

## II-53

## 波浪による海底地盤内の有効応力変動に対する地盤の異方性の影響

金沢大学大学院 学生会員 ○玉置芳幸

金沢大学工学部 正会員 由比政年・石田 啓・矢富盟祥

福井高専 正会員 廣部英一

## 1. はじめに

変動波圧を受ける海底地盤の内部では、変動過剰間隙水圧に起因する不安定化が生じる。著者らは、海底地盤がその生成の過程や自重による影響を受け、異方的な性質を持つことに着目し、地盤の力学的パラメータの異方性が海底地盤の波浪応答に及ぼす影響について検討を進めている。ここでは、海底地盤内の有効応力の分布や地盤の安定性に地盤の異方性が及ぼす影響について検討する。

## 2. 解析の手法

異方性の土粒子骨格の最も簡単な例として、横等方性（水平面内で等方性となる直交異方性）の線形弾性体を考え、 $X, Z$ 面内の平面歪み、微小歪みを仮定する。この時、有効応力 $\sigma$ と歪み $\varepsilon$ の関係は次のように書ける。

$$\sigma_{xx} = \alpha_{xx} \varepsilon_{xx} + \alpha_{zx} \varepsilon_{zz}, \quad \sigma_{zz} = \alpha_{zx} \varepsilon_{xx} + \alpha_{zz} \varepsilon_{zz}, \quad \tau_{zx} = G_{zx} \varepsilon_{zx} \quad \dots\dots (1)$$

ただし、 $E_x, E_z$ は $X, Z$ 方向のヤング係数、 $\nu_{xx}, \nu_{zx}$ を水平-水平および鉛直-水平方向のポアソン比とすると、

$$\alpha_{xx} = E_x N (1 - \nu_{zx}^2) / \Delta, \quad \alpha_{zx} = E_z N \nu_{zx} (1 + \nu_{xx}) / \Delta, \quad \alpha_{zz} = E_z (1 - \nu_{xx}^2) / \Delta \quad \dots\dots (2)$$

$$N = E_x / E_z, \quad \Delta = (1 + \nu_{xx}) (1 - \nu_{xx} - 2\nu_{zx}^2)$$

である。これを用いてYamamotoら(1978)の式<sup>1)</sup>を横等方性地盤に拡張すると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{k}{\gamma} \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) &= \frac{n}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad \alpha_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + G_{zx} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha_{zx} + G_{zx}) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} = \frac{\partial p}{\partial x} \\ G_{zx} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha_{zz} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha_{zx} + G_{zx}) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $p$ は間隙水圧、 $u, w$ は地盤の $X, Z$ 方向変位で、静水状態からの変動成分を表す。また、 $\beta, \gamma$ は間隙水の体積弾性係数と単位体積重量、 $k, n, G_{zx}$ は地盤の透水係数、間隙率及び $X-Z$ 面内のせん断弾性係数である。

また、地盤の厚さが半無限大の場合を考え、地盤の表面および無限下方で次のような境界条件を課した。

$$z = 0; \quad \sigma_{zz} = 0, \quad \tau_{zx} = 0, \quad p = p_0 \exp[i(\lambda x - \omega t)], \quad z = -\infty; \quad u = 0, \quad w = 0, \quad p = 0. \quad \dots\dots (4)$$

ここで、地盤表面での間隙水圧の変動には微小振幅波理論を仮定し、その変動振幅を $p_0$ とおいた。

境界条件が時間および空間（ $x$ 方向）に関して周期的なので任意点での解も調和振動的な形を仮定する。

$$u = U(z) \exp[i(\lambda x - \omega t)], \quad w = W(z) \exp[i(\lambda x - \omega t)], \quad p = P(z) \exp[i(\lambda x - \omega t)] \quad \dots\dots (5)$$

これを先に示した基礎方程式(3)に代入し、得られた式が非自明な解を持つという条件から、特性方程式を得ることができる。この特性方程式と境界条件および基礎方程式から得られる係数間の関係式を数値的に解いて<sup>2)</sup>、異方性地盤の波浪応答を解析し、有効応力の静水状態からの変動成分を求めた。また、有効応力の変動成分と静水圧成分を加え合わせて全有効応力を算出し、地盤の破壊領域に関して検討を行った。

## 3. 解析結果および考察

解析に用いた波の諸元および海底地盤の物性値は、海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会が設定されたもの<sup>3)</sup>のうち、設計波規模の波浪（水深10m, 周期13s, 波高10m）および緩い砂地盤（表1）を用いた。なお、横等方性線形弾性体の独立な弾性パラメータは $E_x, E_z, \nu_{xx}, \nu_{zx}, G_{zx}$ の5つであるが、今回は、 $E_x, \nu_{xx}$ は表1の値に固定し、 $E_z, \nu_{zx}, G_{zx}$ をひずみエネルギーが正となる範囲内で異方的に変化させて、有効応力や地盤の破壊領域に対する影響を検討した。ここでは、影響の最も大きかったヤング係数の異方性を中心に、その結果を紹介する。

表-1 地盤の物性値

|            |                                           |
|------------|-------------------------------------------|
| $E_x$      | $1.02 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$ |
| $\nu_{xx}$ | 0.30                                      |
| $n$        | 0.454                                     |
| $k$        | $1.0 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$        |
| $\beta$    | $4.15 \times 10^7 \text{ (N/m}^2\text{)}$ |
| $\gamma$   | $9.74 \times 10^3 \text{ (N/m}^3\text{)}$ |

なお、以下では、 $\sigma$  応力は圧縮を正として議論を進める。

#### (1) ヤング係数の異方性の影響

鉛直面内のポアソン比，せん断弾性係数を水平面内の値に等しいとし， $(E_z/E_x)$  のみを 3 通り (1.0, 1.5, 2.0) に変化させて，地盤表面付近での有効応力の鉛直方向分布（変動成分）を比較してみた。図1～図3に，それぞれ， $\sigma_{zz}$ ， $\sigma_{xx}$ ， $\tau_{zx}$  の振幅（1周期中の最大値）の分布を示す。 $\sigma_{zz}$  の振幅はヤング係数の異方性が強いほど大きく， $\sigma_{xx}$  の振幅は逆に異方性が強いほど小さい。なお，位相遅れに関しては，異方性の影響は小さな値となった。このことから， $\sigma_{zz}$  が引張り側に働く波谷の前後の位相では，鉛直方向の全有効応力の値は，ヤング係数の異方性が強いほど小さくなるのがわかる。なお， $\tau_{zx}$  に関する異方性の影響は，比較的小さなものとなった。

次に，海底地盤の破壊領域がヤング係数の異方性によりどのような影響を受けるかを検討する。海底地盤の破壊基準としては，いくつかのものが提案されているが，ここでは，Mohr-Coulombの破壊基準に基づいて破壊領域を算出した。図4の実線と $z=0$ の直線で囲まれる部分がせん断破壊の領域を表す。なお，海底地盤の内部摩擦角 $\phi_0$ の値は $45^\circ$ とした。また， $L$ は波の波長を表す。波谷の位相前後に分布する破壊領域は，異方性が強まるほど深い部分にまで達し，水平方向の広がりも大きくなる。つまり，ヤング係数の異方性が強いほど海底地盤はより不安定になる。

#### (2) ポアソン比の異方性の影響

ポアソン比に関しては， $\nu_{zx}$  の値が大きいくほど，地盤表面付近での $\sigma_{zz}$ の振幅が大きく， $\sigma_{xx}$ の振幅が小さいという結果を得た。また $\tau_{zx}$ については，ポアソン比の異方性の影響は比較的小さいものとなった。

#### (3) せん断弾性係数の異方性の影響

有効応力に対するせん断弾性係数の異方性の影響は，ヤング係数やポアソン比の異方性の影響に比べて非常に小さい。

### 4. 結論

横等方性の海底地盤の波浪応答を理論的に解析し，地盤の力学パラメータの異方性が地盤内の有効応力の分布や，地盤の破壊領域におよぼす影響を検討した。また，ヤング係数に関しては，その異方性が強いほど地盤は不安定になることを示した。

（参考文献）

- 1) Yamamoto et. al. (1978), J. F. M., 87-1, pp. 193-206.
- 2) 矢富ら (1995), 海岸工学論文集, 42-2, pp. 1011-1015.
- 3) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994), 海岸波動, 第V篇, pp. 481-482.

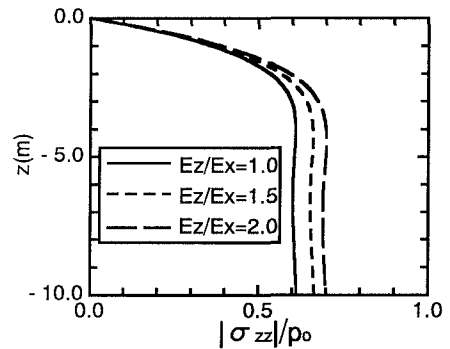


図-1 鉛直有効応力の振幅の鉛直方向分布

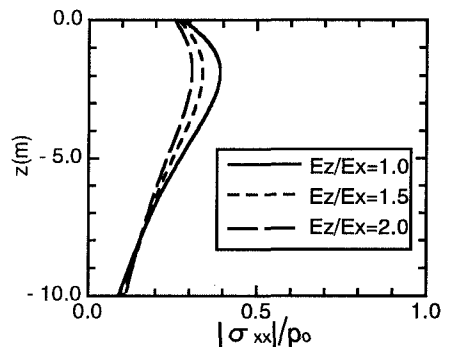


図-2 水平有効応力の振幅の鉛直方向分布

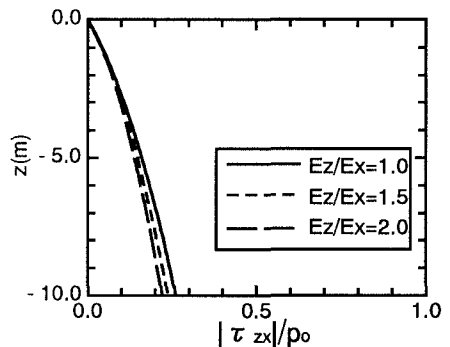


図-3 せん断応力の振幅の鉛直方向分布

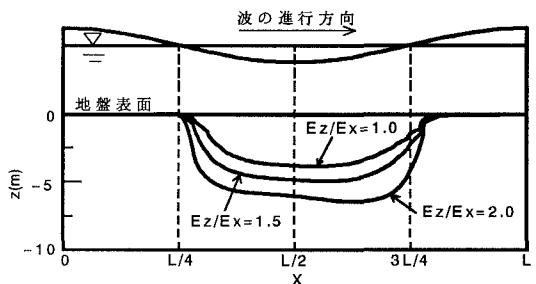


図-4 海底地盤の破壊領域