

波による海底地盤の応答における地盤内の応力分布および破壊条件

福井高専	正会員	○廣部英一
金沢大学工学部	正会員	石田 啓
金沢大学工学部	正会員	矢富盟祥
金沢大学工学部	正会員	由比政年

1. はじめに

波の水面変動によって、海底地盤面に作用する変動波圧が海底地盤内に伝達減衰するのに加えて位相差を生じることから、地盤内に変動過剰間隙水圧が生じる。これにより波谷が通過する位相前後で土粒子骨格に作用する全垂直応力が減少あるいは負となる領域が生じて、せん断力や引張り力による破壊により液状化が発生する。本研究は、変動波圧が作用する海底地盤内の応力分布を明らかにし、破壊条件を考察した。

2. 基礎方程式と境界条件および応答解析法

海底地盤を多孔質の弾性体である土粒子骨格と間隙水からなる2相混合体とする¹⁾。平面歪み状態を考え、波の進行方向にx軸を、鉛直上向きにz軸を取る。土粒子は非圧縮性とし土粒子骨格は圧縮性の線形弾性体とする。間隙水は気泡の混入を考慮して圧縮性として取り扱う。間隙水の流れはDarcyの式を仮定する。

連続式および水平方向と鉛直方向の釣り合い方程式は、次式で表される。

$$\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 p = \frac{n_w}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad G \nabla^2 u + B_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad G \nabla^2 w + B_s \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1)$$

ここに、 u 、 w は地盤の水平および鉛直方向変位、 p は間隙水圧で静的平衡状態からの変動量を表し圧縮を正とする。 ∇^2 はラプラシアン、 $\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_z = \partial u / \partial x + \partial w / \partial z$ は体積歪み、 γ_w は間隙水の単位体積重量、 k は地盤の透水係数、 n_w は地盤の間隙率、 β は間隙水の体積弾性係数である。

間隙水の圧力-歪みの構成関係式、および平面歪み状態における土粒子骨格の応力-歪みの構成関係式は、

$$p = \frac{\beta}{n_w} \varepsilon, \quad \text{および} \quad \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_s + G & B_s - G & 0 \\ B_s - G & B_s + G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 ε は間隙水の体積歪み、 $B_s = G / (1 - 2\nu)$ は土粒子骨格の体積圧縮係数、 $G = E / 2(1 + \nu)$ は土粒子骨格のせん断弾性係数、 E は土粒子骨格の縦弾性係数、 ν は土粒子骨格のポアソン比である。

海底地盤面での境界条件は、微小振幅波を用いると、次のように与えられる。 $p_0 = \gamma_w H / (2 \cosh \lambda h)$ であり、 i は虚数、 λ は波数、 ω は角周波数、 γ_w は海水の単位体積重量、 H は波高、 h は水深である。

$$\sigma_z = 0, \quad \tau_{xz} = 0, \quad p = p_0 \exp[i(\lambda x - \omega t)] \quad \text{at} \quad z = 0 \quad (3)$$

海底地盤の無限深部での境界条件は、波による変動波圧が伝達しないとすると、次のように与えられる。

$$u = 0, \quad w = 0, \quad p = 0 \quad \text{at} \quad z = -\infty \quad (4)$$

基礎方程式(1)の解を求めるにあたり、境界条件が時間 t および水平方向 x に関して周期的であることから、Yamamotoら²⁾の手法に従い、式(1)の解 u 、 w 、 p を、次のように変数分離形の周期解と仮定した。

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

U 、 W 、 P は、鉛直方向 z のみの関数であり、式(5)を式(1)に代入すると定数係数線形連立常微分方程式となるが、これから得られた特性方程式を解き、さらに、 U 、 W 、 P の各項の係数は独立ではなく基礎方程式(1)と境界条件(3)と(4)を満たすことから、一般解を求めることが出来る。

3. 地盤の破壊の判定方法

(1) 引張り破壊 地盤内の土粒子骨格に作用する全垂直応力 σ_{z0} と σ_{x0} は、式(1)を解き式(2)の関係から得られた鉛直と水平応力の変動成分 σ_z と σ_x 、および土被り圧 $(\gamma_s - \gamma_w)z$ により、次式で表される。

$$\sigma_{z0} = \sigma_z + (\gamma_s - \gamma_w)z, \quad \sigma_{x0} = \sigma_x + K_0(\gamma_s - \gamma_w)z \quad (6)$$

平面歪み状態($\varepsilon_y = 0$)の場合、全垂直応力 σ_{y0} は y 軸方向の応力-歪み関係から次式で求められ、同様に応力の変動成分 σ_y も次式で求められる。 γ_s は地盤の単位体積重量、 $K_0 = \nu / (1 - \nu)$ は静止土圧係数である。

$$\sigma_{y0} = \nu(\sigma_{x0} + \sigma_{z0}) \quad , \quad \sigma_y = \sigma_{y0} - K_0(\gamma_s - \gamma_w)z \quad (7)$$

土粒子骨格に作用する主応力 $\sigma_i (i=1, 2, 3)$ は次式となるが、値の大きい順に $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とする。

$$\sigma_i = \frac{\sigma_{z0} + \sigma_{x0}}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_{z0} - \sigma_{x0}}{2} \right)^2 + \tau_{xz}^2 \right]^{1/2} \quad \text{あるいは} \quad \sigma_i = \sigma_{y0} \quad (8)$$

(2) せん断破壊 土のせん断破壊の Mohr・Coulomb 基準および松岡・中井基準は、各々、次のようである。

$$\tan \phi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2(\sigma_1 \sigma_3)^{1/2}} \quad \text{および} \quad \tan \phi = \left[\frac{J_1 J_2 - 9 J_3}{9 J_3} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$\text{ここに、} J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad J_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1, \quad J_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3$$

上式を用いて求められる内部摩擦角 ϕ (応力円の接線の角度) が、地盤の内部摩擦角 ϕ (破壊線の角度) を超えたとせん断破壊される。なお、変動波圧の作用する海底地盤では、波形の位相に応じて応力状態が変化する。

4. 計算結果と考察

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で設定されたもの³⁾のうち、設計波規模の波 ($H=10\text{m}$, $T=13\text{sec}$, $h=10\text{m}$, $L=167.5\text{m}$)、および緩い砂を用いた。

図-1 は、間隙水圧の変動量 p の周期変化を示す。位相 0° は波の峰、位相 180° は波の谷である。変動波圧により生じた p が地盤深部方向に伝達減衰し、地盤面下約 1.7m を最大とした位相遅れを生じている。図-2～図-4 は、垂直応力の変動成分 $\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$ の周期変化を示す。図中には全垂直応力 $\sigma_{z0}, \sigma_{x0}, \sigma_{y0}$ がゼロになる範囲が示されているが、これより左側の領域で引張り破壊が発生する。

図-5 は、体積歪みの分布である。地盤面下約 4m を最大として波の谷で地盤の膨張、波の峰で収縮が生じている。図-6 は、全垂直応力および主応力の最小値が引張りになる領域を示す。これまで、全垂直応力 σ_{z0} がゼロになる範囲で破壊条件を判定したものが多く、波谷の少し前の位相あるいは波峰の通過後の位相を液状化発生域としているが、地盤内の応力分布を3次的に解析すれば、全垂直応力 σ_{x0} と σ_{y0} や主応力 σ_3 がゼロになる範囲は異なることが分かる。図-7 は、松岡・中井の破壊基準による内部摩擦角の分布を示す。緩い砂地盤の内部摩擦角は $35^\circ \sim 40^\circ$ 程度であるが、この範囲は、図-6 の σ_3 が引張りになる領域に外接する。すなわち、波が進行する地盤内では、せん断破壊が発生した後、直ちに引張り破壊が発生する。

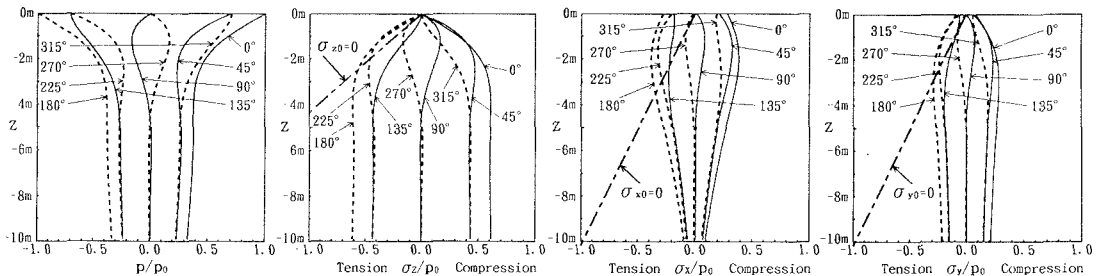


図1 間隙水圧の周期変化

図2 鉛直応力の変動成分の周期変化

図3 水平応力の変動成分の周期変化

図4 水平応力の変動成分の周期変化

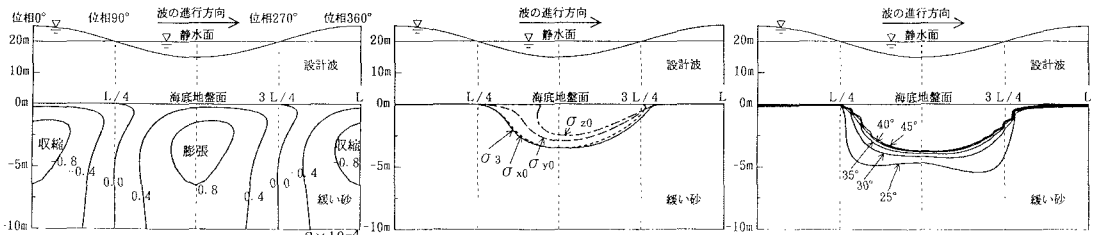


図-5 体積歪みの分布

図-6 垂直応力が引張りになる領域

図-7 内部摩擦角 (松岡・中井の破壊基準)

最後に、図面作成等に協力して頂いた福井高専学生の岡野聡君と松浦光則君に感謝します。

参考文献 1) Biot, M. A. : General Theory of Three-Dimensional Consolidation, Journal of Applied Physics, vol.12, February, pp.155~164, 1941. 2) Yamamoto, T., et al. : On the response of a poro-elastic bed to water waves, J. of Fluid Mech., vol.87, part 1, pp.193~206, 1978. 3) 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 : 海岸波動 [波・構造物・地盤の相互作用の解析法], 第V編 波浪と海底地盤の相互干渉, pp.481~482, 土木学会, 1994.