

# 地震時における海底基礎構造物周辺地盤の変動間隙水圧

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

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震において、ケーソン式護岸が甚大な被害を受けたことを契機に、構造物-海底基礎地盤系の地震時挙動の研究が耐震工学上重要な課題となってきた。特に護岸崩壊の一要因として指摘されている海底地盤の不安定化を検討する上で、構造物との連成を考慮した海底地盤内の地震時動的間隙水圧を把握することが重要である。そこで本研究では、海底地盤を多孔質弾性体、構造物を弾性体、流体を完全流体と仮定し、これら各領域を一つの連続体モデルとして定式化し、各領域の動的相互作用を直接取り入れた解析手法のもと、重力式海洋構造物基礎周辺地盤内の変動間隙水圧分布特性を明らかにする。

## 2. 多孔質弾性体の地震時波動伝播問題

Biotの多孔質弾性理論<sup>1)</sup>において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  $\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij} - \delta_{ij}p$  が成立する。上式において  $e$  は骨格部分の体積ひずみ、 $\epsilon$  は間隙水部分の体積ひずみを表し、 $\alpha_b, \alpha_c, k_c$  は定数<sup>2)</sup>である。地震程度の周波数の波動が地盤を伝播する場合、地盤の変形挙動は近似的に非排水条件のもとに発生していると考えられている。非排水条件下での地盤の変形挙動においては、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

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

$$-p = (\alpha_c + k_c) e \quad (4)$$

となり、全応力で表現すると次の関係式を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^t &= \sigma_{ij} - \delta_{ij}p \\ &= 2\mu e_{ij} + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c - \frac{2}{3}\mu) e \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\sigma_{ij}^t = 2\mu e_{ij} + \lambda^* e \delta_{ij} \quad (6)$$

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  $\lambda$  を  $\alpha_b, \alpha_c, k_c$  を用いて置き換えることにより、全応力表示において波動伝播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<sup>2)</sup>。

## 3. 構造物-流体-海底地盤系

解析対象とする構造物-流体-海底地盤系のモデルを Fig.1 に示す。各領域の定常状態における基礎式はそれぞれ以下のように表される。

領域 I (流体):

$$\Delta \Phi = 0 \quad (7)$$

領域 II (構造物):

$$\mu \Delta \mathbf{u}_S + (\lambda + \mu_S) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}_S + \rho \omega^2 \mathbf{u}_S = 0 \quad (8)$$

領域 III (海底地盤):

$$\mu \Delta \mathbf{u}_G + (\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{\mu_G}{3}) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u}_G + \rho^* \omega^2 \mathbf{u}_G = 0 \quad (9)$$

ここで、 $\Phi$  は速度ポテンシャルを表し、添字  $G, S$  は海底地盤および構造物に関係した量を表す。また、各領域間の動的相互作用を考慮するために以下に示す連続条件を導入する。

流体と海底地盤の境界  $S_4$  :

$$\begin{aligned} t_G &= -n_G P = n_F i_P \rho_F \omega \Phi \\ -i \omega \mathbf{u}_G \cdot n_G &= \mathbf{V} \cdot n_G = -(\nabla \Phi) \cdot n_F \end{aligned} \quad (10)$$

構造物と海底地盤の境界  $S_6$  :

$$\begin{aligned} t_G &= -t_S \\ \mathbf{u}_G &= \mathbf{u}_S \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、添字  $F$  は流体に関係した量を表し、 $\mathbf{n}$  は単位法線ベクトル、 $P$  は流体圧、 $\mathbf{V}$  は流体の速度ベクトルである。また、 $S_2$  と  $S_3$  において放射条件を満足する速度ポテンシャルの級数解を与えることが出来る。さらに、流体と構造物との境界  $S_5$  上においては式(11)と同様な型の連続条件が与えられる。最終的には式(7)~(9)に示した、各領域の基礎式を境界積分方程式に各々変換した後離散化し、各境界上における連続条件、および境界条件を導入して各領域の接合を行うことにより、構造物-流体-海底地盤系に対する境界積分方程式系が得られる。

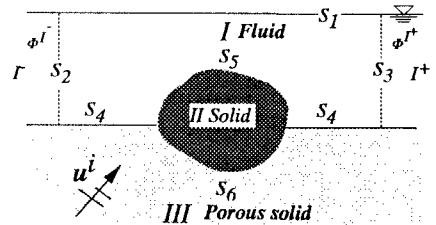


Fig.1 Analysis model for structure-fluid-seabed system

## 4. 海底地盤内の変動間隙水圧

多孔質海底地盤内全応力  $\sigma_{ij}^t$  (式(6)) は、前節において概説した構造物-流体-海底地盤系に対する境界積分方程式系を、数値的に解くことにより得られる境界  $S_4$  および  $S_6$  上の変位  $\mathbf{u}$  と表面力  $\mathbf{t}$  を用いて次のように積分表現される。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}^t(\mathbf{x}) &= \int_S P_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_k(\mathbf{y}) dS_y \\ &\quad - \int_S Q_{ij}^k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_k(\mathbf{y}) dS_y \end{aligned} \quad (12)$$

上式(12)の海底地盤内における全応力より体積ひずみを求め、式(4)に代入することにより地盤内変動間隙水圧を得ることが出来る。応力の体積ひずみへの変換は、次式に示す通常の弾性理論における関係を用いる。

$$e_{ij} = \frac{\nu + 1}{E} \sigma_{ij}^t + \frac{\nu}{E} \sigma_{aa}^t \delta_{ij} \quad (13)$$

ただし、上式中におけるポアソン比は式(5)を考慮して以下のように置き換える必要がある。

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\mu_G}{\alpha_b + 2\alpha_c + k_c + \frac{1}{3}\mu_G} \right) \quad (14)$$

5. 数値計算例

Fig.2, Fig.3に数値計算モデルを示す。本解析では、流体-海底地盤系モデル(model 1 Fig.2)と構造物-流体-海底地盤系モデル(model 2 Fig.3)の二つの数値計算モデルを設定し、両者の結果を比較することにより、構造物による基礎地盤周辺の変動間隙水圧への影響を明らかにする。

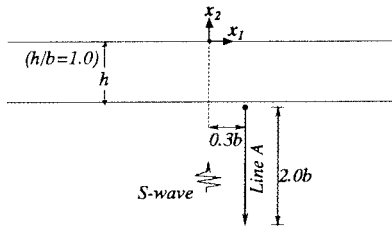


Fig.2 Numerical model for Fluid-seabed system (model 1)

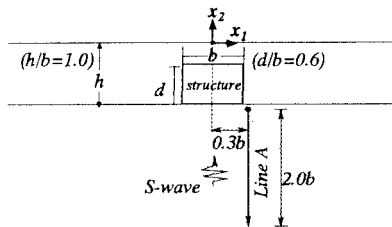
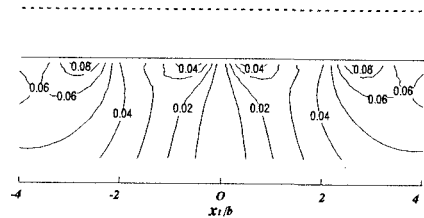


Fig.3 Numerical model for Structure-fluid-seabed system (model 2)

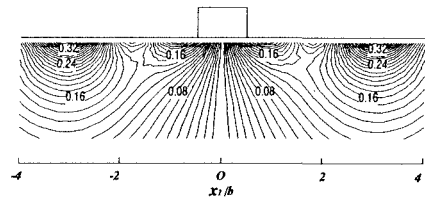
Table 1 Material propaties

A notations	model 2	model 1
Shear modulus of the structure $\mu \text{ s kN/m}^2$	$8.6 \times 10^7$	
Shear modulus of the seabed $\mu \text{ c kN/m}^2$	$4.2 \times 10^5$	
Mass density of the structure $\rho \text{ s t/m}^3$	2.4	
Mass density of the seabed $\rho \text{ c t/m}^3$	2.0	
Poisson's ratio $\nu \text{ s}$	0.17	
Compressibility of the soil particle $C_s \text{ m}^3/\text{kN}$	$2.7 \times 10^{-8}$	
Bulk compressibility of the soil skeleton $C_b \text{ m}^3/\text{kN}$	$1800.0 \times 10^{-8}$	
Compressibility of water $C_l \text{ m}^3/\text{kN}$	$48.0 \times 10^{-8}$	

作用外力としては、鉛直下方向の無限遠方から伝播してくる弾性波(S波)を考える。本数値計算に用いた各領域の物性値をTable1に示す。なお、多孔質海底地盤の諸元値は、密に詰まった砂質地盤、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して設定した。Fig.4に無次元化入射波波長 $\lambda_T/b = 4.0$ のS波入射時におけるmodel 1, model 2それぞれの海底地盤内等変動間隙水圧線を示す。



model1



model2

Fig.4 Pore water pressure( $|p|/|\tau_0|$ ) distribution in the seabed for model 1 and model 2( $\lambda_T/b = 4.0$ )

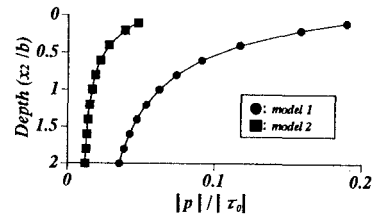


Fig.5 Pore water pressure( $|p|/|\tau_0|$ ) distribution on Line A for model 1 and model 2( $\lambda_T/b = 4.0$ )

図中、変動間隙水圧 $p$ はその絶対値 $|p|$ を入射波の応力振幅の絶対値 $|\tau_0|$ で除することにより無次元化して表されており、等変動間隙水圧線は両者とも $|p|/|\tau_0| = 0.01$ 間隔で描画されている。図より、構造物底面角部直下の海底地盤表層近傍で等変動間隙水圧線が密になっており、この付近において変動間隙水圧が局所的に高くなっていることが分かる。また、Fig.5は海底地盤内のA線上(構造物角部付近より鉛直深さ方向:Fig.2, 3参照)における無次元化変動間隙水圧の分布をmodel 1, model 2を共に示したものである。Fig.5においてmodel 1とmodel 2両者の無次元化変動間隙水圧の値を深さ方向に比較してみると、海底地盤表層付近でその値の差は非常に大きく、地盤深さが増すにしたがってその差は急激に小さくなる傾向にある。

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.