

捨石防波堤と周辺地盤の波によって生じる過剰間隙水圧変動と有効応力変動

京都大学大学院 学生員 O坂本雅信

京都大学工学部 正会員 間瀬 肇

京都大学工学部 正会員 酒井哲郎

1. 要旨：本研究では、捨石堤前面に形成された重複波によって起こる捨石防波堤内およびその周辺海底地盤内の過剰間隙水圧変動と有効応力変動を Biot の圧密方程式に基づいて有限要素法により解析し、水理模型実験で得られている間隙水圧変動の特徴と比較・検討する。

2. 基礎式：ここで用いる基礎式は、海底地盤を気泡の混入を考慮した圧縮性流体で満たされた多孔質弾性体とモデル化した Biot の圧密方程式である。

応力に関する釣り合い式は式(1)および(2)で表される。

ここで、 V_x および V_z はそれぞれ土粒子変位の x および z 方向成分、 v および G は土粒子骨格のポアソン比およびせん断弾性係数、 p は間隙水圧、 ∇ は $(\partial/\partial x, \partial/\partial z)$ なる勾配ベクトルである。

間隙水に関する連続式は式(3)で表される。ここで、

k は速度の次元を有する土の透水係数、 ρ および

β は間隙水の密度と有効体積弾性係数、 g は重力加速度、 n は間隙率、 t は時間である。これらの式は静的状態からの変動分に対する無次元化された支配方程式である。これらの式の係数のオーダーは、砂の場合 $G \sim O(10^8)$ 、 k は $O(10^{-5})$ から $O(10^{-2})$ となる。有限要素法解析を用いて Biot の式を変形すると最終的に連立方程式が得られるが、係数のオーダーが非常に異なると桁落ちの恐れがあるので無次元化した。これらの式は有限要素法を用いて解くことができる。この際ガラーキン法を適用する。

3. 解析条件：海底地盤の下層部は不透水層とする。さらに、港内側には波はないものとする。

捨石防波堤上の波の特性自体明らかではないのでどのような条件を与えてよいのかははっきりしない。ここでは平常状態の波高の小さな波を対象とし、防波堤の前面では重複波が形成されているものを対象とする。入射波の条件としては、波高 H を 2.5 m、周期 T を 10 秒とした。

海底地盤の土質定数はポアソン比 v を 0.33、間隙率 n を 0.28、せん断弾性係数 G を $1.5 \cdot 10^8$ N/m²、透水係数 k を 10^{-3} m/s とした。コア部では $k = 1.0 \cdot 10^{-2}$ m/s、外層では $k = 1.0 \cdot 10^{-1}$ m/s、ポアソン比 $v = 0.4$ 、コア部では砂地盤と同じ値の 0.33、間隙率 n は外層およびコア部とも 0.28 とした。せん断弾性係数 G は、外層部では $G = 1.0 \cdot 10^7$ N/m²、コア部では $G = 1.0 \cdot 10^8$ N/m² を用いる。コア部を設けず外層部の土質定数のみを用いた均一の捨石防波堤も計算の対象にしたが、このケースを Case 2 とする。コア部を設けたものを Case 1 とする。

4. 結果：図-1 は、Case 1 の場合の捨石防波堤内部とその周辺地盤の過剰間隙水圧の等圧線を示したものである。間隙水は等圧線の大きいほうから小さいほうへ等圧線に垂直に動く。図-1を見ると、捨石防波堤前面では、静水位より上方の部分では表面に沿って防波堤内部に上向きの流れが、静水位より下の部分では下向きの流れが生じる。これらの防波堤内部の流れによる浸透力が捨石に作用することになる。すなわち、波の遡上につれて防波堤表面での上向きの掃流力に加えて、防波堤内部でも上向きの浸透力が捨石に作用することになり、捨石の安定性には内部の水理現象がかかわることが理解される。計算条件 Case 2 について、これらの等間隙水圧線を比較しても著しい差は見当たらない。ここでもう少し詳しく過剰間隙水圧の水平方向および鉛直方向の分布を調べてみる。図-2 は Case 1 について、 $z = -10$ m における水平方向の過剰間隙水

$$\frac{G}{G_0} \left\{ \nabla^2 V_x + \frac{1}{1-2v} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{G}{G_0} \left\{ \nabla^2 V_z + \frac{1}{1-2v} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right\} - \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{k G_0}{\rho g L^2 \omega} \nabla^2 p - \frac{n G_0}{\beta} \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

Masanobu SAKAMOTO

Hajime MASE

Tetuo SAKAI

圧の分布を各位相ごとに示したものである。 $z = -10 \text{ m}$ が静水位の位置である。また、横軸の x' は捨石防波堤表面から背後に向かって計った水平距離である。図では $x' = 24 \sim 54 \text{ m}$ がコア部である。Case 2 と比較しても著しい差は見られないが、コア部の透水係数を大きくした Case 2 の方が港内側の捨石防波堤内部の間隙水圧が大きくなる。すなわち、透水係数が大きいほど間隙水圧が伝達しやすい。これは間隙水圧の鉛直分布の場合にもあてはまる。

土粒子の変位ベクトルを調べると防波堤前面水位の上昇により下向きに波圧が作用するとそれに応じて土粒子骨格が下向きの力を受け下方に変位した。捨石防波堤前面での水位が低下し、波圧は静水位状態に比べ負になると静水位付近の土粒子は上方に変位する。Case 2 の方が変位が非常に大きくなっている。これは、コア部のせん断弾性係数が小さいために同じ作用力に対して大きな変位を生じるためである。その変位の増加分はコア部のみならず、捨石防波堤の港内側の表層にまで及ぶ。また、防波堤前面の水位が最大となるとときにコア部の影響が最も顕著になる。

有効応力を Case 1 と Case 2 に関して比較した場合、鉛直有効応力では両者にそれほど差は見られないが、水平有効応力、せん断応力で差が見られる。その差は捨石防波堤の港内側に見られ、コア部があれば応力は港内側の方へ伝わりにくくなるため、コア部を有しない Case 2 の方が有効応力が大きくなる。よってコア部には透水係数が小さく、せん断弾性係数が大きな素材を用いることが重要である。

Oumeraci and Partenscky (1990) による間隙水圧の水平分布の実験結果と解析結果を比較すると、ともに港外側から港内側に向けて指数関数的に減少し、減衰係数は水底に近づくにつれ小さくなるという結果が得られた。間隙水圧の鉛直分布実験結果では水面下よりわずかに下の部分でピークを持っているが解析ではピークは現われなかった。この理由としては今回の計算では碎波を考慮していないことが上げられる。碎波が起これば静水面付近でピークを持つのではないと思われる。今回の解析で用いられた Biot の方程式は加速度が省略された疑似静的なつり合い方程式になっている。碎波のように短時間に大きな波圧が作用する場合には加速度の影響がきいてくる。本解析結果が実験結果と同じようにならなかったのは、実験では加速度の効果が現われているのに対し、モデルではその効果を無視しているためではないと思われる。

参考文献 Oumeraci, H. and Partenscky, H. W., 1990. Wave-induced pore pressure in rubble mound breakwaters, Proc. Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.1334-1347.

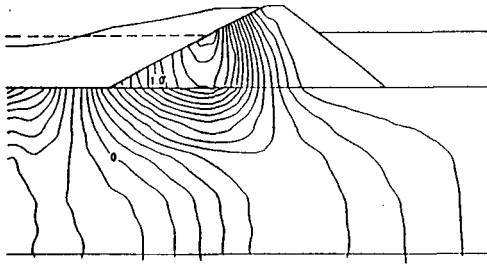


図-1 過剰間隙水圧の等圧線

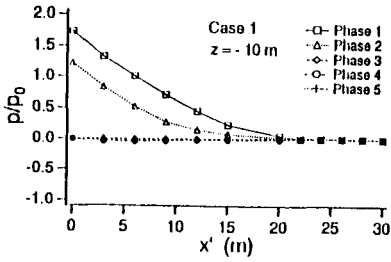


図-2 水平方向の過剰間隙水圧の分布