

CS-5

境界要素法による海底地盤—海洋構造物系の動的相互作用に関する解析

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. 緒言

海底地盤に設置された海洋構造物の地震に対する安定性を検討する場合、海底地盤、海洋構造物、および海洋の、連成問題として考える必要がある。さらに、海底地盤のように、水で飽和された地盤の変形特性は、地盤に存在する間隙水に大きく影響を受けるものと考えられる。

そこで本研究では海底地盤を Biot の理論による多孔質弾性体¹⁾、構造物を弾性体、海洋は非圧縮非粘性の完全流体としてモデル化し、境界要素法を用いて、海底地盤—流体—構造物系における動的相互作用問題の解析を行うものである。

2. 解析手法

(1) 解析モデル

解析対象とする流体—構造物—海底地盤系モデルを Fig.1 に示す。Fig.1 において、領域 I^- , I , I^+ は流体領域であり、領域 I は構造物による波の散乱が顕著な領域。 I^- と I^+ は無限遠方含む一定水深領域である。領域 II は構造物、領域 III は海底地盤である。外力は、地震時を想定した海底地盤内を伝播する入射波動 u^i を考える。

(2) 各領域の基礎式

Biot による多孔質弾性理論では、固体は多孔性の骨格を形成し、また、間隙はランダムに分布しており、全体をマクロな連続体とみなしたとき等方性を保っているものとする。さらに、骨格部分と間隙部分に対して、それぞれの基礎式が成り立つ。しかし、波動が多孔質弾性体中を地震動程度の振動数で伝播している場合、海底地盤は非排水状態で変形しているとして考えられ、骨格部分と間隙部分との相対変位は生じないものとする。Fig.1 に示す領域 III での非排水条件下における、多孔質弾性体の基礎式は次のように表される²⁾。

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu}{3}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

ここに、 $\rho = \rho_s + \rho_w$ であり、 ρ_s, ρ_w はそれぞれ骨格と水の密度である。上式 (1) において係数 α_b, α_c, k_c はそれぞれ定数であり次のように決定される³⁾。

$$\alpha_b = \frac{(n-1)^2 C_p + (n-1) C_s + C_l}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (2)$$

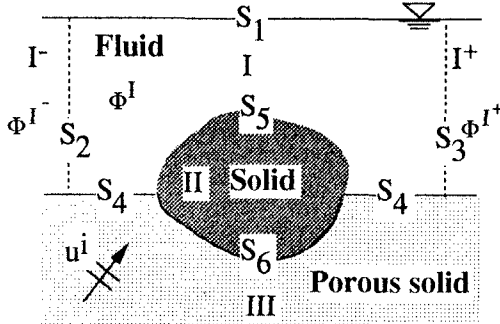


Fig.1 Fluid - Structure - Seabed Coupling model

$$\alpha_c = \frac{-n[(n-1)C_p + C_s]}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (3)$$

$$k_c = \frac{n C_b}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (4)$$

ただし、 C_p, C_b, C_s には次の関係がある。

$$C_p = \frac{1}{n}(C_b - C_s) \quad (5)$$

ここで、 C_b は骨格の圧縮率、 C_s は土粒子の圧縮率、 C_l は水の圧縮率、 C_p は間隙の圧縮率、 n は間隙率である。さらに、Fig.1 に示した解析モデルにおける領域 I, II での基礎式は以下のようである。

流体領域 $I^- + I + I^+$ (非圧縮完全流体) :

$$\Delta \Phi = 0 \quad (6)$$

構造物領域 II (弾性体) :

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

(3) 連続条件

各領域の境界における連続条件をまとめると次のようになる。' 流体と海底地盤の境界 S_4 :

$$\begin{aligned} t_G = -n_G P &= n_F i \bar{\rho} \omega \Phi \\ -i \omega u_G \cdot n_G &= \mathbf{V} \cdot n_G = -(\nabla \Phi) \cdot n_F \end{aligned} \quad (8)$$

流体と構造物の境界 S_5 :

$$\begin{aligned} t_S &= -n_S P = n_F i \bar{\rho} \omega \Phi \\ -i \omega u_S \cdot n_S &= \mathbf{V} \cdot n_S = -(\nabla \Phi) \cdot n_F \end{aligned} \quad (9)$$

構造物と海底地盤の境界 S_6 :

$$\begin{aligned} t_G &= -t_S \\ u_G &= u_S \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、添字 G は海底地盤、 S は構造物、 F は流体に関係した量を表す。また、 t は表面力、 n は境界の単位法線ベクトル、 P は流体圧、 $\mathbf{V}$ は流体の速度ベクトルである。

(4) 仮想境界における連続条件

流体領域 I^- 及び I^+ における水深が一定であれば、この領域内の速度ポテンシャル Φ^{I-} と Φ^{I+} を級数解として求めることが出来る。ここで Φ^{I-}, Φ^{I+} は領域 I^- と I^+ における散乱波の速度ポテンシャルを表す。このとき、領域 I の仮想境界上の連続条件は次のようになる。

仮想境界 S_2 :

$$\Phi^{I-} = \Phi^I, \quad \frac{\partial \Phi^{I-}}{\partial n} = \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} \quad (11)$$

仮想境界 S_3 :

$$\Phi^I = \Phi^{I+}, \quad \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} = \frac{\partial \Phi^{I+}}{\partial n} \quad (12)$$

なお流体領域 S_1 上の境界条件は次のようになる。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad (13)$$

3. 積分方程式

領域 II と III の基礎式 (1) と (7) 式とを比較すれば、Lame 定数の一部が異なるが、両式は同形である。すなわち、普通の弾性体において、定数を特別な値に選んだ場合の変位が、非排水時における多孔質弾性体の変位と考えることが出来る。海底地盤領域 III に対する境界上の積分方程式は次のように書ける。

$$C(x)u(x) = u^i(x) + \int_{S_4+S_6} U(x,y)t(y)dS_y - \int_{S_4+S_6} T(x,y)u(y)dS_y \quad (14)$$

ここで、 $u^i(x)$ は入射波を表す。また $U(x,y)$ は基本解を表し、平面ひずみ問題に対しては次のように与えられる。

$$U(x,y) = \frac{i}{4\mu}[H_0^{(1)}(k_T r)1 + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \quad (15)$$

構造物基礎領域 II についても (14) 式と同様な積分方程式が成立する。流体領域 I の境界上の速度ポテンシャルに対する積分方程式は次のようになる。

$$C(x)\Phi(x) = \int_{S'} G(x,y) \frac{\partial \Phi(y)}{\partial n_y} dS_y - \int_{S'} \frac{\partial G(x,y)}{\partial n_y} \Phi(y) dS_y \quad (16)$$

ここで、 $S' = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$ であり、さらに基本解 $G(x,y)$ は次のようである。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi} \log \frac{1}{r} \quad (17)$$

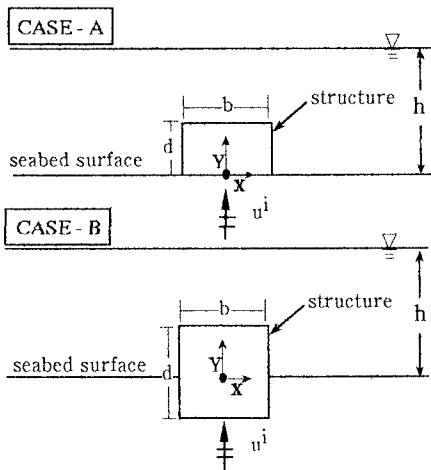


Fig.2 Numerical models

4. 数値解析法及び計算例

流体—構造物—海底地盤連成系に対する境界積分方程式を評価するため、境界を有限個の要素に分割し、数値積分を行う。本解析法では2次アイソパラメトリック要素を用いて各境界積分方程式を離散化し、さらに、境界条件 (13)

式および連続条件 (8)~(12) を導入（各領域を接合）することにより、海底地盤—構造物—流体系に対する連立一次方程式に変換し数値解析を行った。

解析モデルを Fig.2 に示す。CASE-A、CASE-B はそれぞれ、構造物が海底地盤上に設置された場合、構造物が海底地盤に埋め込まれた場合である。外力には弾性波（P 波、鉛直下方より入射）が入射した場合を考える。ここで、多孔質弾性地盤に対する基礎式中に含まれる定数 α_b, α_c, k_c を決めるために必要な各圧縮率は、それぞれ以下のように与えた。 $C_b = 0.9 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{kgf}$, $C_s = 0.27 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kgf}$, $C_l = 0.48 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ 。ここに示した値は砂質地盤に相当する。また、弾性構造物はコンクリート程度の剛性を有するものと考え、構造物と地盤のせん断弾性係数の比 $\mu_S/\mu_G = 133.3$ 、密度比 $\rho_S/\rho_G = 1.2$ 、ポアソン比 $\nu_S = 0.2$, $\nu_G = 0.487$ 、として解析を行った。Fig.3 に CASE-A での海底地盤表面での変位と応力の解析結果を示す。本解析では間隙率を変化させて解析を行った。図より、間隙率が大きくなるほど、構造物底面での変位は減少し、また、構造物角部に応力集中が発生していることが分かる。また、CASE-B の解析結果の詳細は講演時に発表する。

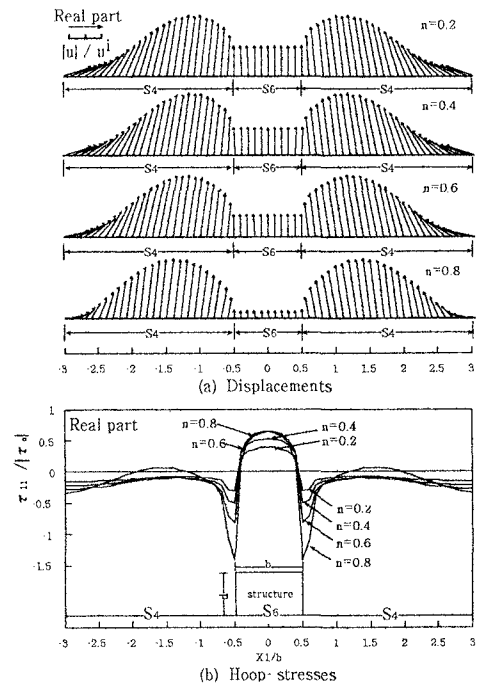


Fig.3 Displacements and Hoop-stresses at Seabed surface

参考文献

- 1) Biot, M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, *J. Appl. Phys.*, Vol.12, pp.155-164, 1941. 2) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1981. 3) Skempton, A.W.: Effective stress in soils, concrete and rocks, *Pore Pressure and Suction in Soils*, Butterworths, London, 1961.