# 直立型捨石護岸の背後土砂吸い出し機構に関する基礎研究

名古屋大学大学院	学生会員	中村友昭
韓国慶尚大学校海洋科学大学	正会員	許 東秀
名古屋大学大学院	フェロー	岩田好一朗

### 1. 緒言

2001年12月に発生した大蔵海岸での事故以来,人工海浜に設置された護岸背後の埋立土砂吸い出しが注目 を集めている.これ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,1995),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が,捨石護岸を対象とした研究は極めて少ない(許ら, 2003).本研究では直立型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の流速場と関連づけて考究する.

#### 2.水理模型実験及び数値解析モデル

(a) 水理模型実験 長さ 30 m,幅 0.7 m,高さ 0.9 mの 2 次元鋼製造波水路内に,平均粒径 D<sub>m</sub> 30 mmの直立型捨石護岸と平均粒径 d<sub>m</sub> 0.45 mmの埋立土砂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,入射波高 H<sub>i</sub>,入射波周期 T および護岸幅 B をそれぞれ 2 種類,5 種類,2 種類ずつ変化させた.静水深 h は 30 cm で一定とした.実験は 2 段階に分けて行った.はじめに,捨石護岸と埋立土砂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,電気容量式水位計 2 台,地下水位計 3 台およ

び間隙水圧計5台を使って護岸周辺の 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究するた め,上述の目の細かい金網を取り除い た実験を行った.各ケースで波作用時 間は30分とし,吸い出し状況を克明 に調べるためにビデオ撮影を行った.





(b) 数値解析モデル 本論で用いる運動方程式は, Hur ら(2003)のポー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項を付け加えて捨石および土砂内の層流抵抗も考慮できるようにしたものである.す なわち,運動方程式,連続式および VOF 関数 F の移流方程式を示すと,それぞれ次式のようになる.

$$\begin{split} \gamma_{v} \frac{\partial u}{\partial t} + \gamma_{x} u \frac{\partial u}{\partial x} + \gamma_{z} w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\gamma_{v} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - M_{x} - R_{x} - \gamma_{v} \frac{g}{k} \gamma_{x} u + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \gamma_{x} \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{z} \tau_{zx}}{\partial z} \right) \\ \gamma_{v} \frac{\partial w}{\partial t} + \gamma_{x} u \frac{\partial w}{\partial x} + \gamma_{z} w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\gamma_{v} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \gamma_{v} g - M_{z} - R_{z} - \gamma_{v} \frac{g}{k} \gamma_{z} w + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \gamma_{x} \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{z} \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{2v}{3} \frac{\partial q^{*}}{\partial z} - \beta w \\ \frac{\partial (\gamma_{x} u)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_{z} w)}{\partial z} &= q^{*}, \quad \frac{\partial (\gamma_{v} F)}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_{x} uF)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_{z} wF)}{\partial z} = Fq^{*} \end{split}$$

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, $\rho$ は流体の密度,vは動粘性係数,pは圧力, $\beta$ は付加減衰領域での減衰係数, $\gamma_v$ は体積空隙率, $\gamma_x,\gamma_z$ 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.本研究ではスタガードメッシュを適用し,上述の支配方程式を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 ら,2003)を参照されたい.また,x,z方向にそれぞれ 1.0 cm×1.0 cm の等間隔格子を用い,安定条件として移流項から生じる CFL 条件と拡散項か

- キーワード 土砂吸い出し, 捨石護岸, 埋立土砂, 数値計算, VOF法
- 連絡先 〒464-8603 名古屋大学 大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4632

ら生じる拡散不安定条件を用いた.なお,透水係数kは Kozeny-Carman の式  $k = 1/180 \cdot n^3 / (1-n)^2 \cdot gd_{50} / v$ を使って推定した.ただし,nは空隙率, $d_{50}$ は平均粒径である.

## 3.結果及び考察

はじめに,土砂吸い出し状況を説明する.水理実験では,吸い出しなし(No Suction),空洞の形成に到る吸い出し(Cave),陥没が生じる大規模な吸い出し(Cave-in)の3パターンが生じた.護岸幅と波長の比 $B/L(0.221 \sim 0.771)$ ,水深波長比 $h/L(0.111 \sim 0.257)$ およびアーセル数 $Ur = HL^2/h^3(1.01 \sim 13.6)$ は土砂吸い出しに大きな影響を与え,図-2に示すように,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.同図によれば,本実験の範囲内では,護岸幅の大小によらずUr > 2.5で土砂が吸い出されることが分かる.

次に,護岸および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.同図より,計算結果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できており,本論で用いた数値解析モデルが妥当であると判断できる.そこで,この数値解析手法を用いて計算した図-3と同一条件下の平均流速場 $\bar{v}$ を図-4に,また,吸い出しに及ぼす土砂内の無次元最大沖向き流速 $v_{max}^{off} / \sqrt{gh}$  ( $v_{max}^{off}$ :最大沖向き流速)と平均流の向き(×印は沖向きを示す)の影響を図-5に示す.図-4のケースは土砂吸い出しにより陥没が生じる場合であるが,同図に示すように埋立土砂前面に沖向き平均流が生じており,さらに図-5からは,前述のような沖向き平均流が生じない場合は土砂吸い出しが起こらないことが確認できる.また同図は, $v_{max}^{off} / \sqrt{gh} > 2.5 \times 10^{-4}$ の場合に土砂吸い出しが生じることも示している.

以上より,埋立土砂内に沖向き平均流が生じ,さらにその位置の沖向き流速が限界流速(本研究では $v_{\max}^{off}$  /  $\sqrt{gh}$   $\approx 2.5 \times 10^{-4}$ )に達することで最前面の埋







h/L = 0.111, Ur = 13.6)

立土砂が移動し始め,最終的に土砂吸い出しによる空洞や陥没が生じたと考えられる.特に,図-4に示した条件では,本論では図示できないが,他のケースと比較して倍以上大きな $v_{\max}^{off} / \sqrt{gh}$ が生じるために,土砂の流出・空洞の形成に続いて陥没が発生したものと推測される.なお,本研究では $D_m$ および $d_m$ を一定としたので,土砂吸い出しに及ぼす平均粒径の効果については議論できない.

## 4.結論

本研究では直立型捨石護岸を取り扱い,水理模型実験と数値計算により,背後土砂内に生じる最大沖向き流速が土砂吸い出しに大きな影響を与え,無次元最大沖向き流速が2.5×10<sup>-4</sup>を上回ると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)護岸幅と波長の比,水深波長比およびアーセル数は土砂吸い出しに大きな影響を及ぼすこと,(2)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明らかとなった.

**参考文献** 1) 高橋重雄ら(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.3-63.2) 許東秀ら(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,第58回年次学術講演会,II-320, pp.639-640.3) Hur, D.S. et al. (2003): Numerical estimation of the wave forces acting on a three-dimensional body on submerged breakwater, Coast. Eng., 47, pp.329-345.

