

波動場・地盤連成数値計算手法に基づく埋立土砂の 吸い出し機構に関する研究

中村友昭*・許 東秀**・水谷法美***

本研究では, 捨石護岸の背後に設置した埋立土砂が海域へ流出する吸い出し現象を取り扱い, 新たに開発した波動場と地盤に対する数値計算手法により直立型捨石護岸背後からの埋立土砂の吸い出し機構を考究した。その結果, 埋立海浜の前面に生じる捨石護岸内部の流速の鉛直方向成分が限界値に達し, さらに捨石護岸近傍の静水面付近にある埋立土砂内部に生じる体積ひずみが増加することにより埋立土砂の吸い出しが生じることを明らかにした。加えて, 波動場と地盤に対する新たな数値計算手法の妥当性や吸い出し防止工法としてのフィルター工法の有効性を確認した。

1. 緒 言

近年, 余暇時間の増加に伴ってマリンスポーツに供する人工海浜の建設が注目を集めている。しかし, 兵庫県明石市の大蔵海岸を始めとする一部の人工海浜において, 護岸背後に設置した埋立土砂が海域へ流出する吸い出し現象が生じ, 海浜の利用に著しい支障をきたしている。高橋ら (1996) はケーソン型防波護岸を対象に広範な水理模型実験を行い吸い出し災害のメカニズムを検討しており, 前野・藤田 (2001) は VOF 法と有限要素法を連携させた VOF-FEM モデルにより矢板式海岸護岸周辺の土砂流出過程の解明を行っている。

また, 許ら (2004) は傾斜型と直立型の捨石護岸を対象に水理模型実験と数値計算を行い, アーセル数や護岸幅が土砂吸い出しに及ぼす影響や埋立海浜の内部に生じる冲向き流速の影響を確認している。ただし, 捨石や埋立土砂の平均粒径の影響や吸い出し防止工法の有効性に対する検討が十分に行われているとは言えず, 加えて土砂吸い出しへの寄与が推測される埋立海浜内部の応力状態やひずみ状態の影響も確認していない。

そこで本研究では, まず非圧縮性気液二相流を解析可能な VOF 法に基づく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-土連成解析に基づく地盤の数値計算手法を開発し, 水理模型実験との比較よりその妥当性を検証する。その後, 形状の単純な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埋立土砂の吸い出し機構を明らかにする。最後に, 埋立土砂の吸い出し防止工法の一つであるフィルター工法を対象に, その有効性を検討する。

2. 数値計算手法

ここでは, まず波動場と地盤の数値計算手法をそれぞれ述べ, 最後に波動場と地盤の接続方法の詳細を説明する。なお, 将来性を考慮して波動場の数値計算手法については三次元的な現象も取り扱えるように開発を行ったが, 本研究では鉛直二次元の現象のみを対象とした。

(1) 波動場の数値計算手法

本研究では, 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も解析対象に含めた次に示す連続式, 運動方程式, VOF 関数 F の移流方程式を採用した。

$$\frac{\partial (mv_j)}{\partial x_j} = q^*, \quad q^* = \frac{q(y, z; t)}{\Delta x_s} \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{aligned} & \left(1 + C_A \frac{1-m}{m} \right) \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{\langle \rho \rangle} \frac{\partial p}{\partial x_i} - g_i + \langle \nu \rangle \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \dots \dots \dots (2) \\ & -R_i^l - R_i^f + \frac{\langle \nu \rangle}{3m} \frac{\partial q^*}{\partial x_i} - \beta_{ij} v_j \end{aligned}$$

$$\frac{\partial (mF)}{\partial t} + \frac{\partial (mv_j F)}{\partial x_j} = Fq^* \dots \dots \dots (3)$$

ここで, v_i は実流速, p は圧力, t は時間, g_i は重力加速度ベクトル, $\langle \rho \rangle$ 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_i^l, R_i^f はそれぞれ線形, 非線形抵抗, $q(y, z; t)$ は 5 次精度 Stokes 理論に基づく造波位置 ($x = x_s$) でのわき出し強さ, Δx_s は造波位置における x 軸方向の格子幅, β_{ij} は減衰係数行列であり, $\langle \rho \rangle, \langle \nu \rangle, R_i^l, R_i^f, g_i, \beta_{ij}$ はそれぞれ

$$\langle \rho \rangle = F\rho_w + (1-F)\rho_a \dots \dots \dots (4)$$

$$\langle \nu \rangle = F\nu_w + (1-F)\nu_a \dots \dots \dots (5)$$

* 学生会員 修(工) 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
** 正 会 員 博(工) 韓国慶尚大学校海洋科学大学助教授 海洋土木工学科
*** 正 会 員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻

$$R_2^i = \frac{12C_{D2}\langle\nu\rangle(1-m)}{md_m^2}v_i \dots\dots\dots(6)$$

$$R_1^i = \frac{C_{D1}(1-m)}{2md_m}v_i\sqrt{v_jv_j} \dots\dots\dots(7)$$

$$g_i = [0 \quad 0 \quad g]^T \dots\dots\dots(8)$$

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

と表される。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、 C_{D2} 、 C_{D1} はそれぞれ線形、非線形抵抗力係数、 d_m は平均粒径、 g は重力加速度、 β は付加減衰領域でのみ正の値を持つ減衰係数である。

ここでは、SMAC 法により時間発展計算を行い、その過程で現れる圧力方程式の解法には MICCG 法を採用した。また、運動方程式 (2) の時間発展項は 3 次精度 Adams-Bashforth 法、移流項は 3 次精度風上差分 (UTOPIA スキーム)、残りの項は中央差分を用いて離散化した。一方、移流方程式 (3) の時間発展項には前進差分、移流項には Donor-Acceptor 法を適用して離散化を行った。

(2) 地盤の数値計算手法

蒋ら (2000) は波動場に VOF 法、地盤に u - w 形式の Biot の式を適用した VOF-FEM モデルの開発を行っているが、高橋ら (2002) は上述の手法は数値計算上不安定になる可能性があることを指摘している。そこで、彼らは u - w 形式から水の相対加速度を無視した u - p 形式に変更することで、波・地盤・構造物の相互作用を解析できる CADMAS GEO-SURF を完成させている。

そこで本研究では、高橋ら (2002) に倣って、水の相対加速度を無視した u - p 形式の Biot の式を採用した。

$$\rho\ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}' - \nabla p_e \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \frac{m}{K_w} \dot{p}_e + \nabla \cdot \left\{ \frac{k}{\rho_w g} (-\nabla p_e - \rho_w \ddot{\mathbf{u}}) \right\} = 0 \dots\dots(11)$$

ここで、 $\rho = (1-m)\rho_s + m\rho_w$ は土の密度、 ρ_s は土粒子の密度、 ρ_w は水の密度、 m は空隙率、 $\mathbf{u}$ は土粒子の変位、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力 (ただし引張を正とする)、 p_e は過剰間隙水圧、 ε_v は体積ひずみ (ただし膨張を正とする)、 K_w は水の体積弾性係数、 k は透水係数、 g は重力加速度であり、上付きの $\cdot$ は物質時間微分を表す。また、圧力変動や流速変動に対する地盤の変位が小さく非線形性も小さいと考えられるので (関瀬ら, 1991)、構成則として地盤が線形弾性体で等方性を有すると仮定した Hooke 則

$$\sigma'_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \dots\dots\dots(12)$$

を採用した。ここで、 λ 、 μ は Lamé の定数、 ε_{ij} はひずみ、 δ_{ij} は Kronecker のデルタであり、弾性係数を E 、せん断弾性係数を G 、Poisson 比を ν とすると、 λ と μ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \dots\dots\dots(13)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} = G \dots\dots\dots(14)$$

以上の支配方程式を二次元四辺形アイソパラメトリック要素と Galerkin 近似に基づく有限要素法を用いて解いた。また、高橋ら (2002) に倣って土粒子の変位 $\mathbf{u}$ と過剰間隙水圧 p_e に対してそれぞれ Newmark の β 法と Crank-Nicolson 法を適用し、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用いた。

(3) 波動場と地盤の接続方法

本数値計算手法では、Mizutani ら (1998) と同様の手法を用いて波動場と地盤の接続計算を行った。すなわち、まず地盤を含む解析領域全体に対して VOF 法に基づく波動場の数値計算手法を適用した後、求めた圧力と流速から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対して Biot の式に基づく有限要素法を適用することで地盤の波浪応答を解析した。ただし、波の作用に伴う地盤の変位が十分に小さいと考え、前野・藤田 (2001) に倣って地盤から波動場へのフィードバックは行わなかった。

3. 結果および考察

本章では、まず倉光ら (2005) による水理模型実験との比較により前述の数値計算手法の妥当性を検証する。次いで、水理模型実験で埋立海浜に陥没が生じたケースを例に数値計算を用いて土砂吸い出しメカニズムを明らかにし、最後に埋立土砂の吸い出し限界と吸い出し防止工法に対する検討を行う。

(1) 数値計算手法の妥当性の検証

直立型捨石護岸周辺の水位や水圧の計測を行った実験との比較により新たに提案した数値計算手法の妥当性を検証する。図-1 に実験装置の概略図と計測装置 (P 1 ~ P10: 間隙水圧計; G 1 ~ G 9: 水位計および地下水位計) の設置位置を示す。実験装置や実験方法の詳細は倉光ら (2005) を参照されたい。

図-2 に本節で用いた数値波動水路の概略図を示す。 x 、 y 、 z 軸方向の格子幅をそれぞれ 2.0 cm、1.0 cm、0.5 cm、重力加速度を 9.81 m/s²、水と空気の密度をそれぞれ 997.04 kg/m³、1.184 kg/m³、水と空気の動粘性係数

をそれぞれ $0.893 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $15.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 捨石と埋立土砂の平均粒径をそれぞれ 30 mm, 0.45 mm, 捨石と埋立土砂の空隙率をそれぞれ 0.36, 0.40, 付加質量係数を 0.15, 非線形抵抗力係数を 0.5, 捨石と埋立土砂の線形抵抗力係数をそれぞれ 100.0, 0.1 とした. また, Biot の式に基づく有限要素法を適用した埋立海浜の諸元に関して, 土粒子の密度を 2650 kg/m^3 , せん断弾性係数を $1.0 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, 水の体積弾性係数を $1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, Poisson 比を 0.33 とし, 次に示す Kozeny-Carman の式 (Bear, 1972) を用いて透水係数を $2.20 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ とした.

$$k = \frac{1}{180} \frac{m^3}{(1-m)^2} \frac{gd_m^2}{\nu_w} \dots\dots\dots (15)$$

ただし, 地盤の数値計算手法では, 波動場の数値計算手法から求めた自由表面の位置は考慮せず, 埋立海浜全体が飽和状態であると仮定して計算を行った.

捨石護岸と埋立海浜の内部に生じる圧力変動 p_e と水位変動 η に関して, 実験値 (○印) と計算値 (実線):

VOF 法に基づく波動場の数値計算手法; 破線: Biot の式に基づく地盤の数値計算手法) の比較をそれぞれ図-3, 図-4 に示す. ここで, $Ur = H_i L^2 / h^3$ はアーセル数, H_i は入射波高, L は入射波の波長, h は静水深, B は捨石護岸の幅, D_{50} は捨石の平均粒径, d_{50} は埋立土砂の平均粒径である. 同図より, 位相に若干のずれが認められるが, 振幅の大きさはほぼ一致していることが分かる. すなわち, 捨石護岸の内部 (P 2 ~ P 4; G 4, G 5) では実験値よりも計算値の方が伝播が速く, 加えて水位変動 η

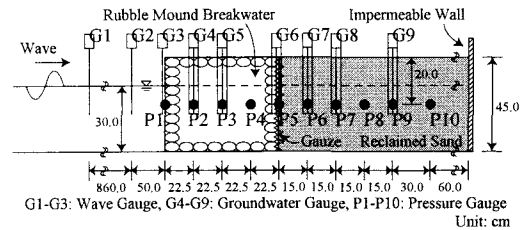


図-1 実験装置の概略図と計測装置の設置位置 (倉光ら, 2005)

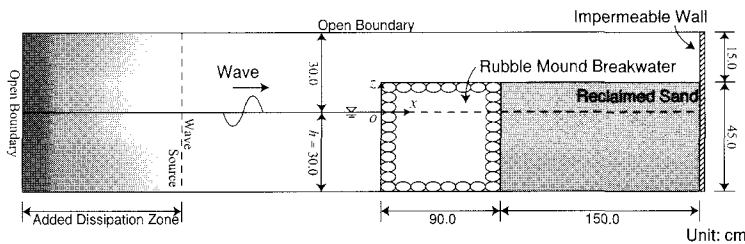
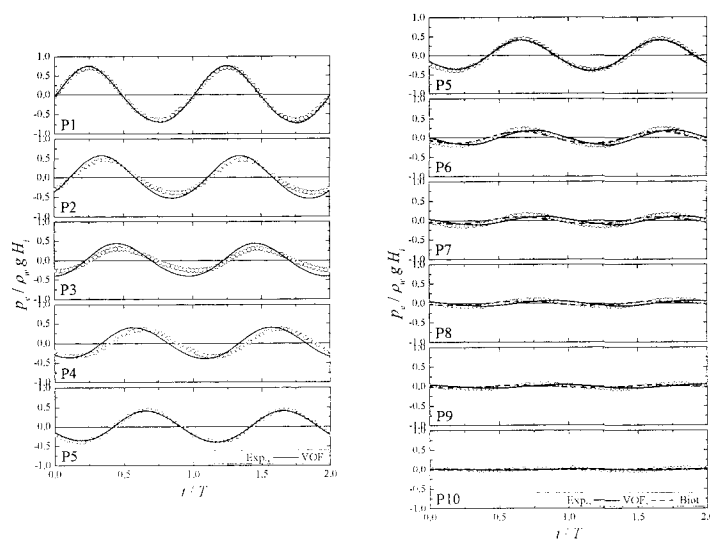


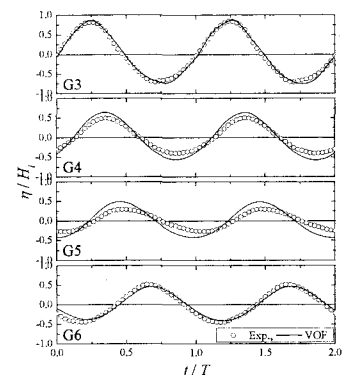
図-2 数値計算手法の再現性の検証で用いた数値波動水路の概略図



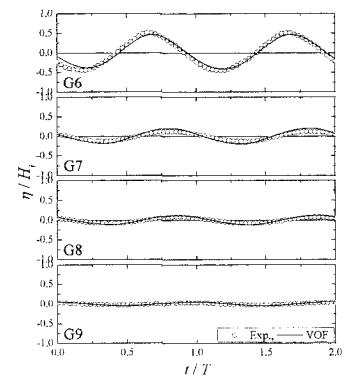
(a) 捨石護岸内部

(b) 埋立海浜内部

図-3 圧力変動 p_e の比較 ($Ur=4.6$, $B/L=0.332$, $d_{50}/D_{50}=0.015$)



(a) 捨石護岸内部



(b) 埋立海浜内部

図-4 水位変動 η の比較 ($Ur=4.6$, $B/L=0.332$, $d_{50}/D_{50}=0.015$)

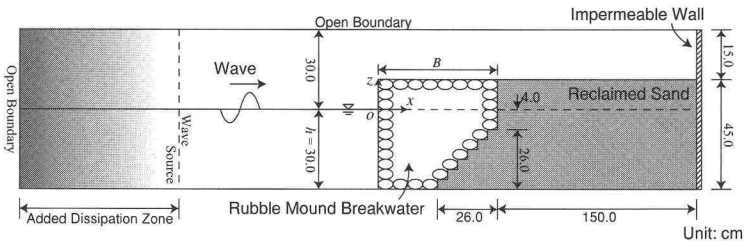


図-5 土砂吸い出しメカニズムの検討で用いた数値波動水路の概略図

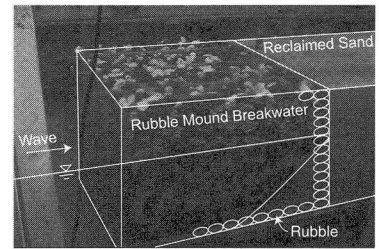


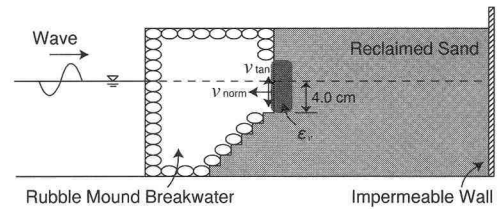
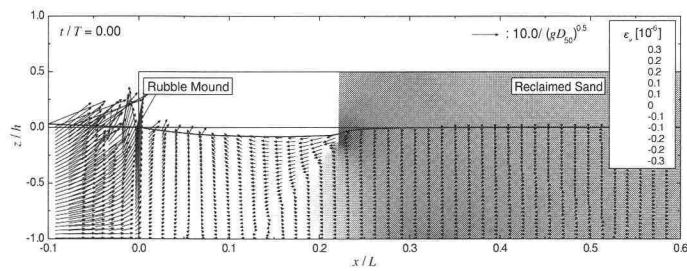
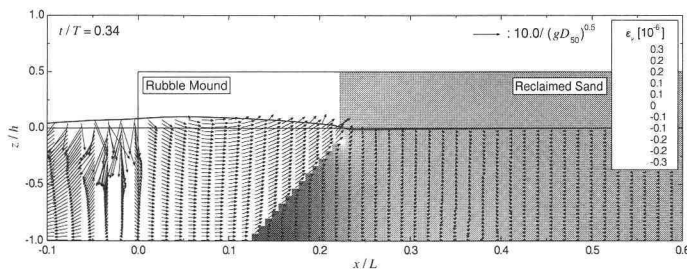
写真-1 造波開始前の直立型捨石護岸と埋立海浜（倉光ら，2005）

の計算値は実験値を若干過大評価しているが、捨石護岸と埋立海浜の境界（P 5；G 6）では計算値と実験値は極めてよく一致している。さらに、埋立海浜内部（P 6～P10；G 7～G 9）では実験値、VOF 法による計算値、Biot の式に基づく計算値の位相にわずかな差異が認められるが、振幅の大きさは非常によく一致していることから、地盤内部に自由表面を有する場合でも、捨石護岸と埋立海浜の内部の波動場を精度良く解析できることが確認できた。

（2）埋立土砂の吸い出しのメカニズム

図-5 に埋立土砂の吸い出し機構の検討で用いた数値波動水路の概略図を示す。基本的には前節の数値波動水路と同様であるが、写真-1に示すように水理模型実験において造波開始前から捨石護岸の内部に埋立土砂が入り込む現象が確認されたことから（倉光ら，2005）、捨石護岸の一部を捨石から埋立土砂に置換することにより捨石護岸内部の埋立土砂のモデル化を行った。

ここでは、埋立海浜近傍の捨石護岸内部に生じる流量流速に焦点を当て、図-6に示す埋立海浜前面に対して法線方向の流量流速 v_{norm} と接線方向の流量流速 v_{tan} に着目した。ただし、 v_{norm} については冲向き方向のみを対象とし、 v_{tan} については上向きと下向き方向の区別をなかった。一方、応力場に関しては、埋立土砂が吸い出しにより動き始める捨石護岸近傍の静水面付近の埋立海浜内部（濃灰色；図-6）に生じる体積ひずみ ε_v を取り上げた。

図-6 v_{norm} 、 v_{tan} の定義と ε_v の対象範囲(a) 法線方向の流量流速 v_{norm} が最大となる位相 ($t/T=0.0$)(b) 接線方向の流量流速 v_{tan} が最大となる位相 ($t/T=0.34$)図-7 流量流速と体積ひずみ ε_v の分布（土砂吸い出しあり； $Ur=12.5$ ， $B/L=0.221$ ， $d_{50}/D_{50}=0.015$ ）

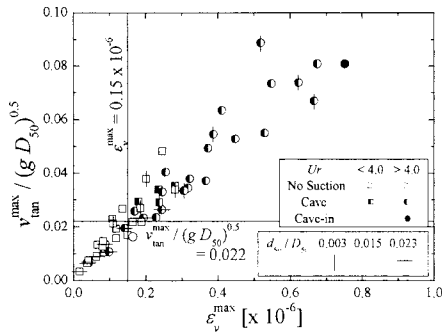


図-8 土砂吸い出しに及ぼす v_{tan}^{max} と ϵ_v^{max} の影響

図-7に水理模型実験で埋立海浜に陥没が生じたケースの流量流速と体積ひずみ ϵ_v の分布を示す。法線方向の流量流速 v_{norm} が最大となる位相 $t/T=0.0$ を示した図-7(a)より、 v_{norm} の増加に伴い土砂吸い出しが生じやすくなると推測されるが、埋立海浜内部に負の ϵ_v (収縮) が生じていることから土砂吸い出しはあまり生じないと考えられる。一方、接線方向の流量流速 v_{tan} が最大となる位相 $t/T=0.34$ を示した図-7(b)より、 v_{tan} の発生に伴い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 ϵ_v が増加 (膨張) していることから、埋立土砂の吸い出しが生じやすい状態になっていると言える。

以上より、波の作用に伴い埋立海浜前面に鉛直方向の流速が生じ、加えて静水面付近の埋立土砂に膨張が生じることによって埋立土砂が動き始め、最終的に埋立土砂の吸い出しに到ると考えられる。

(3) 埋立土砂の吸い出し限界

前節で土砂吸い出しに及ぼす v_{tan} と ϵ_v の影響を確認できたことから、これらの物理量の最大値 v_{tan}^{max} 、 ϵ_v^{max} が土砂吸い出しに与える影響を図-8に示す。ここで、No Suction は水理模型実験で土砂吸い出しが生じなかったケース、Cave と Cave-in は埋立海浜にそれぞれ空洞と陥没が生じたケースを表す。同図より、 v_{tan}^{max} または ϵ_v^{max} の増加に伴い土砂吸い出しが生じ、本研究の範囲では $v_{tan}^{max}/\sqrt{gD_{50}} > 0.022$ かつ $\epsilon_v^{max} > 0.15 \times 10^{-6}$ を満たす条件で埋立土砂が吸い出されることが分かる。また、 $v_{tan}^{max}/\sqrt{gD_{50}}$ が等しい条件であったとしても、アーセル数 Ur が 4.0 を下回る場合と比較して $Ur > 4.0$ の場合の方が ϵ_v^{max} が大きく、そのために土砂吸い出しが生じやすくなったと思われる。

加えて、埋立土砂と捨石の平均粒径の比 d_{50}/D_{50} の増加に伴い v_{tan}^{max} と ϵ_v^{max} がともに減少する傾向が図-8から認められる。ところで、吸い出し防止工法の一つのフィルター工法は隣接する材料の平均粒径の差を小さくするこ

とで埋立土砂の沖への流出を防いでいるが、上述した平均粒径差の減少は d_{50}/D_{50} の増加を意味していることから、フィルター層の設置により v_{tan}^{max} と ϵ_v^{max} を減少させることができ、結果として土砂吸い出しを生じにくくさせることができると推測される。したがって、フィルター工法は捨石護岸内部の流速場や埋立海浜内部のひずみ場の観点からも有効であると考えられる。

4. 結 論

本研究では、新たに波動場と地盤に対する数値計算手法を開発し、水理模型実験との比較よりその妥当性を確認した。そして、直立型捨石護岸背後の埋立土砂の吸い出し現象に適用することで埋立土砂の吸い出し機構を考究した。その結果、埋立海浜の前面に生じる捨石護岸内部の流速の鉛直方向成分が限界値に達し、さらに捨石護岸近傍の静水面付近にある埋立土砂内部に生じる体積ひずみが増加することで埋立土砂の吸い出しが生じることを明らかにした。加えて、吸い出し防止工法としてのフィルター工法の有効性を確認した。

最後に、本研究を進めるにあたり、本研究に対する貴重なご意見を頂いた中部大学工学部 岩田好一郎教授に深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 倉光泰樹・中村友昭・許 東秀・水谷法美・岩田好一郎 (2005) : 捨石堤背後の土砂吸い出しと捨石堤背後の水位変動に関する考察, 土木学会中部支部, II-36, pp. 189-190.
- 蔭 勤・高橋重雄・村西佳美・磯部雅彦 (2000) : 波・地盤・構造物の相互作用に関する VOF-FEM 予測モデルの開発, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 51-55.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・徳淵克正・岡村知光・下迫健一郎・善功 企・山崎浩之 (1996) : 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港研報告, 第35巻, 第2号, pp. 3-63.
- 高橋重雄・鈴木高二朗・村西佳美・磯部雅彦 (2002) : 波・地盤・構造物の相互作用に関する V- π 形式 VOF-FEM (CADMAS GEO-SURF) の開発, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 881-885.
- 許 東秀・中村友昭・岩田好一郎 (2004) : 捨石護岸背後の埋立土砂吸い出し機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 791-795.
- 前野詩朗・藤田修司 (2001) : VOF-FEM モデルによる波動場における護岸周辺地盤の動的挙動の検討, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 971-975.
- 間瀬肇・川迫都夫・酒井哲郎 (1991) : 混成堤基礎地盤の波浪応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 821-825.
- Bear, J. (1972) : Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier, 764 p.
- Golshani, A. (2002) : Three dimensional study of porous flow induced by nonlinear interaction between waves and permeable structures, Doctoral thesis, Nagoya University, 144 p.
- Mizutani, N., A. M. Mostafa and K. Iwata (1998) : Nonlinear regular wave, submerged breakwater and seabed dynamic interaction, Coastal Eng., Elsevier, Vol. 33, pp. 177-202.