

II-303

波浪による海底地盤内の変動間隙水圧と地盤有効応力の関係

京都大学工学部 正 酒井哲郎, 正 間瀬 肇, 関西電力 正 松本明男

1. はじめに 海岸, 海洋構造物の基礎としての海底地盤の安定性を議論する場合, 特に砂地盤の場合には波浪によって生じる変動間隙水圧が重要であることが指摘されている(善ら, 1987). 善らは, これまで地盤の間隙水圧や変位を扱っている研究では Biot(1941) の圧密方程式が用いられており, 地盤骨格は弾性体であると仮定されていることから, 地盤の液状化を議論する場合には適当ではないとして, 別に間隙水圧を支配する方程式を導き, 地盤有効応力の変動は海底面での波圧と間隙水圧変動の差に等しいとして実験結果と比較し, 実験結果を説明しうることを示している. 確かに液状化した状況では弾性体の仮定は現実的ではないが, 液状化する直前までは弾性体の仮定はそれほど非現実的であるとは言えない. ここでは, Biot の圧密方程式を用いた場合でも, 海底面での波圧と間隙水圧変動の差が地盤有効応力の変動に対応している事を, Mei and Foda(1981) の boundary region approximation の展開で用いた mixture theory を用いて示すとともに, 具体的な数値計算例によっても示す.

2. Biot の圧密方程式における関係 mixture theory からの Biot の圧密方程式の誘導は, すでに別の機会(酒井ら, 1988)に示したので, その詳細は参考文献によることとし, ここでは特に間隙水圧の変動と地盤有効応力の変動の関係に関して述べる. 海底地盤を固相と液相の2つの相からなる連続体と考え, 各々の質量保存則と運動方程式を変形する. 特に固相の運動方程式は, 次式のようになる.

$$\rho_s \dot{v}_s = \nabla \cdot T_s + \rho_s g + F_s \quad (1) \quad \text{ここで } \rho_s \text{ は混合体の単位体積に関する固相の密度,}$$

v_s は固相の速度ベクトル, ∇ は空間微分作用素ベクトル, T_s は固相に働く応力テンソル, g は重力加速度ベクトル, F_s はその他の液相からの干渉力ベクトルである.

T_s と液相に働く応力テンソル T_w との和が, 混合体に働く全応力テンソル T になる.

$$T = T_s + T_w \quad (2) \quad \text{Terzaghi による地盤有効応力テンソル } T^e \text{ は, この}$$

全応力テンソル T と液相の単位面積に働く正味の応力テンソル T_w ($= T_w/n_w$ (n_w : 間隙率), すなわち間隙水圧 $-p \cdot I$ (I は単位テンソル))との差として定義される.

$$T^e = T - T_w \quad (3) \quad \text{式 (2) と (3) より,}$$

$$T_s = T^e + (1 - n_w)T_w \quad (4) \quad \text{となる.}$$

土粒子そのものは非圧縮性とし, 土粒子骨格及び間隙水は圧縮性を仮定する. 固相と液相の相互干渉力は, ダルシー則で表現される2相の相対運動による抗力と間隙水圧に関する力からなると仮定する. 次に2つの相の質量保存則を加え合わせ, いわゆる storage equation を得る. 一方2相の運動方程式からそれらの静止状態での式を差し引き, 静止状態からの偏差に関する線形の式を得る. これらの式において, 加速度項及び重力に関する項を無視し, 地盤有効応力 T^e を Hooke の法則を用いて地盤変位を用いて表現すると, いわゆる Biot の圧密方程式が得られる.

式 (3) からわかるように, 間隙水圧変動 ΔT_w が波浪による海底面における波圧の変動 ΔT に等しくない場合は地盤有効応力 T^e は静水状態での値から変化することになる. したがって Biot の圧密式にも,

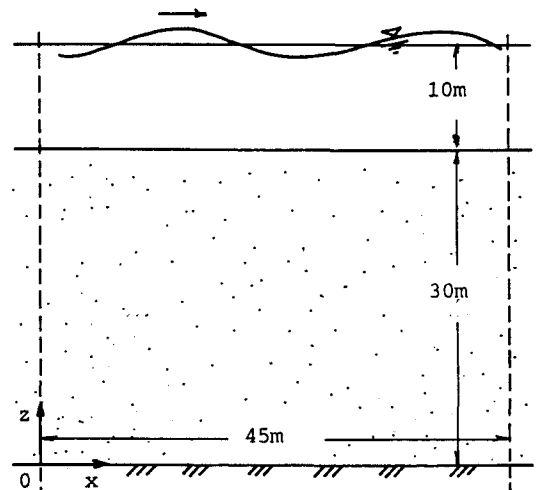


図-1 海底地盤

海底面での波圧と間隙水压変動の差に等しい地盤有効応力の変動が生じる機構が含まれている。

3. 数値計算例 以上の事を具体的な例で示すため、以下のような状況を考える。すなわち波の進行方向（ x ）に 45m，鉛直方向（ z ）に 30m の海底地盤（図-1）を考える。その下は不透過層とする。地盤定数は、せん断弾性率 $G = 1.65 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ，間隙水の体積弾性率 $\beta = 1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ，間隙率 $n_w = 0.28$ ，ポアソン比 $\nu = 0.35$ ，透水係数 $K = 1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ である。水深 h は 10m，波の周期 T は 10sec，波高 H は 2m，波長 L は 92.3m である。波は微小振幅波とし，海底面での波圧を与えた。この波が x の正の方向に進行する場合の海底地盤内の間隙水压変動と地盤変位を求めるため，Biot の式を有限要素法で解いた。この様な簡単な場合には，少々計算が面倒ではあるが既に山本（1977）が理論解を求めており，更に計算の容易なものとしては Mei and Foda の boundary region approximation による近似解があるが，ここではより一般的な場合にも適用出来るように開発した有限要素法（別の機会に発表予定）を用いる。なお有限要素法による Biot の式の定式化も，すでに名倉ら（1984）が行っているが，境界条件の与え方などに不明な点があるため改めて定式化した。なお有効応力は，計算された地盤変位から Hooke の法則を用いて求めた。

図-2は，地盤内の1点での鉛直方向の地盤有効応力の変動 σ_{zz}' （引っ張りを正としている）と，間隙水压の変動 p' から海底面での波圧 $p_0 \cdot \cos(\lambda x - \omega t)$ を引いたものの時間変化を示している。間隙水压が瞬時に海底面での圧力変動に対応する場合は $p' - p_0 \cdot \cos(\lambda x - \omega t) = 0$ となるが，実際には間隙水の対応が遅れるため0にはならない。まえがきで述べた考えによれば， $p' - p_0 \cdot \cos(\lambda x - \omega t)$ の値が正の場合は，間隙水压の変動が海底面での波圧より大きく，その差の分だけ地盤有効応力は引っ張り方向に変動する。この図の場合も， σ_{zz}' は引っ張り方向すなわち正の値を示している。逆に $p' - p_0 \cdot \cos(\lambda x - \omega t)$ の値が負の場合は，間隙水压の変動が海底面での波圧より小さく，その差の分だけ地盤が荷重を受け持つことから，鉛直方向地盤有効応力は圧縮方向の変動（負の値）を示している。

この様に，Biot の圧密方程式を用いて求めた間隙水压変動と鉛直方向有効応力変動の間にも，まえがきで述べた関係が成立していることがわかる。

4. 参考文献 Biot, M.A., 1941, J. Applied Phys., Vol.12, pp.155-164.

Mei, C.C. and Foda, M.A., 1981, J. R. astr. Soc., Vol.66, pp.597-631.

Nago, H. and Maeno, S., 1984, Memoirs of Eng., Okayama Univ., Vol.19-1, pp.13-32.

酒井・間瀬・松本, 1988, 第 32 回水理講演会論文集, pp.589-594.

Yamamoto, T., 1977, Coastal Sediment '77, ASCE, pp.898-913.

善・山崎・渡辺, 1987, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.4, pp.125-180.

最後に，この発表に当り舞鶴高専講師前野賀彦氏に有益な助言を得たことを記して謝意を表する。

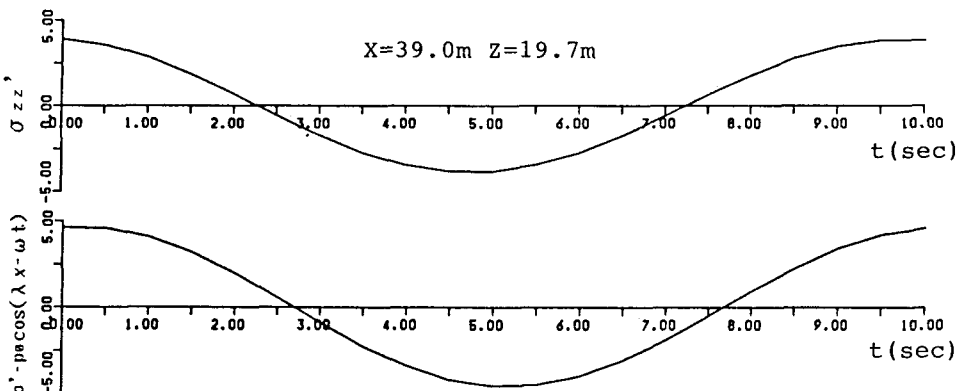


図-2 鉛直方向有効応力変動および間隙水压変動と海底面での波圧との差