

## 捨石護岸背後の土砂吸い出しに及ぼす流速場と応力場の影響に関する一考察

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  
 名古屋大学大学院 フェロー 岩田好一朗

**1. はじめに:** 波浪の作用に伴う埋立土砂の吸い出しが問題となっており、これ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) を対象に研究が行われている. 一方, 波に対する地盤の応答を取り扱える数値計算手法がいくつか開発されているものの (例えば高橋ら, 2002), 著者の知る範囲では埋立土砂の吸い出しに適用した研究は見受けられない. そこで本研究では, 波動場・地盤間の圧力と流速の連続性を確保した新たな数値波動水路を開発し, 捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し現象に適用する. そして, 本手法を用いることによって土砂吸い出し現象の解明を試みる.

**2. 数値波動水路:** 波動場の支配方程式として, Golshani ら (2003) の支配方程式に若干の修正を施した次に示す VOF 関数  $F$  の移流方程式, 連続式, 運動方程式を用いる.

$$\frac{\partial(mF)}{\partial t} + \frac{\partial(muF)}{\partial x} + \frac{\partial(mvF)}{\partial y} + \frac{\partial(mwF)}{\partial z} = Fq^* \quad \frac{\partial(mu)}{\partial x} + \frac{\partial(mv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = q^* \quad q^* = \frac{q(y, z; t)}{\Delta x_s}$$

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial x} + \langle \nu \rangle \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - R_2^x - R_1^x$$

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial y} + \langle \nu \rangle \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - R_2^y - R_1^y + \frac{\langle \nu \rangle}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y}$$

$$\left(1 + C_A \frac{1-m}{m}\right) \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \langle \nu \rangle \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - R_2^z - R_1^z + \frac{\langle \nu \rangle}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w$$

ここで,  $u, v, w$  はそれぞれ実流速の  $x, y, z$  軸方向成分,  $p$  は圧力,  $t$  は時間,  $g$  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,  $q$  は 5 次精度 Stokes 理論に基づく造波位置でのわき出し強さ,  $\Delta x_s$  は造波位置での  $x$  軸方向の格子幅,  $\beta$  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

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

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,  $v_i$  は実流速ベクトルである.

一方, 地盤には次に示す  $u$ - $p$  形式の土~水連成問題の支配方程式 (Biot の式) を適用する.

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

ここで,  $\rho = (1-m)\rho_s + m\rho_w$  は土の密度,  $\rho_s$  は土粒子実質部分の密度,  $\rho_w$  は水の密度,  $\mathbf{u}$  は土粒子実質部分の変位,  $\boldsymbol{\sigma}'$  は有効応力 (引張を正),  $p_e$  は過剰間隙水圧 (圧縮を正),  $\varepsilon_v$  は体積ひずみ (引張を正),  $K_w$  は水の体積弾性係数,  $k$  は透水係数である. また, 構成則として等方弾性地盤の Hooke 則を用いた. 本数値計算手法では, 変位に対して Newmark の  $\beta$  法, 間隙水圧に対して Crank-Nicolson 法を適用し, 連立方程式の解法には Gauss の消去法に基づくバンドマトリクス法を用いて土~水連成計算を行った.

波動場と地盤の接続手法として, まず波動場の計算を数十ステップ実行し, 求めた水圧と流速を境界条件として地盤の応答を計算した. ただし, 地盤の変位が微小であると仮定して地盤から波動場へのフ

ードバックは行わなかった。接続手法の詳細は Mizutani ら (1998) を参照されたい。

**3. 水理実験の概要:** 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を行った (図-1)。作用波は規則波とし、入射波周期  $T$  を 5 種類、入射波高  $H_i$  を 2 種類、護岸幅  $B$  を 3 種類、捨石の平均粒径  $D_{50}$  を 2 種類、埋立土砂の平均粒径  $d_{50}$  を 2 種類変化させた。本研究では、埋立土砂の吸い出しの有無を確認する

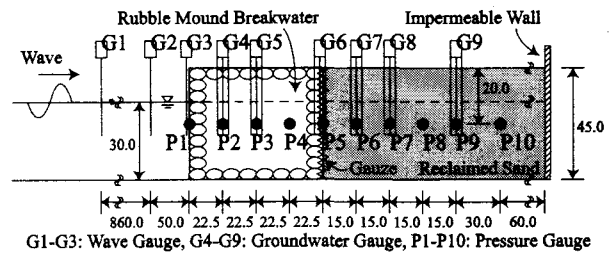


図-1 実験装置の概略図 (単位: cm)

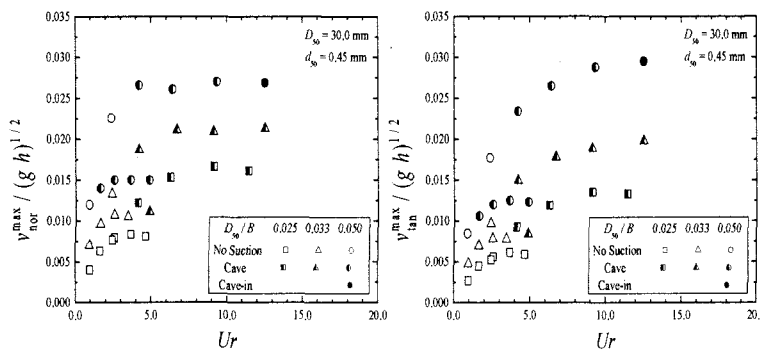
ための実験と埋立土砂の動きを止めて捨石護岸周辺の水位や水圧を計測するための実験に分けて行った。前者の実験では、波を 30 分間作用させ、ビデオ撮影とともに土砂吸い出しの確認を行った。一方、後者の実験では容量式水位計、地下水水位計、間隙水圧計を用いて水位や水圧の計測を行った (図-1 参照)。

**4. 計算結果及び考察:** 水圧変動について、本数値計算手法による計算結果と埋立土砂の動きを止めた実験での実験結果を図-2 に示す。同図より、位相に若干のずれがあるものの、振幅の大きさは非常によく一致していることが分かる。また、図示はしないが、水位変動についても同様の傾向を示している。以下、本手法による計算結果を用いて埋立土砂の吸い出し機構を考究する。

埋立海浜近くの捨石護岸内部に生じる最大流速が土砂吸い出しに及ぼす影響を図-3 に示す。同図より、アーセル数  $U_r = H_i L^2 / h^3$  の増加に伴って沖向き最大流速  $v_{nor}^{max}$  や埋立海浜前面に対して接線方向の最大流速  $v_{tan}^{max}$  も増加し、ある限界値を超える流速が生じると土砂吸い出しも起こりやすくなることが分かる。以上より、護岸内部の水粒子の運動により埋立土砂に流出させようとする力が作用し、そのために土砂吸い出しに到ったと考えられる。

**5. 結論:** 本研究では、波動場と地盤を解析できる新たな数値波動水路を開発し、捨石護岸背後の土砂吸い出しの解明に考察を加えた。紙面の都合上一部の結果のみ示したが、応力場の影響を含む詳細な結果については講演時に発表する。

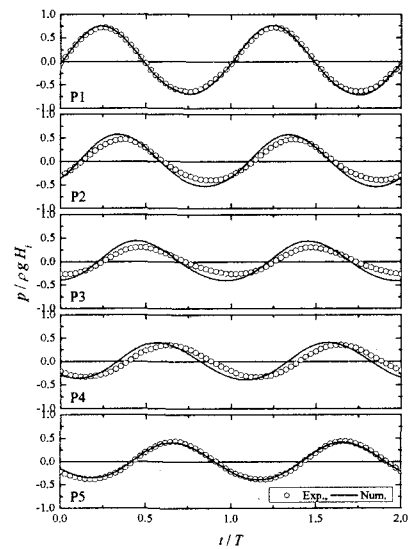
**参考文献:** [1] 高橋ら (1996), 港研報告, 第 35 巻, 第 2 号, pp. 3-63. [2] 高橋ら (2002), 海工論文集, 第 49 巻, pp. 881-885. [3] 許ら (2004), 海工論文集, 第 51 巻, pp. 791-795. [5] Golshani, A. et al. (2003), J. Coast. Eng., JSCE, Vol. 45, No. 1, pp. 1-28. [6] Mizutani, N. et al. (1998), Coastal Eng., Elsevier, Vol. 33, pp. 177-202.



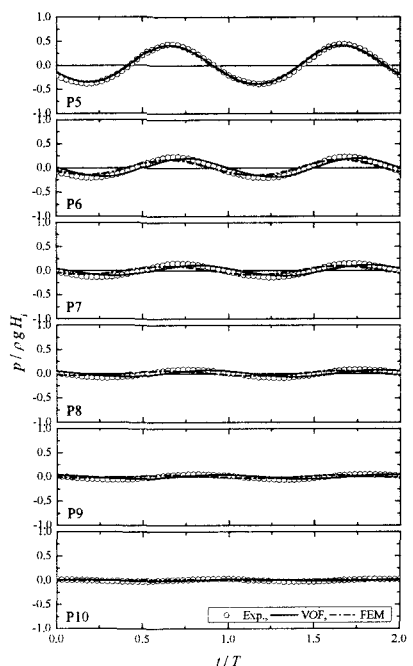
(a) 沖向き最大流速

(b) 接線方向の最大流速

図-3 埋立海浜前面の捨石護岸内部に生じる最大流速の影響



(a) 捨石護岸内部の圧力変動



(b) 埋立海浜内部の圧力変動

図-2 実験値と計算値の比較