

護岸下部から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**：波浪による埋立土砂の吸い出し現象に関して、現在までに捨石護岸（著者ら、2005）、ケーソン型防波護岸（高橋ら、1996）、海岸堤防（岩崎ら、1995）などを対象に研究が行われ、その機構が検討されてきた。また、山元ら（1994）は浸透流解析により高地下水位時の重力式護岸背後の土砂流出機構を検討しているが、重力式護岸を対象とした研究は極めて少ない。そこで本研究では、吸い出し防止対策が取られていなかった現地の構造物をモデル化した重力式直立型護岸を取り扱い、水理実験と数値計算により護岸下部の隙間からの埋立土砂の吸い出し現象を考究する。

2. 水理実験：名古屋大学の二次元鋼製造波水路

（長さ 30.0 m、幅 0.7 m、高さ 0.9 m）に現地の構造物を縮尺 1/20 でモデル化した重力式直立型護岸（表法面勾配 1/0.2）と埋立土砂（中央粒径 0.45 mm）を設置して水理実験を行った（図-1）。護岸上部には越波防止用の板を取り付け、護岸下部と板上部を造波水路に固定した。入射波は規則波とし、入射波高 H_i を 3 種類（2.0, 5.0, 8.0 cm）、入射波周期 T を 3 種類（1.2, 1.4, 1.6 s）、護岸下部の隙間高さ d を 2 種類（0.5, 1.0 cm；それぞれ静水深 $h = 45.5, 46.0$ cm に対応）ずつ変化させ、計 18 ケースの実験を行った。波の作用時間は 30 分間とし、図-1 に示す位置に電気容量式水位計 2 台と隙間水圧計 4 台を設置して波作用時の水位変動と水圧変動を計測した。

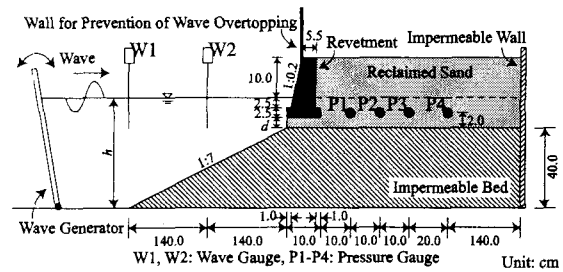


図-1 実験装置の概略図と計測装置の設置位置

3. **数値計算**：波動場に対して、著者ら（2005）の手法を若干改良した手法を適用した。具体的には、CSF モデルに基づく表面張力の効果と Smagorinsky モデルによる LES を導入し、運動方程式の対流項と VOF 関数 F の移流方程式の離散化手法をそれぞれ UTOPIA スキームと Donor-Acceptor 法から TVD スキームと MARS（功刀、1997）に変更した。すなわち、以下に示す支配方程式を用いた。

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

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

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、 $\hat{\rho} = F\rho_w + (1-F)\rho_a$ は流体の密度、 $\nu_i = \hat{\nu} + \nu_e$ 、 $\hat{\nu} = F\nu_w + (1-F)\nu_a$ は流体の動粘性係数、 ν_e は渦動粘性係数、 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、非線形抵抗係数、 $q(y, z; t)$ は造波位置でのわき出し強さ、 Δx_s は造波位置の x 軸方向の格子幅、 f_s^i は表面張力、 D_{ij} はひずみ速度テンソル、 β_{ij} は減衰係数である。

一方、地盤には著者ら（2005）が開発した u - p 形式の Biot の式に基づく手法を適用した。ただし、著者ら（2005）は 4 節点アイソパラメトリック要素を用いて計算しているが、本論では土粒子の変位 $\mathbf{u}$ に 8 節点アイソパラメトリック要素を、過剰間隙水圧 p_e に 4 節点アイソパラメトリック要素を用いた。また、桑原・大槓（1992）を参考に、重力式護岸の m を 0.0 とし地盤とともにその挙動を計算した。

4. **実験結果及び考察**：作用波による土砂吸い出し（写真-1）と吸い出しに伴う埋立海浜の陥没（写真-2）が再現できた。ここでは、上述の土砂吸い出しを吸い出しなし（No Suction）、陥没までは到らない小規

模な吸い出し (Cave), 陥没にまで到る大規模な吸い出し (Cave-in) の3つに分類した. 図-2に入射波と護岸下部の間隙高さ d が土砂吸い出しに及ぼす影響を示す. ここで, L は入射波の波長である. 同図より, 土砂吸い出しは水深波長比 h/L の影響をほとんど受けないものの, 波形勾配 H_i/L の増加や d/H_i の減少に伴い土砂吸い出しが生じやすくなる傾向が確認できる.

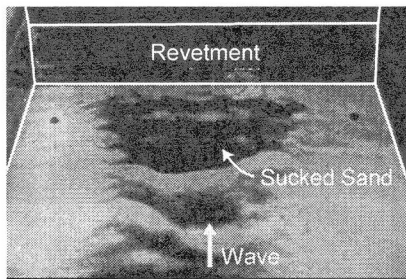


写真-1 護岸前面に流出した土砂 ($H_i/L = 0.017$, $d/H_i = 0.10$)

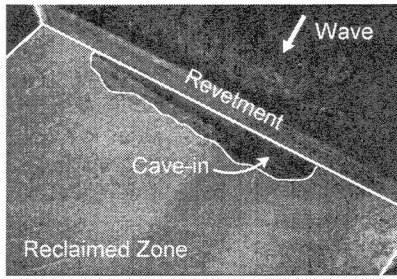


写真-2 埋立海浜に生じた陥没 ($H_i/L = 0.032$, $d/H_i = 0.13$)

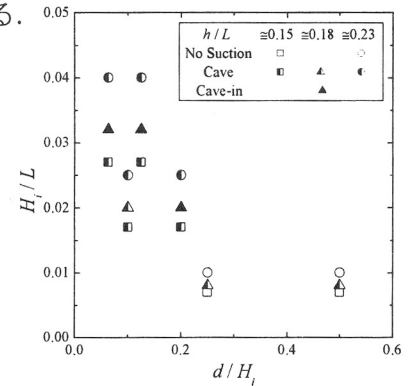


図-2 土砂吸い出しの発生条件

5. 計算結果及び考察: 水位 η および過剰間隙水圧 p_e の比較を図-3に示す. 同図の○印は実験値, 実線はVOF法に基づく計算値, 点線はBiotの式に基づく計算値を表す. 図-3より, η の実験値と計算値の一致は良好であるが, 護岸に作用した碎波圧の伝播が認められる p_e に関しては実験値とVOF法による計算値の差は非常に大きいものの, Biotの式に基づく手法では碎波圧型の波形が再現できていることが分かる. 以下, 本計算手法により土砂吸い出し機構を考究する.

土砂吸い出しに影響を及ぼすと考えられる護岸下部の間隙に生じる冲向き流速 v_{off} に着目したところ, 護岸下部の土砂内部の体積ひずみ ε_v が正 (膨張) のときと負 (収縮) のときに v_{off} が極大値を持つことが分かった. さらに ε_v が正のときは, ε_v が最大となった直後に v_{off} が極大になることが確認できた. そこで, 図-4に体積ひずみの最大値 $\varepsilon_v^{\text{max}}$ と ε_v が正のときの冲向き流速の極大値 $v_{\text{off}}^{\text{max}}$ が土砂吸い出しに及ぼす影響を示す. 同図より, d/H_i の減少に伴い $v_{\text{off}}^{\text{max}}/\sqrt{gh}$ と $\varepsilon_v^{\text{max}}$ が増加し, 特に $H_i/L > 0.025$ のときは非常に大きな $\varepsilon_v^{\text{max}}$ が生じていることから護岸下部からの土砂吸い出しとそれに伴う陥没が起りやすくなったと考えられる.

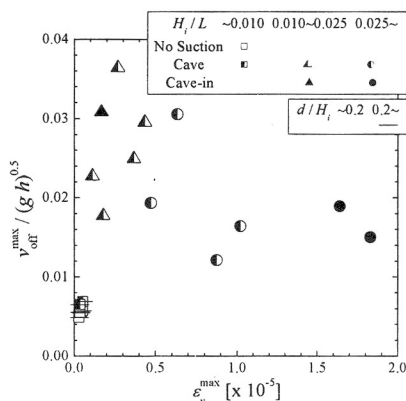
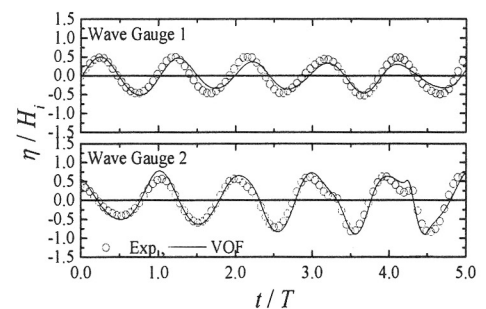
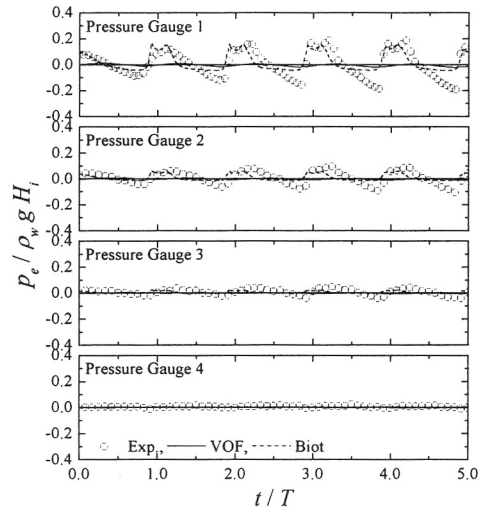


図-4 $v_{\text{off}}^{\text{max}}/\sqrt{gh}$ と $\varepsilon_v^{\text{max}}$ の影響



(a) 水位 η



(b) 過剰間隙水圧 p_e

図-3 実験値と計算値の比較 ($H_i/L = 0.025$, $d/H_i = 0.20$)

6. 結論: 本研究では, 水理実験と数値計算を用いて重力式護岸

下部からの土砂吸い出し現象に考察を加えた. 紙面の都合上, 一部の結果のみしか示せなかったが, 詳細は講演時に発表する.

参考文献:[1] 岩崎ら (1995), 海工論文集, 第42巻, pp. 1026-1030. [2] 功刀 (1997), 機論B, 第63巻, 第609号, pp. 1576-1584. [3] 桑原・大槓 (1992), 海工論文集, 第39巻, pp. 861-865. [4] 高橋ら (1996), 港研報告, 第35巻, 第2号, pp. 3-63. [5] 中村ら (2005), 海工論文集, 第52巻, pp. 836-840. [6] 山元ら (1994), 海工論文集, 第41巻, pp. 906-910.