考えなくてよいから、速度ポテンシャル Φ を、各運動自由度 j に対する浮体運動に伴う発散波の速度ポテンシャル ϕ_j の線形和で表現することができる。すなわち、

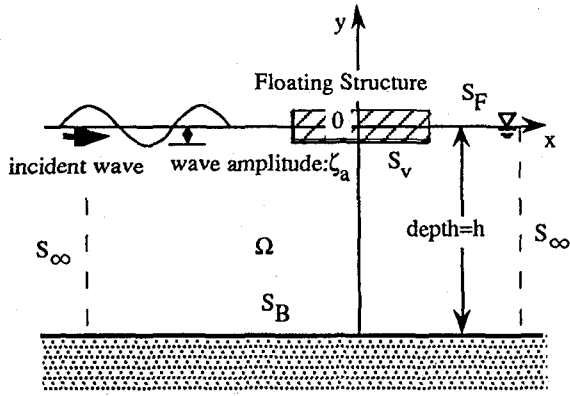


図-1 座標系及び境界の定義

$$\Phi = \sum_{j=1}^N \dot{X}_j \phi_j \quad (2)$$

とする。ここで、 $\dot{X}_j$ は j 自由度に関する運動速度であり、 ϕ_j は j 自由度方向の単位速度振幅に対応した複素ポテンシャルを表すことになる。

図-1に示す座標系及び境界の定義を参照して、速度ポテンシャル Φ の満たすべき支配方程式及び境界条件は以下のようになる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{in } \Omega) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\omega^2}{g} \Phi = 0 \quad (\text{on } S_F) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (\text{on } S_B) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_n \quad (\text{on } S_V) \quad (6)$$

ここで n による微分は浮体表面における外向き法線方向微分を表し、 v_n は浮体表面各点の法線方向速度を表す。また、 g は重力加速度である。さらに、無限境界において Sommerfeld の発散条件を満たす必要がある。

式(6)に式(2)を代入し、流体運動速度と浮体運動速度の浮体表面における外向き法線方向成分を等置すると、

$$\sum_{j=1}^N \dot{X}_j \frac{\partial \phi_j}{\partial n} = \sum_{j=1}^N \dot{X}_j n_j \quad (\text{on } S_V) \quad (7)$$

となる。ここで、 n_j は j 自由度の単位運動速度に対する浮体表面の法線方向速度分布を表す形状関数を表す。

式(3)～式(7)が $\dot{X}_j$ にかかわらず成り立つためには、式(3)～式(5)がそれぞれ ϕ_j に対して独立に成立するとともに、次式が成り立てばよい。

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = n_j \quad (\text{on } S_V) \quad (8)$$

以上で ϕ_j についての支配方程式及び境界条件が定まったことになる。

浮体表面に作用する動的圧力 P は、全速度ポテンシャル式(2)を用いて、線形化 Bernoulli 式より次式で求められる。

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\rho \left(\sum_{j=1}^N \ddot{X}_j \phi_j \right) \quad (9)$$

ここに、 ρ は流体密度である。

外力ベクトルを F 、その成分を f_k で表すと、 n_k を用いて

$$f_k = -\int_{\Gamma} P n_k d\Gamma \quad (10)$$

となる。ただし、積分範囲 Γ は浮体の没水表面を表す。式(9)を式(10)に代入すると、 f_k は次式のように変換できる。

$$f_k = -\sum_{j=1}^N \ddot{X}_j a_{kj} = -\sum_{j=1}^N \ddot{X}_j \text{Re}[a_{kj}] - \sum_{j=1}^N \ddot{X}_j \omega \text{Im}[a_{kj}] \quad (11)$$

ただし、

$$a_{kj} = -\rho \int_{\Gamma} \phi_j n_k d\Gamma \quad (12)$$

である。これをマトリクス表示すると、

$$F = -M_a \ddot{X} - B \dot{X} \quad (13)$$

$$M_a = \text{Re}[a_{kj}] \quad (14)$$

$$B = \omega \text{Im}[a_{kj}] \quad (15)$$

となる。ここで、 M_a : 付加質量マトリクス、 B : 造波減衰マトリクス、 $X = \{X_k\}$: 変位ベクトルである。

浮体の質量マトリクスを M 、静水圧的復元力や線形係留力によるバネ定数および弾性浮体部の FEM モデルよりなる剛性マトリクスを K とおき、構造減衰を無視すると次の運動方程式が成り立つ。

$$(M + M_a) \ddot{X} + B \dot{X} + KX = 0 \quad (16)$$

ここで、 M_a, B は一般に実対称マトリクスとなることが、文献¹¹⁾と同様の手法により容易に証明できる。

2.2 固有値解析

固有値解析は次の3種類について行った。

1. 流体力マトリクスを考慮しない場合

$$(\lambda M + K)X = 0 \quad (\text{空中振動}) \quad (17)$$

2. 付加質量マトリクスのみを考慮した場合

$$\{\lambda(M + M_a) + K\}X = 0 \quad (\text{水中非減衰振動}) \quad (18)$$

3. 流体力マトリクスを考慮した場合

$$\{\mu^2(M + M_a) + \mu B + K\}Z = 0 \quad (\text{水中減衰振動}) \quad (19)$$

M : 質量マトリクス M_a : 付加質量マトリクス

B : 造波減衰マトリクス K : 剛性マトリクス

X : 実固有ベクトル Z : 複素固有ベクトル

λ : 実固有値

μ : 複素固有値

式(17)、(18)では実固有値解析の標準解法を使用できるが、式(19)の場合には、複素固有値解析を行う必要があるため、ここでは NASTRAN に用意されている Hessenberg 法を使用した。

解析においては、実際の設計計算に対する適用性を高めるため、極力 NASTRAN を利用した解析を実施した。すなわち、式(16)において NASTRAN による計算が困難であるのは流体力マトリクスの算出であるため、あらかじめこれを

BEMプログラムにより計算しファイルに保存しておく。次にNASTRANを利用して構造物のFEMによるモデル化と固有値解析を実施するが、この時点で先のファイルから流体力マトリクスを読み込めばよい。ここで、マトリクスの読み込みにはDMIG(Direct Matrix Input at Grid point)命令を用いた。

3. 実験概要

想定する実機を、長さ5,000m、幅1,000m、高さ4.5mの鋼製箱形浮体とする。そのデッキ構造をウェブを15m間隔に配置した面構造で、フランジ厚を18mm、ウェブ厚を28mmとすれば、100m幅当たりの断面剛性は約 $5 \times 10^9 \text{ kNm}^2$ となる。ここではこの短辺方向に波が入射する場合についての断面2次元問題を考える。

模型の呼称と寸法を表-1に示す。模型寸法は想定実機の1/100スケールを基準に決定した。このうちBモデルが想定実機の断面剛性に相当する基準モデルで、AモデルとCモデルはそれぞれの断面剛性の応答に及ぼす影響を調べるためのものである。なお、モデルの剛性の決定に当たってはFroudeの相似則によった。模型はいずれも幅0.5m、比重0.22、ヤング率103MPa（鋼材の約1/2000）のポリウレタン製の板を接合したものである。

実験は、新日本製鐵（株）相模原技術センター内の2次元造波水路（幅2.5m、長さ68m）において実施した。幅が0.5mの模型を使って断面2次元の実験を行うために水路を鉛直板により2つに区切り、幅0.5m相当分を実験水路とした。設置水深はいずれも1.1mとした。また波浪応答実験時⁷⁾における波上側で、線形バネによる水平方向の係留を行っている。A,B,Cモデルそれぞれについて自由振動実験を行い、固有周期の計測ならびにモード形状の観察を行った。

4. 解析モデル

解析モデルの概要を図-2及び図-3に示す。浮体本体には2節点梁要素と4節点線形膜要素を使用した。また静水圧的復元力は、浮体底面節点に鉛直方向に接続したバネ要素による。

表-1 模型諸元

呼称	長さ (m)	板厚 (mm)	喫水 (mm)	比重	剛性比
A	10	76	16.72	0.22	8
B	10	38	8.36	0.22	1
C	10	19	4.18	0.22	1/8

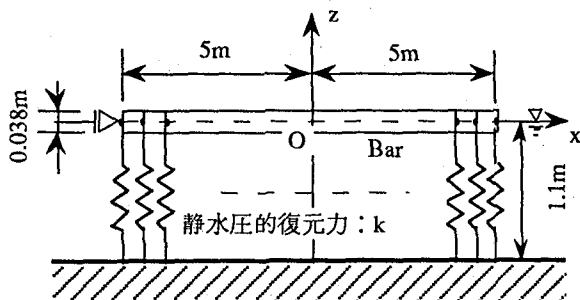


図-2 2節点梁要素解析モデル

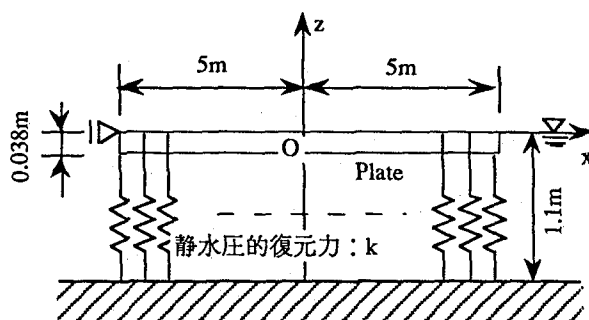


図-3 4節点線形膜要素解析モデル

り、係留は端点の水平方向の自由度を拘束することによりモデル化した。なお、膜要素を用いた解析においては奥行き方向の拘束はないものとし、平面応力問題とした。

5. 解析結果と考察

5.1 水中非減衰振動の固有振動解析と解析モデルの選択

まずBモデル、水深1.1mで、振動周波数0.35Hz時における付加質量のみを考慮した場合について、各モデルで分割数を変えて計算を行った。その解析結果を表-2に示す。解析法についてはHessenberg法を用いた。ここで、B100とは4節点膜要素で長さ方向に100分割したモデルを表し、Bar100とは2節点梁要素で長さ方向に100分割したモデルを表している。

どのモデルについても、高次モードで多少の差はみられるが、低次モードでの一致度は非常に高い。膜要素と梁要素、分割法による差が小さいため、以後の解析は、CPU Timeが短く分割数として適当なBar100で行う。

表-2 Bモデルの水中非減衰振動時の固有周波数(Hz)

Model	B25	B100	Bar100	Bar200
CPU	0m04s	1m46s	0m17s	1m59s
Mode 1	0.158	0.157	0.157	0.158
2	0.287	0.284	0.284	0.284
3	0.436	0.428	0.426	0.427
4	0.528	0.514	0.513	0.514
5	0.693	0.661	0.658	0.659
6	0.781	0.735	0.731	0.731
7	1.011	0.918	0.910	0.910
8	1.184	1.058	1.042	1.038

5.2 水中非減衰振動の固有値収束計算

付加質量には周波数依存性があるため、厳密には付加質量を算出する際の周波数と算出された固有周波数が一致する必要がある。そこでBモデルについて、付加質量を算出する際の周波数を0.20Hzから1.20Hzまで変化させ、それぞれに対する水中非減衰振動の固有周波数を算出し、表-3に示す。次に同表において計算された固有周波数と付加質量算出時の周波数が最も近いものを選び出し、これを表-4に示し、実験値と比較する。厳密にはより桁数を上げた収束計算が必要だが、付加質量の算出ならびに固有値解析は高コストな解析でもあるため、ここではこのような簡便な収

束計算によった。しかしながら、表-3からも明らかな通り、この程度の収束計算でも後に実験と比較する3次以上のモードにおいては最大でも3.5%（7次）の相対誤差の精度で固有周波数が得られていることがわかる。表-4において、Added Massは付加質量が浮体に一様に分布すると想定した時の、固有周波数から逆算した単位長さ当たりの付加質量である。実験結果と解析値はおおむね良好に一致しており、特に高次モードでの一致度が高い。

図-4に空中振動及び水中非減衰振動の1次から4次までのモード図を示す。水中非減衰振動のモード図では、通常の空中振動のモード図と違った特徴がみられる。際だった特徴としては、水中非減衰振動における両端での振幅が、特に低次モードにおいて、空中振動のそれと比較して小さくなっている。これは、両端での振幅が大きいと流体に与える運動エネルギーが増大するためと考えられる。

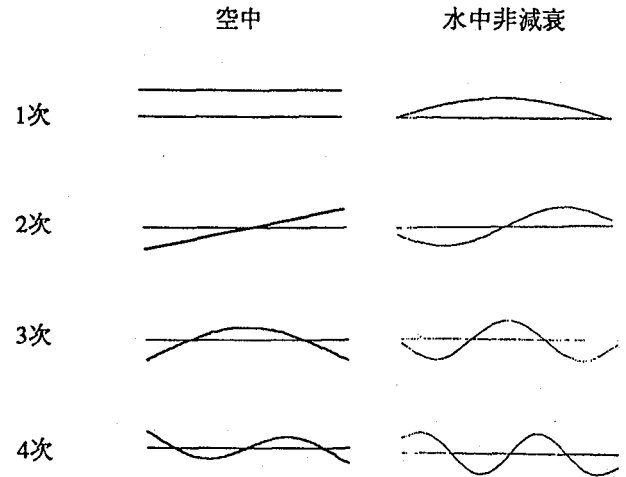


図-4 振動モード図

表-3 Bモデルの水中非減衰振動の固有周波数(Hz)の変化

Freq.(Hz)	0.20	0.30	0.35	0.40	0.50	0.60
Mode 1	0.158	0.157	0.157	0.157	0.156	0.154
2	0.254	0.277	0.284	0.287	0.291	0.292
3	0.428	0.427	0.426	0.425	0.423	0.421
4	0.478	0.505	0.513	0.520	0.526	0.528
5	0.661	0.659	0.658	0.657	0.654	0.650
6	0.698	0.721	0.731	0.739	0.749	0.754
7	0.913	0.911	0.910	0.909	0.907	0.905
8	1.023	1.036	1.042	1.048	1.056	1.061
Freq.(Hz)	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Mode 1	0.154	0.154	0.156	0.158	0.156	0.154
2	0.292	0.292	0.296	0.300	0.298	0.295
3	0.419	0.419	0.424	0.428	0.426	0.421
4	0.528	0.531	0.540	0.547	0.546	0.540
5	0.649	0.653	0.667	0.676	0.673	0.665
6	0.757	0.765	0.793	0.817	0.816	0.806
7	0.905	0.916	0.960	0.995	0.992	0.973
8	1.065	1.076	1.130	1.212	1.211	1.183

表-4 固有周波数(Hz)の実験値と収束させた解析値の比較

Mode	1	2	3	4
実験値			0.344	0.398
Analysis (Freq.)	0.158 (0.20)	0.277 (0.30)	0.425 (0.40)	0.526 (0.50)
Added Mass [ton/m]	9.942	3.229	1.507	0.906
Mode	5	6	7	8
実験値	0.500	0.752	0.870	1.190
Analysis (Freq.)	0.649 (0.70)	0.765 (0.80)	0.995 (1.00)	1.183 (1.20)
Added Mass [ton/m]	0.623	0.497	0.350	0.318

5.3 実験値と、空中振動・水中非減衰振動・水中減衰振動の解析値の比較

次にBモデルについて、空中振動、水中非減衰振動、水中減衰振動それぞれについて5.2と同様の収束計算を行い、固有振動解析を行った。その解析値と実験値を表-5に示す。表-5において、空中振動の解析結果だけが実験値とかけ離れている。これらのことより、付加質量が固有周波数に与える影響が大きいこと、固有周波数のみの評価であれば特に高次モードにおいては造波減衰の影響が比較的小さいため、水中非減衰振動に関する解析で十分であることが分かる。なお、全般に解析値の方が実験値より大きな固有周波数を与えており、これは低次モードほど顕著となるが、その原因として解析では考慮されていない粘性減衰の影響が挙げられる。また水中減衰振動に関する解析値において、造波減衰（臨界減衰比で表示）の値が低次モードになるほど大きくなっていることがわかる。

以降の解析においては付加質量のみを考慮した水中非減衰振動で解析を行う。

表-5 Bモデルの固有周波数(Hz)

モード 次数	実験値	空中 振動	水中非減 衰振動	水中減衰振動	
				固有周波数*	臨界減衰比
1		5.451	0.158	0.143	0.77
2		5.451	0.277	0.288	0.30
3	0.344	5.458	0.425	0.398	0.29
4	0.398	5.501	0.526	0.509	0.18
5	0.500	5.639	0.649	0.595	0.17
6	0.752	5.950	0.765	0.701	0.13
7	0.870	6.512	0.995	0.848	0.10
8	1.190	7.379	1.183	1.171	0.05

* 減衰固有周波数

5.4 剛性による固有周波数の変化

次にA,B,C各モデルでの解析値（5.2と同様な収束計算による）及び実験値とモード次数の関係を図-5に、剛性によるモード次数と付加質量の関係を図-6に示す。図-6のAdded

Massは表-4のものと同様にして算出した。各モデルともに実験値の方が解析値よりやや低い固有周波数を与えており、特に低次モードにおいて顕著である。浮体剛性の固有周波数への影響は高次モードにあらわれており、剛性が高い方が固有周波数も高くなっている。一方、浮体剛性が固有周波数に与える影響は、低次モードでは比較的少なくなっている。これは、低次モードにおいては静水圧的復元力ならびに付加質量が固有周波数に与える影響が、浮体の剛性が固有周波数に与える影響と比較して大きいと考えられる。また図-6においては、付加質量はモード形状に強く依存するため、浮体剛性に関わらず、同じになっているものと思われる。

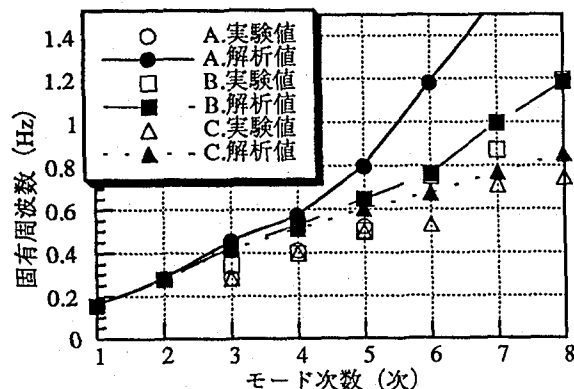


図-5 各モデルの実験値と解析値の比較

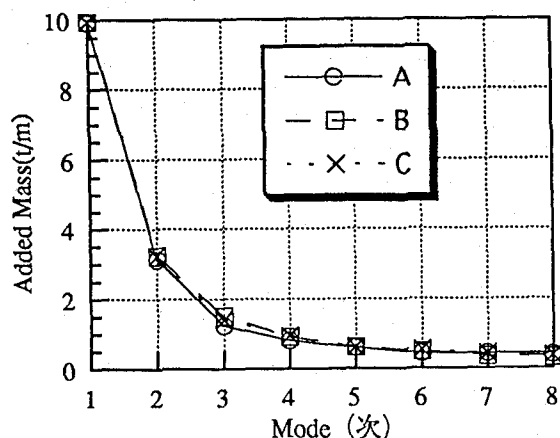


図-6 剛性によるモードと付加質量の関係

5.5 水深の変化による固有周波数の変化

これは実験では行われていないが、同じBモデルで水深を変化させてその影響を検討する。解析を行った水深は、0.2m, 0.5m, 1.1m, 2.0mである。モード別の水深と固有周波数の関係を図-7に、水深によるモード次数と付加質量の関係を図-8に示す。

水深を変化させることにより、固有周波数も大きく変化する。図-8に示すとおり、水深が浅いと単位長さ当たりの付加質量が大きくなっている。つまり、水深が変化することにより付加質量が大きく変化し、固有周波数に影響していると考えられる。しかし、水深1.1mと2.0mを比較すると、低次モードで多少の差があるが高次になると差は小さくなっている。これは水深2.0mの5次以上の高次モードでの

周波数は深海波領域となり、付加質量の変化が小さくなるためであると考えられる。つまり、水深が深い場合にはさほど水深に気を配ることはないが、浅い場合には水深に十分注意を払うことが必要となる。

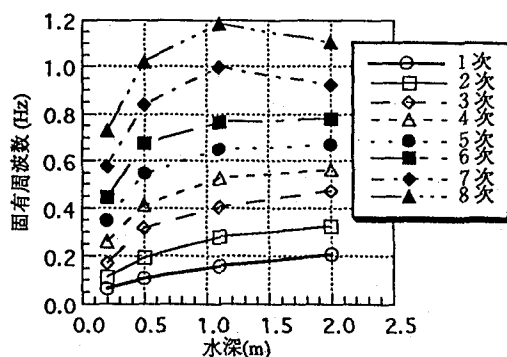


図-7 水深と固有周波数の関係

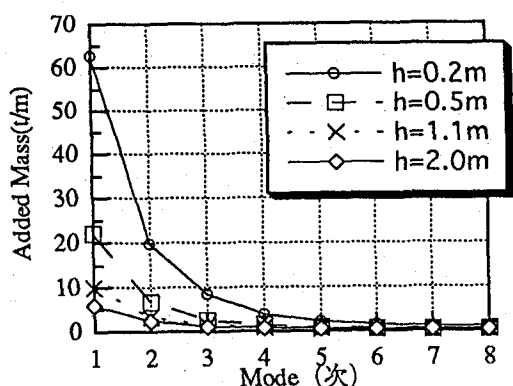


図-8 水深によるモードと付加質量の関係

5.6 モード応答解析への適用

ここで固有値解析結果を利用し、モード応答解析への適用を考える。モード応答解析は、0.90Hzの規則波を想定し、この周波数に対して求められる固有値及び固有ベクトルを用い、また減衰に関してはモード減衰として水中減衰振動の解析により得られる減衰係数を使用する。また比較解析として、同じ0.90Hzの規則波における直接周波数応答解析を行う。その定常応答変位振幅の解析結果を、図-9、及び図-10に示す。ここでHou nとは、Householder法を用いてn次モードまでを考慮したモード応答を表す。

形状としては直接周波数応答解析の結果と似てはいるが、両端において振幅のずれが認められる。これは減衰定数としてモード減衰を使用しなければならないことが原因として挙げられる。特に、造波減衰マトリクスでの非対角成分が厳密に考慮されていないことの影響が大きいと思われる。いずれにせよ、モード減衰を用いたモード応答解析を行うことは、厳密な応答評価を行いたいときには不適切であると考えられる。

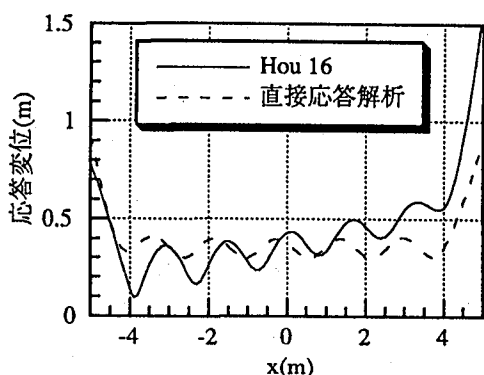


図-9 モード応答解析と直接応答解析の比較 (その1)

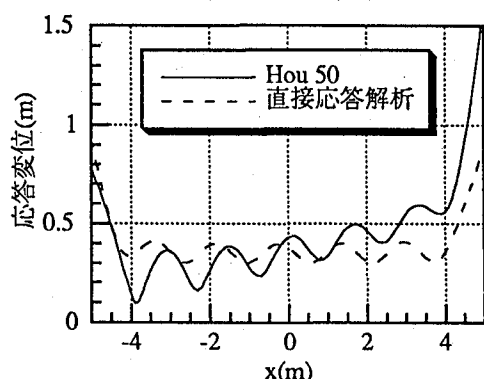


図-10 モード応答解析と直接応答解析の比較 (その2)

6. 結論

本研究では大規模な浮体を取り上げ、流体力マトリクスを考慮した場合としない場合の固有振動解析、また剛性、想定水深の違うモデルでの解析を行い、これらを比較した。得られた結論は以下のとおりである。

(1)付加質量を考慮した場合としない場合では固有周波数が大きく異なり、考慮したときの方が遥かに実験値に近い。従って、このような解析を行う際には必ず付加質量を考慮しなければならない。

(2)浮体剛性が固有周波数に与える影響は低次モードでは比較的少ない。これは、低次モードにおいては静水圧的復元力ならびに付加質量が固有周波数に与える影響が、浮体剛性のそれと比較して大きいととえられる。

(3)固有周波数は水深により大きく変化する。しかし深海

波領域となる水深では固有周波数はあまり変わらない。これは深海波領域では付加質量が水深によりあまり変化しないためである。

参考文献

- 1) (社)日本造船学会海洋工学委員会性能部会編：超大型浮体構造物，成山堂書店，1995。
- 2) Newman, J.N.: Wave effects on deformable bodies, Applied Ocean Research, Vol. 16, pp.47-59, 1994.
- 3) Mamidipudi, P. and Webster, W.C.: The motions performance of a mat-like floating airport, Hydroelasticity in Marine Technology, (Faltinsen, O., et al. eds.), Balkema, pp.363-375, 1994.
- 4) Wang, S., Ertekin, R.C., van Stiphout A.T.F.M. and Ferrier P.G.P.: Hydroelastic-response analysis of a box-like floating airport of shallow draft, Proc. 5th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., pp.145-152, 1995.
- 5) 居駒知樹，増田光一，前田久明：超大型浅喫水浮遊式構造物の弾性応答に関する研究，第13回海洋工学シンポジウム，pp.185-192，1995。
- 6) 濱本卓司，藤田謙一，林 孝幸：ユニット連結型浮遊式構造物の3次元波浪応答解析，第13回海洋工学シンポジウム，pp.223-230，1995。
- 7) 中井幸治，関田欣治，太田英美，宇都宮智昭，渡邊英一：大規模弾性浮体の波浪中挙動の実験と解析，第13回海洋工学シンポジウム，pp.209-216，1995。
- 8) 宇都宮智昭，渡邊英一，岡村謙作，中井幸治，関田欣治，太田英美：弾性変形を考慮した大型ボンツーン浮体の波浪応答特性について，海岸工学論文集，第42巻，pp.961-965，1995。
- 9) 田尻太郎，三上 隆，芳村 仁：FEMとBEMを用いた水中構造物の自由振動解析，構造工学論文集，Vol.40A，pp.29-37，1994。
- 10) 濱本卓司，徳淵正毅，田村嘉章，田中彌壽雄：Unit型大型浮遊式海洋構造物の実験モード解析，第13回海洋工学シンポジウム，pp.201-208，1995。
- 11) Newman, J. N.: Marine Hydrodynamics, MIT Press, 1977.

(1995年9月18日受付)