

防波堤基礎マウンドにおける砂の吸い出し現象に関する基礎実験

Experimental Study on Sand Scouring under Rubble Mound of breakwater

寒地土木研究所 ○正会員 長谷一矢 (Kazuya Hase)
正会員 山本泰司 (Yasuji Yamamoto)

1. まえがき

消波ブロック被覆堤は、我が国の主流防波堤のひとつであるが、砂地盤上に建設した後に比較的大きな波浪が来襲すると、消波ブロックの沈下や時には本体ケーソンの沈下が生じる場合のあることが経験的に知られている。最近の研究により、このような消波ブロック被覆堤の沈下現象が、波浪による砂地盤の吸い出し作用が主要な原因で生じることが明らかになってきた¹⁾。また、砂地盤の吸い出し発生限界条件や吸い出し量の推定を、数値計算により検討する試みもされている^{2) 3)}。吸い出し発生限界条件を明らかにすることや定量的な推定を可能とすることは、効果的な対策工を検討していく上で重要であると考えられる。

本研究は、振動流発生装置を用いて砂の吸い出し現象を再現することにより、砂粒径、砕石粒径が砂の吸い出し量に及ぼす影響を実験的に確認することを目的としている。

2. 実験の概要

図-1に示す任意波形振動流発生装置は、閉水路内の水をピストンにより駆動するもので、任意の制御波形を与えることが可能である。観測部は長さ 10m、高さ 0.55m、幅 0.3m であり、前面と上面はガラス張りとなっている。

本装置観測部に縦 0.3×横 0.3m の正方形断面水路を設け、図-2に示すようなマウンド下面を想定した実験模型を設置した。図に示すように、砕石を幅 0.6m で設置し、砕石の両端を金網で固定した。砕石下部には珪砂を敷き詰め、振動流が作用した時に砂が吸い出されるようにした。砕石上部には、砕石が沈下した際に隙間が生じないように、厚さ 5cm のスポンジを圧縮して詰め込んだ。この実験模型に所定の振動流を作用させた後に、砕石外に吸い出された砂を回収し、乾燥機を使って絶乾状態にした後、乾燥重量を計量した。

振動流速は、砕石部から片側 3.6m の位置の水路断面中央をレーザー流速計で計測した。振動流波形は正弦波形とし、流速振幅 u を 0~20cm/sec で段階的に変化させ、振動周期は 10sec とした。波数は 1 回の実験あたり 10 波を基本とした。

砕石は代表径 9.1mm, 28.5mm, 48.1mm, 74.3mm の 4 種類、珪砂は $D_{50}=0.158\text{mm}$, 0.470mm , 1.030mm の 3 種類を用意し、それぞれを組み合わせる実験を行った。ここで、代表径 ϕ は、砕石 1 個当たりの平均体積を V とすると、 $\phi=V^{1/3}$ で定義される。図-3に使用した珪砂の粒径加積曲線を示す。

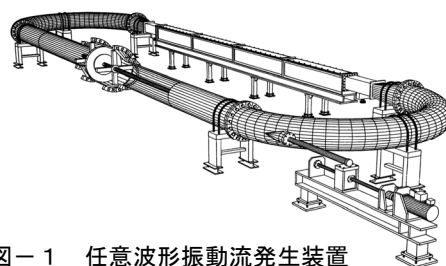


図-1 任意波形振動流発生装置

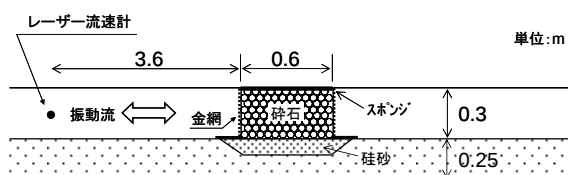


図-2 実験模型

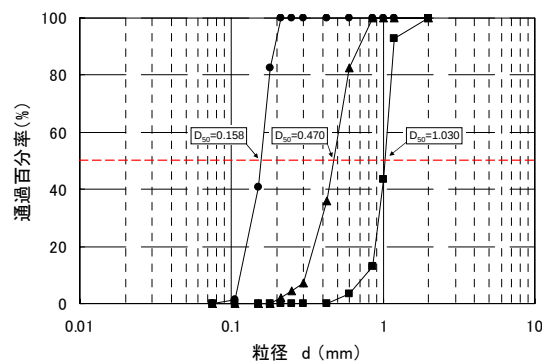


図-3 珪砂の粒径加積曲線

3. 砂の吸い出し特性

3. 1 砂粒径と砕石粒径の影響

図-4は砂粒径、砕石粒径の違いによる吸い出し量の変化について示したものである。横軸は、流速振幅 u を砕石空隙率 λ で除した値であり、本論文ではこれを砕石の隙間を流れる流速の代表値として考えることにする。縦軸の吸い出し量は単位幅単位時間当たりの実質体積であり、吸い出された砂の乾燥重量と砂の密度から体積を求め、水路幅 0.3m と振動流作用時間 100sec (周期 10s × 10 波) で除した値である。

砂粒径の違いに着目すると、●▲■より、粒径が細かいほど吸い出し量が多くなる傾向にあり、吸い出し量は流速振幅に比例して増加する。一方、砕石粒径の違いに着目すると、◇●△□より、各粒径の吸い出し量の値に有意な差が認められない。これは、流速振幅と吸い出し量の関係に砕石粒径は影響を及ぼさない事を示している。しかしながら、実験で取り扱った砕石は 9.1~

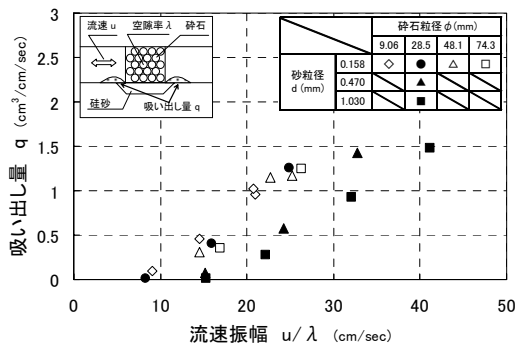


図-4 砂粒径・砕石粒径の影響

74.3mm であり、実際のマウンド砕石（直径 300mm 程度）より小さい範囲の結果であるため、更なる検討の余地はある。

3. 2 吸い出しの発生限界

マウンド下面の砂の移動限界摩擦速度 u_{*c} の推定を(1)式により試みることにする。

$$u_{*c} = A_0 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d} \quad (1)$$

ここに、 u_{*c} は移動限界摩擦速度、 ρ_s は砂の密度、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 d は砂粒径、 A_0 は実験定数である。図-5 は砂粒径と移動限界摩擦速度の関係であり、(1)式による推定値（実線）と実験値（●▲■）を示している。実験値には図-4 の吸い出し量が 0 付近のデータを用い、(2)式、(3)式により u_* を求めてプロットしている。

$$u_*^2 = \frac{1}{2} f_w u_{bm}^2 \quad (2)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = -0.08 + \log \frac{\xi_h}{k_e} \quad (3)$$

ここに、 u_* は摩擦速度、 u_{bm} は底面における最大水平水粒子速度（本論文では $u_{bm} = u/\lambda$ として扱う）、 ξ_h は底面における水粒子変位の振幅、 k_e は粗度高さ（通常は砂粒径を用いる）、 f_w は Jonnson の波による摩擦係数を用いることとした。本実験においては、 $A_0 = 0.1$ とすることで推定値と実験値は概ね一致する。

3. 3 吸い出し量の推定

本実験では、吸い出された砂が砕石外で体積するため浮遊状態の砂が少なく、掃流砂が卓越する状況にあった。そこで、本実験で吸い出された砂を掃流砂として整理し、吸い出し量の推定を試みた。

図-6 は図-4 の結果を無次元掃流力 τ_* と無次元掃流量 q_* の関係で整理したものである。無次元掃流力 τ_* は(4)式で表される。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{\left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1\right) g d} \quad (4)$$

一般的に掃流砂量は掃流力の $3/2$ 乗に比例することから、(5)式に示す推定式を用いることとした。

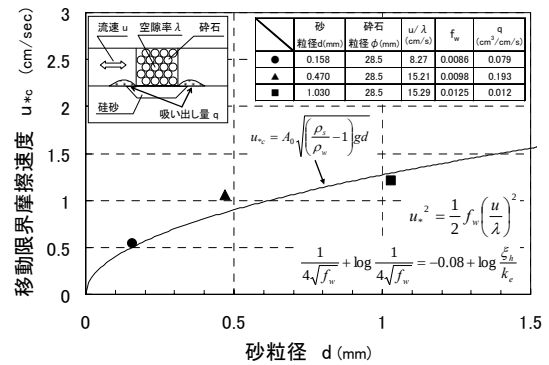


図-5 砂の移動限界摩擦速度

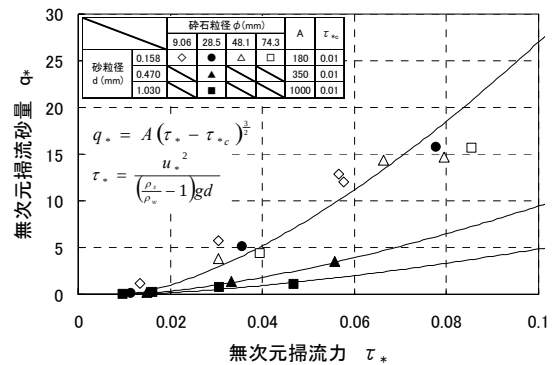


図-6 無次元掃流力と無次元掃流砂量

$$q_* = A(\tau_* - \tau_{*c})^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

ここに、 τ_{*c} は無次元限界掃流力で(1)式と(4)式から $\tau_{*c} = 0.01$ 、 A は実験定数である。図に示す様に、 A に適切な値を与えることにより、推定値（実線）と実験値は概ね一致する。 A は砂粒径 d の関数であると予想されることから、今後これらの関係を明らかにすることにより、砂粒径と振動流速から吸い出し量を定量的に評価できる可能性がある。

4. あとがき

砂粒径、砕石粒径が砂の吸い出し量に及ぼす影響を系統的な吸い出し実験により明らかにした。そして、本実験における吸い出し量を掃流砂として整理することにより、定量的に吸い出し量を推定することができた。今後は、浮遊砂量や吸い出し現象の安定化も考慮した吸い出し量の推定法を検討したい。

参考文献

- 1) 鈴木高二朗・高橋重雄・高野忠志・下迫健一郎：砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤の沈下被災について－現地調査と大規模実験－、港湾空港技術研究所報告、第 41 巻、第 1 号、pp.51-89、2002。
- 2) 鈴木高二朗・大寄菜々子・山本泰司：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、2003。
- 3) 山本泰司・長谷一矢・先川光弘：防波堤マウンド下面の砂地盤の吸い出しに関する振動流実験、北海道支部論文報告集、第 60 号、pp.448-451、2004。