

# 弾性浮体構造物の地震時動的応答に関する一解析

東海大学大学院 学生員 ○白川 英輝  
 東海大学大学院 学生員 内海 秀幸  
 東海大学海洋学部 正員 川上 哲太郎  
 東北大学工学部 正員 北原 道弘

## 1. はじめに

近年、海洋空間において空港などの超大型浮体式構造物の建設が望まれており、現在、実規模を意識したモデルでの実験が進められている。これまで、浮体の動揺をはじめとした動的応答に関しては一般的に浮体は剛体とモデル化されてきた。しかし、現在想定されている様な大規模浮体においては構造系全体としての剛性は著しく減少するため、剛体とモデル化するのが妥当でない場合も生じてくる。そこで、本研究では浮体構造物の弾性応答に着目した地震時応答解析手法を提案し、その解析例を示す。本解析手法においては海底地盤を伝播してきた波動(地震波)が流体領域を介して浮体構造物に対する外力となるように、境界要素法を用いた浮体構造物、海底地盤、流体領域を一つの連続体モデルとして定式化しており、各領域の動的相互作用を直接的に導入している。

## 2. 基礎式と連続条件

Fig. 1に示すように、構造物が海に浮かんでいる状況を想定する。本解析では海底地盤と浮体式構造物を弾性体、流体部分を非圧縮非粘性の完全流体と仮定した。流体領域および海底地盤・弾性浮体領域の基礎式は定常状態においてそれぞれ以下のようである。

$$\Delta\Phi = 0 \tag{1}$$

$$\mu\Delta\mathbf{u} + (\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \rho\omega^2\mathbf{u} = \mathbf{0} \tag{2}$$

上式において $\Phi$ は速度ポテンシャル、 $\mathbf{u}$ は変位、 $\rho$ は密度、 $\lambda$ と $\mu$ はラメ定数である。また $\omega$ は角振動数である。

次に弾性体と流体が接し合う境界における連続条件を考える。まず流体圧 $p$ は速度ポテンシャル $\Phi$ を用いて次式で表される。

$$p = i\rho\omega\Phi \tag{3}$$

いま、流体と弾性体に対する力学的連続条件は上記流体圧 $p$ と表面力 $\mathbf{t}$ を用いて次のように書ける。

$$\mathbf{t} = -n\mathbf{p} \tag{4}$$

ここで、 $\mathbf{n}$ は弾性体境界上における単位外向き法線ベクトルである。さらに、運動学的連続条件として弾性体の境界における変位速度と、その点における水粒子速度の連続性より次式が成立する。

$$-i\omega\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \tag{5}$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は流体の速度ベクトルである。また数値計算上、流体領域は有限な長さに打ち切る必要があるため弾性浮体領域から十分離れたところで仮想境界を設定した (Fig. 1参照)。仮想境界上において流体領域内の速度ポテンシャル $\Phi^I$ と仮想境界以遠の領域における $\Phi^{I*}$ には次のような

連続条件が成立する。

$$\Phi^{I*} = \Phi^I, \quad \frac{\partial\Phi^{I*}}{\partial n} = \frac{\partial\Phi^I}{\partial n} \tag{6}$$

ここで、仮想境界以遠の水深が一定であれば $\Phi^{I*}$ は解析的に決定できる。なお流体領域の自由表面における境界条件は次のようになる。

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x_2} = \frac{\omega^2}{g}\Phi \tag{7}$$

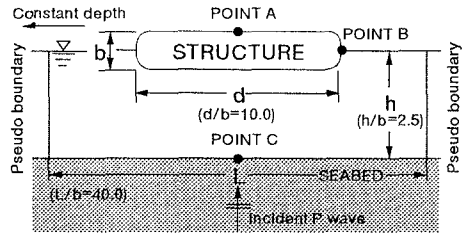


Fig. 1 Numerical model

## 3. 弾性浮体の内部応力

弾性浮体領域における内部応力は弾性浮体境界上において得られた変位と表面力(海底地盤-流体-浮体構造物の連成系モデルに対する境界値問題を境界要素法により数値的に解いて求められる<sup>1)2)</sup>)を用いて次式のように積分表現される。

$$\tau_{ij}(\mathbf{x}) = \int_S P_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_k(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} - \int_S Q_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_k(\mathbf{y}) dS_{\mathbf{y}} \tag{8}$$

ここで、積分核である $P, Q$ は動弾性波動場の基本解

$$U_i^k = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(k_T r) \delta_{ki} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_k \partial x_i} \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \tag{9}$$

を用いて

$$P_{ij}^k = \lambda U_{m,m}^k \delta_{ij} + \mu U_{i,j}^k + \mu U_{j,i}^k \tag{10}$$

$$Q_{ij}^k = (\lambda P_{m,m}^{kl} \delta_{ij} + \mu P_{i,j}^{kl} + \mu P_{j,i}^{kl}) n^l \tag{11}$$

の様に表される<sup>2)</sup>。

## 4. 数値計算法と計算例

海底地盤-流体-浮体構造物連成系に対する境界積分方程式を数値的に評価するため、まず、各領域それぞれの基礎式を境界積分方程式に変換し、2次アイソパラメトリク要素を用いて離散化を行った。さらに、連続条件式(4)~(6)と境界条件(7)を導入することにより海底地盤-

キーワード：浮体構造物 弾性体 境界要素法

〒424 静岡県清水市折戸3-20-1 TEL 0543-34-0411 (内線2523) FAX 0543-34-9768

流体-浮体構造物連成系に対する連立一次方程式を構築した。

本解析ではFig. 1に示すような弾性浮体モデルに対して、地震外力として海底地盤の鉛直下方より伝わってくる弾性波 (P波) を考えた。

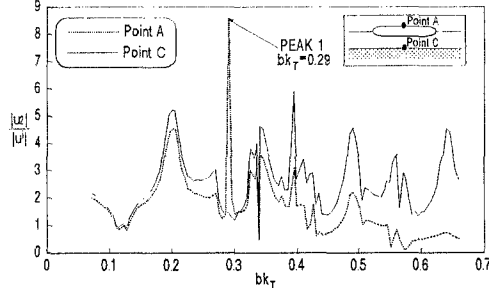


Fig. 2 Response curves at point A and C

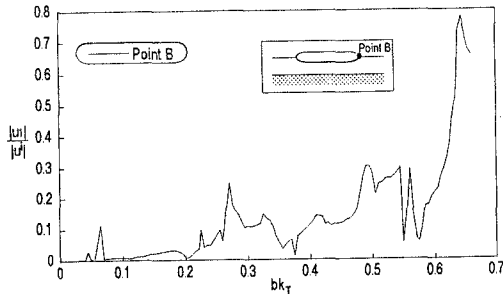
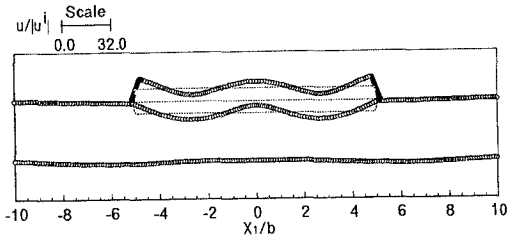
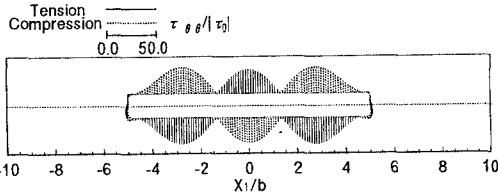


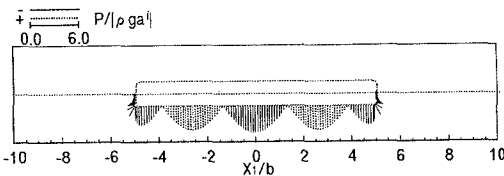
Fig. 3 Response curve at point B



(a) Deformation



(b) Hoop stress



(c) Hydrodynamic pressure

Fig. 4 P-wave incidenc at peak 1(Fig.2), Real part ( $bk_T = 0.29, bk_L = 0.155$ )

また、各領域の物性値は海底地盤を砂質地盤と想定して  $\nu = 0.3, \rho = 2.0(t/m^3), \mu = 1.96 \times 10^5(kN/m^2)$  とした。浮遊式構造物は  $\nu = 0.3, \rho = 0.5(t/m^3), \mu = 2.45 \times 10^5(kN/m^2)$  とし、浮体の剛性に関しては2次元の解析を行うため、実機の浅喫水超大型浮遊式構造物の  $EI = 5.1 \times 10^9(kN/m^2)$  との相似性を考慮して決定している<sup>3)</sup>。

Fig. 2に無次元化入射波波数  $bk_T$  に対する POINT A および POINT C, Fig. 3では構造物側面中央 POINT B における応答倍率をそれぞれ示す (Fig. 1参照)。ここで、応答倍率は Fig.2では鉛直方向変位  $u_2$  と入射波振幅  $u_1^i$  との絶対値の比  $|u_2|/|u_1^i|$ , Fig. 3では水平方向変位を考え  $|u_1|/|u_1^i|$  と定義している。Fig. 4に応答曲線 (Fig. 2) がピーク値を示す無次元化入射波波数  $bk_T = 0.29$  (peak 1) での変位 (a), Hoop stress (b), 浮体構造物底面での動水圧の分布状態 (c) を示す。図中、Hoop stress において実線は引張り、点線は圧縮を表しており、動水圧においては実線は負圧、点線は正圧を表している。変形 (a) を見てみると、海底地盤はほとんど変形していないにも係わらず、浮体構造物に変形しており、構造物自体の固有振動が卓越した変形モードが表れているものと考えられる。また Hoop stress および動水圧の分布状態は浮体構造物の変形を示唆する状態となっている。さらに、Fig. 5では浮体構造物内部での応力の分布状態を各成分ごとに表している。

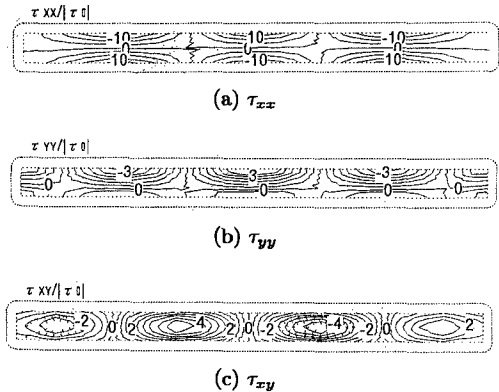


Fig. 5 Stress components P-wave incidenc at peak 1(Fig.2), Real part ( $bk_T = 0.29, bk_L = 0.155$ )

## 5. おわりに

本解析では単純な解析モデルではあるが各領域の相互作用を考慮した上で浮体構造物の地震時応答を明らかにすることが出来た。今後の課題としては係留問題が挙げられ、発表当日には係留による拘束条件を考慮した解析結果についても言及する予定である。

### 参考文献

- 1) 川上哲太郎 他：地盤-構造物-流体系における動的相互作用問題への積分方程式法の応用, 境界要素法論文集, 3巻, pp. 191-196, 1985.
- 2) 内海秀幸 他：多孔質弾性地盤内の動的応力に及ぼす間隙率の影響, 境界要素法論文集, 13巻, pp.137-142, 1996.
- 3) 渡邊英一 他：大規模弾性浮体の固有値振動解析: 構造工学論文集, Vol. 42A, pp. 49-54, 1996.