超大型半潜水式浮体の構造応答特性と 初期構造設計法の考え方

学生員 飯島 一博*

正員 吉田 宏一郎**

正員 鈴木 英之**

Structural response characteristics of semi-submersible V.L.F.S. in waves
and fundamental guideline to the structural design

by Kazuhiro Iijima, *Student Member*
Suzuki Hideyuki, *Member*

Koichiro Yoshida, *Member*

Summary

In this paper, we discuss the characteristics of structural response of semi-submersible V.L.F.S. in waves based on rigorous numerical analysis. In this analysis, hydroelasticity and hydro-dynamic interactions are fully considered. A guide-line for structural design of semi-submersible V.L.F.S. is proposed after relations between the structural response characteristics and structural configuration are discussed.

There are two types of semi-submersible V.L.F.S. proposed. One is column-supported type seen in Kansai Int'l Airport 1st Phase, floating structure plan. V.L.F.S. of this type is supported on columns of large diameter with small depth. It is shown that the response characteristics can be dominated by quasi-static response pointed out by a part of the present author. The other type is column and lower-hull supported model represented by MOB, whose shape is obtained by extending the present semi-submersible rigs of two lower-hulls. It is shown that some of the most important response characteristics with the structure of this type are horizontal bending in low frequencies and structural resonance.

1. 序 論

超大型浮体の一形式に半潜水式浮体があるが、提案されている半潜水式浮体には、関西国際空港第一期工事浮体案¹⁾で見られた形式のコラムだけで支持される浮体、すなわちコラム支持浮体と、MOB²⁾に見られる、コラムとローハルで支持される浮体、すなわちコラム・ローハル支持浮体がある (Fig.1参照)。ここで想定するコラム支持浮体はコラム間隔に対して、コラムの直径が比較的大きく、喫水の小さなモデルである。heaveの固有周波数は波スペクトルのピーク周波数よりも大きな周波数域に配置され、面外のたわみの固有周波数はさらに高周波数域に配置される。コラム・ローハル支持浮体は、現存するセミサブリグを主に長手方向に接続し、全体構造応答上の補強を施したものである。

本論文ではこれら2タイプの浮体についての基本的な波浪中構造応答の特性を調べる。解析の際には係留を考慮する必要のないと思われるカテナリーのような弱い係留がなされていることを想定する。半潜水式浮体はボンツーン式浮体に比較して運動応答、構造応答ともに小さいと考えられ、外洋においても防波堤などの設置を前提としない。有義波高 $H_{1/3}=10.0(\text{m})$ 、周期 $T_{01}=10.0(\text{sec})$ のスペクトル波中でも構造的に成立する浮体構造を探る。

浮体の長さを主なパラメータとし、それぞれのタイプの浮体の波浪中応答特性と生じる現象について調べる。2タイプの浮体間の優劣は波浪中応答以外の係留や建造などの観点から決定するものと考えて特に決定せず、それぞれのタイプの浮体の構造設計法のガイドラインを与えることを試みた。

一般に、浮体の長さが大きくなることは、構造応答の点から考えて、成立性困難につながる。このことは、浮体が剛体的に挙動すると仮定すると、単位波振幅波中の縦曲げに関して、単位幅当たりの浮体中央部のモーメントは次の式³⁾で与えられることから予想される。

$$M_w = \gamma_w \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \left(1 - \cos \frac{\pi L}{\lambda} - \frac{\pi L}{2\lambda} \sin \frac{\pi L}{\lambda} \right) \quad (1)$$

*東京大学工学系研究科船舶海洋工学専攻

**東京大学船舶海洋工学専攻

ここで、 γ_w は海水の比重、 λ は入射波の波長、 L は浮体の長さとする。この式を極大にするのは、入射波波長と浮体長さとの間に一定の関係がある場合であり（マッチング）、式(1)は浮体の長さの2乗に比例することがわかる。また、浮体が長くなると構造の同調周波数が波のスペクトル域に入る場合がありうる。半潜水式の超大型浮体の場合、完全に同調周波数を回避することは容易でないと考えられる。

Fig. 1: two types of semi-submersible V.L.F.S.

2. 解析法について

ここで用いる数値計算法は、前報で紹介したもの⁴⁾であり、線形の範囲で流弾性と流体力学的相互干渉が厳密に考慮されている。具の数値計算法⁵⁾を基に、構造領域では部分構造法を用い、流体領域では group body の概念を新たに導入することで、計算を階層化して、大規模なモデルについても計算できるように拡張したものである。具の計算法では、影本の相互干渉の理論⁶⁾と特異点分布法を用いて流体力を評価し、FEM を用いて構造をモデル化する。

通常の半潜水式の浮体の構造設計における解析では、浮体構造を立体骨組み構造としてモデル化する必要がある、この必要性は浮体が大型化しても変わらない。本数値解析手法では、構造を立体骨組み構造でモデル化できる。その場合には荷重点が多いので、通常の部分構造法に従い、荷重点を拘束点として消去しないでいると、残される節点の総自由度数が膨大なものになってしまう。そこで、ここでは境界節点以外の多数の荷重点についても、厳密に消去し、その結果、残る節点は部分構造に分割した時の境界節点だけになる。

すでに Fig. 2 に示すモデルについて実験⁷⁾を行なっている。下図には今回の数値計算法でのモデル化を示している。sub-structure で表される構造が5個横方向につながったものとしてモデル化する。S4 点における曲げ歪みの周波数応答関数を Fig. 3 に示す。R.A.O. は Response Amplitude Operator の略で周波数応答を表す。実験との相関はよく得られており、また、'Goo' で示される具による数値計算法による結果ともよく一致している。

このような詳細な解析法が必要である一方で、計算の結果を確認したり、解釈したり、また、応答の改善の方向性を示すためにも、特質をとらえた簡易な解析法を用いる必要がある。すでに著者らの一部が、超大型浮体を弾性支床上の一次元梁としてモデル化し、面外たわみについて解析解を得ており、準静的に構造応答がピークを生じる特性周波数 ω_s と対応する入射波の波長である特性距離 λ_s が存在することを示した⁸⁾。このピークは構造応答の上限を表す。また、構造

の固有周波数は heave の固有周波数 ω_0 よりも高い周波数に存在すること、同調時のピークの高さは、その時の変形モード形状と波力のパターンの内積に比例することが示されている。最後の点は同調時でも、浮体に対して十分小さな入射波波長であれば、その応答が小さいことを示唆するものである。一次元梁としての解析は、面内たわみ振動、ねじり振動、縦振動の解析にも拡張することができるであろう。

Fig. 2: experimental model and setup

Fig. 3: R.A.O. of bending strain at S4 in head sea

3. コラム支持浮体の応答特性

コラム支持浮体では、あらかじめ全体構造応答を考慮して設計を行なう。heave の固有周波数を波スペクトルのピーク周波数に比較して高周波数に配置し、同調時の応答が大き

くならないことを狙う。その場合に問題になると予想される準静的な構造応答のピークを考慮する。その際の曲げモーメントは断面 2 次モーメントの $1/2$ 乗に比例し⁸⁾、断面 2 次モーメントは構造深さの 2 乗と (見掛けの) 板厚に比例すると考えられるから、結局、構造深さに比例し、板厚の $1/2$ 乗に比例する。断面係数は構造深さと板厚に比例するから、曲げモーメントを断面係数で除して得られる曲げ応力は構造深さには無関係で、板厚の $1/2$ 乗に反比例する。特性周波数での応力低減のためには板厚を増加させることが効果的である。そこで、Fig.4 のようなモデルとする。デッキ構造は準静的な構造応答のピークを考慮して、見かけ上の板厚を増すために、4 層の板厚 30(mm) の鋼板からなっている。特性距離 $\lambda_s = 700$ (m)、特性周波数は $\omega_s = 0.29$ (rad/sec)、その時の曲げ応力は 30(MPa/m) と予想される。コラムの間隔は 30(m)、コラム直径は 15(m)、喫水は 10(m) である。単位デッキ面積当たりの排水重量は 20,000(N/m²) 程度ということになる。扱う浮体の幅は 150(m) の一定とし、浮体長さ L は 480(m)、1560(m)、2400(m) の 3 種類とする。

Fig. 4: column supported model

3.1 構造応答

Fig.5 には、向かい波中での浮体中央のデッキ部の曲げ応力の周波数応答関数を示す。浮体の長さを変化させたと、特に、1560(m) と 2400(m) の場合の応答曲線の変化は大きくない。その時の円周波数 $\omega_s = 0.25$ (rad/sec) で曲げ応力 30(MPa/m) をピークとするなだらかな曲線は、準静的な応答が支配的であることを示している。この周波数と応答量は準静的な構造応答のピークとして予想された値とほぼ一致しており、弾性支床上の一次元梁による解析でもよく応答を説明すると言える。また、heave の固有周波数は円周波数 $\omega_0 = 0.81$ (rad/sec) であり、浮体長さ 2400(m) の場合には、面外たわみ振動の固有周波数は次数の低いものから順に円周波数 $\omega = 0.81, 0.82, 0.85, \dots$ (rad/sec) のようになっているが、明確な応答のピークは曲線上には現れていない。むしろ、浮体長さ 480(m) の場合の最低次の面外たわみの固

有円周波数 $\omega = 1.38$ (rad/sec) でのピークの方が大きい。これは、生じる浮体の変形モードの波長と波力のパターンの波長 (入射波の波長) との比が小さいため⁸⁾ であると考えられる。なお、これらの固有周波数は弾性支床上の梁モデルで予想される値とほぼ一致している。

Fig. 5: R.A.O. of bending stress at the mid-ship of column supported models in head sea

Fig. 6: R.A.O. of bending stress at the mid-ship of column supported model ($L = 2400$ m) in oblique sea in comparison with the result in head sea

Fig.6 には長さ 2400(m) の浮体の場合の入射角を 45 度とする斜め波中での浮体中央部のデッキ部での曲げ応力の周波数応答曲線である。向かい波での準静的な応答のピークを基準にして、やや高周波数域にその周波数が移動し、ピークは低くなっている。これは斜め波になったことで、入射角を χ とした時に波数が見掛け上 $\cos \chi$ 倍になるためであり、斜め波中での準静的な構造応答のピークの生じる周波数は、特性周波数 ω_s に対して、 $\sqrt{1/\cos \chi} \omega_s$ で表されることで説明できる。また、ピークの高さは浮体の長さ当たりの受ける荷重の変化に比例する。上下方向の波強制力だけを評価すれば、ピークの高さは、入射波の波数を k 、浮体の幅を B として、 $\frac{2}{k B \sin \chi} \sin(\frac{k B \sin \chi}{2})$ に比例することがわかる。以上から

準静的な応答のピークの周波数と応答の大きさは、Fig.6中の'peak(χ)'で表される曲線のように変化すると予想され、45度の斜め波中の結果をよく説明する。

有義波高 $H_{1/3}$ 10.0(m)、 $T_{01} = 10.0$ (sec) の ISSC スペクトル波中の応答の標準偏差でのデッキ応力を比較すれば、Table.1のようになる。

Table 1: r.m.s. of deck axial stress σ_a and deck bending stress σ_b (MPa); column-supported model

	wave dir.	L (m)		
		480	1560	2400
σ_a	head sea	1.1	0.9	1.1
	obliq. sea	1.4	3.2	18.1
σ_b	head sea	33.8	11.4	9.8
	obliq. sea	40.4	25.0	24.8

応答の1000波中の最大期待値は約4倍とすれば、最大でも斜め波中で200(MPa)になり、これは許容できる程度である。 $L=2400$ (m)のモデルで斜め波中で軸応力が増加するのは、後で示すように水平曲げが原因であり、浮体の幅が大きくなれば、水平曲げによるデッキ中央側部の軸応力は小さくなると考えられる。斜め波中の浮体中央側部の軸応力の周波数応答関数をFig.7に示す。軸応力については浮体が大きくなる程、大きな応答が生じている。 $L = 2400$ (m)の浮体の応答中に見られる円周波数 $\omega = 0.55$ (rad/sec)でのピークは、面内振動の最低次の固有周波数に対応している。

Fig. 7: R.A.O. of deck axial stress at the mid-ship of column supported models in oblique sea

3.2 運動応答

代表的な周波数における変形の様子をFig.8に示す。これらは浮体の前方から鳥瞰した図になっている。a)図に示す最も低い周波数域を除いて、全ての周波数域で浮体中央部で応答が小さく、両端部で大きな応答になっていることがわかる。c)図は前端よりも後端で応答が大きくなっており、この周波数では、波強制力が後部で大きくなっていた。d)図

は6節振動が生じる固有周波数に対応している。コラム支持浮体モデルは、heaveの固有周波数が高めであることから、低周波数域での運動応答はよくないことが予想される。一方で浮体が大型化すれば、全体に働く波強制力の和などは位相差のためにそれほど大きくはならないから、運動応答は同種の小型の浮体に比べれば好転する。

浮体長さ2400(m)の場合では、前述のISSCスペクトル波中では浮体中央部の上下方向の変位振幅については、波高に比して有義値で2パーセント、浮体端部で25パーセント程度であった。浮体長さ480(m)のものでは同じく、中央部で8パーセント、端部で25パーセントであった。

Fig. 8: shape of deck deflections $L = 2400$ (m) in oblique sea

4. コラム・ローハル支持浮体の応答特性

4.1 基本となる浮体の応答

構造をモデル化する場合には、それ以前に構造の配置やサイズが決定されており、また、それらは現実的なものでなければならない。そのために、典型的なセミサブリグである長さ91.4(m)、幅56.4(m)のAKER H-3を基とした浮体を1倍体浮体モデル(mono-ploid)としたときに、mono-ploidを長手方向に繋げることで大型化を実現したモデルを選ぶ。AKER H-3はセミサブリグの中では第2世代に属する典型的な、デッキ、2本のローハル、8つのコラムからなる浮体で、4本の鉛直横ブレース、2本の水平横ブレース、4本の水平斜めブレースで補強されている。Fig.9にmono-ploidの立体骨組みによるモデル化が示されている。前半部分と後半部分をそれぞれ別のsub-structureとして扱い、一つのsub-structureは二つのgroup bodyに支持されている。一つのgroup bodyは大小一つのコラムと片側ローハルの半分からなる。AKER H-3全体では二つのsub-structureと4つのgroup bodyで構成されることになる。sub-structureに注目すると総節点数は59個で、このうち14個が境界節点であり、残り45個が内部節点である。浮体長さ182.8(m)の2倍体浮体モデル(di-ploid)、同548.4(m)の6倍体浮

体モデル (hexa-ploid)、同 914.0(m) の 10 倍体浮体モデル (deca-ploid) を扱う (Fig.10参照)。

Fig. 9: modeling of column lower-hull model

Fig. 10: column lower-hull models

代表的な結果である、浮体中央側部のデッキ部の軸応力について、Fig.11には向かい波中の結果を、Fig.12には斜め波中 (向かい波より 45 度) の結果を示す。浮体が大型化するにつれて、構造応答が増加することがわかる。特性距離が 1600(m) 以上と計算され、浮体長さ 914(m) の場合でも、応答曲線が構造応答の上限である準静的な応答のピークに

代表される曲線に収束していく途中の過程であることと、構造の固有周波数が含まれることによる。コラム・ローハル支持浮体では、特性周波数 ω_s が 0.19(rad/sec) と低く、換算した見掛け上の板厚も大きいので、準静的な構造応答のピークは問題にはならない。

コラム支持浮体モデルの構造応答の評価で用いたものと同じスペクトル波中でのコラム・ローハル支持浮体モデルのデッキ部の軸応力応答、水平斜めブレースの標準偏差をそれぞれ、Table.2,3に示す。許容応力をデッキ部では 1000 波中最大期待値が 200(MPa) となることに対応する標準偏差 50(MPa)、応力集中の存在する水平斜めブレース部では mono-ploid の水平斜めブレース中で生じる応力の標準偏差 22(MPa) 程度ということにすると、di-ploid ではデッキ部についても、水平斜めブレース部でも許容応力にほぼおさまっているのに対して、hexa-ploid のデッキ部では許容できるが、水平斜めブレース部では許容できる応力レベルになっていないこと、deca-ploid ではデッキ部でも許容できる応力レベルになっていないということがわかる。

Fig. 11: R.A.O. of deck axial stress at the mid-ship of column lower-hull supported models in head sea

Fig. 12: R.A.O. of deck axial stress at the mid-ship of column lower-hull supported models in oblique sea

Table 2: r.m.s. of deck axial stress σ_a and deck bending stress σ_b in three wave cond. (MPa)

	wave dir.	mono	di	hexa	deca
σ_a	head sea	1.4	3.4	11.1	77.6
	beam sea	0.3	0.3	0.2	0.6
	obliq. sea	1.0	4.51	35.5	155.6
σ_b	head sea	1.4	1.3	1.8	7.7
	beam sea	0.5	0.0	0.0	0.1
	obliq. sea	1.0	1.8	3.4	9.6

Table 3: r.m.s. of axial stress σ_a and bending stress σ_b of horizontal diag. brace in three wave cond. (MPa)

	wave dir.	mono	di	hexa	deca
σ_a	head sea	0.1	0.2	0.0	0.1
	beam sea	1.1	1.0	1.2	1.1
	obliq. sea	20.1	28.8	47.1	103.5
σ_b	head sea	0.5	1.2	2.3	2.7
	beam sea	0.9	0.9	0.9	0.9
	obliq. sea	1.5	3.1	5.1	12.1

4.2 構造の修正

hexa-ploid ではなんらかの構造の修正が必要であり、deca-ploid ではそれ以上の構造の修正が必要である。その前に、何が構造応答を大きくする原因であるかを解明する必要があるだろう。斜め波中の低周波数域で応答が大きくなる現象を考察する。もう一度、構造を剛体と仮定した場合の浮体中央部の縦曲げに関するモーメントを表す式 (1) を見直すと、この式の γ_w に当たる係数は変わるものの、水平曲げにも適用できるということに気がつく。縦曲げでは復元力が存在するが、水平曲げでは慣性力が同じ役割を果たす。入射波の波長 λ に比較して、浮体長さ L が大きい場合には水平曲げによる曲げモーメントを極大にさせるのは、 $\sin \frac{\pi L}{\lambda} = \sin \frac{k' L}{2} = \pm 1$ の場合である。ここで $k' = k \cos \chi$ は入射波が斜めであることを考慮した見掛け上の波数である。次にねじりによる影響はブレース部では大きいと考えられ、またコラム・ローハル支持浮体モデルではその断面形状から曲げねじり現象も大きく生じると考えられる。一般的な弾性支床上の梁モデルで、ねじりだけを考慮すると、次のような振動方程式が得られる。

$$-I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - k_{xx} \theta = m_x \sin(kx \cos \chi - \omega t) \quad (2)$$

ここで、 I_p は単位長さ当たりの慣性モーメント、 GJ はねじり剛性、 k_{xx} は単位長さあたりの復元力 (モーメント) 係数、 m_x は単位長さあたりに働くねじりモーメント、 θ は回転変位 (roll) をそれぞれ表している。両端自由の条件の下でこの式を解くと

$$\begin{aligned} \theta(x, t) = & \frac{\hat{\theta} k \cos \chi}{\alpha} \frac{\cos \frac{kL \cos \chi}{2}}{\cos \frac{\alpha L}{2}} \sin \alpha x \cos \omega t \\ & - \frac{\hat{\theta} k \cos \chi}{\alpha} \frac{\sin \frac{kL \cos \chi}{2}}{\sin \frac{\alpha L}{2}} \cos \alpha x \sin \omega t \end{aligned}$$

$$- \hat{\theta} \sin(kx \cos \chi - \omega t) \quad (3)$$

ここで、 $\omega_0 = \sqrt{k_{xx}/I_p}$ 、 $\alpha = \sqrt{I|(\omega^2 - \omega_0^2)|/GJ}$ 、 $\hat{\theta} = m_x / (GJ(k \cos \chi)^2 + I(\omega_0^2 - \omega^2))$ である。ただし、式 (3) は ω_0 を roll の固有周波数として、 $\omega > \omega_0$ の場合の解である。この式は、コラム・ローハル支持浮体モデルの場合には第 2 項が卓越するので、極大となるのはほぼ、 $\sin \frac{k \cos \chi L}{2} = \pm 1$ の時である。これは浮体中央部の水平曲げがマッチングにより極大になる条件と重なる。Fig.12 を見ると、hexa-ploid では円周波数 $\omega = 0.45$ (rad/sec)、deca-ploid では円周波数 $\omega = 0.35$ (rad/sec) はこの条件を満たし、水平曲げモーメントとねじりによる応答が極大値をとっている。また、波強制力を考える時に上下方向の荷重は水線面積にほぼ比例し、水平方向の荷重は没水部の体積に比例するだろう。コラム・ローハル支持浮体モデルでは没水部が非常に大きくなっているため、水平方向の荷重も大きくなっており、ねじりモーメントも大きい。これらの要因が一体となって、コラム・ローハル支持浮体モデルの斜め波中の低周波数域での構造応答を大きくしている。最近の MOB の研究⁹⁾では、やはり斜め波中でコネクター接続部の荷重が非常に大きくなることが示されているが、ここで結論されることで説明がつけられる。

また、構造の同調が波スペクトルの主要な周波数域に入り込んでいることも構造応答を大きくする原因である。hexa-ploid では円周波数 $\omega = 0.89$ (rad/sec) にねじり振動の最低次の同調周波数が存在し、deca-ploid では円周波数 $\omega = 0.56$ (rad/sec) にねじり振動の最低次の同調周波数、 $\omega = 0.58, 1.10$ (rad/sec) に面外振動の 1 次と 2 次の同調周波数、 $\omega = 0.48$ (rad/sec) に面内振動の 1 次の同調周波数が存在している。

hexa-ploid、deca-ploid に構造の変更を施して、構造応答の改善を試みる。構造を変更する際に、デッキの外形寸法は変化させないこととし、現実的な部材の剛性の変化と部材の数の増減で対応するものとする。上述したように、応答を大きくする原因は、低周波数域では斜め波中での水平曲げあるいはねじり振動による応答と、より高周波数域では構造の同調応答である。いずれも全体剛性を増加させることで克服できるものと考えられる。Fig.10 に 'modified' として最終的なモデルを示す。hexa-ploid ではローハル間に直径 4(m)、板厚 30(mm) の水平斜めブレース材を付加し、鉛直横ブレースをなくすかわりにデッキ部の構造深さを 5.0(m)、板厚を増加させて 25(mm) とし、デッキ部の剛性を増した。この変更はねじり剛性を増加させると同時に、水平曲げに関する剛性を増加させる点で有効である。deca-ploid では hexa-ploid に与えたものと同じ修正に加えて、さらにローハル部の外形寸法を 20 パーセント大きくして剛性を増加させ、鉛直の長手方向のななめブレースを加え全体の縦曲げに関する剛性を増した。その結果、各ブレース部においても許

容応力以下の応答におさえることができた。また、面外振動の固有周波数は最低次のもので円周波数 $\omega = 0.77(\text{rad/sec})$ に存在し、波スペクトルの主要域から外すという意味で完全には、同調を回避することができなかったが、生じるモードと波力のパターンの比を小さくして、同調が生じてもピークを大きくしないことで、構造応答を小さくしている。このときの生じるモードの波長と入射波の波長の比は1/18程度になっている。ただし、生じるモードの代表波長を浮体長さの半分を選んだ。修正前の deca-ploid での同じ比は1/11であり、コラム支持浮体モデルの1560(m)のものについては1/33であった。同調が問題にならない一つの目安として、生じるモード波長と入射波の波長の比が1/20程度であることが考えられる。

4.3 運動応答

論文中には示さないが構造修正により、運動応答も改善されていた。主として同調時の過大な応答が回避されたことによると思われる。上下方向の動揺の振幅について有義値で波高に対して、構造修正後の hexa-ploid では浮体中央部で3パーセント、端部においても10パーセント程度、構造修正後の deca-ploid では浮体中央部で3パーセント、端部において6パーセント程度であった。コラム支持浮体モデルに比較して端部での応答が小さいことが特徴的である。特性距離が長いために、全体的に剛体的でコラム支持浮体モデルのように波に乗ったような変形は生じない。

斜め波中の代表的な周波数での変形の様子を Fig.13 に示す。なお、これらの図は構造を修正する前のものである。a) 図は最低次の面外たわみ振動の様子を示し、b) 図は2次の面外たわみ振動の様子を表す。c) 図は最低次の面内ねじり振動の様子を示す。d) 図は斜め波中の低周波数域でマッチングにより構造応答がピークになる周波数での変形の様子を示す。

Fig. 13: shape of deflections of deca-ploid in diag. sea

5. 大型半潜水浮体の初期構造設計法

コラム支持浮体の全体構造設計の場合には、簡易計算によって応答の概要を把握することのできる、準静的な応答が重要になる。初めの段階で簡易計算で十分にチェックを行えば、次の詳細な解析でも許容応力を満たす可能性が高い。応答を改善する方法は見掛け上の板厚を増加させることである。コラム・ローハル支持浮体では、構造の同調現象と水平曲げとねじりによる応答が重要になった。縦曲げの問題と、水平曲げ・ねじりの問題を分離するためにまず、縦曲げ強度が十分であることを確認する必要がある。応答の改善法は縦曲げに関する全体剛性を上げるために、デッキやローハルの断面積を増加させること、鉛直縦斜めブレースを付加することである。次に、斜め波中の応答を計算し、水平曲げ・ねじりに対する強度の確認を行う。これらに関する全体剛性を増加させるためには、水平斜めブレースをつけるなどの方法が有効であるが、不十分な場合にはデッキ形状の幅を広げるなどの根本的な変更が必要である。同調を完全に避けることができない場合には、同調モードの波長とその時の入射波波長の比が小さくなっていけばよく、この比は1/20程度がひとつの目安となると考えられる。なお、コラム・ローハル支持浮体モデルについて、弾性支床上モデルで予想される面外たわみ振動の同調周波数は、実際に詳細な数値計算で求められた値に比べて数十パーセント小さかった。全体剛性や付加質量係数などの見積りもりの不正確さと、実際にはせん断変形が生じることに起因すると考えられる。以上のような検討を経て、詳細な解析で得られた部材力をもとに部分構造を設計する。初期構造設計のフローについて Fig.14 に示す。

6. 結 論

前報で開発した数値解析手法を用いて、半潜水式超大型浮体の代表的な形式であるコラム支持浮体モデルとコラムローハル支持浮体モデルの応答特性を調べた。その際の主要なパラメータは浮体の長さとした。また、応答に生じる重要な現象について調べ、構造応答の改善法について述べた。

コラム支持浮体では、低周波数域での準静的な構造応答のピークが構造設計上、最も重要になる。コラム・ローハル支持浮体では準静的な構造応答のピークを生じる周波数が非常に小さく、その時の応答も大きくはないので構造設計の点では重要ではない。設計上重要なのは構造の同調時の応答と、低周波数域での水平曲げとねじり振動によるマッチング応答であった。最後に挙げた現象は水平方向の波力の大きくなるコラム・ローハルモデルでより顕著である。簡易モデルで多くの現象は説明をすることができ、特に、構造的には比較的単純なコラム支持浮体では弾性支床上の梁モデルによる解析で応答を定量的にも把握することができた。

最後に超大型半潜水式浮体の初期構造設計法についてまとめフローに示した。

Fig. 14: flow chart for designing semi-submersible V.L.F.S

参考文献

- [1] 宝田直之介: 超大型海洋構造物のテクノロジー・アセスメントの一例その1~その10, 造船学会誌第638号~652号, 1982~1983
- [2] E.I.Hickey, J.E.Dailey, C.E.Nolan, R.D.Gaul: MOBILE OFFSHORE BASES, VLFS'91, 1991, pp.133-148
- [3] 山本善之, 大坪英臣, 角洋一, 藤野正隆: 船体構造力学, 成山堂書店, 1991, pp.100-104
- [4] 飯島一博, 吉田宏一郎, 鈴木英之: 超大型半潜式浮体の波浪中構造応答解析, 日本造船学会論文集, 第181号, 1997, pp.281-288
- [5] Goo, J.S. and Yoshida, K: A Numerical Method for Huge Semisubmersible Responses in Waves, SNAME Transactions, 1990, vol.98
- [6] Kagemoto, H and Dick K, P. Yue: Interactions among multiple three-dimensional bodies in water waves, J.Fluid Mech., 1986, vol.166, pp.189-209
- [7] 吉田宏一郎, 鈴木英之, 飯島一博, 岡徳昭: 大規模浮体の波浪中応答解析と流体力学的相互干渉が設計に及ぼす影響, 日本造船学会論文集, 178号, 1995, pp.297-304
- [8] 鈴木英之, 吉田宏一郎: 超大型浮体の構造挙動および構造設計に関する考察, 日本造船学会論文集, 第178号, 1995
- [9] Chunfa Wu, T.R.J.Mills: Wave Induced Connector Loads and Connector Design Considerations for the Mobile Offshore Base