

## II - 355

### 有限要素法による三次元弾性浮体の波浪応答解析

大阪府 正員○小寺 健二郎 京都大学工学部 正員 渡邊 英一  
京都大学工学部 正員 杉浦 邦征 京都大学工学部 正員 宇都宮智昭

#### 1.はじめに

浮体式海洋構造物において、施設としての機能性や安全性を長期間維持できる構造物を設計する上で、波浪による応答特性を推定することは極めて重要である。その際、小規模な浮体式構造物では、波浪による弾性応答は剛体運動に比して小さいが、大規模なものになると、浮体の剛性が相対的に低下し、浮体部分を弾性体と見なした波浪応答解析を行うことが必要である。

また、単純な形状の大規模な浮体式構造物に限らず、任意形状の海洋構造物の応答解析を行うためにも三次元での解析が必要である。

そこで本研究では、流体部、浮体部ともに有限要素法を用いた任意形状三次元弾性体の波浪応答解析プログラムの開発をおこない、これを用いて浮体を弾性体とみなし、浮体-流体の相互作用を考慮した波浪応答解析を行うことを目的とする。

#### 2.解析方法

本研究では、流体部分に無限要素を組み込んだ有限要素解析(FEM)<sup>1)</sup>、浮体部分に汎用的な有限要素解析プログラムであるNASTRANを用い、流体-構造物系の相互作用を考慮した波浪応答解析プログラムを作成し、浮体を弾性体とみなした波浪応答解析を行った。本手法によれば、流体部、浮体部とも一貫して有限要素法の文脈に沿って定式化できるため、流体部と浮体部の接続が容易であり、また、理論的な明快さを有する。

#### 3.解析理論

浮体の波浪中動揺における研究は、理論的には速度ポテンシャルに関する境界値問題として定式化され、全速度ポテンシャルは次式のように入射波によるポテンシャル、回折波によるポテンシャル、造波ポテンシャル（浮体が単位速度振幅運動したとき生じるポテンシャル）の和と考えられる。

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_d + \sum_{j=1}^N \phi_j \dot{\xi}_j$$

ここで、 $\Phi$ 、 $\Phi_0$ 、 $\Phi_d$ はそれぞれ全速度ポテンシャル、入射波ポテンシャル、回折波ポテンシャルであり、 $\phi_j$ はj自由度方向の造波ポテンシャル、 $\dot{\xi}_j$ はj自由度方向の物体の速度である。流体部に対するFEM<sup>2)</sup>において、速度ポテンシャルを形状関数を用いて節点におけるポテンシャルに離散化し、全体方程式を解くことで節点における回折波ポテンシャルと造波ポテンシャルを求めることができる。ここで、無限要素の部分に用いる形状関数は、固有関数展開法により得られる次式のような級数形の解析解の近似式より定められる。

$$\phi_j \cong a \frac{1}{\sqrt{r}} e^{ik_1 r} + b \frac{1}{\sqrt{r}} e^{-k_1 r}$$

ここでa、bはパラメータであり、rは浮体中心からの距離、 $k_0$ は波数、 $k_1$ は第1減衰波成分に対する波数

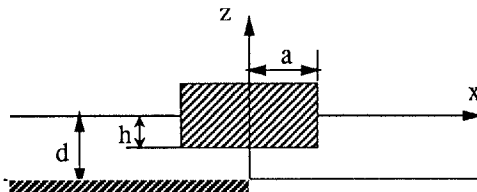


図1 円柱浮体モデル

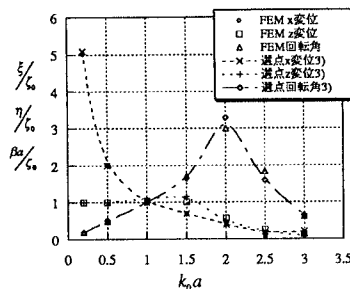


図2 剛体変位の検証

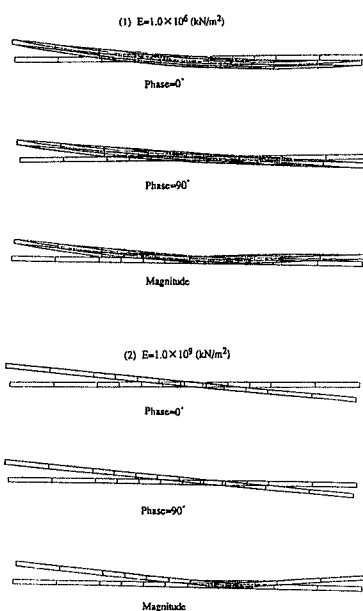


図3 円柱浮体の変形図(波長L=7.85m)

であり、 $\omega$ を波の角振動数、 $h$ を水深、 $g$ を重力加速度とすると、次式を満たすような数値である。

$$k_1 \tan k_1 h = -\frac{\omega^2}{g}$$

また、入射波ポテンシャルは線形波理論より既知である。一方、浮体部に対するFEMにおいて、全体剛性方程式の右辺である節点外力を入射波及び回折波によるポテンシャルによって生じる力と、造波ポテンシャルによって生じる力に分けて考えると、後者は浮体の変位に関係し、全体剛性方程式の左辺（全体剛性マトリックス）に組み込むことができる。このようにして次式のような浮体部の全体剛性方程式が得られる。

$$[-\omega^2([M]+[M_s])+[K]]\{\bar{f}\}=\{\bar{f}\}$$

ここで、 $[M]$ 、 $[M_s]$ 、 $[K]$ 、はそれぞれ、質量マトリックス、付加質量および造波減衰によるマトリックス、剛性マトリックスであり、 $\{\bar{f}\}$ 、 $\{\bar{f}\}$ はそれぞれ、浮体の節点変位、浮体に働く節点外力である。上式を解いて浮体の節点変位が求められる。

#### 4.数値解析例

図1のような円柱浮体で、半径1.0(m)、水深1.0(m)、吃水0.25(m)、ヤング率 $1.0 \times 10^9$ (kN/m<sup>2</sup>)のものに対して、浮体の重心の水平変位、鉛直変位、回転角を求め、浮体を剛体とみなし選点法を用いた解析の結果<sup>3)</sup>と比較したものが図2である。また、同じく図1のような円柱浮体で、半径4.0(m)、水深1.0(m)、吃水0.1(m)のものに対して、 $k_0 a = 3.2$  ( $k_0$ :波数、 $a$ :半径)、波長 $L = 7.85$ (m)とし、2種類のヤング率における変形図を示したものが図3である。次に、図4のような矩形浮体で $a = 5.0$ (m)、 $b = 5.0$ (m)、 $d = 1.0$ (m)、 $h = 0.1$ (m)、 $\psi = 0.0$ (rad)のものに対して、 $k_0 d = 1.0$  ( $k_0$ :波数、 $d$ :水深)、波長 $L = 6.28$ (m)とし、2種類のヤング率における変形図を示したものが図5である。なお、このモデルは入射波に対して左右対称なので、図4の斜線部分に対してのみ解析を行った。

#### 5.結論

- 1) 流体部分に無限要素を組み込んだ有限要素解析(FEM)、浮体部分にNASTRANを用い、流体-構造物系の相互作用を考慮した波浪応答解析プログラムを作成した。
- 2) 図2より、解析モデルが小さく、円柱浮体であることからこの場合は剛体変形しているものと見なせ、妥当な結果が得られていることから本研究で作成した三次元波浪応答解析プログラムが有効性のあるものであることが検証された。
- 3) 図3、図5より、ヤング率を小さくすると弾性変形が確認された。
- 4) 今後は、さらに大規模な形状のものや、様々な形状のモデルに対して解析を行う必要があると思われる。

#### 参考文献

- 1) Woo-Sun Park, Chung-Bang Yun and Chong-Kun Pyun: Infinite element for 3-dimensional wave-structure interaction problems, Eng. Struct., Vol 14, No.5, 1992.
- 2) O.C.ツイエンキーヴィッツ:マトリックス有限要素法、培風館、1993.
- 3) 土木学会海岸工学委員会:海岸波動、土木学会、1994.

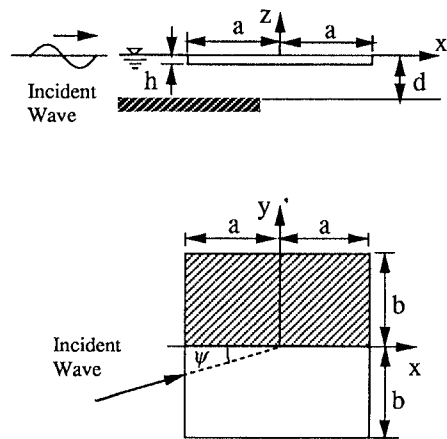
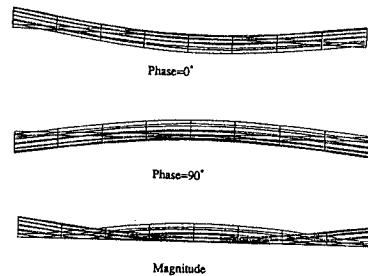


図4 矩形浮体モデル

(1)  $E = 1.0 \times 10^7$  (kN/m<sup>2</sup>)



(2)  $E = 1.0 \times 10^9$  (kN/m<sup>2</sup>)

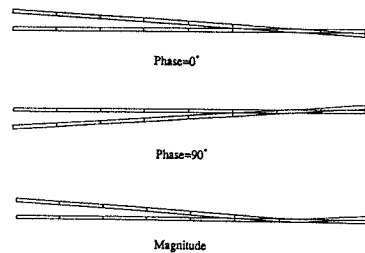


図5 矩形浮体の変形図(波長 $L = 6.28$ m)