

二粒径混合砂礫床における砂の移動限界と粒径比の影響

鳥取大学大学院工学研究科 学生会員○小林亮太
 国土交通省近畿地方整備局 非会員 河原光佑
 鳥取大学大学院工学研究科 正会員 和田孝志
 鳥取大学大学院工学研究科 正会員 三輪 浩

1. 背景と目的 ダム直下の河川では上流からの土砂供給が極端に減少するため、河床の粗粒化現象や流路の固定化、河道の樹林化等が問題となっている。これらへの対策として、礫層に砂が一定割合含まれると礫が移動しやすくなる効果¹⁾を利用した覆砂などが考えられている²⁾。このような効果を定量的に把握するためには、二粒径混合砂礫床における砂礫の移動限界の特性とその評価法を検討する必要がある。しかし、砂の移動限界については礫に比べて検討例が必ずしも多くない。そこで、本研究では河床の基盤構造および砂含有率が砂の移動限界に及ぼす影響に着目し、砂礫の粒径比（礫粒径/砂粒径）が異なる場合の砂の移動限界の影響を検討する。

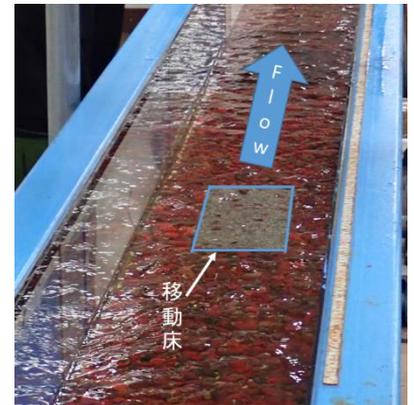


図-1 実験河床(礫 B)

2. 実験の概要 実験には長さ 7.67 m、幅 0.3 m の循環式可変勾配直線水路を用いた。この水路の下流端から 2.27 m~2.57 m の区間の中心線上に長さ 0.30 m、幅 0.12 m、深さ 0.03 m の移動床部を設置し、その両側および上下流側に後述する礫 A または礫 B を貼り付けた固定床部を設置した(図-1)。実験に用いた砂礫は、平均粒径 $d_g=0.71$ cm、

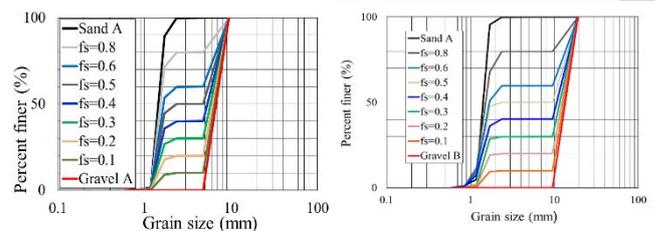


図-2 混合砂礫 A(左), B(右)の粒度分布

幾何標準偏差 $\sigma_g=\sqrt{d_{84}/d_{16}}=1.22$ の礫 A、 $d_g=1.43$ cm、 $\sigma_g=1.22$ の礫 B および $d_s=0.14$ cm、 $\sigma_g=1.19$ の砂 A である。礫 A と砂 A、礫 B と砂 A をそれぞれ所定の割合で混合させ、図-2 に示す粒度分布の混合砂礫を作成した。以下、前者を混合砂礫 A、後者を混合砂礫 B と呼ぶ。なお、図中の f_s は混合砂礫中の砂の含有率である。

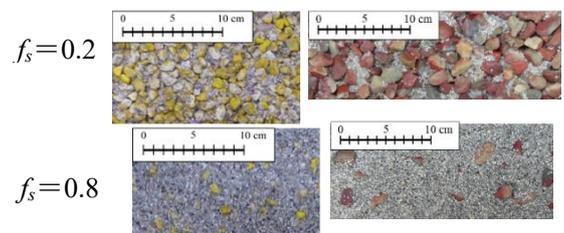


図-3 移動床 A(左), B(右)の通水前の状況

実験は、まず移動床部に混合砂礫を充填し、河床位が周囲の固定床とほぼ同じになるように調整した。なお、砂礫は礫と砂をそれぞれ数層に分けて交互に充填した。混合砂礫 A、B の河床表面の例を図-3 に示す。実験では、まず水路を所定の勾配に設定し、レーザー変位計で河床面を測定した。ついで、移動床部を金網で被い所定の流量を通水し、流れが安定したことを確認した後金網を取り上げ約 90 秒間に移動床部から固定床部に移動した砂の重量を測定した。なお、通水中には超音波変位計で水面を測定した。本研究では、移動床部から流れた砂の重量と実験の水深およびエネルギー勾配から砂の無次元限界掃流力を求めた。

3. 実験結果と考察 図-4 は実験で得られた水深と移動床部から流出した砂の重量の関係を示したものであり、図中の回帰直線は最小二乗法による実験結果の近似線を示している。両図ともデータのばらつきはあるものの、どの f_s に対しても概ね直線で近似することができ、水深の増加に対して砂の移動量が指数関数的に増加することを示している。なお、近似線の傾きは混合砂礫 A では f_s が 0.3 以下と 0.4 以上のグループでほぼ平行であり、混合砂礫 B では f_s が 0.4 以下と 0.5 以上のグループでほぼ平行である。これは水深の増加に対する砂の移動量の増加速度がそれぞれのグループでは f_s によらずほぼ一定であることを示している。

キーワード 二粒径混合砂礫, 移動限界, 粒径比, 無次元限界掃流力, 砂含有率

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南 4 丁目 101 鳥取大学工学部社会システム土木系学科水工学研究室 TEL0857-31-5284

本研究における砂の限界掃流力の算定は以下のとおりである。まず、砂のみ ($f_s=1.0$) の河床における砂の限界摩擦速度 u_{*cs} を岩垣の方法によって算出し、これと $f_s=1.0$ の実験における平均エネルギー勾配から $u_{*cs}^2=gh_{cs}I_e$ を用いて移動限界水深 h_{cs} を求める。次いで、**図-4** の $f_s=1.0$ の近似直線からこの h_{cs} に対する砂の移動量を読み取る。その結果、混合砂礫 A では 1.42g、混合砂礫 B では 3.95g となった。これらの値を移動限界の閾値として、各 f_s の近似直線から移動限界水深を求め、 f_s ごとの平均エネルギー勾配を用いて限界摩擦速度 u_{*cs} と無次元限界掃流力 τ_{*cs} を求める。

図-5 は砂の無次元限界掃流力 τ_{*cs} と砂含有率 f_s の関係を示したものである。実験結果を見ると、砂含有率 f_s が ≤ 0.4 では f_s の増加につれて τ_{*cs} は急激な減少傾向を示し、 $f_s \geq 0.4$ ではおおむね一定値に近い傾向を示している。このことから、 f_s が小さい場合は礫の遮蔽効果の影響が大きく限界掃流力も相対的に高い値を示すが、 $f_s=0.4$ 以上ではその影響はほとんど現れないといえる。これは、河床の基盤構造に依存していると考えられる。すなわち、 f_s が低い範囲では河床は礫骨格構造で遮蔽効果は大きい、 f_s が高くなると河床は砂基質構造となって遮蔽効果は現れなくなる。したがって、 $f_s=0.4$ 前後は河床の基盤構造が変容し、砂の離脱機構が異なる変化点であるといえる。図中には修正 Egiazaroff 式による砂の移動限界も示されているが、本実験の結果よりも大きく、 $f_s=0.4$ 付近の差が最も大きい。同様の傾向は礫の移動に対しても確認されており³⁾、これらの検討の範囲では二粒径混合砂礫に対する修正 Egiazaroff 式の適用には限界があると判断される。

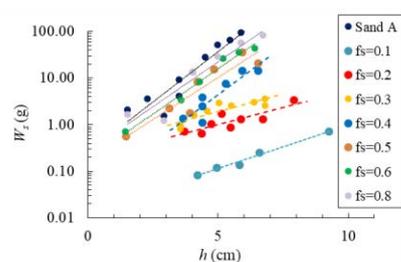
次に、粒径比の影響に関して、**図-5** より混合砂礫 B の無次元限界掃流力は混合砂礫 A よりも全体的に大きくなっているが、両者の差は $f_s=0.1$ 前後で顕著であり、それ以上では f_s の増加に対する無次元限界掃流力の変化傾向はおおむね同程度であると見なすことができる。これらのことから、粒径比が大きいほど礫骨格構造における遮蔽効果の影響が大きく、砂基質構造においては粒径比の影響は小さいと考えられる。

最後に、**図-6** は混合砂礫 A と混合砂礫 B の結果における $\tau_{*cs}(d_g/d_s)^{-1}$ と砂含有率 f_s の関係を示したものである。なお、図中の直線は以下に示された二峰性混合砂礫における砂の移動限界の式⁴⁾である。同図から、式(1)は混合砂礫 A の結果を概ね説明している。しかし、混合砂礫 B ではとくに $f_s \leq 0.4$ で式(1)との差が大きい。このため、混合砂礫 B の実験に対してはこの式の適用は礫による砂の遮蔽効果を過大に推定することになる。しかし、 $f_s \geq 0.4$ では本実験結果の傾向を概ね評価できており、二粒径混合砂礫に対しては有効であるといえる。

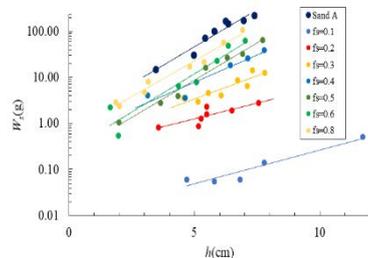
$$\tau_{*cs} = \begin{cases} (0.06 - 0.12f_s) \left(\frac{d_g}{d_s}\right) & f_s \leq 0.4 \\ (0.016 - 0.01f_s) \left(\frac{d_g}{d_s}\right) & f_s > 0.4 \end{cases} \quad (1)$$

4. あとがき 本研究では、無次元限界掃流力に及ぼす砂含有率および河床の骨格構造、そして粒径比の影響を検討するとともに、移動限界式を示してその適用性について考察した。今後、二峰性混合砂礫河床における掃流砂量に関する実験に取り組む予定である。

- 参考文献** 1) 池田 宏：二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験，筑波大学水理実験センター報告，No.8，pp.1-15，1986。
 2) 三輪 浩，山田啓太郎：粗粒化河床への覆砂による礫の移動と流路変動，河川技術論文集，第24巻，pp.89-94，2018。
 3) Miwa, H., Parker, G.: Effects of sand content on initial gravel motion in gravel-bed rivers, Earth Surface Processes and Landforms, 42, pp1355-1364, 2017。
 4) 大江多聞，吉岡大海：二粒径混合砂礫河床における砂の移動限界，平成29年度舞鶴工業高等専門学校卒業研究論文，第2章，2018。



(a) 混合砂礫 A



(b) 混合砂礫 B

図-4 水深と砂の移動量の関係

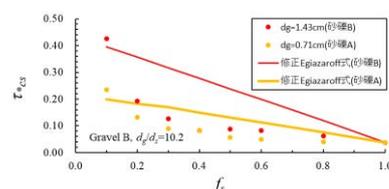


図-5 砂の無次元限界掃流力と砂含有率の関係

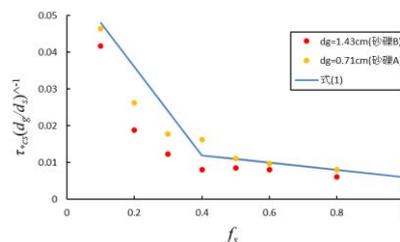


図-6 $\tau_{*cs}(d_g/d_s)^{-1}$ と砂含有率 f_s の関係