

舞鶴工業高等専門学校 学生員○玉木 光
 舞鶴工業高等専門学校 北中知佑
 舞鶴工業高等専門学校専攻科 学生員 山田啓太郎
 舞鶴工業高等専門学校 正会員 三輪 浩

1. まえがき ダムの下流河川では、ダムによる土砂移動の不連続が河床低下や河床の粗粒化を引き起こし、延いては流路の固定化につながるなどの例がある。一方、礫層に砂が含まれると礫の移動限界は低下する¹⁾ので、河床への砂の供給は表層の礫をより低流量で移動させる方法の一つとして期待できる。このような効果を定量的に把握し、流路変動へと発展させるためには、混合砂礫河床における礫や砂の移動性や、両者の相互作用に関する定量的な評価が必要である。礫の移動限界に及ぼす礫層の砂含有の効果については、Wilcock & Crowe²⁾やMiwa & Parker³⁾が評価式を提案しており、前者は既に河床変動計算への導入も行われている⁴⁾。本研究では、砂礫の移動限界の系統的定量評価の一環として、混合砂礫河床における砂の移動限界に及ぼす砂の含有率と基盤構造の効果について検討している。

2. 実験の概要 実験は長さ12m、幅0.2m、深さ0.3mの亚克力製可変勾配直線水路を用いて行った。この水路の下流端から2.73m～3.03mの区間の中心線上に幅0.12m、深さ0.03mの移動床部となる箱を設置し、その両側および上下流側にはほぼ様な礫をニスで貼り付けた固定床部を設けた。実験に用いた砂礫は、平均粒径 $d_m=0.71\text{cm}$ の礫Aと $d_m=0.14\text{cm}$ の砂Aである。移動床部には礫と砂を一定割合で混合させた混合砂礫を充填し、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(図-1)。なお、本研究では混合砂礫層における砂の含有率を次式で定義している。

$$f_s = \frac{V_s}{V_g + V_s} \quad (1)$$

ここに、 V_g は礫の体積、 V_s は砂の体積である。

図-2は礫A、砂Aおよびこれらの混合砂礫の粒度分布であり、典型的な二峰性となっている。Carling & Reader⁴⁾は、 f_s が0.2を超えると礫の骨格構造(Gravel framework)は緩くなり始め、0.4を超えると砂基質内に礫が存在(Sand-matrix)する混合状態に置き換わることを示している。図-3は実験前の河床の状況を示したものであり、本研究ではこれらの砂含有率を有する混合砂礫を対象として砂の限界掃流力の測定を行った。

実験は、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、移動床部分を金網で被い、所定の流量を通水してほぼ等流状態を確認した後、金網を取り除き、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。通水中には超音波変位計で水面を測定し、停水後に再度河床面を測定した。表-1に実験ケースを示す。表中、 Q は流量、 I は河床勾配を表す。また、欄内の数字は実験の実施数である。なお、実験では礫は移動しない条件設定を行ったが、大流量での金網の除去時に数個程度の礫の移動が認められた。

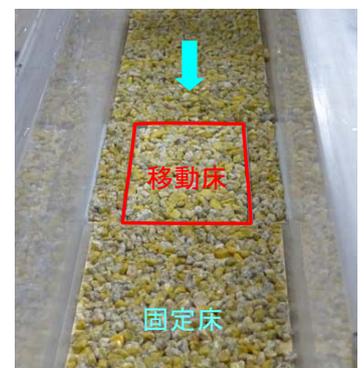


図-1 実験河床

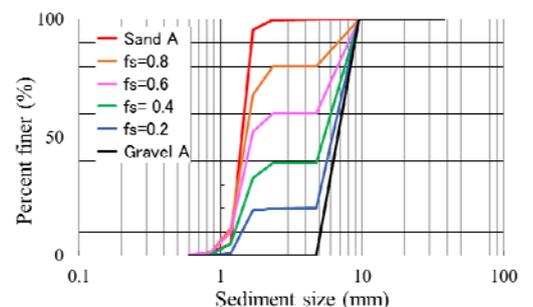


図-2 使用砂礫の粒度分布(礫A)

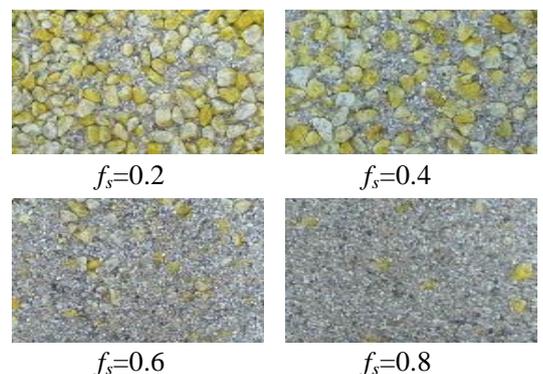


図-3 実験前の河床状況

3. 実験結果と考察 図-4は水深と90秒換算の砂の移動量(g)の関係を、砂の含有率 f_s ごとに片対数紙上に描点したものである。また、図中の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。 $f_s=0.6$ のケースで若干のばらつきが認められるが、いずれの f_s に対してもおおむね直線で近似することができ、しかも、 f_s ごとの直線の傾きは同程度であることがわかる。これは、本実験の範囲では、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、また、その増加速度は砂の含有率によらずほぼ一定であることを示している。なお、 f_s が0.6以上のケースでは同一水深における移動量は同程度となっているが、 f_s が0.2と0.4のケースではこれらよりもかなり小さい。これは、礫による遮蔽効果が影響しているためであると考えられる。

混合砂礫床における砂の限界掃流力の算定は、まず、砂のみに対する移動限界水深を岩垣の方法によって算出し、その水深に該当する砂の移動量を砂のみの実験結果に対する最小二乗法による近似式から求める。図-4に示した砂Aに対しては1.5gとなった。この移動量を移動限界の閾値として、各 f_s の混合砂礫における砂の移動限界水深をそれぞれの近似式から求め、限界摩擦速度と無次元限界掃流力 τ_{*cs} を算出した。図-5は砂Aに対する τ_{*cs} と f_s の関係を示したものである。同図より、 τ_{*cs} は f_s の値によって特徴的な変化を示すことがわかる。すなわち、 $f_s=0.4$ 以下では $\tau_{*cs}=0.14$ 程度の大きな値を示すが、 $f_s=0.6$ 以上では $\tau_{*cs}=0.03$ 程度の小さな値を示し、かつそれぞれの変化幅は小さい。前者は上述したように礫による遮蔽効果が原因であるが、後者には遮蔽効果はほとんど現れないためである。これらは河床の基盤構造に依存しており、前者は礫を主体とする骨格構造に起因し、後者は砂基質構造に起因するものであると考えられる。これらの結果より、 $f_s=0.4$ から0.6の間で砂の離脱機構は異なり、 τ_{*cs} は急激に変化することが期待され、河床の基盤構造の変化の影響とともに今後さらに検討を深める必要がある。図-5中にEgiazaroff式による砂の移動限界と砂径・平均粒径比 d_s/d_m を示しているが、Egiazaroff式と実験値とはかなり異なった傾向を示している。砂の含有によって礫が移動しやすくなり、アーマールコートが進行して礫の骨格構造が緩くなると、さらなる砂の含有が可能となる。このような状態はEgiazaroff式では追跡が困難であると思われる。

4. あとがき 礫層に砂が混入すると、砂の含有率が0.4程度までは比較的高い無次元限界掃流力を示すが、0.6以上では砂のみの無次元限界掃流力程度まで低下することを実験的に示した。そして、その境界は河床の基盤構造が礫の骨格ベースから砂基質への変容に近いことを述べた。今後は、砂含有率が0.4から0.6の範囲での砂の移動限界を調べるとともに、砂・礫径比の影響についても検討する予定である。なお、本研究に関して米国イリノイ大学Gary Parker教授から有益な助言を賜った。また、本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究(C)の補助を受けて行われた。記して謝意を表します。

参考文献 1) 池田 宏, 伊勢屋ふじこ: 粗砂の運ばれやすさに及ぼす細砂の影響, 筑波大学水理実験センター報告, No. 9, pp. 43-47, 1985. 2) Wilcock, R. and Crowe, J.C.: Surface-based transport model for mixed-size sediment, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.129, No.2, pp.120-128, 2003. 3) Miwa, H. and Parker, G.: Effects of sand content on initial gravel motion in gravel-bed rivers, Earth Surface Process and Landforms, 2017 (in printing). 4) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 坂本 洋: 混合砂礫河床変動モデルの構築と粗粒化・細粒化を伴う河床変動への適用, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 68, No. 4, pp. I_1189-I_1194, 2012. 4) Carling, P.A. and Reader N.A.: Structure, composition and bulk properties of upland stream gravels, Earth Surface Processes and Landforms, Volume 7, Issue 4, pp.349-365, 1982.

表-1 実験条件

Q (L/s)	f_s				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
2.0~2.9	1		1		1
3.0~3.9		1		1	1
4.0~4.9	1	1	1	1	2
5.0~5.9		1		1	2
6.0~6.9	2	1	1	1	
I	1/200				

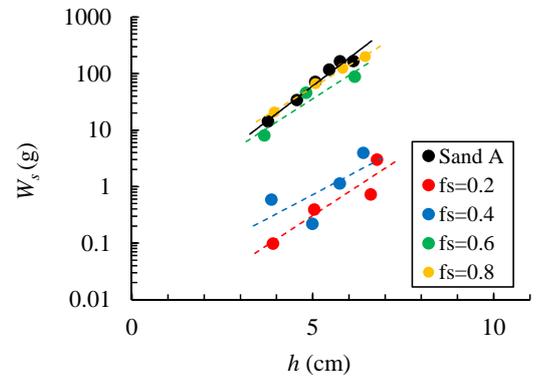


図-4 水深と砂Aの移動量の関係

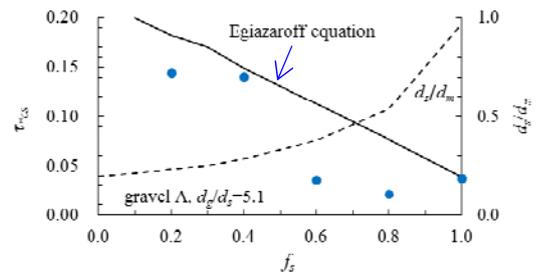


図-5 砂の無次元限界掃流力と砂含有率の関係