

# 有限要素法による水中係留浮体の地震時動揺解析

Seismic Response Analysis of Submerged Floating Structures by F.E.M.

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 横濱秀明(Hideaki Yokohama)  
 北海道大学大学院工学研究科 正員 小池明夫(Akio Koike)  
 北海道大学大学院工学研究科 正員 蟹江俊仁(Shunji Kanie)  
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆(Takashi Mikami)

## 1. まえがき

一般に浮体構造物は免震性が高いとされている。しかし現実には、水深の大きいところで航行中の船舶が海底で発生した地震の衝撃を受ける、いわゆる海震による被害事例が報告<sup>1)2)</sup>されており、必ずしも免震性が高いとは言いきれない。本研究は水中に係留された浮体構造物を対象にその地震時挙動について検討を行うものである。係留浮体の動揺問題としては、二次元の境界要素法を用いた波浪動揺解析が一般的に行われているが、流体の圧縮性を考慮した地震時挙動解析についてはあまり例を見ない。清川<sup>3)</sup>が圧縮性を考慮した境界要素法を提示しているものの、水深が一定であることなどの条件が必要であり、水域の形状の任意性を考慮しにくいなどの難点がある。

そこで本研究では、水中係留浮体の地震（鉛直方向）時挙動を、有限要素法により解析することとした。有限要素法を用いることにより、海底面の起伏や、局所的な海底面の振動の影響などが比較的容易に考慮できることなどの利点がある。定式化については、流体を非粘性、非回転の圧縮性流体と仮定して、Helmholtz 方程式をガラーキン法により有限要素法に離散化する手法を採用した。

## 2. 前提条件と解析モデル

解析に関しては次の仮定に従うものとする。

- (1) 浮体の動揺変位は微小とする。
- (2) 流体場のポテンシャルは入射・回折・反射によるポテンシャルの線形和で表せるものとする。
- (3) 浮体、海底面および側壁は剛体とする。
- (4) 流体は、非粘性、非回転で圧縮性を考慮する。

解析モデルを図-1に示す。図-1に示した浮体は線形のパネにより係留されていると仮定し、運動は  $X, Z, \theta$  の3自由度成分を有するものとする。

## 3. 支配方程式と境界条件

圧縮性を考慮した流体領域の支配方程式は次式のような Helmholtz 方程式となる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (\text{in } D_L) \quad (1)$$

ここで  $c$  は水中での圧力波伝播速度である。

$$\Phi = 0 \quad (\text{on } S_F) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (\text{on } S_0) \quad (3)$$

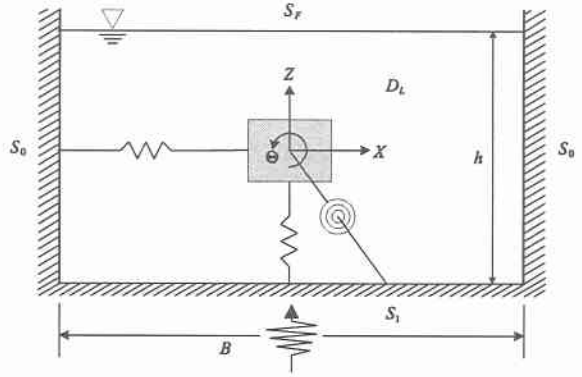


図-1 モデル図

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_{sn} \quad (\text{on } S_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = v_n \quad (\text{on } S_b) \quad (5)$$

式(2)は、表面波の影響が無視できると仮定した自由表面における境界条件、式(3)は側壁における不透過条件であり、ここでは完全反射を仮定した。式(4)、式(5)は浮体表面および海底面における流体運動速度との連続条件であり、 $n$  による微分は法線方向微分を、また  $v_{sn}, v_n$  は、浮体表面、海底面の法線方向速度振幅を示している。

## 4. 流体領域の有限要素法への定式化

式(1)をガラーキン法により離散化すると次式のような速度ポテンシャルの運動方程式となる。

$$[m]\{\ddot{\Phi}\} + [k]\{\Phi\} = [f] \left\{ \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right\} \quad (6)$$

ここで、全体マトリクス  $[M]$ 、 $[K]$  および  $[F]$  は、4 節点アイソパラメトリック要素の形状マトリクス  $[N]$ 、線要素の形状関数マトリクス  $[N_i]$  を用いて次式のようになる。

$$[M] = \frac{1}{c^2} \sum_{e=1}^n \int_{D_e} [N]^T [N] \mu D_L \quad (7)$$

$$[K] = \sum_{e=1}^n \int_{D_e} \nabla [N]^T \nabla [N] \mu D_L \quad (8)$$

$$[F] = \sum_{i=1}^l \int_{S_i} [N_i]^T [N_i] k S \quad (9)$$

## 5. 構造物の運動方程式

流体中に係留された浮体の運動方程式は次式で表される。

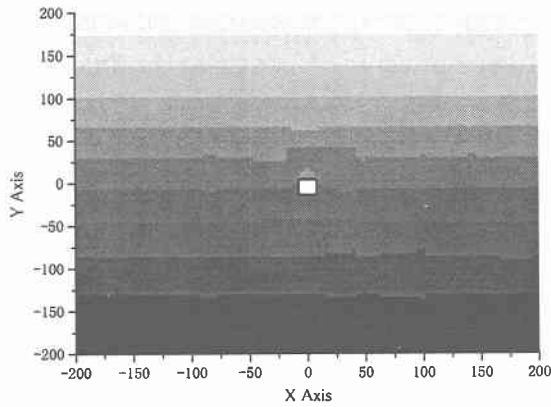


図-2 圧力分布

$$[m]\ddot{u} + [k]u = \{P\} \quad (10)$$

$$\text{ここで, } [m] = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_z & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta \end{bmatrix}, [k] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xz} & k_{x\theta} \\ k_{zx} & k_{zz} & k_{z\theta} \\ k_{\theta x} & k_{\theta z} & k_{\theta\theta} \end{bmatrix}$$

および  $\{u\} = (x, z, \theta)^T$  は、水平、鉛直および回転の3自由度における質量マトリクス、剛性マトリクス、変位ベクトルであり、 $I_\theta$  は浮体の回転中心に関する回転慣性モーメントである。また、右辺の荷重項は、入射波に起因する流体強制力と、構造物の運動による造波減衰力との和として次式のように表される。

$$\{P\} = \{P_f\} + \{P_D\} \quad (11)$$

$\{P_f\}$ : 流体強制力,  $\{P_D\}$ : 造波減衰力

造波減衰力は、浮体が水平、鉛直および回転方向に動揺したときに発生するラディエーションポテンシャルを用いて求めることができ、構造物の運動速度に比例する力として左辺に移項する。さらに、係留バネ固定点(海底面)の運動による慣性力項を考慮して、構造物の運動方程式は最終的に次式となる。

$$[M]\ddot{X} + [C]\dot{X} + [K]X = \{P_f\} - [M]\ddot{X}_G \quad (12)$$

ここで、 $[C]$ は造波減衰力を示す減衰マトリクスであり、 $\ddot{X}_G$ は、係留バネ固定点(海底面)での加速度ベクトルである。

## 5. 数値解析例

解析諸元は、水深  $h = 400m$ 、幅  $B = 400m$  とし、浮体は  $15m \times 15m$  の矩形浮体である。入力波は、境界  $S_1$  において鉛直方向加速度  $150gal$  (一定) を与え、入力波の円振動数を変化させながら解析を行った。要素は、4節点アイソパラメトリック要素を用い、全要素数は 688、全節点数は 752 である。また、水中での圧力波伝播速度  $c = 1516m/s$ 、流体の密度  $\rho_w = 1.0ton/m^3$  を採用した。

図-2は、浮体の固有円振動数に等しい円振動数を有する地震波が入射したときの流体強制力最大時の圧力分布を示した図である。

図-3は、構造物変位の動的応答倍率を示したもので、流体を非圧縮性と仮定した場合の解と合わせて記載した。

また、図-4は造波減衰から求めた付加質量と入射波の円振動数の関係を表したもので、構造物による排水質量に対する比で表した。

図-5は地盤加速度、構造物加速度、流体強制力及び

造波減衰力の時間領域における位相差を示している。

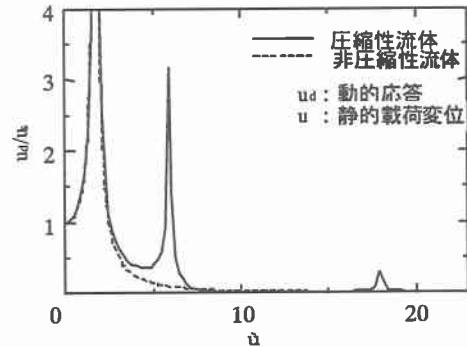


図-3 構造物変位の動的応答倍率

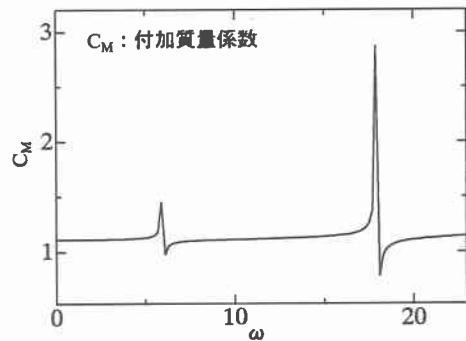


図-4 付加質量係数

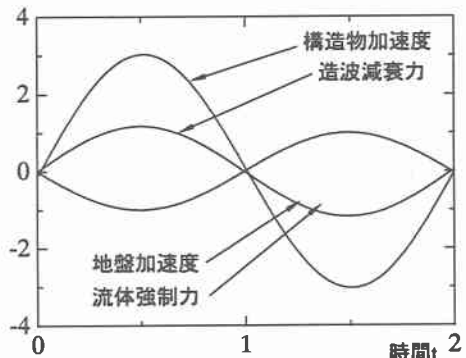


図-5 位相差

## 6. まとめ

構造物の固有周期と入射波の周期が等しい場合、大きな応答倍率を示し、流体を圧縮性流体として扱うか、非圧縮として扱うかの差はほとんど見られない。しかし、海域自体が持っている固有モードに起因する大きな応答を非圧縮流体と仮定した場合には、評価できない可能性がある。また、付加質量係数の入射波円振動数依存性は、ほとんどないものの、海域の固有モード周辺で大きく変動することが判明した。今後、海域の水平方向の大きさ、境界条件ならびに水深の影響等に関して研究を進め、流体の圧縮性の影響について考察を加える予定である。

## 参考文献

- 1) 佐藤孫七：海震の話し，気象 12.2, 1968.
- 2) 佐藤孫七：“海震”体験あれこれ，気象 22.1, 1978.
- 3) 清川哲志：海震による浮体の高振動動揺について，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.816-820, 1992.