

超大型浮体式構造物（メガフロート）の振動解析

上田宏樹*・岡田 徹*・今西悦二郎(工博)*・加藤 稔(工博)**

*技術開発本部・機械研究所 **技術開発本部・開発企画部

Vibration Analysis of Super-large Floating Structure (Mega-float)

Hiroki Ueda・Toru Okada・Dr. Etsujiro Imanishi・Dr. Minoru Kato

A super-large floating structure(mega-float) has been developed to realize the construction of pontoon-type marine airports. In this paper, a modeling method based on the 2D-shell-model for pontoon structures is proposed. The effect of fluid mass is considered in the vibration analysis. FEM results and experimental results are compared. Vibration simulations, as an aircraft lands on a mega-float airport, were carried out. This method proved useful for the design of real-size pontoon structures.

まえがき = 有効利用可能な国土が狭い我が国では、空港、物流基地、都市などの機能を海上の用地造成で補うことが、近年急速におこなわれている。海上に用地を造成する工法としては、埋め立て、干拓、棧橋、浮体の4工法が考えられている。しかし、埋め立てにより造成された用地は、地盤沈下、とくに不等沈下、造成用地の確保、長期にわたる建設期間などが問題である。いっぽう、浮体工法では、完成後の維持・管理費が他の工法にくらべて大きいものの、上記の問題に関しては埋め立て工法にくらべて有利である。また、建設費についても水深が深くなると(約20mが境といわれている)、浮体工法のほうが有利である。

以上の背景から、空港などへの超大型浮体式海洋構造物の適用を目指して、1995年に造船13社と鉄鋼4社からなる「メガフロート技術研究組合」が発足し、海上空港の実現に向け研究が進められている。本研究はこのメガフロート技術研究組合において実施されたものである。

流体の影響を考慮した浮体構造物の弾性変形振動に関する研究は、近年、数多くおこなわれている^{1)~4)}。本稿では、ポンツーン型の浮体構造物で構成される超大型浮体式海洋構造物の振動特性を有限要素法をもちいて解析する方法を示す。まず、ポンツーン型の浮体構造物は大規模な振動解析となるため、その解析モデルを低次元化する方法について述べる。つぎに、構造物に加わる流体の圧力効果を付加質量に置換する方法をもちいて、浮体構造物の弾性変形と流体との連成を考慮したウェットモードの固有振動数を求め、低次元化方法の適用範囲について検討する。そして、実証実験浮体構造物による実験結果との比較をおこない、ポンツーン型の浮体構造物の振動特性と低次元化方法の妥当性について述べる。最後に、本方法をもちいてメガフロート空港に航空機(B747-400)が着陸した場合の浮体の挙動をシミュレーションした結果を示す。

2 ポンツーン型浮体構造物の低次元化

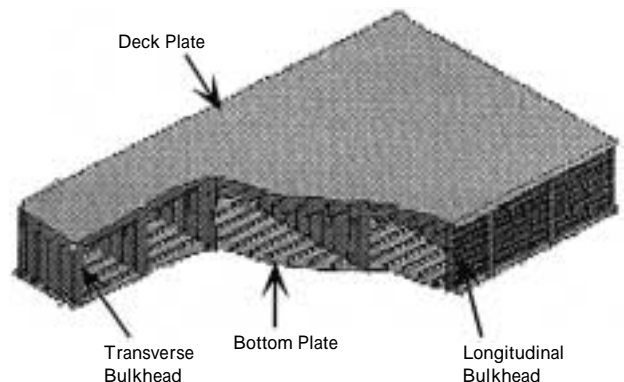
第1図にポンツーン型の浮体構造物の断面構造図を

示す。上甲板および底板が浮体の幅方向、長手方向に上下の隔壁(トランス、ガーター)により結合されている。また、上甲板、底板、隔壁はリブ(ロンジ、スティッフナ)により補強されている。ここでは、超大型浮体式海洋構造物の上甲板と底板が一体となって変形するような振動モード(全体振動)について解析する方法を示す。ポンツーン型浮体構造物は第1図のような三次元構造をしており、これをすべて要素分割したモデルで超大型浮体の振動解析をおこなうことは、現在の計算機の容量では不可能である。したがって、全体振動については計算の自由度を縮小するために浮体構造物を等価な二次元の板構造に置き換える。また、ポンツーン型浮体構造物においては、その構造から全体剛性が異方性をもっており、等価な二次元の板構造でモデル化するためには、剛性の異方性を考慮した等価パラメータを決定する必要がある。この等価パラメータを決定するフローチャートを第2図に、また、フローチャートの内容を以下に示す。

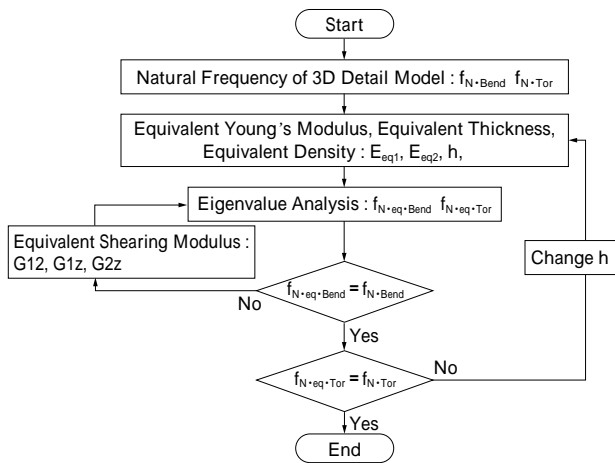
1) 三次元モデルによる基準固有振動数の計算

基準となる三次元の浮体構造物の流体を考慮しない振動モード(以下、ドライモード)に対する固有振動数解析をおこない、その結果を、等価な二次元板構造モデルの等価パラメータを決定するための固有振動数の基準値とする。

2) 二次元板構造モデルの等価ヤング率、等価板厚、等価比重の仮設定



第1図 ポンツーン型浮体構造物の断面図
Fig. 1 Sectional view of pontoon structure



第2図 二次元板構造モデルパラメータ決定フロー
Fig. 2 Flow of parameter determination

浮体の断面形状から計算される実際の断面二次モーメント $I_{real 1}, I_{real 2}$ と鉄のヤング率 E_{steel} から曲げ剛性 $E_{steel} I_{real 1}, E_{steel} I_{real 2}$ が決まる。シェル要素の板厚を h としたときの二次元板構造の浮体の断面二次モーメントは

$$I_{shell 1} = \frac{bh^3}{12}, I_{shell 2} = \frac{Lh^3}{12} \quad (1)$$

となる、ここで、 L は浮体の長さ、 b は浮体の幅を示している。したがって、シェル要素の等価なヤング率は

$$E_{eq 1} = \frac{E_{steel} I_{real 2}}{I_{shell 2}}, E_{eq 2} = \frac{E_{steel} I_{real 1}}{I_{shell 1}} \quad (2)$$

で計算される。また、シェル要素の等価な比重は基準となる浮体構造物の重量を W とすると

$$\rho = \frac{W}{b \cdot L \cdot h} \quad (3)$$

で計算される。

3) 等価横弾性係数の計算

等価ヤング率を決定した結果をもちいて二次元板構造モデルのドライモードの固有振動数解析をおこない、基準値とした三次元浮体構造物のドライモードの固有振動数解析結果と曲げ変形の固有振動数を比較する。両者が一致しない場合は、横弾性係数を変更し、再度、固有振動数解析をおこない、両者が一致した値を等価横弾性係数に仮決定する。

4) ねじれ剛性

上述の等価横弾性係数をもちいた固有振動数解析結果について、二次元板構造モデルのねじれ変形の固有振動数を三次元浮体構造物の結果と比較する。両者が一致しない場合は、ねじれ剛性を調整するために板厚 h を変更する。ここで、板厚 h が変化すれば二次元板構造モデルの断面二次モーメントも変化するので、板厚 h が変化した後の断面二次モーメントをもちいて等価なヤング率および横弾性係数を再計算した後、固有振動数解析をおこない、ねじれ変形の固有振動数に対する収束計算をおこなう。

3. 流体付加質量

次に浮体構造物の弾性変形を考慮した流体付加質量について説明する。浮体構造物に加わる流体の圧力効果は

構造物に対する付加質量と考えることにより、流体の影響をモデル化することができる。流体の特性としては、以下のものを仮定している。

- ・非圧縮性
- ・一様密度
- ・流体は無限
- ・渦なし流れ(非粘性)
- ・定常流れは存在しない

流体に関して、変位スカラーポテンシャル という概念を導入する。ここで、変位 u は、

$$u = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (4)$$

と考えられる。非圧縮性流体を仮定しているので、

$$\text{div } u = 0 \quad (5)$$

となり、式(4)、式(5)より次式を与える。

$$\nabla^2 u = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u = 0 \quad (6)$$

いっぽう、運動方程式は、流体密度を ρ_w 、流体の圧力を P とすると、

$$\rho_w u + \nabla P = 0 \quad (7)$$

と表される。ここで、自由表面上では、

$$P = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \text{const} = 0 \quad (9)$$

である。また、流体と構造の接触面では、

$$n \cdot u_s = n \cdot u_w = n \cdot \nabla \phi \quad (10)$$

$$F_s = -F_w = n \cdot \nabla \phi \cdot A \quad (11)$$

が成立する。ここで、添え字の s, w はそれぞれ構造物と流体を示している。また、 n は構造物から流体へ向かう単位法線ベクトル、 A は要素の断面積である。

以上の式より、構造の要素変位とその要素に作用する流体力の関係式が導かれる。さらに、要素の形状関数に基づいて、節点力 F_s と節点変位 U_s との関係は

$$[F_s] = -[M_w] \ddot{U}_s \quad (12)$$

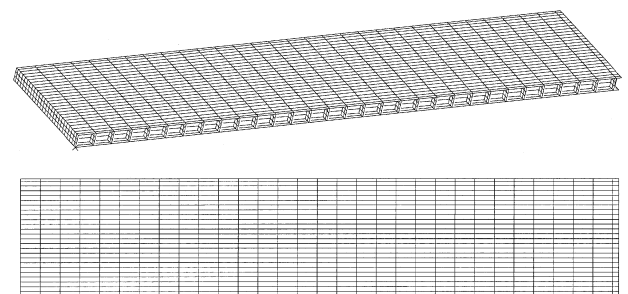
となり、 $[M_w]$ が流体付加質量に相当する。

4. 固有振動数の検討

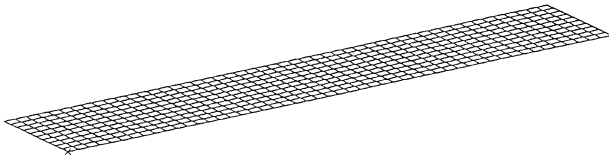
前章で述べた方法により、 $20 \times 100\text{m}$ の浮体構造物の固有振動数解析をおこなった。

4.1 ドライモード

二次元板構造モデルの等価パラメータ決定の基準となる三次元浮体構造物の解析モデル(3D-model)を第3図に示す。上甲板、底板、トランス、ガーダーを要素分割した三次元モデルである。ただし、トランス-トランス



第3図 三次元モデル
Fig. 3 3D-model



第4図 二次元板構造モデル
Fig. 4 2D Shell-model

ス間の上甲板, 底板の曲げ変形は考慮していない。また, 第4図に二次元板構造モデルの解析モデル(2D Shell-model)を示す。なお, 1要素のサイズは2×2mである。

2章で示したドライモードにおける等価パラメータ決定方法をもちいて計算した二次元板構造モデルの固有振動数と, ドライモードにおける三次元モデルの固有振動数計算結果との比較を第1表に示す。両者はよく一致しており, ドライモードでの二次元板構造モデルの等価パラメータの妥当性が示された。

4.2 ウェットモード

前節で求めた二次元板構造モデルに対し, ウェットモードの固有振動数および振動モードを第2表に示す。なお, 比較のため三次元モデルのウェットモードの固有振動数も示す。

つぎに, 実験結果との比較を示す。解析モデルと同じ

第1表 固有振動数(ドライモード)

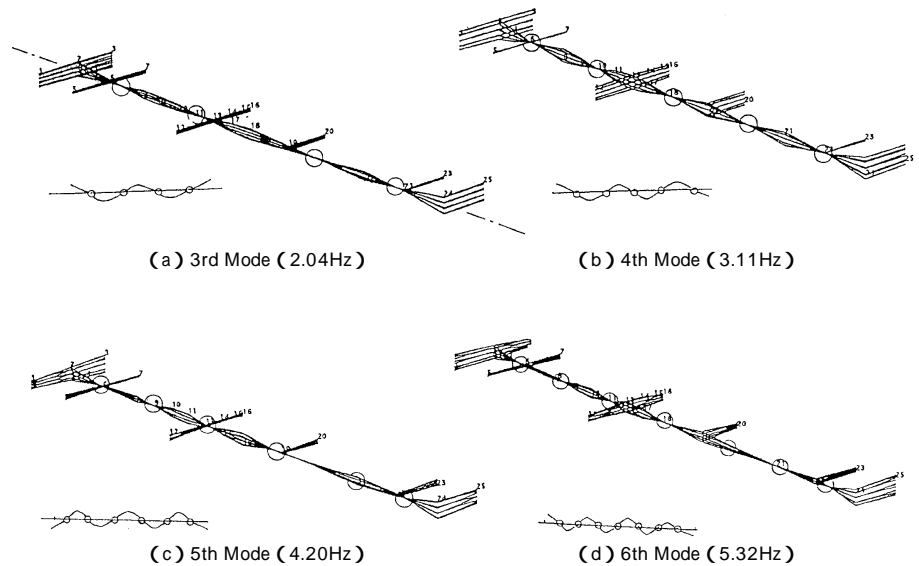
Table 1 Natural frequencies (dry mode)

Bend	2D Shell-model	3D-model
1st	1.60 Hz	1.74 Hz
2nd	4.17	4.46
3rd	7.54	7.89
4th	11.37	11.59
5th	15.40	15.26
6th	19.49	18.73
Torsion	2D Shell-model	3D-model
1st	4.32	4.08
2nd	8.64	8.19
3rd	12.98	12.34
4th	17.32	16.51
5th	21.66	20.64

第2表 固有振動数(ウェットモード)

Table 2 Natural frequencies (wet mode)

Bend	2D Shell-model	3D-model
1st	0.44 Hz	0.47 Hz
2nd	1.09	1.18
3rd	2.05	2.17
4th	3.25	3.35
5th	4.63	4.65
6th	6.16	6.04
Torsion	2D Shell-model	3D-model
1st	1.41	1.38
2nd	2.83	2.77
3rd	4.32	4.23
4th	5.89	5.76
5th	7.54	7.35



第5図 曲げ固有振動数とモードの実験結果

Fig. 5 Experimental result of natural frequency of bending mode

20×100mの浮体構造物を海水に浮かべ, 慣性型の加振機で加振して, 固有振動数および固有振動モードを求めた。第5図に曲げモードの固有振動数および固有振動モードを示す。第2表と第5図の結果を比較すると, 解析結果と実験結果はよく一致している。ただし, 高次モードになるにしたがって, 徐々に解析結果が実験結果より高くなる傾向がある。

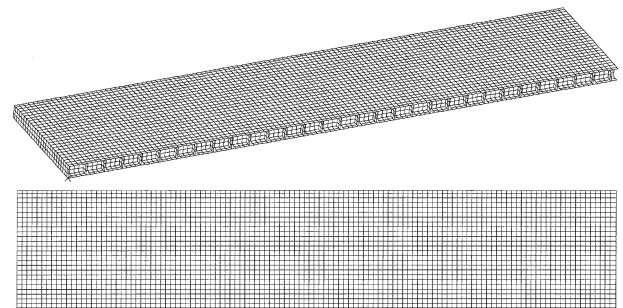
この原因について検討するために, 以下に示す要素分割の小さいモデルをもちいて解析をおこなった。

- ・三次元モデル2(第6図; 3D-model 2)

トランス-トランス間の要素分割をおこない, トランス-トランス間の上甲板および底板の変形を考慮したモデル

- ・二次元板構造モデル2(2D Shell-model 2)

要素サイズを1×1mにしたモデル

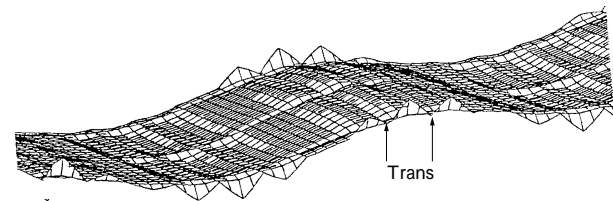
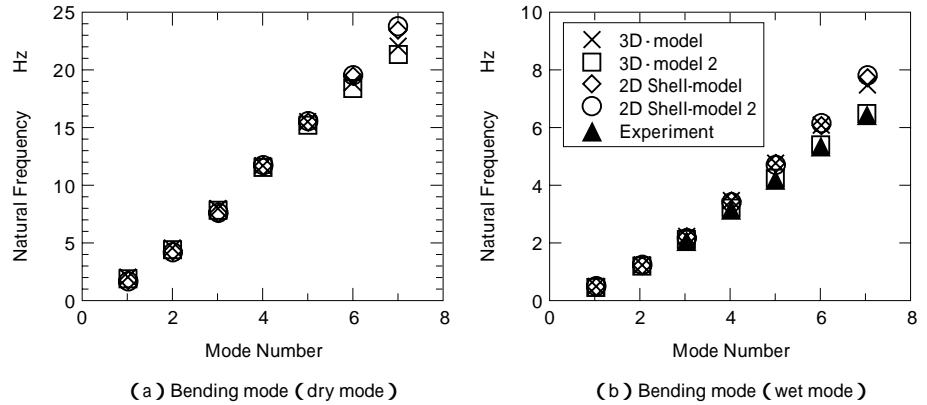


第6図 三次元モデル2

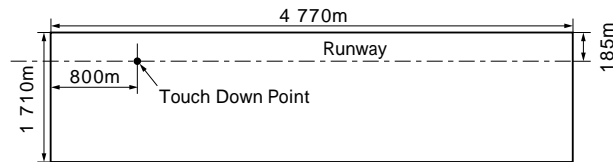
Fig. 6 3D-model 2

以上のモデルに対するドライモードとウェットモードの固有振動数解析をおこない, 今までの解析結果および実験結果との比較を第7図に示す。第7図(b)より, 上甲板および底板のトランス-トランス間の曲げ変形を考慮した三次元モデル2のウェットモードの解析結果は実

第7図 モード次数と固有振動数との関係
Fig. 7 Mode number vs natural frequencies



第8図 底板の振動モード(6次)
Fig. 8 Vibration mode of Bottom plate (6th)



第9図 メガフロート空港の着陸位置
Fig. 9 Dimensions of Mega-float-airport and a touch down point

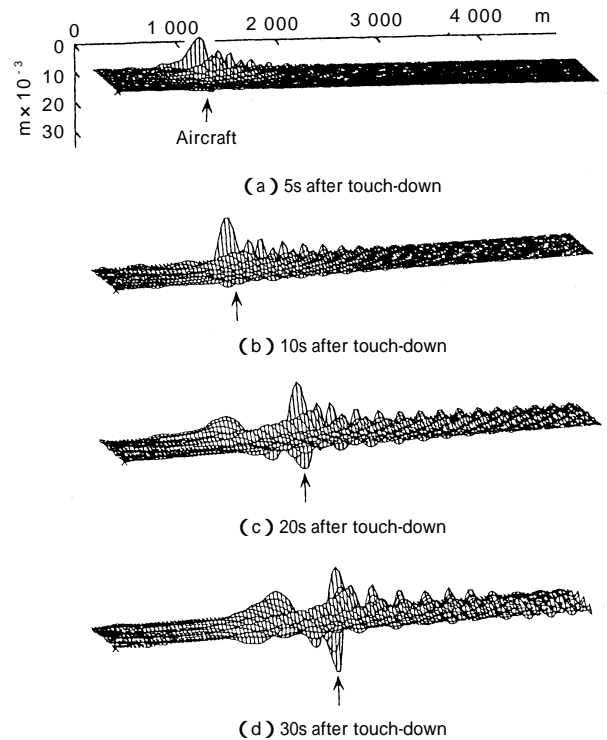
験結果と良く一致していることがわかる。

いっぽう、第7図(a)に示すドライモードについて見ると、ウェットモードにくらべて、各解析結果は6次モードでも比較的互いに一致している。二次元板構造モデル2(要素サイズ1×1m)の解析結果は、ドライモード、ウェットモードともに要素サイズが2×2mの二次元板構造モデルと一致していることがわかる。これらのことから、二次元板構造モデルの固有振動数解析結果が高次モードになるにしたがって実験結果より高くなるのは、要素分割サイズによる浮体構造物の剛性変化が原因しているのではなく、流体付加質量が影響していると考えられる。

ここで、三次元モデル2の流体に接している底板の振動モード(6次モード)を第8図に示す。第8図より、6次モードでは、トランス-トランス間での底板の変形が大きくなっており、流体付加質量による底板の変形を無視できなくなることがわかる。したがって、二次元板構造モデルは、流体付加質量の影響によるトランス-トランス間の底板の変形を考慮できなくなるような高次モードの領域では解析誤差が大きくなる。つまり、浮体の変形の波長が30m以上の領域であれば、精度的にも十分に満足する手法であると判断される。

5. 航空機着陸時シミュレーション

本手法をもちいてメガフロート空港に航空機(B747-400)が着陸した時の浮体の挙動シミュレーションをおこなった。



第10図 航空機滑走中の浮体の変形図
Fig. 10 Deformation after touch down of aircraft

第9図にメガフロート空港の諸元を示す。第9図に示す着陸点に航空機が着陸し、浮体上を滑走する場合の浮体構造物の挙動解析をおこなった。結果を第10図に示す。航空機が滑走することによって、浮体の曲げ波が滑走方向に進行しているのが確認できる。

むすび=ポンツーン型浮体構造物の振動解析に対し、二次元板構造によるモデル化手法を提案し、その妥当性を示した。また、本手法をもちいてメガフロート空港に航空機が着陸した場合の浮体挙動をシミュレーションし、実規模浮体構造物の設計へ反映できることを示した。

参考文献

- 1) 登坂宣好: 日本建築学会論文集, Vol.298 (1980), p.143.
- 2) 大川 豊ほか: 船舶技術研究所報告別冊, Vol.6 (1985), p.15.
- 3) 渡辺英一ほか: 土木学会構造工学論文集, Vol.42A (1996), p.49.
- 4) T. Hamamoto et al.: Proc. of OMAE, Vol. 6 (1997), p.195.