

海底地盤に根入れされた構造物基礎地盤周辺の動的応力の解析

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

海洋構造物基礎地盤の地震時応答は構造物だけでなく流体領域からの連成効果を含んだものであり、各領域間の相互作用問題として取り扱う必要がある、そこで本研究では境界要素法を用いて流体-海洋構造物-海底地盤連成系モデルを定式化し、各領域間の相互作用を考慮した上で構造物基礎地盤周辺応力を求めた。本解析では海底地盤をBiotの理論に基づく非排水条件下での多孔質弾性体と仮定した。また構造物は弾性体とモデル化し、海底地盤に根入れされたタイプと根入れの無い構造物を想定し、根入れによる地震時の変形と応力特性について検討を行った。

2. 非排水変形時の多孔質弾性体

Biotの多孔質弾性理論¹⁾で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。骨格部分と間隙部分に対する応力-ひずみ関係はそれぞれに対して

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

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

のようであり、全応力としては $\sigma_{ij}^t = \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p$ 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²⁾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

$$\sigma_{ij}^t = 2\mu e_{ij} + (\alpha_b + \alpha_c - \frac{2}{3}\mu) e \delta_{ij} \quad (4)$$

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

となり、全応力で表現すると次の関係式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^t &= \sigma'_{ij} - \delta_{ij}p \\ &= 2\mu e_{ij} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu) e \delta_{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\lambda^* = \alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu$ とおけば、上式は

$$\sigma_{ij}^t = 2\mu e_{ij} + \lambda^* e \delta_{ij} \quad (7)$$

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定数 λ を α_b, α_c, k_c を用いて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²⁾。

3. 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³⁾）を用いて次式のように積分表現される。

$$\begin{aligned} \tau_{ij}(\mathbf{x}) &= \int_S P_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_k(\mathbf{y}) dS_y \\ &\quad - \int_S Q_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_k(\mathbf{y}) dS_y + \sigma_{ij}^I(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_{ij}^I(\mathbf{x})$ は入射波の持つ応力であり、積分核である P, Q は動弾性波動場の基本解

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

を用いて

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

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

の様に表される⁴⁾。この時、基本解(9)式中の縦波波数 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

$$k_L = \omega / ((\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{4}{3}\mu) / \rho)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

と置き換える必要がある。

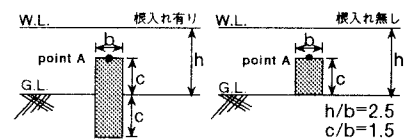
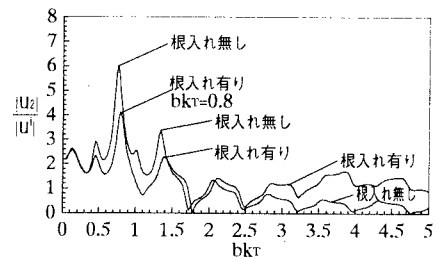
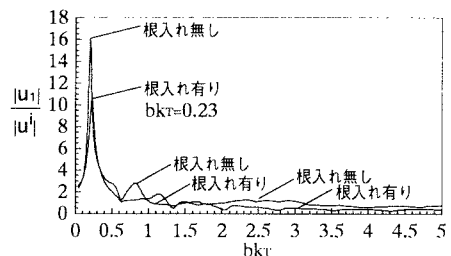


Fig. 1 Numerical models

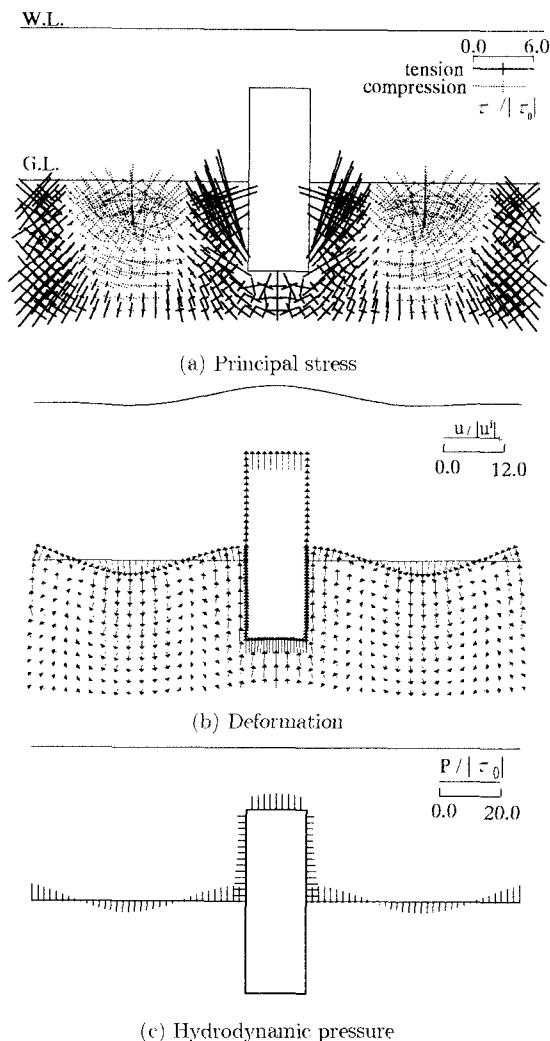


(a) P-wave incidence



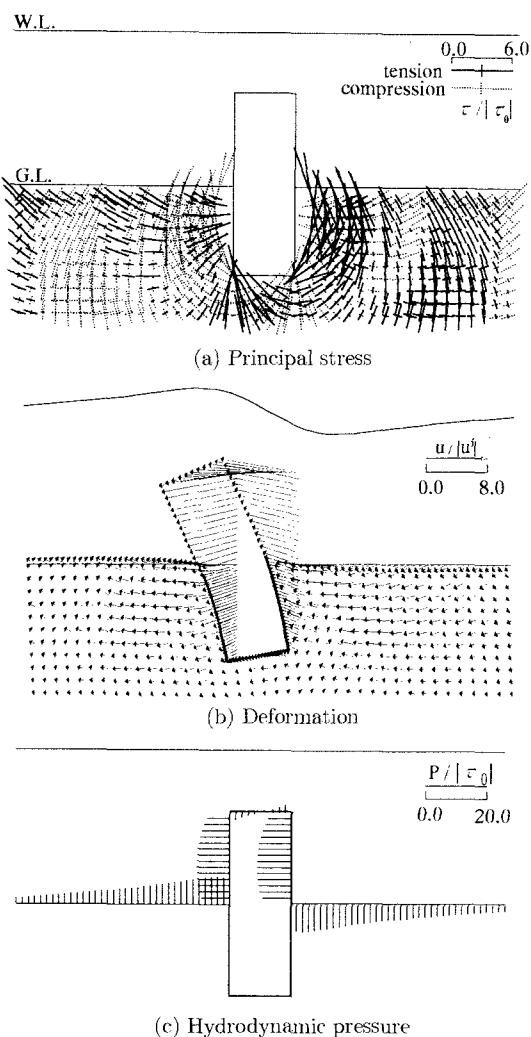
(b) S-wave incidence

Fig. 2 Response curves at point A for P and S wave incidence

Fig. 3 P-wave incidence ($bk_T = 0.80$)

4. 数値計算例

Fig. 1に示すような二つの解析モデルに対して、地震外力として多孔質海底地盤中を鉛直下方より伝播してくる弾性波(P, S波)を考えた。解析に用いた多孔質海底地盤と弾性構造物に関する物性値は密に詰まった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て設定した。数値計算結果として、無次元化入射波波数 bk_T に対する構造物天端中央point A(Fig. 1参照)におけるP, S波入射の場合の応答倍率をFig. 2に示す。ここで応答倍率はP波入射の場合、鉛直方向変位 u_2 と入射波振幅 u^i との絶対値の比 $|u_2|/|u^i|$ とし、S波入射の場合には、同様に水平方向変位に対して $|u_1|/|u^i|$ と定義した。また、根入れされた構造物の応答倍率の初期ピーク(P波： $bk_T = 0.8$, S波

Fig. 4 S-wave incidence ($bk_T = 0.23$)

: $bk_T = 0.23$)における構造物基礎地盤周辺の応力(a)、変位(b)、動水圧(c)の分布状態をFig. 3,4にそれぞれ示す。基礎地盤周辺の応力状態はP,S波ともに海底地盤表面上の構造物と接する角部付近で大きな値を示している。

参考文献

- 1) Biot, M.A. : General theory of three-dimensional consolidation, J. Appl. Phys., Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 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.