

I-A 112 海洋構造物基礎地盤周辺における動的応力の解析

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
東海大学海洋学部 正 員 北原 道弘

1. はじめに

既往の研究において、流体—海洋構造物—海底地盤系の動的相互作用問題に対して、著者らは境界要素法を用いた解析手法を開発し、海洋構造物、海底地盤の境界上での変位、応力を重視した解析を行っている¹⁾。本研究では、本手法を拡張し、流体—海洋構造物—海底地盤系の動的相互作用を考慮しつつ、海底地盤内部での変位および応力の分布状態を明らかにすることを目的とした解析手法の開発を行ったものである。

2. 解析モデル

解析対象とする流体—海洋構造物—海底地盤系モデルをFig. 1に示す。ここで、領域I, I⁺, I⁻は流体領域で、非圧縮非粘性の完全流体とし、領域IIは構造物による波の散乱が顕著な領域、I⁺とI⁻は無限遠方を含む一定水深領域と仮定した。領域IIの海洋構造物は線形弾性体、領域IIIは海底地盤であり、多孔質弾性体²⁾³⁾と仮定した。外力としては、地震時を想定した海底地盤内を伝播する弾性波動および領域I⁻の遠方より伝播する水面波を考える。

3. 海底地盤内部の応力・変位

海底地盤領域IIIにおける内部の変位および応力は境界S₄およびS₆上において得られた変位と表面力（流体—海洋構造物—海底地盤系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（参考文献1）参照）を用いて次式のように積分表現される。

$$u_i(\mathbf{x}) = \int_{S_4+S_6} U_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_j(\mathbf{y}) dS_y - \int_{S_4+S_6} T_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_j(\mathbf{y}) dS_y + u_i^I(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$$\tau_{ij}(\mathbf{x}) = \int_{S_4+S_6} P_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_k(\mathbf{y}) dS_y - \int_{S_4+S_6} Q_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_k(\mathbf{y}) dS_y + \sigma_{ij}^I(\mathbf{x}) \quad (2)$$

ここで、 $u_i^I(\mathbf{x})$, $\sigma_{ij}^I(\mathbf{x})$ は入射波の持つ変位および応力であり、 $\mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ はそれぞれ次のように表される。

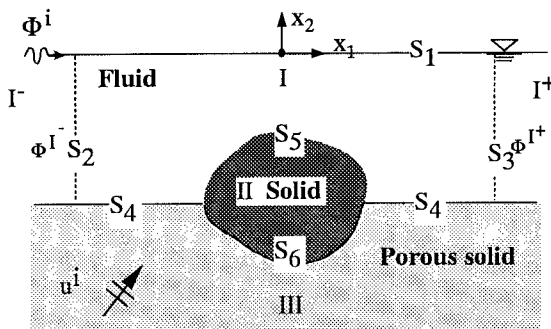


Fig. 1 Fluid-structure-sebed system

$$\mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(k_T r) \mathbf{1} + \frac{1}{k_T^2} \nabla \nabla \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \quad (3)$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{T}_y^n \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (4)$$

式(2)の内部応力に対する積分表現において、 P_{ij}^k, Q_{ij}^k は式(3)の動弾性波動場の基本解を応力表現する事により以下のように表される。

$$P_{ij}^k = \lambda U_{m,m}^k \delta_{ij} + \mu U_{i,j}^k + \mu U_{j,i}^k = \frac{i}{4} k_T \left[\left(\frac{\lambda}{\mu} \delta_{ij} r_{,k} + \delta_{ik} r_{,j} + \delta_{jk} r_{,i} \right) AT1 - \left(\left(\frac{\lambda}{\mu} + 2 \right) \delta_{ij} r_{,k} + \delta_{ik} r_{,j} + \delta_{jk} r_{,i} - 4r_{,i} r_{,j} r_{,k} \right) AT2 - \left(\frac{\lambda}{\mu} \delta_{ij} r_{,k} + 2r_{,i} r_{,j} r_{,k} \right) AT3 \right] \quad (5)$$

$$AT1 = - (k_T r)^{-1} H_0(k_T r) - (1 - 2(k_T r)^{-2}) H_1(k_T r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^3 [(k_L r)^{-1} H_0(k_L r) - 2(k_L r)^{-2} H_1(k_L r)] \quad (6)$$

$$AT2 = (k_T r)^{-1} H_0(k_T r) - 2(k_T r)^{-2} H_1(k_T r) - \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^3 [(k_L r)^{-1} H_0(k_L r) - 2(k_L r)^{-2} H_1(k_L r)] \quad (7)$$

$$AT3 = - 2(k_T r)^{-1} H_0(k_T r) - (1 - 4(k_T r)^{-2}) H_1(k_T r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^3 [2(k_L r)^{-1} H_0(k_L r) + (1 - 4(k_L r)^{-2}) H_1(k_L r)] \quad (8)$$

$$Q_{ij}^k = (\lambda P_{m,n}^{kl} \delta_{ij} + \mu P_{i,j}^{kl} + \mu P_{j,i}^{kl}) n^l = - \frac{i}{4} \mu k_T^2 [RTN1_{ij}^k (k_T r)^{-1} AT1 + RTN11_{ij}^k AT11 - RTN2_{ij}^k (k_T r)^{-1} AT2 - RTN22_{ij}^k AT22 - RTN3_{ij}^k (k_T r)^{-1} AT3 - RTN33_{ij}^k AT33] \quad (9)$$

$$AT11 = - (1 - 3(k_T r)^{-2}) H_0(k_T r) + 2(k_T r)^{-1} (1 - 3(k_T r)^{-2}) H_1(k_T r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^4 [-3(k_L r)^{-2} H_0(k_L r) - (k_L r)^{-1} (1 - 6(k_L r)^{-2}) H_1(k_L r)] \quad (10)$$

$$AT22 = - 3(k_T r)^{-2} H_0(k_T r) - (k_T r)^{-1} (1 - 6(k_T r)^{-2}) H_1(k_T r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^4 [3(k_L r)^{-2} H_0(k_L r) + (k_L r)^{-1} (1 - 6(k_L r)^{-2}) H_1(k_L r)] \quad (11)$$

$$AT33 = - (1 - 6(k_T r)^{-2}) H_0(k_T r) + 3(k_T r)^{-1} (1 - 4(k_T r)^{-2}) H_1(k_T r) + \left(\frac{k_L}{k_T} \right)^4 [(1 - 6(k_L r)^{-2}) H_0(k_L r) - 3(k_L r)^{-1} (1 - 4(k_L r)^{-2}) H_1(k_L r)] \quad (12)$$

$$RTN1_{ij}^k = \frac{\lambda}{\mu} \left(\frac{\lambda}{\mu} + 4 \right) \delta_{ij} n^k + 2(\delta_{ik} n^j + \delta_{jk} n^i) - 2 \frac{\lambda}{\mu} (\delta_{ij} r_{,k} n^l + n^k r_{,i} r_{,j}) - RN_{ijk} \quad (13)$$

$$RTN11_{ij}^k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \delta_{ij} n^k + 2 \frac{\lambda}{\mu} (\delta_{ij} r_{,k} n^l r_{,l} + n^k r_{,i} r_{,j}) + RN_{ijk} \dots\dots\dots (14)$$

$$\begin{aligned}
RTN2_{ij}^k = & 4\left(\frac{\lambda}{\mu} + 1\right)\delta_{ij}n^k - 2\left(3\frac{\lambda}{\mu} + 4\right)\delta_{ij}r_{,k}n^l r_{,l} \\
& - 2\left(\frac{\lambda}{\mu} + 2\right)n^k r_{,i}r_{,j} + 2(\delta_{ik}n^j + n^i\delta_{jl}) \\
& + 24r_{,i}r_{,j}r_{,k}n^l r_{,l} - 5RLN_{ij}^k \dots\dots\dots (15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RTN22_{ij}^k = & \left(\frac{\lambda}{\mu} \left(\frac{\lambda}{\mu} + 2 \right) \right) \delta_{ij} n^k \\
& - 2 \frac{\lambda}{\mu} \delta_{ij} r_{,k} n^l r_{,l} + 2 \left(\frac{\lambda}{\mu} + 2 \right) n^k r_{,i} r_{,j} \\
& - 8 r_{,i} r_{,j} r_{,k} n^l r_{,l} + RN_{ij}^k \dots \dots \dots (16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
RTN3_{ij}^k = & \left(\frac{\lambda}{\mu}\left(\frac{\lambda}{\mu}+2\right)\right)\delta_{ij}n^k \\
& + 2\left(\frac{\lambda}{\mu}+2\right)\delta_{ij}r_{,k}n^lr_{,l} - 2\frac{\lambda}{\mu}n^kr_{,i}r_{,j} \\
& - 12r_{,i}r_{,j}r_{,k}n^lr_{,l}) + 2RN_{ijk} \dots\dots\dots (17)
\end{aligned}$$

$$RTN3_{ij}^k = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 \delta_{ij} n^k + 2 \frac{\lambda}{\mu} \delta_{ij} r_{,k} n^l r_{,l} + 2 \frac{\lambda}{\mu} n^k r_{,i} r_{,j} + 4 r_{,i} r_{,j} r_{,k} n^l r_{,l} \dots \dots \dots (18)$$

$$RN_{ijk} = \delta_{ik}r_{,j}n^l r_{,l} + \delta_{jk}r_{,i}n^l r_{,l} + n^i r_{,j}r_{,k} + n^j r_{,i}r_{,k} \dots\dots\dots (19)$$

4. 数值計算例

数値計算モデルをFig. 2に, 多孔質弾性地盤および構造物において用いた物性値をtable 1に示す. 本解析では海洋構造物にはコンクリート程度, 海底地盤には多孔質系の砂岩程度の剛性を与えている. 解析例として, 鉛直下方から弾性波(P波およびS波, $bk_T = 1.0, k_T$:入射波横波波数)が入射した場合での, 海底地盤内部における主応力分布, および海底地盤内と各領域の境界上での変位分布を, Fig. 3にそれぞれ示す.

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) Biot, M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 3) 石原研一: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, pp.50-69, 1981.

Table 1 Material properties of the seabed and structure

$\mu s / \mu g$	10.0
Cs compressibility of the solid particle	$2.7 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kgf}$
Cb bulk compressibility of the solid skeleton	$1800 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{kgf}$
n porosity	0.4
$\rho s / \rho g$	1.2

Fig. 2 Numerical model

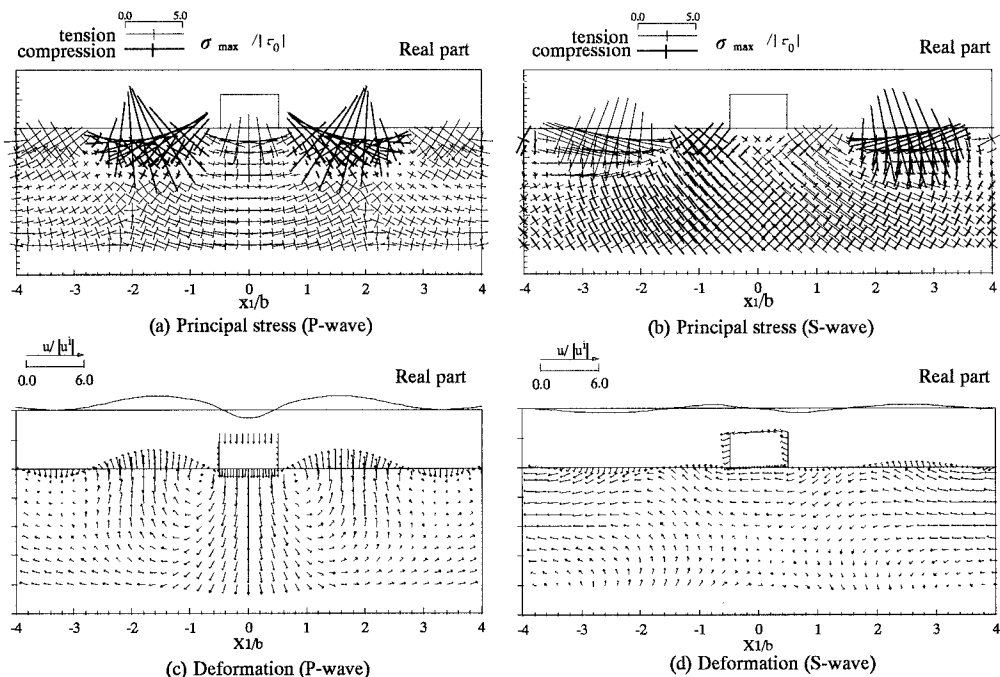
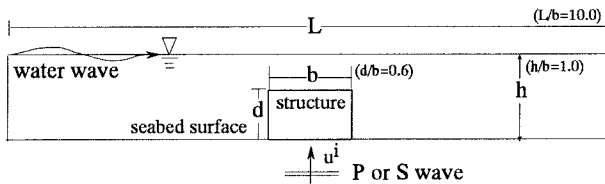


Fig. 3 Principal stress and deformation for P,S-wave incident