

I - A31 波浪による海洋構造物基礎地盤の動的応答解析

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
 東北大学工学部 正 員 北原 道弘

1. はじめに

海洋に構造物を設置する場合、海底地盤の安定性問題は基本的検討項目であり、海底地盤と構造物の動的相互作用を考慮した検討が重要課題となる。そこで、本研究では波浪荷重を受ける海底地盤及び構造物の動的相互作用問題のうち、構造物基礎周辺の海底地盤の動的応答特性を数値解析的に検討することを目的とする。本解析では、海底地盤は海水で飽和されていることを考慮してBiot理論に基づく多孔質弾性体、構造物を弾性体、流体を完全流体とモデル化し、海底地盤、構造物、流体の各領域を境界要素法を用いて一つの連続体モデルとして定式化し、各領域の相互作用を直接取り入れた形で解析を実行する。

2. 非排水変形時の多孔質弾性体

石原らの研究¹⁾では、波動伝播状態にある多孔質弾性体においては非排水状態での変形が卓越するものと考えられている。本解析は波浪による波動が各領域に周波数域で直接的に連続（伝達）する一つの系の波動場として定式化しており、海底地盤を非排水条件下での多孔質弾性体とモデル化した。Biotの多孔質弾性理論²⁾においては媒体は多孔性の骨格を形成し、その間隙には液体が完全に飽和されている状態を想定している。骨格部分と間隙水部分に対する応力-ひずみ関係はそれぞれに対して

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + [(\alpha_b - \frac{2}{3}\mu)e + \alpha_c \epsilon] \delta_{ij} \quad (1)$$

$$-p = (\alpha_c e + k_c \epsilon) \quad (2)$$

のようであり、全応力としては $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p$ が成立する。上式において e は骨格部分の体積ひずみ、 ϵ は間隙水部分の体積ひずみである。 e_{ij} は骨格部分のひずみテンソルであり骨格部分の変位 u_i を用いて

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3)$$

と表される。また μ はせん断剛性、 α_b, α_c, k_c は定数（後出）である。いま非排水条件下での変形挙動を考えた場合、骨格と間隙水部分の体積ひずみは等しく $e = \epsilon$ と仮定され、式(1),(2)はそれぞれ

$$\sigma'_{ij} = 2\mu e_{ij} + (\alpha_b + \alpha_c - \frac{2}{3}\mu)e \delta_{ij} \quad (4)$$

$$-p = (\alpha_c + k_c)e \quad (5)$$

となり、全応力で表現すると次の関係式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p \\ &= 2\mu e_{ij} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu)e \delta_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで

$$\lambda^* = \alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu \quad (7)$$

とおけば、上式は

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} + \lambda^* e \delta_{ij} \quad (8)$$

となり、これは普通の弾性体の応力-ひずみ関係と形式上同じ形である。つまり、普通の弾性体におけるラメ定数 λ を α_b, α_c, k_c を用いて式(7)の様に置き換えることにより、全応力表示において非排水変形時における多孔質弾性体の応力-ひずみ関係を弾性体と同様に表現出来る³⁾。また前出の定数 α_b, α_c, k_c はそれぞれ次のように決定される。

$$\alpha_b = \frac{(n-1)^2 C_p + (n-1)C_s + C_l}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (9)$$

$$\alpha_c = \frac{-n[(n-1)C_p + C_s]}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (10)$$

$$k_c = \frac{n C_b}{C_b(C_l - C_s) + C_p C_s} \quad (11)$$

ただし、 C_p, C_b, C_s には次の関係がある。

$$C_p = \frac{1}{n}(C_b - C_s) \quad (12)$$

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。なお、式(9)~(12)の定数はBiotが定義した定数とTable 1のような対応関係にある。

Table 1 List of correspondence between notations used by Biot and this paper

Biot's notation	Notation adopted in this paper
A	$\alpha_b - \frac{2}{3}\mu$
Q	α_c
R	k_c
N	μ

3. 各領域の基礎式

解析モデルの各領域I, II, III (Fig. 1参照)における基礎式は周波数領域において、それぞれ以下のように表される。

流体領域I- + I + I⁺:

$$\Delta \Phi = 0 \quad (13)$$

構造物領域II:

$$\mu \Delta u + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u + \rho \omega^2 u = 0 \quad (14)$$

海底地盤領域III:

$$\mu \Delta u + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu}{3}) \nabla \nabla \cdot u + \bar{\rho} \omega^2 u = 0 \quad (15)$$

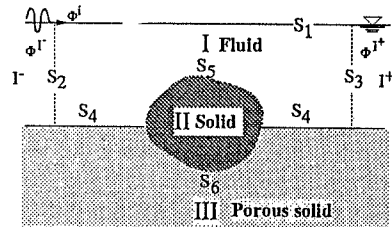


Fig. 1 System of fluid-solid-porous solid

海底地盤、多孔質弾性体、動的応答解析、境界要素法

〒424 静岡県清水市折戸3-20-1 Tel (0543)-34-0411(2279) Fax(0543)-34-9768

4. 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 :

$$t_G = -n_G P = n_F i \rho_F \omega \Phi \quad (16)$$

$$-i \omega u_G \cdot n_G = V \cdot n_G = -(\nabla \Phi) \cdot n_F \quad (17)$$

流体と構造物の境界 S_5 :

$$t_S = -n_S P = n_F i \rho_F \omega \Phi \quad (18)$$

$$-i \omega u_S \cdot n_S = V \cdot n_S = -(\nabla \Phi) \cdot n_F \quad (19)$$

構造物と海底地盤の境界 S_6 :

$$t_G = -t_S \quad (20)$$

$$u_G = u_S \quad (21)$$

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、 V は流体の速度ベクトルである。また、境界 S_2 、 S_3 においては、領域 I^- と I^+ 部分における水深が一定であるという仮定から得られる、速度ポテンシャルに関する級数解と領域 I の速度ポテンシャルをポテンシャルと速度の連続性により接続する。

5. 海底地盤内の応力

海底地盤領域における内部応力は海底地盤境界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⁴⁾）を用いて次式のように積分表現される。

$$\sigma_{ij}(x) = \int_S P_{ij}^k(x, y) t_k(y) dS_y - \int_S Q_{ij}^k(x, y) u_k(y) dS_y + \sigma_{ij}^I(x) \quad (22)$$

ここで、 $\sigma_{ij}^I(x)$ は入射波による応力であり、積分核である P 、 Q は動弾性波動場の基本解

$$U_i^k = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(k_T r) \delta_{ki} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial x_k \partial x_i} \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \quad (23)$$

を用いて

$$P_{ij}^k = \lambda U_{m,m}^k \delta_{ij} + \mu U_{i,j}^k + \mu U_{j,i}^k \quad (24)$$

$$Q_{ij}^k = (\lambda P_{m,m}^{kl} \delta_{ij} + \mu P_{i,j}^{kl} + \mu P_{j,i}^{kl}) n^l \quad (25)$$

の様に表される⁴⁾。この時、基本解(23)式中の縦波の波数 k_L は前節で述べた非排水変形時における多孔質弾性体中のラメ定数 λ^* を考慮して

$$k_L = \omega / \{(\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{4}{3}\mu) / \rho\}^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

と置き換える必要がある。

6. 数値計算例

数値計算モデルとして Fig. 2 に示すような海底地盤に幅 b の矩形構造物が設置された状態を想定する。多孔質海底地盤と弾性構造物に関する物性値は軟弱砂質地盤およびコンクリート程度の剛性を有するものとし、構造物幅 b

にたいして8倍の波長を持った水面波を入射した。Fig. 3 に変位(a)、全応力(b)、間隙水圧(c)の分布状態を示す

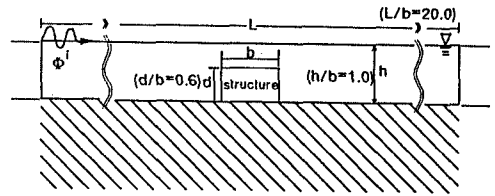
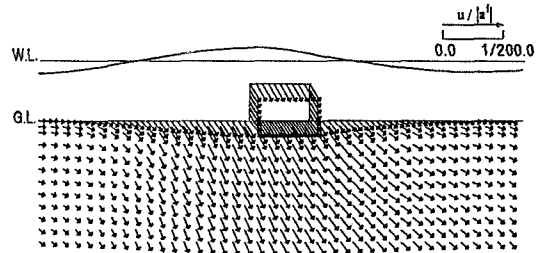
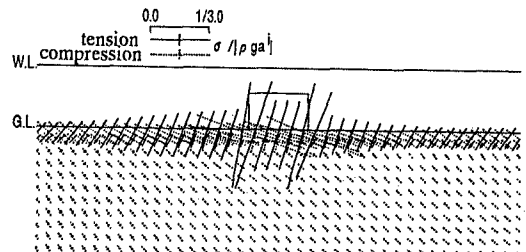


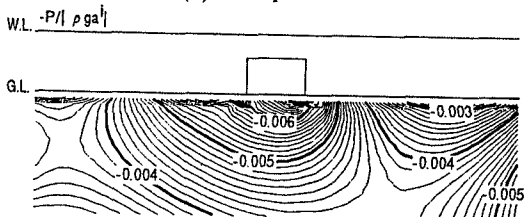
Fig. 2 Numerical model



(a) Deformation



(b) Principal stress



(c) Pore water pressure

Fig. 3 Water-wave incidenc

$$(\mu_S = 0.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2, \mu_G = 0.75 \times 10^4 \text{ tf/m}^2, n = 0.4, C_b = 9000 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{tf}, C_s = 2.70 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{tf})$$

参考文献

- 1) 石原研而 著：土質力学の基礎，鹿島出版会，pp.62-64，1976.
- 2) Biot, M.A. : General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 3) Ishihara, K. : Approximate forms wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus, Soils and Foundations, Vol. X, No.4, pp.10-38, 1970.
- 4) 内海秀幸 他：多孔質海底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.