多数の浮体で支持された長大な半潜水式 構造体の波浪応答解析

正員 吉 田 宏一郎* 正員 具 滋 三**
正員 岡 徳 昭*

Response Analysis of Huge Semisubmersible Type Structures Supported by a Large Number of
Floating Bodies in Waves

by Koichiro Yoshida, *Member* Ja-Sam Goo, *Member*
Noriaki Oka, *Member*

Summary

A numerical procedure is described for predicting the motions and the structural responses of huge offshore structures supported by a large number of three-dimensional floating bodies of arbitrary shape in waves. The developed numerical approach which is accurate in linear system is based on combination of a three-dimensional source distribution method, wave interaction theory and the finite element method of using the space frame element. Numerical results are compared with the experimental ones of the structural responses of a freely floating semisubmersible type structure supported by 8 lowerhulls and 16 columns in shallow water. The results of comparison confirmed the validity of the proposed approach. The method presented is applicable to huge structures for ocean space utilization which seem to be brought into practical use in the future.

1. 緒 言

著者らは前報¹⁾において、三次元特異点分布法と Kagemoto らの相互干渉理論^{2),3)}を基礎として、多数の三次元任意形状浮体間の流体力学的相互干渉効果を考慮して波強制力、運動応答を効率よく解析する方法を開発した。これまでに発表された代表的な相互干渉効果に関する計算値及び実験値と比較することにより、この解析法の精度を確認すると共に、4 行 10 列の 40 個の箱型浮体群について波強制力、運動応答を解析した。

一方、著者らは以前に、半潜水式構造や緊張係留プラットフォームの上部構造を三次元弾性骨組と仮定して波浪応答を解析する方法を発表した^{4)~8)}。この方法は細長体仮定に基づく流体力の近似評価、構成部材間の流体力学的相互干渉の無視、マトリックス構造応答解析法に基づくモデル化などから成立している。

本研究では、上述した波浪応答に関する流体力評価の精密化と上部構造の弾性骨組仮定とを組み合わせ、構造体に

よる海洋空間利用の推進のために必要となる、多数の大型浮体とこれらにより支持された大規模上部構造とから構成される半潜水式構造体の波浪応答を精度よく解析する方法を開発した。8 箇のコラムーローハル型支持浮体とリング状甲板梁からなる半潜水式リング状構造体の波浪強制実験を実施し、主要構造応答である甲板梁の垂直曲げ歪の周波数応答関数について良好な相関が確認され、本方法の有効性が明らかとなった。

2. 理論計算法

本論文では三次元任意形状浮体間の相互干渉については簡単に触れるので、詳細については先に発表した著者らの論文¹⁾を参考にされたい。まず、理論の仮定として、上部構造は三次元線形弾性骨組構造とする。流体は非圧縮性、非粘性とし、流体の運動は非回転であるとする。また、弾性応答と入射波の流体運動は微小振幅周期運動をするものとし、それぞれの定常状態を論ずることとする。また、自由表面はすべての方向に無限に広がっているものとし、水深が有限の場合は水深一定とする。

Fig. 1 のように平均水面上の空間固定された局所デカルト座標系 $o_i - x_i y_i z$ ($i = 1 \sim N$) を持つ N 個の三次元任意

* 東京大学工学部

** 東京大学大学院工学系研究科

である。また、 G_j は支持浮体 j の没水表面上の Green 関数である。

従って、 N 個の支持浮体の取付節点を含む系の全体運動方程式は次のようになる。

$$([K] - \omega^2[M] - i\omega[C])\{\eta\} = \{F\} \quad (7)$$

ここで、 $[K]$ は上部構造の剛性行列、 $[M]$ は上部構造の質量行列、 $[C]$ は上部構造の減衰行列である。 $\{\eta\}$ は総自由度の複素変位振幅 vector である。また、 $\{F\}$ は複素外力振幅 vector であり、その成分は支持浮体の取付節点では式 (6) を用い、他の節点では 0 である。上部構造の剛性行列及び質量行列は上部構造を梁要素と近似して求める。上部構造の減衰行列は Rayleigh 減衰を用いることにする。本 program では汎用性を考えて上部三次元骨組構造のせん断変形及び回転慣性も含むようにし、支持浮体の取付節点以外の節点での境界条件も取り扱うことができる。系の全体運動方程式である式 (7) と式 (5) との連立方程式を解くことによって、総自由度の複素変位振幅 vector $\{\eta\}$ 及び係数 vector $\{A_i\} (i=1 \sim N)$ が得られる。従って、上部構造の内力は要素剛性行列を用いることによって得られるし、支持浮体 j の没水表面上の任意点 (x_j, y_j, z) の変動圧力の複素振幅 P_j は次式によって得られる。

$$\begin{aligned} P_j = i\rho\omega \left[\left(\{a_j\}^T + \sum_{i=1}^N \{A_i\}^T [T_{ij}] \right) \left(\{\phi_j\} + \iint_{S_{m,j}} \{\sigma_j\} G_j ds \right) \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{il} \{R_{il}\}^T [T_{ij}]) \right] \left(\{\phi_j\} + \iint_{S_{m,j}} \{\sigma_j\} G_j ds \right) \\ + \sum_{l=1}^6 (-i\omega\eta_{lj} \phi_{lj}^0) \Big] - \rho g \{ \eta_{3j} + (y_j - y_{mj}) \eta_{4j} \\ - (x_j - x_{mj}) \eta_{5j} \} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 g は重力加速度、 ϕ_{lj}^0 は単独の支持浮体 j が l 方向の単位速度振幅で運動しているときの支持浮体 j の没水表面上の radiation potential である。また、 (x_{mj}, y_{mj}, z_m) は支持浮体 j の取付節点の座標である。このように、本動的応答解析法はある支持浮体に外接する仮想の水底にまで達している鉛直円柱の内側に他の支持浮体が存在してはならないという制限があるものの、線形の範囲内では厳密な計算手法である。

3. 実 験

多数の三次元任意形状支持浮体間の流体力学的相互干渉効果を考慮した運動—構造応答解析法の妥当性の検証のため、Fig. 2 に示す半潜式構造体を用いた水槽実験を行った。材料は全部アクリルであり、没水水深を維持するため、各々の支持浮体に 5.93 Kgf のおもりを二つずつ入れた。上部構造の断面及び支持浮体の寸法の詳細は Fig. 3 に示している。また、浮体の質量は $0.017765 \text{ Kgf} \cdot \text{s}^2/\text{cm}$ 、浮体のみの重心は水面下 20 cm、上部構造を含む場合の浮体の重心は水面下 19.1 cm である。また、浮体のみの重心回り

の x, y, z 軸に関する慣性モーメントは各々 2.76, 6.57, $4.49 \text{ Kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{cm}$ である。但し、これらの基準座標系については後に述べる。また、半潜式構造体の heave 及び pitch の計測された固有周期は各々 1.89 sec (3.32 rad/sec), 1.97 sec (3.19 rad/sec) である。水槽実験は、水深 304 cm、波入射角 180° 、周期 0.55~2.6 sec、波高 2.0~4.5 cm の範囲の規則波によって行われた。波高は容量式波高計で計測された。また、Fig. 2 の上部構造にある黒丸は歪ゲージが貼付されている部分を示し、これにより支持浮体間の中間部分の軸歪、曲げ歪の変動を計測した。また、波上側の支持浮体について変動圧力を計測した。Fig. 3 のローワーハルにある黒丸は圧力計が取付されている一つの部分を示しているが、変動圧力はローワーハルの両側面、上下面の中央部分で計測した。圧力計は共和電業株式会社の PGM-G 型圧力変換器を用いた。変動圧力の計測結果については後の機会に譲りたい。

4. 比較及び考察

半潜式構造体の単独の支持浮体の diffraction 問題及び radiation 問題を解く場合、三次元特異点分布法を用い、支持浮体の没水表面の要素分割数を Fig. 4 のように 344 要素で計算した。また、式 (2) の diffraction potential は振動項を 9 個、単調減少項を 14 個で計算した。半潜式構造体の上部構造の計算は有限要素法を用い、その要素分割を Fig. 5 に示す。黒丸は節点を示し、実線は梁要素を

Fig. 2 Configuration of the test model

Fig. 3 Configuration of the upper structure and the floating body

Fig. 4 Submerged surface of the floating body represented by 344 panels

示す。節点番号がある部分が支持浮体の取付節点である。総節点数 32, 総要素数 32, 総自由度数 192 である。また, Fig. 5 における座標系 XYZ は全体座標系であり, 支持浮体の位置, 上部構造の節点座標, 支持浮体の取付節点以外の節点の境界条件, 節点変位, 節点反力はこの座標系を用いる。また, 座標系 xyz は三次元特異点分布法を用いる場合の基準座標系であり, 支持浮体の没水表面の要素座標, 支持浮体の重心, 支持浮体の慣性モーメント, 支持浮体の運動基準点 (即ち, 支持浮体の取付節点の座標) はこの座標系を用いる。また, 座標系 $x'y'z'$ は有限要素法を用いる場合の要素座標系であり, 上部構造の要素の断面二次モーメント, 要素のねじり係数, 要素内力はこの座標系を用いる。計算結果と実験結果との比較例を Fig. 6, Fig. 7 に示す。いずれの図においても, 横軸は入射波の円周波数 ω (rad/sec) であり, 黒丸は実験値, 実線は支持浮体間の流体力学的相互干渉効果を考慮した計算値, 点線は単独の支持浮体の流体力学及び波強制力は三次元特異点分布法を用いるものの, 支持浮体間の相互干渉効果を考慮せず, 波の位相だけ考慮した計算値である。また, 実線及び点線は 53 個

Fig. 5 Coordinate system and discretization of the upper structure

の周波数応答を直線で連結したものである。また, 構造の全体減衰行列は全体剛性行列に比例する Rayleigh 減衰を用い, その係数は, 複雑な構造体の場合, 実験的にも精度よく評価することが難しいので, よく用いられる 0.01 を用いた。Fig. 6 は図中の平面図に黒丸で示した場所における単位波振幅当りの軸歪振幅の周波数応答である。Fig. 6 の (b), (c) の 5~7 rad/sec 近傍を除いてほぼよい相関を示している。尚, この 5~7 rad/sec 近傍では Fig. 7 の (b), (c) からわかるように垂直曲げ歪が非常に大きくなり, その影響により値の相対的に小さな軸歪の計測値の誤差が大きくなったものと考えられる⁸⁾。Fig. 7 は単位波振幅当りの垂直曲げ歪振幅の周波数応答である。この曲げ歪が支配的であり, 軸歪より一桁大きくて水平曲げ歪より 2 倍程度大きい。従って, このような半潜水式リング構造体を設計するときは垂直曲げ応力に注意が必要である。また, 相互干渉を考慮した計算値と実験値の相関が比較的によいことがわかる。Fig. 7 の (b), (c) に代表されるように, 相互干渉効果によって peak 値が少し低周波数へ移っていることがわかる。また, 応答が大きい 6 rad/sec 付近で相互干渉効果によって曲げ歪が小さくなっていることと後の運動応答から見ても相互干渉効果はこのような半潜水式構造体に好ましい影響を与えていることがわかる。また, 3 rad/sec 付近での相互干渉を考慮した計算値が少し飛び出しているのは構造体の固有周期の影響であり, この固有周期の近傍では構造体の運動が大きいので, 粘性による減衰の影響が大きいと考えられる。位相だけ考慮した計算はこの付近で計算値が発散する。これは固有周期の近傍での造波減衰を相互干渉を考慮した場合より小さく評価したことによるものであると考えられる。Fig. 8 は単位波振幅当りの水平曲げ歪振幅の周波数応答である。他の場所での応答については大きさ及び傾向がほとんど同じであり, 軸歪或は垂直曲げ歪の傾向と違っていた。これは斜めに配置された支持浮体の yawing モーメントの影響が支配的であろうと考えられる。Fig. 9 は単位波振幅当りのねじりモーメント振幅の周波数応答である。他の場所での応答は紙数の都合で示され

Fig.6 Axial strain responses of the upper structure

Fig. 7 Vertical bending strain responses of the upper structure

Fig.8 Horizontal bending strain responses of the upper structure

Fig.9 Torsional moment responses of the upper structure

(a)

(b)

Fig.10 Motion responses of the upper structure

Fig. 10 Motion responses of the upper structure

ていない波上側の傾向が相当違っていたが、その他はわずかの差がみられる程度であった。Fig. 10の(a)は単位波振幅当りの surge の運動振幅の周波数応答である。また、Fig. 10の(b), (c), (d)は単位波振幅当りの heave の運動振幅の周波数応答である。支持浮体が半潜式であることと上部構造が存在するため、相互干渉の影響があまり目立っていないことがわかる。これは先に発表した拘束を受けない40個の箱型浮体の運動応答と異なる傾向を見せている¹⁾。

5. 結 言

三次元特異点分布法、相互干渉理論及びマトリックス構造応答解析法を組み合わせ、多数の三次元任意形状支持浮体間の流体力学的相互干渉効果と上部構造部材の剛性を考慮して半潜式構造の波浪荷重に対する運動—構造応答を解析する方法を開発し、この手法による計算値と実験値との比較検討結果、本手法の妥当性が確かめられた。また、本解析法は多数の浮体で支持された海洋空間利用構造体のような上部構造の相対的な弾性変形が大きい場合に有効であると思われる。また、支持浮体が半潜式であることと上部構造が存在するため、運動応答の相互干渉効果が余り目立たないことは前報の40個の箱型浮体の運動応答と異なる傾向を見せている。

今後は、著者らが先に発表した中水深域空間利用構造体⁹⁾のような上部構造と支持基礎の弾性変形を含む流体力学問題の構造応答解析手法に対して、引続き研究を進めて行く考えである。また、計算時間(CPU)は1周波数当り、相互干渉を考慮した計算と位相だけ考慮した計算を同時に解く場合、約50 secである(日立M-680H使用)。

参 考 文 献

- 1) 具 滋三, 吉田宏一郎: 多数の三次元任意形状物体間の相互干渉, 日本造船学会論文集, 第165号(1989), p. 193~202.
- 2) Kagemoto, H. and Yue, D. K. P.: Interactions among multiple three-dimensional bodies in water waves. An exact algebraic method, Journal of Fluid mechanics, Vol. 166 (1986), p. 189~209.
- 3) Kagemoto, H. and Yue, D. K. P.: Wave-induced motions of multiple floating bodies, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 161 (1987), p. 152~158.
- 4) 吉田宏一郎, 石川邦照, 飯田国廣: 浮遊骨組構造の周期応答解析, 日本造船学会論文集, 第136号(1974), p. 355~363.
- 5) 吉田宏一郎, 石川邦照: 浮遊骨組構造の周期応答解析(続報), 日本造船学会論文集, 第138号(1975), p. 285~294.
- 6) 吉田宏一郎, 石川邦照: 三次元浮遊骨組構造の周期応答, 日本造船学会論文集, 第143号(1978), p. 286~300.
- 7) 吉田宏一郎, 安藤定雄, 岡 徳昭, 矢後清和: 大型半潜式海洋構造物の波浪応答特性, 第5回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, 1981, p. 39~51.
- 8) 吉田宏一郎, 尾崎雅彦, 岡 徳昭: 緊張繫留プラットフォームの構造応答特性, 日本造船学会論文集, 第152号(1983), p. 329~335.
- 9) 吉田宏一郎, 有馬俊朗, 岡 徳昭: 中水深域空間利用構造体の開発—半潜式リング状構造体の検討—, 日本造船学会論文集, 第165号(1989), p. 203~213.