351

#### (昭和63年5月 日本造船学会春季講演会において講演)

# 半潜水式海洋構造物の波浪中 全体構造応答特性

# 正員 片 山 正 敏\* 宇ノ木 賢 一\*

Overall Structural Response Characteristics of Semi-Submersible Offshore Structure in Waves

by Masatoshi Katayama, Member Ken-ichi Unoki

## Summary

Approaches to the overall structural response analysis of a semi-submersible offshore structure in waves are widely divided into two, i.e. the deterministic method based on design wave and the stochastic method based on statistical prediction.

At present, the former, the deterministic method based on design wave, is more often applied to the design of an actual structure than the latter from the viewpoints of simplicity in computation, etc.

In application of the former, it is also important to study non-linearity in response (effect of wave height) in very high waves.

This paper first presents the results of a tank test that was performed to verify the applicability to practical problems of the approximate overall structural response analysis method in high regular waves based on the finite amplitude and non-linearized theory. In the tank test, a 1/50-scale structural model of a 2-lower hull and 8-column type semi-submersible offshore structure was used.

Subsequently, a prototype model of a semi-submersible offshore structure was used to investigate the non-linearity in response (effect of wave height) in very high waves by performing a numerical analysis, and the degree of its significance lying in the design of an actual structure was also discussed.

## 1緒 言

半潜水式海洋構造物は,海洋開発がより厳しい海象・ 気象条件やより水深の深い海域へと進出するに伴って, 急速に発展してきた。

半潜水式海洋構造物の開発にあたっては,波浪中運動 性能に優れた稼働率の良い全体形状とともに,合理的構 造計画設計を進める上で波浪中構造強度特性に優れた構 造形式の開発が重要な技術的課題である。

半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答解析法とし ては,設計波による決定論的手法と統計的予測による確 率論的手法があるが,現状では計算の簡便さなどによ り,実機の構造設計にあたっては,前者の決定論的手法 が適用されることが多いようである。

微小振幅・線形理論に基づいた Hooft 流の考え方<sup>1)</sup> による波浪中全体構造応答解析法は、すでに我が国にお

\* 三菱重工業(株)技術本部広島研究所

いても多くの研究成果が報告され<sup>2)~6)</sup>,また実用的な全体応答解析システムも開発されて実機の設計に適用されている<sup>7)~13)</sup>。

また,半潜水式海洋構造物の波浪中構造応答に関する 実機計測結果<sup>14)~20)</sup>や水槽試験結果<sup>21)~24)</sup>も発表されてい る。

海洋工学委員会構造分科会では、実機相当モデル(OS モデル)を設定して、全体応答解析プログラムの精度検 証のための比較計算が行われているが、必ずしも解析結 果がすべて一致しているわけではない<sup>25)</sup>。

また、半潜水式海洋構造物の全体構造設計を、設計波 による決定論的手法により行う場合には、大波高下での 応答の非線形性(波高影響)を検討しておくことも大切 である。

このような観点から、本研究では、まず近似的な有限 振幅・非線形理論に基づく全体構造応答解析法の適用性 を検討するため、OS モデルを参考にして製作した 1/50 352

縮尺弾性模型を用いて水槽試験を実施した。続いて実機 相当モデル(OS モデル)について、大波高下での応答 の非線形性(波高影響)を調べるため数値解析を行い、 実機の設計にあたってどの程度の意義を持つかについて 検討した。

# 2 理 論 解 析

# 2.1 基本的仮定および解析法

半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答解析にあた って次のような基本的仮定を設ける。

- 全体構造応答解析にあたっては、立体骨組構造として取り扱うことができる。
- 。流体は非圧縮、非粘性、非回転の理想流体とする。
- ・構成部材の断面寸法は、波長に比較して十分小さく
   (細長体の仮定)、かつ、その流体力学的な相互干渉 は無視できる。
- 外部力学系(係留ラインなど)に作用する流体力学
   的な力は無視できる。
- ・波は微小振幅または有限振幅の深海進行波とし、流体力は変位、速度、加速度で線形表示できる。ただし、変位、速度に関しては一部非線形項を考慮する。
- 構造変形は微小弾性で、運動は重心周りの調和振動 である。
- 風圧力,潮流力,波漂流力などは全体構造の運動変 位にかかわらず一定とし,静的外力として取り扱う ことができる。

各構成部材に作用する力は、慣性力、圧力による力、 相対変位による力、相対速度による力、相対加速度によ る力の5種類と仮定し、部材要素重心を節点とする立体 骨組構造の節点外力(節点集中荷重および分布荷重)と みなす。

慣性力以外の4種類の力のうち,部材要素の変位,速 度,加速度に依存する項は,復原力, radiation force や外部力学系による係留力ならびに Froude-Kriloff force, diffraction force の波強制力などであり,モリ ソン式などにより算定する。

以上から,各波周波数に対する見掛け慣性力,減衰力, 復原力(外部力学系を含む)および波強制力からなる運 動方程式が組立てられる。この運動方程式を解析するこ とにより,6成分の運動振幅,位相が求められ,したが って各構成部材の分担すべき部材力が決定される。

なお,内力応答の解析にあたっては汎用構造解析プロ グラムが使用される。

大波高下での応答解析にあたっては,全体構造の運動 変位や水粒子の運動が小さいという仮定が成り立たなく なり,運動方程式は非線形となる。 このため,"半潜水式海洋構造物の波浪中応答解析に 適用される波周期においては,流体力学的な減衰力に比 べて慣性力の効きの方がはるかに大きいこと"に着目し て,有限振幅・非線形理論により非線形運動方程式を近 似的に解析する方法を採ることとした。

非線形項として取り扱った事項は次の通りである。

- ・流体力計算にあたって、水粒子の変位(静水面でなく波面)および全体構造の6自由度運動変位を考慮する。
- ●非線形減衰力(抗力)および外部力学系による非線
   形復原力(係留力など)を考慮する。
- 2.2 波浪中全体構造応答解析法

紙数の関係で微小振幅・線形理論に基づく解析法は省 略し、以下に有限振幅・非線形理論に基づく解析法につ いて述べる。

全体構造に関する座標系を Fig.1 の通り定義 する。 全体構造系(外部力学系を含む)の周波数応答特性は, 部材要素 *i* に関する(1)~(3)式を解くことにより求 められる。

$$\begin{split} \sum_{i} F_{i}^{W} + \sum_{i} F_{i}^{B} + \sum_{i} F_{j}^{T} = 0 \quad (1) \\ \sum_{i} F_{i}^{WI} + \sum_{i} F_{i}^{C} + \sum_{i} F_{i}^{DR} + \{\sum_{j} (T_{j}^{t} \cdot C_{j}^{I} \cdot T_{j}) \\ + \sum_{k} (T_{k}^{t} \cdot C_{k}^{II} \cdot T_{k})\} \cdot \eta_{\text{static}} = 0 \quad (2) \\ \sum_{i} (T_{i}^{t} \cdot A_{i} \cdot T_{i}) \ddot{\eta} + \sum_{i} (T_{i}^{t} \cdot B_{i}^{I} \cdot T_{i}) \cdot \dot{\eta} \\ + \sum_{i} \{(T_{i}^{t} \cdot B_{i}^{II}) \cdot (T_{i} \cdot \dot{\eta} - \dot{\zeta}_{i})\} \cdot |T_{i} \cdot \dot{\eta} - \dot{\zeta}_{i}| \\ + \sum_{j} (T_{j}^{t} \cdot C_{j}^{I} \cdot T_{j}) \cdot \eta + \sum_{k} \{T_{k}^{t} \cdot C_{k}^{II} \cdot (T_{k} \cdot \eta - \zeta_{k})\} \\ = \sum_{i} (T_{i}^{t} \cdot G_{i}) \cdot \ddot{\zeta}_{i} + \sum_{i} (T_{i}^{t} \cdot B_{i}^{I}) \cdot \dot{\zeta}_{i} \quad (3) \end{split}$$

ただし,

- $F_i^w: 重量ベクトル(基本荷重, バラストなど)$  $F_i^B: 浮力ベクトル$  $F_j^T: 外部力学系(係留ラインなど)の初期張力ベ$
- クトル
- Fi<sup>WI</sup>:風荷重ベクトル
- Fi<sup>c</sup>:潮流力ベクトル
- $F_i^{DR}$ :波漂流力ベクトル



Fig. 1 Coordinate system

半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答特性

T<sub>j</sub>:構造系への外部力学系の着力点 j の変位変換 マトリックス **[100 0**  $(z_j - z_G) - (y_j - y_G)$  $= 0 1 0 - (z_j - z_G)$  $(x_j - x_G)$ 0  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & (y_j - y_g) & -(x_j - x_g) \end{bmatrix}$ 0 (4)x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>:構造系への外部力学系の着力点 j の座標  $x_G, y_G, z_G: 全体構造の重心 Gの座標$ C<sub>j</sub> :構造系への外部力学系の着力点 j における 非線形ばね定数マトリックス  $K_{xj}(X_j)$ 0 0  $K_{yi}(Y_i)$ 0 (5) 0 0  $K_{zj}(Z_j)$  $K_{xj}(X_j), K_{yj}(Y_j), K_{zj}(Z_j):$ 構造系への外部力学系 (係留ラインなど)の着力点 jの変位の関数であ る x, y, z 方向のばね定数  $T_j^t: T_j$ の転置行列  $T_k$ :水面を切る部材要素 kの変位変換マトリックス  $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (z_k - z_G) \end{bmatrix}$  $-(y_{k}-y_{G})^{-}$  $= | 0 \ 1 \ 0 \ -(z_k - z_G) |$ 0  $(x_k - x_G)$  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & (y_k - y_G) & -(x_k - x_G) \end{bmatrix}$ 0 (6) $x_k, y_k, z_k$ : 部材要素 k の重心の座標 C<sub>k</sub><sup>II</sup>: 水面を切る部材要素 k に関する復原力係数 マトリックス  $= 0 \rho g A_k 0$ (7)ρ:海水密度 g:重力加速度 A<sub>k</sub>:部材要素 k の水線面積  $T_k^t: T_k$ の転置行列 η<sub>static</sub>:静的変位ベクトル(風,潮流,波漂流力に対 応する)  $T_i$ : 部材要素 i の変位変換マトリックス  $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ (z_i - z_G) \ -(y_i - y_G)]$  $0 \ 1 \ 0 \ -(z_i - z_G) \qquad 0$  $(x_i - x_G)$  $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & (y_i - y_G) & -(x_i - x_G) \end{bmatrix}$ 0 (8) $x_i, y_i, z_i$ : 部材要素 i の重心の座標  $T_i^t: T_i$ の転置行列 A<sub>i</sub>: 部材要素 i に関する見掛け慣性力係数マト リックス  $M_i + m_{xi}$ 0  $M_i + m_{vi}$ (9) 0 0  $M_i + m$  $M_i: 部材要素 i の質量$ *m<sub>xi</sub>*, *m<sub>yi</sub>*, *m<sub>zi</sub>*: 部材要素 *i* に関する *x*, *y*, *z* 方向付加

質量(波面と動揺を考慮した没水部に ついて)  $\eta: 全体構造系(外部力学系を含む)の重$ 心の動揺変位ベクトル $<math>= \{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$  (10) •:時間に対する微分( $\dot{x} = dx/dt$ )を示す。  $B_i^I: 部材要素 i$ に関する造波減衰力係数マトリック ス(波面と動揺を考慮した没水部について)

$$= \begin{bmatrix} N_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & N_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & N_{zi} \end{bmatrix}$$
(11)

- N<sub>xi</sub>, N<sub>yi</sub>, N<sub>zi</sub>: 部材要素 *i* に関する *x*, *y*, *z* 方向造波 減衰力係数(波面と動揺を考慮した没 水部について)
  - B<sub>i</sub><sup>II</sup>: 部材要素 i に関する x, y, z 方向減衰
     力(抗力)係数マトリックス(波面と 動揺を考慮した没水部について)

$$= \begin{bmatrix} D_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & D_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & D_{zi} \end{bmatrix}$$
(12)

- D<sub>xi</sub>, D<sub>yi</sub>, D<sub>zi</sub>: 部材要素 i に関する x, y, z 方向の抗 力係数(波面と動揺を考慮した没水部 について)
  - **く**<sub>1</sub>:入射波の水粒子の部材要素*i*における 変位ベクトル

$$= \{\zeta_{xi}, \zeta_{yi}, \zeta_{zi}\}$$
(13)

$$= \{\zeta_{xk}, \zeta_{yk}, \zeta_{zk}\}$$
(14)

G<sub>i</sub>:部材要素 i に作用する波強制力の慣性力係数マト リックス(波面と動揺を考慮した没水部について)

$$= \begin{bmatrix} \rho V_i + m_{xi} & 0 & 0 \\ 0 & \rho V_i + m_{yi} & 0 \\ 0 & 0 & \rho V_i + m_{zi} \end{bmatrix}$$
(15)

 $V_i$ : 部材要素iの体積

抗力係数は次式による。

$$D_{xi} = \frac{1}{2} C_{Dxi} \cdot \rho \cdot A_{xi}$$

$$D_{yi} = \frac{1}{2} C_{Dyi} \cdot \rho \cdot A_{yi}$$

$$D_{zi} = \frac{1}{2} C_{Dzi} \cdot \rho \cdot A_{zi}$$

$$(16)$$

ただし,

全体構造の重心周りの運動を近似的に調和振動と仮定す

ると(17)式が成り立つ。

354

$$\left. \begin{array}{c} \eta = \eta_0 \cos(\omega t + \varepsilon) \\ \dot{\eta} = -\omega \eta_0 \sin(\omega t + \varepsilon) \\ \ddot{\eta} = -\omega^2 \eta_0 \cos(\omega t + \varepsilon) = -\omega^2 \eta \end{array} \right\}$$
(17)

(17) 式を(3) 式に代入し、 *n* について整理した後, 初期値として線形解を使用し必要な精度まで繰返し計算 を行うことによって解を得ることができる。(3) 式中 の流体力計算にあたっては、各構成部材(コラム, ブレ ース, ロワーハルなど)単体の流体力は修正モリソン式 により, 流体力係数については実験値あるいは船級協会 などの推奨値を用いて求め(註:付加質量係数,造波減 衰力係数についてはポテンシャル理論により求めること もある), Hooft 流の考え方により代数加算する。

上記手法によれば,非線形運動方程式を精度よく解く ことができるが,実際の数値計算にあたってはかなりの 計算時間を要することとなるので,次のような近似的解 析法を採ることとした。

まず,入射波の周期をN等分し,各位相ごとに非線形 運動方程式(3)式を解くこととする。続いて,入射波 の波面と線形解による動揺を考慮して,運動方程式の右 辺の波強制力項と左辺の減衰力項を確定する。

すると(3)式は $\eta$ と $\eta$ に関する代数方程式となるが (17)式の関係より、最終的に全体構造系の重心の動揺 変位ベクトル  $\eta = \{x, y, z, \phi, \theta, \phi\}$ にて表わされ、比較 的簡単な繰り返し計算により解が求まる。

N個(偶数)の位相ごとの $\eta$ に関する解 $\bar{\eta}(t)$ が求ま れば、(18)~(20)式に示すようなフーリエ級数に展開 することにより、非線形運動方程式(3)式の解が最終 的に求まる。

$$\bar{\eta}(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{N/2-1} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) + \frac{a_{N/2}}{2} \cos \frac{N}{2}\omega t$$
(18)

ただし,

$$a_{n} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \bar{\eta}(t) \cos n\omega t \, dt \quad (n = 0, 1, 2, \cdots, N/2)$$
(19)
$$b_{n} = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \bar{\eta}(t) \sin n\omega t \, dt \quad (n = 1, 2, 3, \cdots, N/2 - 1)$$

以下の数値計算にあたっては *N*=8(入射波の周期を 8等分)とした。

(20)

このように、周波数応答解析と時刻歴応答解析を組合 せた、いわゆるハイブリッド型の解法を適用することに より、近似的ではあるが比較的簡単に非線形運動方程式 を解くことができる。

全体構造を剛体と仮定して求めた上記6自由度の運動 応答解析結果を用いて各構成部材ごとの慣性力,流体力 を確定し、構造外力として与えてからの構造解析は、一般に汎用構造解析プログラムを用いて解析される。

## 3 模型試験

#### 3.1 試験方法

海洋工学委員会構造分科会で設定された2ロワーハ ル,8コラム型半潜水式海洋構造物の実機相当モデル (OSモデル)を参考にして,Fig.2に示す縮尺1/50の 相似模型を製作し,試験に用いた。

ただし、水槽試験では流体力学的相似性と構造力学的 相似性の両方を満足させることは非常に難しいので、幾 何学的形状を大略相似させただけで、重量分布や剛性は 大幅に変えたものとした。

米家が実施した水槽試験模型 (NK モデル)<sup>24),26)</sup>と比較しても,幾何学的形状がほぼ一致しているだけで,重量分布や剛性は大幅に異なったものとなっている。

排水量は約 256 kgf (2.51 kN) であり, 実機 で約 32,000 tonf (314 MN) である。Fig.2 に示すように, 模型は前後, 左右対象構造であり, 外殻はすべてアクリ ル製で, ブレースやデッキ構造はアクリルパイプによる 骨組構造で構成されている。

重量調整はすべて鉛を使用し, アクリルパイプあるい は板から成る構造部材の剛性に影響を与えないよう, ゴ ムパッドを介して取り付けた。

部材力の検出は弾性模型であるので歪みゲージを直接 貼付して行った。

模型の詳細設計にあたっては、まずコラム、ロワーハ ル、ブレースの外殻寸法をほぼ幾何学的に相似になるよ うに決定したが、構造剛性については OS モデルとはか なり異なったものとなっている。特にブレースとコラム の接合部については、コラム内部の補強が模型工作上難



Fig. 2 1/50 scale model of 2 lower hull, 8 column type semi-submersible offshore structure

しいので,代りにコラムの外殻板厚を増厚させることに より対応した。

構造部材の寸法を決定した後,最終的に重量調整のた め鉛をデッキやロワーハルに配置したが,その重量分布 は,OS モデルと比較して重心高さ(KG)を下げること により,メタセンター高さ(GM)を大きくして復原力 特性を増すように配慮した。

本試験における応力の計測点は 26 点で,すべて軸応 力(ひずみ),また係留力は4点,波高2点である。応力 の計測をすべて軸ひずみにしたのは,本試験の主要目的 が理論解析手法の計算精度や大波高下での応答の非線形 性(波高影響)を調査することにあり,試験技術などを 考慮すると,より単純な現象に着目する方がより明確な 結論を引き出せると考えたからである。

動揺については、非接触型(光学式)のビデオ・カメ ラを用いたオートトラッキングシステムを用いた。デッ キ上4コーナに光点(ターゲット)を8点設け、ビデオ カメラから送られてくる映像信号をリアルタイムで処理 して、対象物体の図心位置を出力しながら、自動追跡す る装置である。対象物体(マーク)の図心位置は 1/30 秒ごとに、モニター画面上を横方向512ドット、縦方向 384ドットで座標値が出力され、この値より6成分の動 揺振幅などを演算処理する。試験計測点を Fig.3 に示 す。

水槽試験は三菱重工業㈱広島研究所海洋構造物試験水 槽(長さ 57.5m×幅 4.53m×深さ 2.0m) にて実施し た。

試験時の水深は 1.6m (実機で 80m) であり係留状態 で試験した。水深は,使用した水槽の制約から,半潜水 式海洋構造物としては浅いものであり,係留状態に関し てもカテナリー係留の代りに線形ばねを用いた。

供試波はすべて規則波で,試験条件は次の通り設定し た。

波 方 向: $\chi=0^\circ$ , 67.5°, 90° 波 高: $H_w=4 \operatorname{cm}(2 \operatorname{m})$ , 15 cm(7.5 \operatorname{m}), 30 cm



Fig. 3 Locations and codes for measurements

(15m), 40 cm(20m), 50 cm(25m) 波円周波数: ω=2.1rad/sec (0.3rad/sec) ~ 9.2rad/ sec (1.3rad/sec)

ただし、波高  $H_w$ =4cm(2m) については全周波数に わたって試験したが、波高影響を調べるための波高  $H_w$ =15cm(7.5m)~50cm(25m) については、砕波限界波 高の関係 もあり、 $\omega$ =2.1rad/sec (0.3rad/sec)~5.7 rad/sec (0.8rad/sec) を中心に試験した。

計測された模型(非係留状態)の固有周期は下記の通 りである。

		模型	実 機
上下揺れ	$(T_H)$ :	3. 4 sec	$24 \sec$
縦揺れ	$(T_P)$ :	4.5 sec	32 sec
横 揺 れ	$(T_R)$ :	4.3 sec	30 sec
横 揺 れ	$(T_R)$ :	4.3 sec	30 se

3.2 全体構造応答解析

規則波中の全体構造応答解析法は2に述べた通りであ るが、構造応答解析にあたっては構造モデルが空間内で 変位と回転を生じないようにするため、Fig.4 に示すよ うに仮想支持点(24 自由度弾性支持点)を設けた。

また,全体構造解析にあたっては,骨組構造にモデル 化する際の剛性の評価,特に結合部の剛性の評価に注意 が必要となる。各部材の中心線をもって部材を代表させ ているが,ロワーハルやコラムへの部材交差部では Fig. 4 に示すように,剛性の小さい側の部材(ブレース,デ ッキガーダなど)が貫入しているものとして貫入区間を 剛領域(註:貫入前の部材剛性の 100 倍)とした。

また,流体力係数としては海洋工学委員会構造分科会 での統一計算モデル (OS モデル)<sup>25)</sup> で設定された値 (註: DnV の推奨値, 1975)<sup>27)</sup> を基準に設定した。すな わち質量力係数  $C_M$  については, ロワーハルの上下方 向 2.26, 左右方向 1.48, 内側コラム (円筒) 1.89, 抗 力係数  $C_D$  については, ロワーハル の上下方向 2.0, 左右方向 2.0, 内側コラム (円筒) 0.7 とした。

したがって,流体力係数については周波数依存性のない取り扱いとなっている。

また、実機換算水深が 80m であることおよび広範囲



Fig. 4 Space frame model

にわたる波高や波長を系統的に変えた試験で,波高影響 をみることが主目的であることから,波理論としては浅 海徴小振幅波理論に統一し,拡張適用して解析した。

## 3.3 試験結果と解析結果の比較

以下に示す試験結果および計算結果はすべて無次元化 した周波数応答であり、いずれも横軸に実機換算した波 円周波数( $\omega$ )をとり、参考までにロワーハル中心間距 離(B)と微小振幅深海波の波長( $\lambda$ )で無次元化したパ ラメータを付している。

(1) 構造応答特性

Fig. 5~7 に代表的なデッキガーダと ブレースの横波 中 ( $\chi$ =90°) での軸力の周波数応答特性を示す。いずれ も縦軸は1本のコラムあたりの平均変動浮力振幅 $\gamma Ah_A$ で無次元化されており、すべて同一スケールで表示され ている。ここで $\gamma$ は流体の比重、Aはコラムの平均水線 面積(コラムの総水線面積の 1/8)、 $h_A$ は入射波の振 幅、Fは軸力の応答振幅を示す。

入射波の波高  $H_w=25m$  では 円周波数  $\omega=0.58$  rad/sec で, また  $H_w=15m$  では円周波数  $\omega=0.76$  rad/sec にていずれも砕波限界となるので, 水槽試験および解析



(b) Transverse inner deck girder



はこの範囲内で実施した。

Fig. 5 はデッキ横方向ガーダの軸力の周波数応答特性 で、いずれのデッキガーダにも若干の応答の非線形性 (波高影響) がみられ、その値は  $H_w=15$ m、円周波数  $\omega=0.6\sim0.7$  rad/sec 近傍で 10 $\sim20\%$  程度となってい る。傾向的には内側 (DP-2) よりも外側デッキガーダ (DP-1) の方が非線形性が大きく出ている。

Fig. 6 は鉛直ブレースの軸力の周波数応答特性で,い ずれのブレースにも若干の応答の非線形性がみられ,そ の値は  $H_w=15$ m, 円周波数  $\omega=0.7$  rad/sec 近傍で約 10% 程度となっている。横方向デッキガーダと同様に, 傾向的には内側 (VP-2) よりも外側デッキガーダ(VP-1) の方が非線形性が大きく出ている。

Fig.7 は水平ブレースの軸力の周波数応答特性で, いずれの水平ブレースにも傾向的には応答の非線形性は みられるが,水平斜めブレース (HP-1) を除いては, 微小である。

微小振幅波領域における NK モデルの試験結果<sup>24),26)</sup> では, 外側水平ブレース (HH-1) について計測値が計 算値と比べて大幅に小さい (最大 50% 近く) 結果とな



(a) Transverse outer diagonal brace





半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答特性



(a) Horizontal outer transverse brace



(b) Horizontal diagonal brace







っているが、本試験ではほぼ良好な結果を得ている。こ の理由の一つとしては、本試験では Fig.2 に示すよう に水平ブレースがコラムに挿入される部分の剛性を高め るため(註:実機ではコラム内部は剛性の高い補強がさ れている)コラム外殻板厚を増厚させたことによるもの と思われる。







Fig. 8 Axial force responses of transverse deck girders in oblique sea

Fig. 8~10 に代表的なデッキガーダとブレースの斜波 中(χ=67.5°)での軸力の周波数応答特性を示す。

Fig.8 はデッキ横方向ガーダの軸力の周波数応答特性 で、外側デッキガーダ (DP-1) では、円周波数  $\omega \approx 0.8$ rad/sec 近傍にて応答のピークが出ているが 応答の非線 形性は微小である。

斜波中の軸力応答は、横波中と異なって外側 (DP-1) よりも内側デッキガーダ (DP-2) で応答の非線形性が 大きく出ており、その値は  $H_w=15m$ , 円周波数  $\omega=$ 0.7rad/sec 近傍では約 50% 程度となっている。

Fig. 9 は鉛直ブレースの軸力の周波数応答特性で,い ずれのブレースにも若干の応答の非線形性が傾向的には みられるが,その値は微小である。

Fig. 10 は水平ブレースの軸力の周波数応答特性で, いずれのブレースにも若干の応答の非線形性が傾向的に はみられるが,その値は微小である。

(2) 試験結果および解析結果についての考察

微小波高(H<sub>w</sub>=2m)規則波中での軸力に関する構造 応答特性については、一部の応答に計測値と計算値の間



#### 日本造船学会論文集 第163 号



(a) Transverse outer diagonal brace





Fig. 9 Axial force responses of diagonal braces in oblique sea

に相関性のよくない点はあるが、全般的にはよい相関に ある。

半潜水式海洋構造物に作用する波浪荷重の推定にあた っては流体力係数(特に付加質量係数あるいは質量力係 数)の評価が重要となる。

弾性模型の軸力に関する構造応答特性の計算にあたっては、先に述べたように流体力係数は海洋工学委員会構造分科会での統一計算モデル(OS モデル)で設定された DnV の推奨値(1975)を用いた。

本弾性モデルとほぼ相似の NK モデルに関する米家 の検討結果<sup>24)</sup>によれば、2次元特異点分布法による計算 値は、 ロワーハル の上下方向 2.55~2.85, 左右方向 1.65~1.75 とかなり大きな値となっており、 また 周波 数依存性もある。米家が NK モデルの解析に使用した 値はロワーハル上下方向 2.4~2.6, 左右方向 1.6~1.7 となっている。

したがって、DnV の推奨値は流体力係数 を 過少評価 していることとなるが、本水槽試験における計測値と計 算値の全体的な相関がよく、構造応答の大きくなる比較















的低周波数領域では、計測値がむしろ計算値を下まわっ ているケースもあることを考えると、実用的には DnV の推奨値を用いてもよいと思われる。

大波高 (H<sub>w</sub>=15m, 25m) 規則波中での軸力に 関 す る構造応答特性は,全般的には応答の非線形性(波高影 響)がみられ,その大きさは同一部材でも入射波の方向 によって異なってくる。計測値と計算値の間には傾向的 半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答特性

によい相関がみられる。

このような水槽試験では,試験技術上も流体力学的相 似性と構造力学的相似性を同時に満足させることが非常 に難しいことなどを考えると,2で述べた全体構造応答 解析法は,実用的には実機への適用性があるとみなして よいと思われる。

なお、本試験に用いた弾性模型は、模型製作および試 験技術上構造剛性が実機よりもかなり高く、特にコラム の剛性は非常に高いものとなっており、また、計測値も 軸力のみである。このため大波高下での全体構造応答特 性については、実機相当モデル(OS モデル)について 系統的数値解析を行って、検討することとする。

## 4 実機相当モデルについての数値解析

解析対象モデルは,海洋工学委員会構造分科会で設定 された実機相当モデル(OS モデル)であり,詳細は文 献<sup>26</sup>)を参照されたい。

大波高下での応答の非線形性(波高影響)については, 設計波による決定論的手法に基づき,各部材に発生する 設計最大応力を比較することにより検討する。

# 4.1 全体構造応答解析要領

波浪中全体構造応答解析にあたっては, Fig.11 に示 すように構造モデル化を行った。係留ラインについて は、その影響が小さいので無視するとともに、全体構造 応答解析を二段階解析法によっているため、構造モデル が空間内にて変位と回転を生じないようにするため、仮 想支持点(24 自由度弾性支持点)を設けた。

また,流体力係数としては海洋工学委員会構造分科会 での統一計算モデル (OS モデル)<sup>25)</sup> で設定された値 (註:DnV の推奨値, 1975)<sup>27)</sup> を使用した。

大波高下での応答の非線形性を調べることが主目的で あるため,波理論としては深海微小振幅波(エアリー波) を適用した。

100 年再現波の規則波としての最大波高と波周期の関係(すなわち規則波の steepness)は、(21)式<sup>23)</sup>により求める。





$$H_w = \begin{cases} 0.22 T^2 & (T \leq 6 \sec) \\ \frac{T^2}{4.5 + 0.02(T^2 - 36)} & (T > 6 \sec) \end{cases}$$
(21)

ただし,

H<sub>w</sub>:設計規則波高(m),最大波高は 32m とする。 T:設計規則波周期 (sec), T=2π/ω

微小振幅・線形理論および有限振幅・非線形理論により、各部材応力の周波数応答関数が求まる。

したがって(21)式より,各入射波の円周波数に対応 した設計最大波高が求まるので,100年再現波の下での 各部材応力などの構造応答は,(22)式または(23)式で 算定される。

$$\sigma = H(\omega, \chi) \cdot h_A \tag{22}$$

ただし,

- σ:100 年再現波の下での微小振幅・線形理論
   に基づいた設計波法による応力応答
- H(ω, χ): 微小振幅・線形理論に基づく規則波中の応 力応答関数

χ:入射波の波向

また,

$$\bar{\sigma} = \bar{H}(\omega, \chi ; H_w) \cdot h_A \tag{23}$$

ただし,

- δ:100 年再現波の下での有限振幅・非線形理論に基づいた設計波による応力応答
- *H*(ω, χ; *H*<sub>w</sub>):有限振幅・非線形理論に基づく規則波 中の応力応答関数

各部材応力の設計波法による設計最大値は、入射波の 波向( $\chi$ ) および円周波数( $\omega$ )の組合せにより、(22) 式または(23) 式によって求まる応力応答の内の最大値 を採ることにより、それぞれ  $\sigma_{DW}$ 、 $\bar{\sigma}_{DW}$  として求まる。

設計波法による最大応力を発生 さ せる 入射波の方向 は、各部材によって異なり、文献<sup>28)</sup> に よ れ ば  $\chi=0^{\circ}\sim$ 130°の範囲にあるが、 $\chi=45^{\circ}$ 、90°を中心に検討してお けば大略の傾向は把握できる。

したがって、以下の検討においては、入射波の方向は  $\chi=45^{\circ}$  および  $\chi=90^{\circ}$  の 2 ケースについて解析を行い、 大波高下での応答の非線形性について検討することとす る。入射波の波高については  $H_w=2.0 \text{ m}, 7.5 \text{ m}, 15.0 \text{ m}, 22.5 \text{ m}, 30.0 \text{ m}$  について解析し、それぞれ5 種類 の周波数応答関数を求める。

微小振幅・線形理論に対応する最大応力( $\sigma_{DW}$ )は, 波高  $H_W = 2m$  での周波数応答関数から求まる単位波振 幅あたりの応力に,(21)式より求まる設計最大波振幅 を乗じて求め、また、有限振幅・非線形理論に対応する 最大応力( $\bar{\sigma}_{DW}$ )は,(21)式より求まる設計最大波高

NII-Electronic Library Service

に対応した単位波振幅あたりの応力を、上記5種類の周 波数応答関数から線形補間して求め、これに(21)式よ り求まる設計最大波振幅を乗じて求める。

4.2 構造応答の非線形性(波高影響)

Fig. 12 に入射波の方向 χ=45° での デッキガーダお よびコラムに関して,有限振幅・非線形理論を適用した 設計波法に基づく応力応答と微小振幅・線形理論を適用 した設計波法に基づく応力応答の比較を示す。

実機の設計において重要となる応力レベルの高い領域 では、コラム頂部の曲げ応力について若干の非線形性 (波高影響)がみられ、有限振幅・非線形理論での応力 応答は約1.1倍となっているが、その他の部材について は応答の非線形性はほとんどみられない。

Fig. 13 に入射波の方向 χ=45° での ブレースに関し て,有限振幅・非線形理論を適用した設計波法に基づく 応力応答と微小振幅・線形理論を適用した設計波法に基



Fig. 12 Comparison of structural responses of deck girders and columns by linear and non-linear theories based on design wave method ( $\chi = 45^{\circ}$ )



Fig. 13 Comparison of structural responses of braces by linear and non-linear theories based on design wave method ( $\chi = 45^\circ$ )

づく応力応答の比較を示す。

実機の設計において重要となる応力レベルの高い領域 では、水平斜めブレースの軸応力について若干の非線形 性がみられ、有限振幅・非線形理論での応力応答は約 1.05 倍となっているが、その他の部材については応答 の非線形性はほとんどみられない。

次に, Fig. 14 に入射波の方向 χ=90° での デッキガ ーダおよびコラムに関して,有限振幅・非線形理論を適 用した設計波法に基づく応力応答と微小振幅・線形理論 を適用した設計波法に基づく応力応答の比較を示す。

このケースでは、応力が小さく、実機の設計において 応答の非線形性は問題とならない。

Fig. 15 に入射波の方向 χ=90° での ブレースに関し て、有限振幅・非線形理論を適用した設計波法に基づく 応力応答と微小振幅・線形理論を適用した設計波法に基 づく応力応答の比較を示す。



Fig. 14 Comparison of structural responses of deck girders and columns by linear and non-linear theories based on design wave method  $(\chi=90^\circ)$ 



Fig. 15 Comparison of structural responses of braces by linear and non-linear theories based on design wave method ( $\chi = 90^\circ$ )

設計波による決定論的手法に基づいて全体構造応答解 析を行う場合には、(21)式に示した 100 年再現波の規 則波としての最大波高と波周期の関係(すなわち規則波 の steepness)より、多くの部材の設計最大応力は波周 期の短い(円周波数  $\omega$ =0.7~0.8 rad/sec 近傍)領域で 発生しており、設計最大波高も 12.3~15m 程度となっ ている。したがって大波高下での応答の非線形性も実機 の設計にあたってはそれほど問題にならないものと言え る。

# 5 結 言

半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造応答特性に関し て、有限振幅・非線形理論に基づく理論解析法について 検討した。続いて、半潜水式海洋構造物の代表的な構造 形式である、2 ロワーハル、8 コラム型について、水槽 試験を行い、これら応答解析法の実際問題への適用性を 検討した。最後に、大波高下での全体構造応答の非線形 性(波高影響)が、実機の設計にあたってどの程度の意 義を持つかについて検討した。

主要な結論は下記の通りである。

(1) 大波高下での全体構造応答の非線形性(波高影響)を検討するため,近似的ではあるが簡便な,周波数 応答解析と時刻歴応答解析を組み合わせた,ハイブリッ ド型解析手法による有限振幅・非線形理論に基づく半潜 水式海洋構造物の波浪中全体構造応答解析法を示した。

(2) 上記非線形応答解析法について,弾性模型を用いた水槽試験を実施して,実際問題への適用性を検証した。

(3) 半潜水式海洋構造物の応答の非線形性(波高影響)を検討するため,実機相当モデル(OS モデル)について,大波高下での全体構造応答解析を行った。この結果,設計波による決定論的手法に基づいて実機の全体構造設計を行う場合には,各部材に発生する設計最大応力が問題となるが,大部分の部材については,応答の非線形性は問題とならないことを確認した。

(4) ただし、コラムやブレースの一部には若干の非 線形性がみられるので、設計波による決定論的手法によ り実機の設計を行う場合には、微小振幅・線形理論によ る解析結果に荷重係数 (load factor) として約 1.1 を 乗じておけば十分であると言える。

最後に、本研究にあたり三菱重工業㈱広島研究所尾崎

雅彦氏には貴重な助言を,また,同渡部剛賢氏には水槽 試験の実施,解析に際して御協力いただいた。ここに深 く謝意を表します。

#### 参考文献

- Hooft, J. P.: A Mathematical Method of Determining Hydrodynamically Induced Forces on a Semisubmersibles, Annual Meeting, New York, SNAME (1971).
- 吉田宏一郎 ほか:浮遊式骨組構造の周期応答解 析.日本造船学会論文集.第136号(1974).
- 吉田宏一郎,石川邦照:浮遊式骨組構造の周期応 答解析(続報),日本造船学会論文集,第138号 (1975).
- Yoshida, K. and Ishikawa, K.: Elastic Structural Response of Semisubmersibles in Regular Waves, 11 th Symp. on Naval Hydrodynamics, London (1976).
- 5) 吉田宏一郎:半潜水式構造の解析システム,第3 回海洋工学シンポジウム,日本造船学会(1977).
- 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).
- 7) 佐竹優ほか:半潜水式海洋構造物の設計及び建造, 三菱重工技報 Vol.13, No.4 (1976).
- 8) 秋田好雄ほか:浮遊式海洋構造物の設計システム について、日本造船学会論文集,第143号(1978).
- 金綱正夫 ほか:浮遊式海洋構造物の設計システム,三井造船技報,第103号(1978).
- 10) 間野正己ほか:半潜水式海洋構造物の波浪中にお ける構造応答解析システム,石川島播磨技報,第 20巻,第2号(1980).
- 11) 酒戸恒男ほか:半没水式石油掘削リグの波浪中強 度,住友重機械技報, Vol.30, No.90 (1982).
- 12) 亀谷日出彦ほか:セミサブ型石油掘削リグ "SS-4000"の構造強度,川崎重工技報,第84号(1984).
- 関川常雄ほか:セミサブ型海洋構造物の構造設計法 —BINGO 4000 M—, 日本 鋼管技報, No. 95 (1982).
- 14) Hammett, D. S.: Compare Performance SEDCO 135-Theoretical Design to Field Measurements, Offshore Technology Conference, OTC 1391 (1971).
- Bell, A. O. and Walker, R. C.: Stress Experienced by an Offshore Mobile Drilling Unit, Offshore Technology Conference, OTC 1440 (1971).
- 16) Rey-Grange, A. C.: Design and Actual Behavior of Pentagon 81 Semi-Submersible Drilling Platform, Offshore Technology Conference, OTC 1388 (1971).
- 17) 有田行雄ほか:半潜水形ドリリングユニットの波 浪中における実機の動揺および強度試験,三菱重 工技報, Vol.10, No.2 (1973).
- 18) 栖原寿郎ほか:浮遊式海洋構造物の波浪中の運動,強度の推定法に関する研究,日本造船学会論 文集,第134号(1973).
- 19) Olsen, O. A. and Verlo, P. O.: A Comparison

of Full-Scale Performance Measurements of Aker H-3 with theoritical Predictions, Offshore Technology Conference, OTC 2508 (1976).

- Tamaki, I. et al.: Full-Scale Measurement Tests on the New Semi-Submersible Polycastle, Offshore Technology Conference, OTC 4731 (1984).
- 21) 片山正敏ほか:半潜水式海洋構造物の波浪中構造 応答解析,三菱重工技報,Vol.15,No.1(1978).
- Chao, J. C.: Dynamic Response of Floating Structures, Proc. of ASCE Vol. 104, No. WW 2 (1978)
- 23) El-Tahan, H. et al.: Motion and Structural Response of a Hydroelastic Semi-Submersible Model to Waves and Ice Impacts, Proc. of 4 th. OMAE Symp., Dallas, ASME (1985).

- 24) 米家卓也:半潜水式海洋構造物の波浪中全体構造 応答特性,日本造船学会論文集,第160号(1986).
- 25) 日本造船学会海洋工学委員会構造分科会:半潜水 式海洋構造物の実機相当モデルについての波浪応 答比較計算,日本造船学会誌,第646号(1983).
- 26) Yoneya, T.: Experimental Study on Wave-Induced Structural Response of Semisubmersibles, Proc. of OMAE Symp., New Orleans, ASME (1984).
- 27) Det norske Veritas: Rules for Classification of Mobile Offshore Units (1975).
- 28) 日本造船学会海洋工学委員会構造分科会:半潜水 式海洋構造物の構造強度概論(3),日本造船学会 誌,第676号(1985).
- 29) Det norske Veritas : Rules for Classification of Mobile Offshore Units (1982).