

舞鶴工業高等専門学校 学生員○山田啓太郎
 舞鶴工業高等専門学校 横江 佳人
 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、土砂移動の不連続が河床の粗粒化や河道の固定化につながるなどの例がある。これらの対策の一つとして河床に砂を供給して表層の礫を移動させることが考えられる¹⁾。礫層に砂が含まれると礫の摩擦角の減少によって礫の移動限界が低下することは定性的に知られている²⁾が、定量的な評価は必ずしも多くない。Miwa & Parker³⁾は礫と砂からなる二峰性の混合砂礫河床における礫の移動限界に関する実験を行って礫の無次元限界掃流力 τ_{*cg} と砂の含有率 f_s の関係を検討し、 f_s が0.4程度で $\tau_{*cg}=0.02$ 程度まで低下することを示した。このような特性を利用すれば、より低流量での礫の移動を容易にし、流路変動へもつながる可能性がある。本研究では、礫河床への砂の供給方法を覆砂によるものとし、これが礫の移動性に及ぼす効果を確認するとともに、流路の変動特性について検討している。

2. 実験の概要 実験は長さ $L=18\text{m}$ 、幅 $B=0.5\text{m}$ の可変勾配直線水路を用いて行った。また、実験には図-1に示すような平均粒径 $d_m=0.71\text{cm}$ の礫、 $d_m=0.14\text{cm}$ の砂1および $d_m=0.052\text{cm}$ の砂2を用いた。実験では、図-2のように、水路に長さ $L_1=1.8\text{m}$ 、 B_1 =幅0.5m、深さ $D_1=0.08\text{m}$ の移動床部を設置し、その上下流側を上記の礫をニスで貼り付けた固定床部とした。移動床部には礫のみを充填した河床と、礫と砂2を4:1の割合で混合した砂礫($f_{s1}=0.2$)を充填し、これを流量 $Q_1=5\text{L/s}$ の下で通水してアーマールコート河床を形成した河床を準備した。さらに右岸側水路半幅分のみに覆砂を行った。実験では、覆砂時の河床表層の砂含有率は $f_{s2}=0.4$ および0.2の2種類を設定し、覆砂の有無と移動床部の設置状況(礫のみの河床もしくはアーマールコート河床)による礫の移動性と流路変動特性について検討した。表-1に実験条件を示す。当該実験では、所定の流量の下で約1分間に移動床部から流出した礫と砂の量を測定し、これを5回繰り返した。なお、通水中に超音波変位計で水位を測定し、停水後にレーザー変位計で河床位の測定を行った。

3. 実験結果と考察 図-3は $Q_2=30\text{L/s}$ における土砂流出量の時間変化を河床条件(礫河床(RC31)、礫河床+覆砂(RC32)、アーマールコート河床+覆砂(RC34))別に示したものである。同図より、覆砂による砂供給を行う(RC32 & RC34)ことで礫の流出量が大幅に増加しており、礫層上の砂の存在が礫の流出に大きな効果を発揮することがわかる。さらに、覆砂を行ったアーマールコート河床(RC34)の方が、覆砂を行った礫のみの河床(RC32)に比べ礫流出量はより大きくなった。同図より、アーマールコート河床では礫の流出量増加に伴って貯留層に存在する砂2の流出量も増加しており、覆砂による砂供給によって上層の礫が移動し、混合砂礫層の下方面で侵食が及び、貯留層に存在する砂2が露出することで礫の移動が促進されたと考えられる。

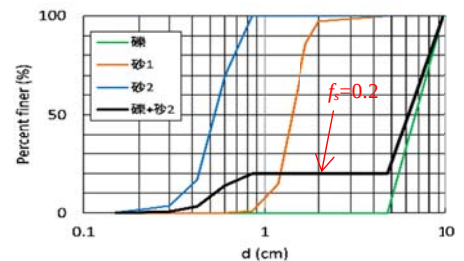


図-1 使用砂礫の粒度分布

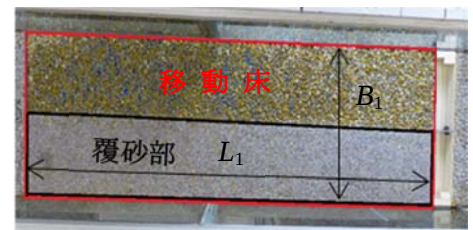


図-2 実験河床

表-1 実験条件

Run No.	Sand f_{s1}	Armour coat $Q_1 (\text{L/s})$	Sand covering		Gravel motion $Q_2 (\text{L/s})$
			$W_s (\text{g})$	f_{s2}	
RC21	0	—	—	—	15
RC22	0	—	3500	0.4	15
RC23	0.2	5	1750	0.2	15
RC24	0.2	5	3500	0.4	15
RC31	0	—	—	—	30
RC32	0	—	3500	0.4	30
RC33	0.2	5	1750	0.2	30
RC34	0.2	5	3500	0.4	30

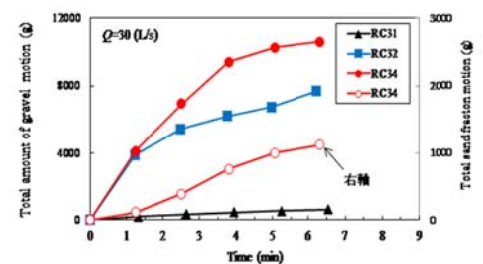


図-3 累積時間と流出土砂量の関係 (○は貯留層の砂：右軸)

図-4, 図-5はアーマーコート河床に覆砂を行った実験(RC34)の最終段階における移動床部の縦断形状と横断形状を示したものである。図-4より, 覆砂を行わなかった左岸側($y/B=0.2$)では明確な河床変動は見られないが, 覆砂を行った右岸側($y/B=0.8$)では顕著な河床変動が認められる。また, 横断方向の河床変動に着目すると, 図-5に示すように河床侵食は覆砂のない左岸側まで及び, 結果として流路幅が拡大していることがわかる。以上より, 砂の供給による河床表層の礫の移動が河床および流路の変動につながることを示された。



図-4 移動床部縦断形状

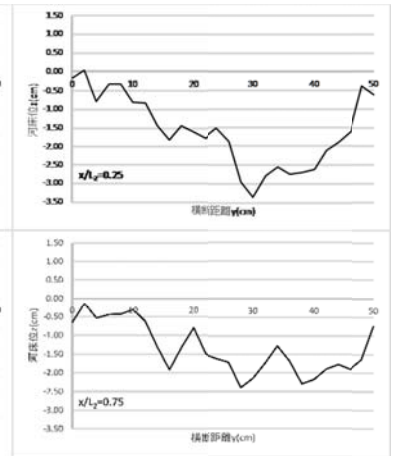


図-5 移動床部横断形状

次に, 覆砂の量が土砂の流出特性に及ぼす影響について考察する。図-6は2種類の覆砂量に対するアーマーコート河床における土砂流出量の時間変化を示している。同図より $Q=15$ l/sの場合は, 覆砂量を増やすことで礫の流出量も大きく増加しているが, $Q=30$ l/sの場合には, 覆砂量を変化させても, 礫の流出量に大きな違いは見られない。図-7は2種類の流量条件に対する最終段階における移動床部の横断形状($x/L_2=0.75$)を示したものである。同図より, $Q=15$ l/sの場合, 少ない覆砂量では左岸側, 右岸側ともに河床がほとんど変化していないのに対して, 覆砂量を増加させた場合には右岸側で河床変動がみられる。 $Q=30$ l/sの場合は覆砂量に関係なく右岸側で河床変動が生じており, 表層の礫が移動したことがわかる。また, 覆砂量を増やすことで左岸側にまで河床侵食が及んでいることが確認できる。以上より, 覆砂量を変化させることで土砂流出や流路変動の特性に違いが生じることが確認できた。これらの要因として, 小流量ではある一定量以上の覆砂を行わなければ, 表層の礫を移動させることができず, 貯留層の砂による礫移動の促進効果が得られないのに対して, 大流量ではより少ない覆砂量でも表層の礫を移動させるのに十分な効果があり, 結果として礫の移動量が覆砂量の多い場合とほぼ同程度になったと考えられる。図-6より, $Q=15$ l/sの場合には貯留層の砂がほとんど流出していないのに対して, $Q=30$ l/sではその流出量が時間の経過に伴って大幅に増加しており, このことを裏付けている。

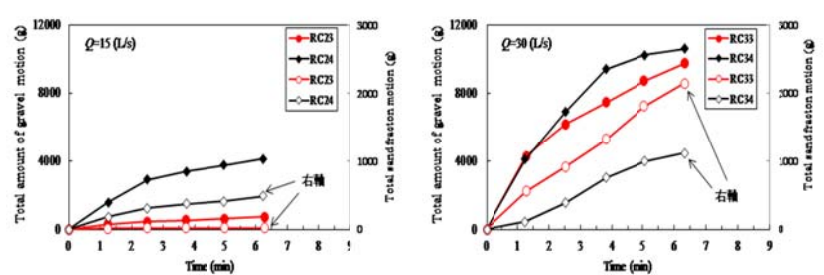
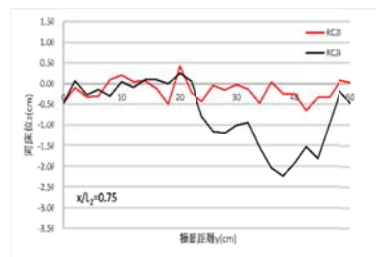
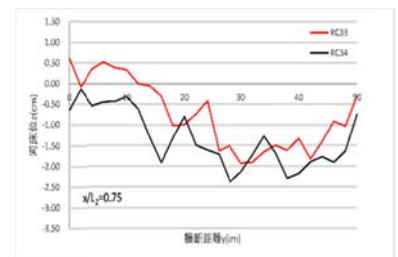


図-6 累積時間と流出土砂量の関係 (覆砂量の影響)
($f_s=0.2$: RC23, RC33, $f_s=0.4$: RC24, RC34)



Q=15 l/s



Q=30 l/s

図-7 移動床部横断形状

4. あとがき 礫層に砂を供給することで礫の移動が活発化し, 流路変動にもつながることを実験的に示した。また, 覆砂量の違いによって土砂の流出特性に違いが生じることが確認できた。今後も検討を続け, 砂供給の効果とその限界を明確にする予定である。ただし, 過剰な礫の移動は河床低下を促進する可能性も有しているため, これを制御することも考える必要がある。最後に, 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) (研究代表者: 三輪 浩) 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) 山田ら: 第71回土木学会年講, 2016. 2) 池田・伊勢屋: 筑波大学水理実験センター報告, No.9, 1985. 3) Miwa, H. & Parker, G.: Earth Surface Process and Landforms, 2017 (in printing).