

捨石護岸背後の埋立土砂吸い出し機構に関する研究

許 東 秀*・中村友昭**・岩田好一朗***

近年, 人工海浜土砂の吸い出し現象が注目を集めている。本研究では, 従来あまり検討されていない捨石護岸を取り扱い, 水理模型実験と数値計算により, 埋立土砂吸い出し現象や吸い出し機構を捨石護岸および埋立土砂内部の流速場と関連づけて考察した。その結果, 土砂吸い出しは背後土砂内に生じる沖向き流速の影響を強く受け, ある限界流速に達すると土砂吸い出しが生じやすくなり, 最終的に埋立土砂のくぼみや陥没の発生に到ることを明らかにした。加えて, 現地と類似した埋立海浜のくぼみや陥没を水理実験で再現できたこと, アーセル数は土砂吸い出しに大きな影響を及ぼすこと, 線形・非線形抵抗を考慮した数値計算手法の妥当性などが判明した。

1. 緒 言

海岸性リクリエーションへの関心が高まるに伴い, 様々な機能を備えた海浜空間の整備が求められている。こうした声に応える一施策として, 人工海浜の建設が注目を集めているが, 一部の人工海浜では, 緩傾斜護岸や突堤から海域へ堤体背後埋立土砂が吸い出され, 海浜利用の観点で著しい支障をきたしている。不幸にも, 2001 年 12 月には, 兵庫県明石市の大蔵海岸で人身事故まで発生する事態となった(土木学会海岸工学委員会, 2002)ことは記憶に新しい。

このような土砂吸い出しに伴う海浜のくぼみや陥没の発生機構については十分に検討されておらず, 事故防止の観点からも吸い出し発生のメカニズムの早急な解明が不可欠である。これを受け, 現在までにケーソン型防波護岸を対象とした研究が行われ(例えば高橋ら, 1996; 重村ら, 2002), 背後土砂吸い出し機構や対策工法などに検討が加えられている。しかし, 捨石護岸を取り扱った研究は極めて少なく(例えば著者ら, 2003), 未解明の問題が数多く残されている。

本研究では, 従来あまり検討されていない捨石護岸を取り扱い, 水理模型実験と数値計算により, 埋立土砂の吸い出し現象や吸い出し機構を捨石護岸および埋立土砂内部の流速場と関連づけて考究する。

2. 水理模型実験

名古屋大学大学院工学研究科に設置されている長さ 30 m, 幅 0.7 m, 高さ 0.9 m の二次元鋼製造波水路内に, 後述する捨石護岸および埋立海浜を設置して水理模型実験を行った(図-1 参照)。捨石護岸は傾斜型と直立型の 2 種類とし, それぞれ以下の方法で実験を行った。なお, 直立型捨石護岸の実験は, 護岸幅が背後土砂吸い出しに

及ぼす影響を確認し, 数値計算と比較するために行った。

(1) 傾斜型捨石護岸

図-1(a) に示すように, 平均粒径 $D_m=20$ mm の捨石で構成された傾斜型捨石護岸(天端幅 25 cm, 高さ 45 cm, 法面勾配 1/2)の背後に平均粒径 $d_m=0.1$ mm の珪砂からなる埋立海浜を設置した。入射波は規則波とし, 入射波高 H_i , 入射波周期 T , 静水深 h と埋立海浜高さ h_r をそれぞれ 8 種類 (1.8 cm~10.4 cm), 8 種類 (0.7 s~1.7 s), 2 種類 (30 cm, 35 cm), 2 種類 (40 cm, 45 cm) ずつ変化させ, 計 28 ケースの実験を行った。また, 電気容量式水位計 5 台と地下水位計 3 台を図-1(a) に示す位置に設置し, 護岸周辺の水位変動特性を調べた。各実験ケースで波作用時間は 60 分とし, 吸い出し状況を調べるためのビデオ撮影を行った。

捨石護岸および埋立海浜の模型を次の手順で設置した。まず捨石護岸を設置し, 水深が約 20 cm になるまで水路内に水を注いだ。その後珪砂を投入して埋立海浜を形作り, 最後に所定の静水深 h まで再び注水した。そのため, 写真-1 に示すように造波開始前から捨石護岸内の一部に埋立土砂が入り込んだ。ただし, 現地での捨石護岸の施工においても同様の現象が起これと考えられるので, この状態を本実験の初期状態とした。

(2) 直立型捨石護岸

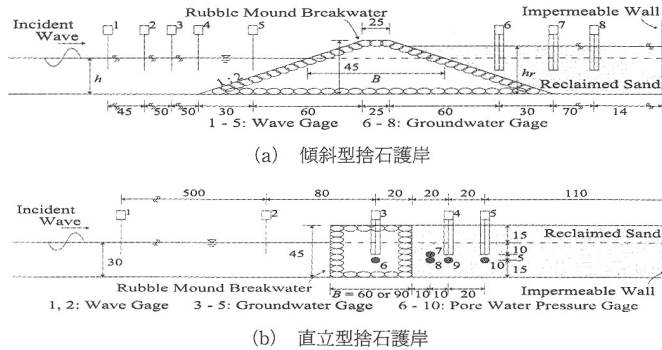
図-1(b) に示すように, 平均粒径 $D_m=30$ mm の捨石で構成した直立型捨石護岸(幅 60 cm または 90 cm, 高さ 45 cm)の背後に平均粒径 $d_m=0.45$ mm の珪砂からなる埋立海浜を設置した。入射波は規則波とし, 入射波高 H_i , 入射波周期 T と静水深での護岸幅 B をそれぞれ 2 種類 (2.0 cm, 5.0 cm), 5 種類 (0.9 s~1.7 s), 2 種類 (60 cm, 90 cm) ずつ変化させ, 計 16 ケースの実験を行った。静水深 h と埋立海浜高さ h_r をそれぞれ 30 cm, 45 cm で一定とした。

実験は 2 段階に分けて行った。はじめに, 捨石護岸と埋立海浜の間に目の細かい金網を設置して埋立土砂の動きを止めた実験を行った。この実験では, 図-1(b) に示すように電気容量式水位計 2 台, 地下水位計 3 台および

* 正 会 員 工博 韓国慶尚大学校海洋科学大学助教授 海洋土木工学科

** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** フェロー 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



図—1 捨石護岸模型の概略図と計測装置の設置位置 (単位: cm)

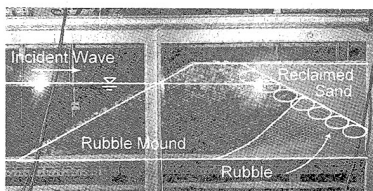
間隙水圧計 5 台を設置して、護岸周辺の水位変動と間隙水圧変動を計測した。次に、土砂吸い出し機構を考案するため、上述の目の細かい金網を取り除いた実験を行った。なお、各ケースで波作用時間は 30 分とし、土砂の吸い出し状況を調べるためにビデオ撮影を行った。なお、この実験でも、前述した傾斜型捨石護岸と同様に、造波開始前の捨石護岸内への土砂侵入が認められたので、この状態を本実験の初期状態とした。

3. 数値解析

ここでは、Hur・Mizutani (2003) のポラスボディモデルに基づく VOF 法の運動方程式に線形抵抗力項を付け加え、捨石護岸および背後土砂内の層流抵抗も考慮できるようにした手法を用いる。鈴木ら (2003) は Dupuit-Forchheimer 式をもとに抵抗力項を修正した運動方程式を用いて妥当性を確認しているが、線形項および非線形項の係数値に曖昧さが残っているのも事実である。そこで本論では、非線形抵抗力項はポラスボディモデルによるものをそのまま用い、その上に Darcy 則に基づく線形抵抗力項 (地下水入門編集委員会編, 1983) を付加する。すなわち、VOF 関数 F の移流方程式、連続式および運動方程式を示すと、それぞれ次式ようになる。

$$\frac{\partial(\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial(\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w F)}{\partial z} = F q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\gamma_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z w)}{\partial z} = q^* \quad (2)$$



写真—1 造波開始前の傾斜型捨石護岸と埋立海浜

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_x - R_x - \gamma_v \frac{g}{k} \gamma_x u \\ &+ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\gamma_x \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{zx})}{\partial z} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \gamma_v \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_x u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_z w \frac{\partial w}{\partial z} \\ &= -\gamma_v \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_v g - M_z - R_z - \gamma_v \frac{g}{k} \gamma_z w \\ &+ \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(\gamma_x \tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\gamma_z \tau_{zz})}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、 u 、 w はそれぞれ x 、 z 軸方向の流速、 q^* は造波位置でのわき出し強さ、 t は時間、 g は重力加速度、 ρ は流体の密度、 ν は動粘性係数、 p は圧力、 β は付加減衰領域での減衰係数 (許, 2000)、 γ_v は体積空隙率、 γ_x 、 γ_z はそれぞれ x 、 z 軸方向の面積空隙率、 M_x 、 M_z はそれぞれ x 、 z 軸方向の慣性力、 R_x 、 R_z はそれぞれ x 、 z 軸方向の抗力、 k は透水係数である。本研究では、捨石および埋立土砂の空隙率をそれぞれ 0.40、0.44 に、慣性力係数および抗力係数をそれぞれ 1.5、0.5 に設定し、透水係数 k は次に示す Kozeny-Carman の式 (Bear, 1972) を用いて推定した。

$$k = \frac{1}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{g d_{50}^2}{\nu} \quad (5)$$

ただし、 n は空隙率、 d_{50} は平均粒径である。

本論では、 x 、 z 方向にそれぞれ $1.0 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ の等間隔格子を用い、上述の支配方程式をスタガードメッシュにより差分近似することで数値計算を行った。計算手法の詳細については参考文献 (例えば Hur・Mizutani, 2003; 許, 2000) を参照されたい。また、安定条件として移流項から生じる CFL 条件と次に示す拡散項から生じる拡散不安定条件を用いた。なお、 t は時間である。

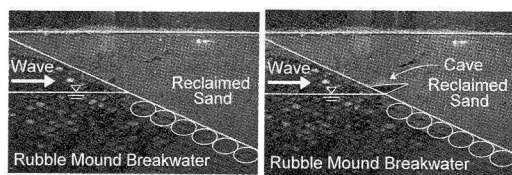
$$vt < \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1/\Delta x^2 + 1/\Delta z^2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

4. 結果および考察

本章では、はじめに水理模型実験の結果を示し、続いて数値解析による計算結果を示すとともに、捨石護岸および埋立土砂内の流速場が土砂吸い出しに与える影響について考察する。土砂吸い出し現象は波形勾配 H_i/L (0.007~0.073)、水深波長比 h/L (0.111~0.460)、静水深での護岸幅と波長の比 B/L (0.221~0.855)、埋立海浜高さと波長の比 h_r/L 、捨石の平均粒径と護岸幅の比 D_m/B 、平均粒径の比 d_m/D_m 、法面勾配 S などに支配されることが考えられるが、後述するようにアーセル数 $Ur = H_i L^2 / h^3$ (0.5~19.9) の方が土砂吸い出しへの効果がより明確に表れていることから、 H_i/L に代えて Ur を主に用いることにする。以降、これらの無次元数の中から、特に支配的であると考えられる h/L 、 B/L および Ur に対して考察を行う。

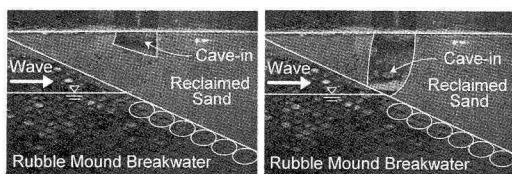
(1) 埋立土砂の陥没過程と土砂吸い出し状況の分類

現地の人工海浜で確認された部分的なくぼみや陥没を、傾斜型捨石護岸に対する水理模型実験で再現することができた。すなわち、写真-2 に例示するように、埋立土砂前面の水面変動範囲にのみ土砂吸い出しによる空洞ができ(写真-2(b))、その後空洞上の土砂の自重により空洞が崩壊して埋立土砂表層にくぼみが生じ(写真-2(c))、さらに土砂吸い出しの進行により埋立土砂が崖状に陥没する(写真-2(d))ことを確認できた。以上の現象は、重村ら(2002)によるケーソン型防波護岸に対する実験でも明らかになっている。なお、傾斜型捨石護岸に対するすべての実験ケースで、造波開始30分以降の埋立土砂の形状変化は十分に小さかったので、前述したよ



(a) 造波開始前

(b) 造波開始12.5分後



(c) 造波開始15分後

(d) 造波開始30分後

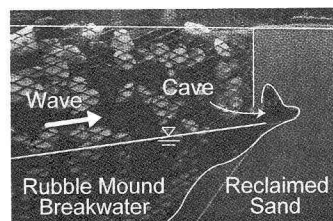
写真-2 傾斜型捨石護岸背後の埋立土砂の移動状況
($H_i/L=0.019$, $B/L=0.314$, $h/L=0.169$, $Ur=4.0$)

うに直立型捨石護岸の実験では波作用時間を30分とした。

次節以降の議論のために、観測された土砂吸い出しを、吸い出しなし(No Suction; パターン①)、写真-3(a)に例示するような空洞の形成に到る吸い出し(Cave; パターン②)、写真-3(b)のような陥没に到るほど大規模な吸い出し(Cave-in; パターン③)の3パターンに分類する。写真-3(b)は比較的規模の大きな土砂吸い出しにより陥没が生じたケースの一例であるが、捨石や土砂の設置の偏りなどの影響により、作用波の等しい条件下でも、場所によって埋立土砂のくぼみや陥没の発生状況が異なっており、写真-4に示す愛知県白谷人工海浜で確認されたくぼみ発生状況との類似が認められる。

(2) 土砂吸い出しの発生条件

静水深での護岸幅と波長の比 B/L 、水深波長比 h/L およびアーセル数 Ur は土砂吸い出しに大きな影響を与え、図-2に示すように、護岸法面が傾斜しているかどうかにかかわらず、 B/L や h/L が小さく Ur が大きい場合に土砂吸い出しが生じることが認められる。同図によ



(a) パターン②：直立型捨石護岸背後に生じた空洞
($H_i/L=0.021$, $B/L=0.256$, $h/L=0.128$, $Ur=10.2$)



(b) パターン③：傾斜型捨石護岸背後に生じた陥没
($H_i/L=0.019$, $B/L=0.314$, $h/L=0.169$, $Ur=4.0$)

写真-3 造波終了後の埋立土砂形状の一例

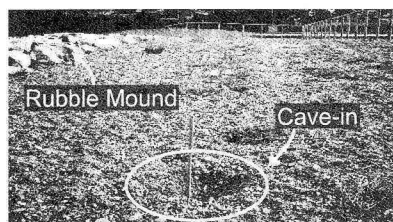
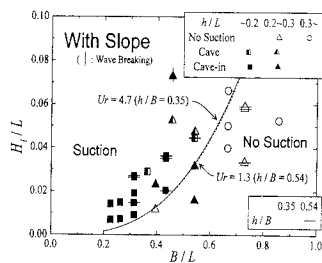
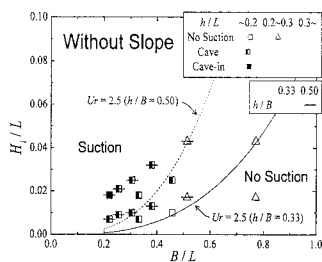


写真-4 白谷人工海浜で確認された護岸背後のくぼみ

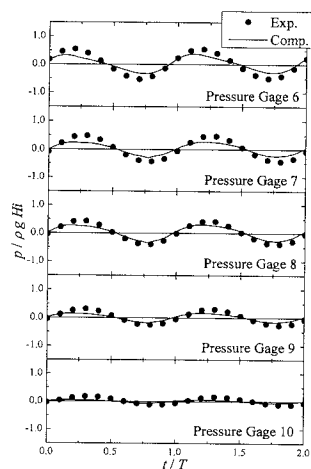
ば、本実験の範囲内では、傾斜型捨石護岸については $h/B=0.35$ の場合 $Ur > 4.7$ (図-2(a) 中の実線の左側), $h/B=0.54$ の場合 $Ur > 1.3$ (図-2(a) 中の点線の左側) を満たす条件で埋立土砂が吸い出されやすくなることが認められる。一方、直立型捨石護岸については h/B の大小に関わらず $Ur > 2.5$ (図-2(b) 中の実線または点線の左側) を満たす条件で土砂吸い出しが生じやすくなる。このように、傾斜型護岸の場合は土砂が吸い出されるか否かを区分する限界アーセル数が h/B によって異なる



(a) 傾斜型捨石護岸



(b) 直立型捨石護岸

図-2 土砂吸い出しに及ぼす B/L と H_i/L の関係図-3 直立型捨石護岸および背後土砂内の間隙水圧 ($H_i/L=0.018$, $B/L=0.221$, $h/L=0.111$, $Ur=13.6$)

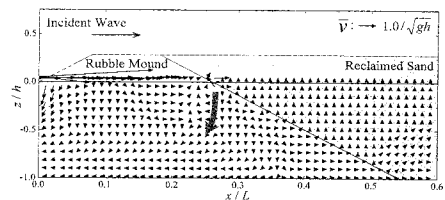
ことから、 Ur に加えて h/B の影響も考慮する必要があると認められる。この理由として、直立型護岸の場合は h と B が互いに独立な変数であるものの、傾斜型護岸の場合は h と B が反比例関係にあるために、 h/B の影響が直立型護岸と比較して土砂吸い出し現象により強く現れたためと考えられる。なお、図-2(a) に示す傾斜型護岸の場合に砕波が起こったケースがあったが、土砂吸い出しに及ぼす影響については確認できなかった。

(3) 数値計算の妥当性の検討

埋立土砂の動きを止めて行った実験での直立型捨石護岸および埋立土砂内の無次元間隙水圧 $p/\rho g H_i$ (p : 間隙水圧) の時間変化を図-3 に例示する。同図によれば、計算値は実験値を若干過小評価しているものの、伝播に伴う減衰や位相差をよく再現しており、この点で本論の数値解析モデルが妥当であると判断できる。以後、数値計算で得られた流速場を使って埋立土砂の吸い出し機構について考察する。

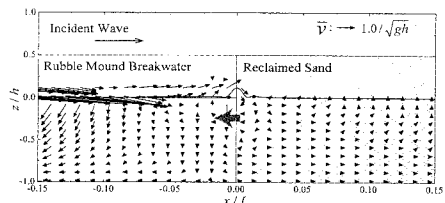
(4) 埋立土砂内の流速場が土砂吸い出しに及ぼす影響

土砂吸い出しが生じる場合の護岸周辺の平均流速場 $\bar{v}$ を図-4 に例示する。図-4(b) に示す直立型護岸の場合、埋立土砂前面付近に冲向き平均流が生じている。一方、図-4(a) に例示する傾斜型護岸の場合、前述のような埋立土砂内の冲向き平均流は生じていないものの、捨石護岸内に土砂を吸い出す向きの流れが生じていることが確認できる。ここでは、さらに図-4 のように埋立土砂前部の静水面付近に生じる冲向きの流れに着目して、土



(a) 傾斜型捨石護岸

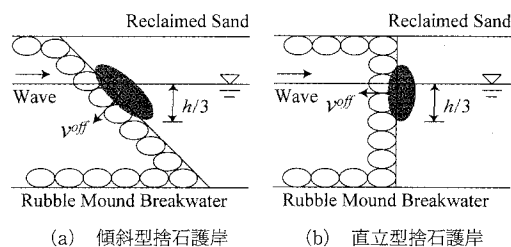
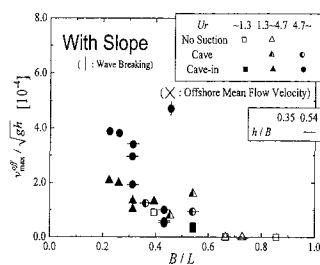
($H_i/L=0.007$, $B/L=0.261$, $h/L=0.141$, $Ur=2.6$)



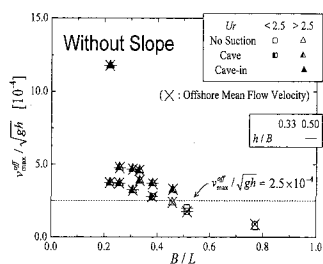
(b) 直立型捨石護岸

($H_i/L=0.018$, $B/L=0.221$, $h/L=0.111$, $Ur=13.6$)

図-4 背後土砂吸い出しが生じる場合の捨石護岸周辺の平均流速場 $\bar{v}$

図-5 流速 v^{off} の対象範囲と冲向き流速の定義

(a) 傾斜型捨石護岸



(b) 直立型捨石護岸

図-6 埋立土砂内の流速場が土砂吸い出しに及ぼす影響

砂吸い出しとの関連について以下考察する。そこで、図-5の濃灰色で示した $z > -h/3$ 範囲の流速を対象とし、傾斜型および直立型捨石護岸に対する冲向き流速 v^{off} をそれぞれ図-5(a)と図-5(b)のように定義する。

土砂吸い出しに及ぼす $z > -h/3$ の埋立土砂内の無次元最大冲向き流速 $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ ($v_{\text{max}}^{\text{off}}$: 最大冲向き流速)と平均流の向き (×印は冲向きを表す) の影響を図-6に示す。図-6(a)に示す傾斜型護岸の場合は冲向き平均流が生じていないが、冲向き流速がわずかでも生じると土砂吸い出しが起こりやすくなり、さらに $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ の増加とともに吸い出し規模も大きくなる傾向が認められる。一方、図-6(b)に示す直立型護岸の場合は $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ が 2.5×10^{-4} を上回ると土砂吸い出しが生じており、傾斜型護岸と同様に、 $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ が増大するに伴い土砂の吸い出し規模も大きくなっている。以上より、土砂が吸い出され始める限界無次元冲向き流速は護岸形状により異なるものの、無次元最大冲向き流速 $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ は土砂吸い出し

に大きな影響を及ぼすことが認められる。

また、前述したように水理実験から Ur が大きいと土砂吸い出しが生じやすくなる傾向を見出したが、数値計算で得られた図-6からも、 Ur が 4.7 (傾斜型護岸; $h/B=0.35$)、1.3 (傾斜型護岸; $h/B=0.54$) または 2.5 (直立型護岸) を上回ると、 Ur の増加とともに $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ も大きくなり、さらにそれに伴って埋立土砂が吸い出されやすくなる傾向を確認できる。このように、水理模型実験を通じて得られた土砂吸い出しに及ぼす Ur の効果を数値解析でも検証することができた。

5. 結 語

本研究では、水理模型実験と数値計算により、捨石護岸背後の埋立土砂吸い出し現象や吸い出し機構を護岸および土砂内部の流速場と関連づけて検討した。その結果、土砂吸い出しは背後土砂内部に生じる冲向き流速の影響を強く受け、傾斜型護岸の場合は冲向き流速が少しでも生じたときに、また直立型護岸の場合は $v_{\text{max}}^{\text{off}}/\sqrt{gh}$ が 2.5×10^{-4} に達したときに土砂吸い出しが生じやすくなることを明らかにした。加えて、(1) 現地の人工海浜で確認されたものと類似する部分的なくぼみや陥没を水理模型実験で再現できたこと、(2) 土砂吸い出しは静水深での護岸幅と波長の比、水深波長比およびアーセル数の影響を受けることがほぼ明らかとなり、本研究で用いた数値計算手法により捨石護岸背後の埋立土砂吸い出し機構を検討することができた。今後、精度向上のための数値計算手法の改良を行い、土砂吸い出し機構に対してさらなる検討を進めていきたい。

参 考 文 献

- 重村利幸・滝口和男・多田毅・林建二郎・藤間功司 (2002): 防波護岸背後からの土砂吸い出しに関する基礎的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 871-875.
- 鈴木高二朗・大岩菜々子・山本泰司 (2003): 防波堤基礎での洗掘量の推定について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 886-890.
- 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, 35巻, 2号, pp. 3-63.
- 地下水入門編集委員会編 (1983): 入門シリーズ 8 地下水入門, 土質工学会, 210 p.
- 土木学会海岸工学委員会 (2002): 大蔵海岸陥没事故調査報告書, 120 p.
- 許 東秀 (2000): 潜堤による多方向不規則波の碎波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大学学位論文, 177 p.
- 許 東秀・水谷法美・中村友昭・岩田好一朗 (2003): 捨石傾斜護岸背後の埋立土砂吸い出し機構に関する考察, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, II-320, pp. 639-640.
- Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier, 764 p.
- Hur, D.S., and N. Mizutani (2003): Numerical estimation of the wave forces acting on a three dimensional body on submerged breakwater, Coastal Eng., Vol. 47, pp. 329-345.