

海底地盤-海洋構造物系の動的相互作用に関する数値解析手法の開発

東海大学大学院 学生員 ○内海秀幸
 東海大学海洋学部 正員 川上哲太朗
 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動に伴う動的挙動の解明は工学上重要な課題の一つである。そこで本研究では海底地盤を Biot の多孔質弾性体¹⁾とモデル化し、境界要素法を用いて、海底地盤・流体・構造物系における地震時の動的相互作用問題の解析を行う。ここで解析対象とす

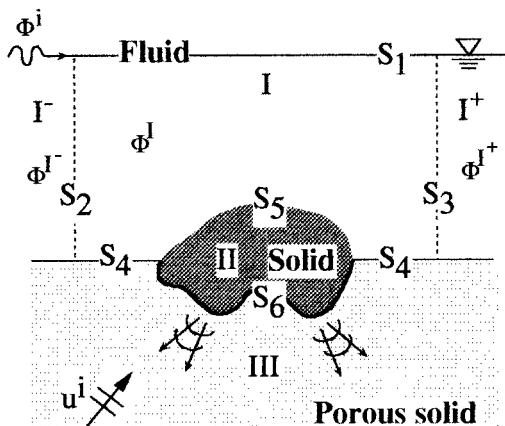


図 1 流体-構造物基礎-海底地盤モデル

る流体・構造物基礎・海底地盤モデルを図 1 に示す。図 1において、領域 I, I^-, I^+ が流体部分であり、 I^- と I^+ 部分の水深は一定とする。領域 II が構造物基礎、領域 III が海底地盤である。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 と流体中を伝わる入射波動 Φ^i である。

2. 解析手法

Biot モデルでは、固体は多孔性の骨格を形成しており、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考える。このとき、骨格部分と間隙部分に対する基礎式は次のようになる¹⁾。

骨格部分に対する運動方程式

$$\mu \Delta \mathbf{u} + \nabla \left[\left(\alpha_b + \frac{1}{3} \mu \right) \nabla \cdot \mathbf{u} + \alpha_c \nabla \cdot \mathbf{v} \right] = (\rho_s + \rho_a) \ddot{\mathbf{u}} - \rho_a \ddot{\mathbf{v}} - b(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{v}}) \quad (1)$$

間隙部分に対する運動方程式

$$\nabla(\alpha_c \nabla \cdot \mathbf{u}) + k_c \nabla \cdot \mathbf{v} = (\rho_w + \rho_a) \ddot{\mathbf{v}} - \rho_a \ddot{\mathbf{u}} - b(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{v}}) \quad (2)$$

ここに、 \mathbf{u} は骨格部分の変位ベクトル、 \mathbf{v} は間隙水部分の変位ベクトル、 ρ_s と ρ_a は骨格部分の密度と付加質量である。また、 α_b, α_c, k_c は定数である。さらに、 b は、 γ を地盤内流体の動粘性係数、 n を間隙率、 k を透水係数として次式のように表される。

$$b = \gamma n^2 / k \quad (3)$$

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ず、近似的に次式が成り立つ。

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (4)$$

式 (1) と (2) に式 (4) の関係を代入し加え合わせることにより、多孔質弾性体中を波動伝播する基礎式は次のように表すことができる²⁾。

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu}{3}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (5)$$

ここに、 $\rho = \rho_s + \rho_w$ である。上式 (5) において係数 α_b, α_c, k_c はそれぞれ骨格、土粒子、水の圧縮率であり次のように決定される³⁾。

$$\alpha_b = \frac{(n-1)^2 C_p + (n-1) C_s + C_l}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (6)$$

$$\alpha_c = \frac{-n[(n-1)C_p + C_s]}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (7)$$

$$k_c = \frac{n C_b}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (8)$$

ただし、 C_p, C_b, C_s には次の関係がある。

$$C_p = \frac{1}{n}(C_b - C_s) \quad (9)$$

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。

(1) 各領域における基礎式

図 1 に示した解析モデルに対する各領域の基礎式をまとめると、次のようにになる。

流体領域 $I^- + I + I^+$ (非圧縮完全流体) :

$$\Delta \Phi = 0 \quad (10)$$

構造物基礎領域 II (弾性体) :

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

海底地盤領域 III (多孔質弾性体、非排水) :

$$\mu \Delta \mathbf{u} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu}{3}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0 \quad (12)$$

(2) 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 :

$$\begin{aligned} t_G &= -\mathbf{n}_G P = \mathbf{n}_F i \bar{\rho} \omega \Phi \\ -i\omega \mathbf{u}_G \cdot \mathbf{n}_G &= \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}_G = -(\nabla \Phi) \cdot \mathbf{n}_F \end{aligned} \quad (13)$$

流体と構造物基礎の境界 S_5 :

$$\begin{aligned} t_S &= -\mathbf{n}_S P = \mathbf{n}_F i \bar{\rho} \omega \Phi \\ -i\omega \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{n}_S &= \mathbf{V} \cdot \mathbf{n}_S = -(\nabla \Phi) \cdot \mathbf{n}_F \end{aligned} \quad (14)$$

構造物基礎と海底地盤の境界 S_6 :

$$\begin{aligned} t_G &= -t_S \\ \mathbf{u}_G &= \mathbf{u}_S \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、添字 G は海底地盤、 S は構造物基礎、 F は流体に関係した量を表す。また、 t は表面力、 \mathbf{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。

(3) 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できる。水面波入射の場合

$$\Phi^{I-} = \Phi^i + \Phi^r + \Phi^{s-}, \Phi^{I+} = \Phi^i + \Phi^{s+} \quad (16)$$

弹性波入射の場合

$$\Phi^{I-} = \Phi^{s-}, \Phi^{I+} = \Phi^{s+} \quad (17)$$

$$\left[\begin{array}{ccccccc} \bar{H}_1 - G_1^{*b} & \bar{H}_2^{*c} - G_2^{*c} & \bar{H}_3^{*c} - G_3^{*c} & \bar{H}_4 & \bar{H}_5 & -G_4^{*i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -U_5^{*i} & 0 & \bar{T}_5 & \bar{T}_6 & U_6 \\ 0 & 0 & 0 & -S_4^{*i} & 0 & \bar{D}_4 & 0 & \bar{D}_6 & -S_6 \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ a^- \\ a^+ \\ \Phi_4 \\ \Phi_5 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ t_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^i (G_2^{*c} - \bar{H}_2^{*c}) \\ 0 \\ u^i \end{bmatrix} \quad (24)$$

ここで、 Φ^i は入射波の速度ポテンシャル。 Φ^{s-}, Φ^{s+} は領域 I^- と I^+ における散乱波の速度ポテンシャル。また、 Φ^r, Φ^t は反射波、透過波の速度ポテンシャルである。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 :

$$\Phi^{I-} = \Phi^I, \frac{\partial \Phi^{I-}}{\partial n} = \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} \quad (18)$$

仮想境界 S_3 :

$$\Phi^I = \Phi^{I+}, \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} = \frac{\partial \Phi^{I+}}{\partial n} \quad (19)$$

3. 積分方程式

領域 II と III の基礎式 (11) と式 (12) 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。

$$\begin{aligned} C(x)\mathbf{u}(x) &= \mathbf{u}^i(x) + \int_{S_4+S_6} U(x,y)t(y)dS_y \\ &- \int_{S_4+S_6} T(x,y)\mathbf{u}(y)dS_y \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $\mathbf{u}^i(x)$ 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。

$$\begin{aligned} U(x,y) &= \frac{i}{4\mu}[H_0^{(1)}(k_T r)1 \\ &+ \frac{1}{k_T^2} \nabla \nabla \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \end{aligned} \quad (21)$$

構造物基礎領域 II についても式 (20) 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。

$$\begin{aligned} C(x)\Phi(x) &= \int_{S'} G(x,y) \frac{\partial \Phi(y)}{\partial n_y} dS_y \\ &- \int_{S'} \frac{\partial G(x,y)}{\partial n_y} \Phi(y) dS_y \end{aligned} \quad (22)$$

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。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi} \log \frac{1}{r} \quad (23)$$

流体・構造物基礎・海底地盤連成系に対する積分方程式 (20),(22) に、連続条件 (13)~(15) 及び (18), (19) を導入することにより、海底地盤・構造物基礎・流体系に対する

積分方程式 (24) を得る。ここで添字 $1 \sim 6$ は境界 $S_1 \sim S_6$ に対応し、添字 b は境界 S_1 上における流体領域の自由表面での境界条件を表す。添字 c は式 (18),(19) の連続条件が代入されており、 G_4^{*i} は境界 S_4 における連続条件 (13) が代入されていることを表す。また、 a^i は入射水面波の振幅を表し、 u^i は入射弾性波の振幅を表す。

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.