護岸下部からの土砂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:波浪の作用に伴う土砂吸い出しに関して,現在までに捨石護岸(著者ら,2006),ケーソン型防波 護岸(高橋ら,1996),海岸堤防(岩崎ら,1995),矢板式護岸(前野ら,2002),緩傾斜護岸(野口ら,2000) などを対象に研究が行われ,水理実験や数値計算によりその機構が検討されている.また,山元ら(1994)は 実態調査と浸透流解析により高地下水位時の土砂流出機構を検討しているが,重力式護岸を取り扱った研究は 極めて少ない.本研究では,吸い出し防止対策が取られていなかったために実際に土砂吸い出しが生じた重力 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間隙からの土砂吸い出し機構を考究する.

2. 水理実験:名古屋大学大学院の二次元造波水路(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d₅₀=0.45 mm)を設置 して水理実験を行った(図-1).土砂吸い出しへの越波の影響を除外するために護岸上部に越波防止用の板を 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*,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), 護岸下部の間隙高さ*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,電気容量式水位計2台と間隙水圧 計4台により図-1に示す位置の水位と水圧を計測 するとともに,土砂吸い出しの確認を行った.

3. 数値計算手法: 波動場に対して, 著者ら (2006)





が開発した手法を適用した.ただし、CSF モデルに基づく表面張力の効果と Smagorinsky モデルによる LES を新たに導入し、さらに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 3 次精度の TVD スキームと MARS (功刀、1997) に改良した.すなわち、次 に示す VOF 関数 F の移流方程式、連続式、運動方程式を本数値計算手法の支配方程式として採用した.

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

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

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、 $v_t = \hat{v} + v_e$ 、 $\hat{v} = Fv_w + (1-F)v_a$ は流体の動粘性係数、 v_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、 Δx_s は造 波位置でのx軸方向の格子幅、 f_s^i は表面張力、 D_{ii} はひずみ速度テンソル、 β_{ii} は減衰係数である.

一方,地盤には,土粒子の変位 u の形状関数を4節点から8節点のアイソパラメトリック要素に変えた著者 ら(2006)による u – p 形式の Biot の式に基づく手法を適用した.本研究では,桑原・大槇(1992)を参考に 護岸の空隙率 m, せん断弾性係数 G, Poisson 比 v を設定することにより地盤とともにその挙動を解析した. 4. 結果及び考察:写真-1 に例示するように,作用波による土砂吸い出しと吸い出しに伴う埋立海浜の陥没

キーワード 土砂吸い出し機構,重力式護岸,埋立土砂,水理模型実験,数値計算,地盤の波浪応答 連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4630 を再現できた.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吸い出し (Cave)、陥没まで到る大規模な吸い出し(Cave-in)に分類した.図-2に水理実験による土砂吸い出しの発生 条件を示す.ここで、Lは入射波の波長、 $Ur = H_i L^2 / h^3$ はアーセル数である.同図より、 d_{50} / d の影響はほ とんど受けないものの、 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 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

水位 η と水圧 p_e に関する実験値と計算値の比較を図-3 に示す. 同図 の〇印は実験値,実線は VOF 法に基づく波動場の計算値,点線は Biot の式に基づく地盤の計算値を表す. 同図より, VOF 法による p_e は実験 値との差が大きいが, Biot の式による p_e は実験値を若干過小評価して いるものの,護岸に作用した砕波圧型の波形を比較的良く再現できてい ることが確認できる.また, η に関しては実験値を極めて良く再現でき ていることから,以下では本計算手法により吸い出し機構を考究する.

ここでは、土砂吸い出しに影響を及ぼすと考えられる護岸の下部にある土砂の最も沖側に生じる体積ひずみ ε_v (膨張を正とする)とそのすぐ沖側に生じる沖向き流速 v_{off} に着目した.その結果、図示はしないが、

4.0 1.0 2.03.0 5.0 t/T(a) 水位変動 n Pressure Gauge 1 0.0 -0.2 -8:4 Pressure Gauge 0.2 0.0 $g H_i$ -0.2 -8:4 $\sigma_{_{\mathscr{Y}}}$ 0.2 p_e 0.0 -0.2 -8:4 Pressure Gauge 4 02 0.00 -0.2Exp. -0.4 i 0.0 1.0 3.0 4.0 5.0 2.0 t / T(b) 水圧変動 p。 図-3 実験値と計算値の比較

Wave Gauge 1

 v_{off} は1周期に2つの極大値を持ち,各極大値は $\varepsilon_v > 0$ (膨張)と $\varepsilon_v < 0$ (収縮)の位相にそれぞれ現れることが分かった.一例として, $\varepsilon_v > 0$ 時に v_{off} が極大となる位相の流速分布を図-4に示す.以上を踏まえて,図-5に ε_v の最大値 ε_v^{max} と地盤膨張時の v_{off} の極大値 v_{off}^{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 $v_{off}^{max}/\sqrt{gh} \ge \varepsilon_v^{max}$ が増加する傾向が認められ,加えて $H_i/L > 0.025$ では特に大きな ε_v^{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こりやすくなったと推測される.

5. 結論:本論では水理実験と数値計算により重力式護岸下部からの土砂吸い出しを検討し,護岸下の土砂内部に生じる体積ひずみとその沖側に生じる沖向き流速により土砂吸い出しを評価できることを明らかにした.

参考文献: [1] 岩崎ら (1995), 海工, 42, pp. 1026-1030. [2] 功刀 (1997), 機論 B, 63, 609, pp. 1576-1584. [3] 桑原・大槇 (1992), 海工, 39, pp. 861-865. [4] 高橋ら (1996), 港研報告, 35, 2, pp. 3-63. [5] 中 村ら (2006), 土論 B, 62, 1, pp. 150-162. [6] 前野ら (2002), 海工, 49, pp. 876-880. [7] 野口ら (2000), 海工, 47, pp. 756-760. [8] 山元ら (1994), 海工, 41, pp. 906-910.

