

## 直立型捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出しに関する一考察

名古屋大学大学院 学生会員 ○中村 友昭

韓国慶尚大学校 正 会 員 許 東秀

名古屋大学大学院 正 会 員 水谷 法美

**1. 緒言：**大蔵海岸での人身事故を契機に人工海浜の護岸背後に設置した埋立土砂の吸い出し現象が注目を集め、現在までにケーソン型防波護岸（例えば高橋ら，1996）や捨石護岸（例えば許ら，2004）に対する研究が行われ、土砂吸い出し機構や対策工法に検討が加えられている．一方、地盤の波浪応答を取り扱える数値計算手法がいくつか提案されている（例えば高橋ら，2002）が、土砂吸い出し現象に適用した研究は見受けられない．そこで本研究では、気液二相流を解析可能な波動場の数値計算手法および波動場との圧力・流速の連続性を考慮した水-土連成計算に基づく地盤の数値計算手法をそれぞれ開発し、直立型捨石護岸の背後に設置した埋立土砂の吸い出し現象に適用することで土砂吸い出し機構を解明することを目的とする．

**2. 数値計算手法：**波動場の支配方程式として、透過性構造物から受ける線形・非線形抵抗力をモデル化した Golshani（2002）による支配方程式の運動方程式に粘性による拡散項を付加し、さらに液相だけでなく気相にまで解析対象を拡張した次に示す VOF 関数  $F$  の移流方程式、連続式、運動方程式を用いた．

$$\frac{\partial(mF)}{\partial t} + \frac{\partial(mv_j F)}{\partial x_j} = Fq^*, \quad \frac{\partial(mv_j)}{\partial x_j} = q^*, \quad q^* = \frac{q(y, z; t)}{\Delta x_s}$$

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \langle \nu \rangle \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} - R_2^i - R_1^i + \frac{\langle \nu \rangle}{3m} \frac{\partial q^*}{\partial x_i} - \beta_{ij} v_j$$

ここで、 $v_i$  は実流速、 $p$  は圧力、 $t$  は時間、 $g_i$  は重力加速度、 $\langle \rho \rangle$  は流体の密度、 $\langle \nu \rangle$  は流体の動粘性係数、 $m$  は空隙率、 $C_A$  は付加質量係数、 $R_2^i$ 、 $R_1^i$  はそれぞれ線形、非線形抵抗力、 $q(y, z; t)$  は 5 次精度 Stokes 理論に基づく造波位置でのわき出し強さ、 $\Delta x_s$  は造波位置における  $x$  軸方向の格子幅、 $\beta_{ij}$  は付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数であり、 $\langle \rho \rangle$ 、 $\langle \nu \rangle$ 、 $R_2^i$ 、 $R_1^i$  はそれぞれ

$$\langle \rho \rangle = F\rho_w + (1-F)\rho_a, \quad \langle \nu \rangle = F\nu_w + (1-F)\nu_a, \quad R_2^i = \frac{12C_{D2}\langle \nu \rangle(1-m)}{md_m^2} v_i, \quad R_1^i = \frac{C_{D1}(1-m)}{2md_m} v_i \sqrt{v_j v_j}$$

である．ただし、下付きの  $w$  と  $a$  はそれぞれ液相、気相での値を表しており、 $d_m$  は平均粒径、 $C_{D2}$ 、 $C_{D1}$  はそれぞれ線形、非線形抵抗力係数である．以上の支配方程式を SMAC 法と Donor-acceptor 法により解いた．

一方、地盤の支配方程式として、次に示す水の相対加速度を無視した  $u-p$  形式の Biot の式を用いた．

$$\rho \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}' - \nabla p_e, \quad \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{m}{K_w} \dot{p}_e + \nabla \cdot \left\{ \frac{k}{\rho_w g} (-\nabla p_e - \rho_w \ddot{\mathbf{u}}) \right\} = 0$$

ここで、 $\rho = (1-m)\rho_s + m\rho_w$  は土の密度、 $\rho_s$  は土粒子の密度、 $\rho_w$  は水の密度、 $\mathbf{u}$  は土粒子の変位、 $\boldsymbol{\sigma}'$  は有効応力（引張を正）、 $p_e$  は過剰間隙水圧、 $\varepsilon_v$  は体積ひずみ（膨張を正）、 $K_w$  は水の体積弾性係数、 $k$  は透水係数である．また、構成則として Hooke 則を用いた．ここでは、二次元四辺形アイソパラメトリック要素に基づく有限要素法を用いて解き、土粒子の変位  $\mathbf{u}$  に対して Newmark の  $\beta$  法、過剰間隙水圧  $p_e$  に対して Crank-Nicolson 法、連立一次方程式の解法には Gauss の消去法に基づくバンドマトリクス法を適用した．

波動場と地盤の接続手法として、まず地盤を含む解析領域全体に VOF 法を適用した後、波動場と地盤の境界面での圧力と流速を計算し、最後にその圧力と流速を境界条件に地盤に Biot の式を適用することで地盤の波浪応答を解析した．詳細は Mizutani ら（1998）を参照されたい．ただし、波による地盤の変位が非常に小さいと考え、地盤から波動場へのフィードバックは行わず、また埋立海浜全体が飽和状態であると仮定した．

**3. 水理模型実験の概要：**名古屋大学の二次元造波水路に直立型捨石護岸と埋立海浜を設置して水理模型実験

キーワード 土砂吸い出し、捨石護岸、埋立土砂、VOF 法、Biot の式、地盤の波浪応答

連絡先 〒464-8603 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4632

を行った。本研究では、埋立土砂の動きを止めて護岸周辺の水位と水圧を計測する実験と土砂吸い出しの有無を確認する実験に分けて行った。前者の実験では容量式水位計、地下水位計、間隙水圧計を用いて水位と水圧を計測し（図-1）、後者の実験では波を30分間作用させて土砂吸い出しの確認を行った。

**4. 結果および考察：**埋立海浜内部の圧力変動について、土砂の動きを止めた実験での実験値と本数値計算手法による計算結果の比較の一例を図-2に示す。同図より、位相に若干のずれが認められるものの、振幅の大きさは非常によく一致していることが分かる。図示はしないが、護岸内の圧力変動と護岸および土砂内部の水位変動も同様の傾向を示していることから、本数値計算手法の妥当性を確認できた。

本研究では、図-3に示す数値波動水路を用い、図-4に示す流量流速 $v_{\text{norm}}$ 、 $v_{\text{tan}}$ 、体積ひずみ $\varepsilon_v$ に焦点を当てる。図示しないが、 $v_{\text{norm}}$ が最大となる位相では護岸近傍の静水面付近の埋立海浜内部に負の $\varepsilon_v$ が生じるために、沖向き流れに伴う土砂吸い出しはほとんど生じないと推測されるが、吸い出しが生じたケースの $v_{\text{tan}}$ が最大となる位相の $\varepsilon_v$ を示した図-5から、 $v_{\text{tan}}$ により埋立海浜前面に上向きの力が作用し、さらに静水面付近の埋立海浜内部の $\varepsilon_v$ が増加していることから土砂吸い出しが生じやすくなったと考えられる。そこで、 $v_{\text{tan}}$ と $\varepsilon_v$ の最大値が土砂吸い出しに及ぼす影響を図-6に示す。ここで、No Suctionは吸い出しなし、CaveとCave-inはそれぞれ空洞、陥没に到る吸い出しが生じたケースを表す。同図より、 $v_{\text{tan}}^{\text{max}}$ と $\varepsilon_v^{\text{max}}$ の増加に伴い土砂吸い出しが生じる傾向が確認できる。以上より、作用波により $v_{\text{tan}}$ や $\varepsilon_v$ が増加することで土砂吸い出しが助長されることが言える。

**5. 結論：**本研究では、波動場と地盤の新たな数値計算手法を開発し、捨石護岸背後の土砂吸い出し機構の解明を行った。引き続き、土砂吸い出し機構のさらなる解明を行っていく所存である。

**参考文献** [1] 高橋ら（1996）、港研報告、第35巻、第2号、pp. 3-63. [2] 高橋ら（2002）、海工論文集、第49巻、pp. 881-885. [3] 許ら（2004）、海工論文集、第51巻、pp. 791-795. [4] Golshani, A. (2002), Doctoral thesis, Nagoya University, 144 p. [5] Mizutani, N. et al. (1998), Coast. Eng., Elsevier, Vol. 33, pp. 177-202.

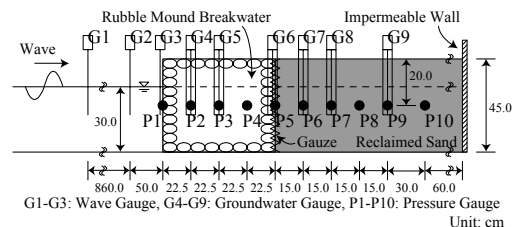


図-1 水理模型実験の実験装置の概略図

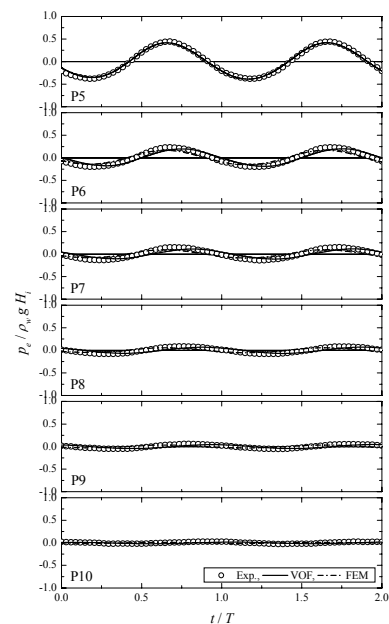


図-2 埋立海浜内部の圧力変動

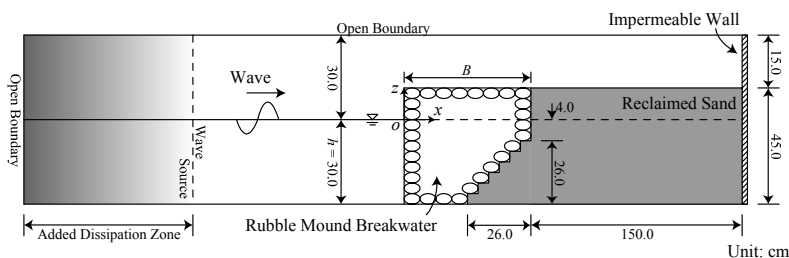


図-3 土砂吸い出し機構の検討で用いた数値波動水路の概略図

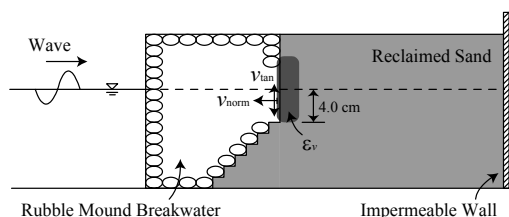


図-4  $v_{\text{norm}}$ 、 $v_{\text{tan}}$  の定義と  $\varepsilon_v$  の対象範囲

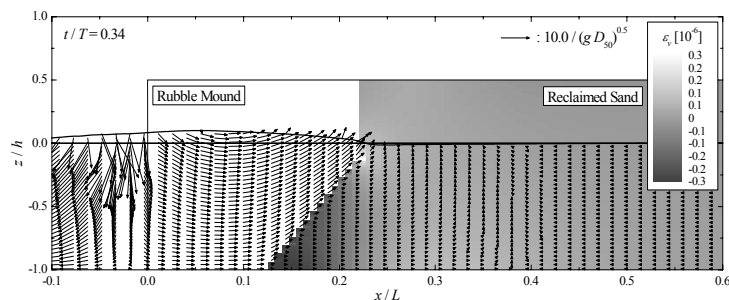


図-5 流量流速および体積ひずみ $\varepsilon_v$ の分布（土砂吸い出しが生じたケース；鉛直方向の流量流速 $v_{\text{tan}}$ が最大となる位相）

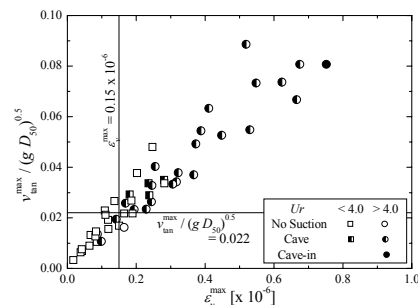


図-6  $v_{\text{tan}}^{\text{max}}$ と $\varepsilon_v^{\text{max}}$ が及ぼす影響（ $D_{50}$ ：捨石の平均粒径）