

粗粒化河床への覆砂による礫の移動と流路変動

GRAVEL MOBILIZATION AND CHANNEL EVOLUTION DUE TO SAND COVERING TO GRAVEL-BEDS

三輪 浩¹・山田啓太郎²
Hiroshi Miwa and Keitaro Yamada

¹正会員 工博 鳥取大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8550 鳥取市湖山町南4丁目101)

²正会員 京都市建設局土木管理部 (〒604-8571 京都市中京区寺町通御池上る上本能寺前町488番地)

Armored gravel bed formation in rivers downstream of dams may be serious problems caused by the cutoff of sediment supply. Releasing flows large enough to generate shear stresses adequate to mobilize the coarse gravels in the armor layer is not always appropriate, because other problems such as generation of flows with high turbidity may arise. On the other hand, when fine sediment (i.e. sand) is present in streambeds composed of coarse gravels, the gravel can be more easily removed as compared with gravel beds without fine sediment (e.g. Ikeda, 1984). Gravel augmentation using fine gravel has been recently demonstrated as a viable alternative to mobilizing coarse surface layers. However, the effect of gravel mobilization on channel evolution was hardly discussed. In this study, we investigate the effects of sand supply to the armored gravel bed associated with sand covering on gravel mobilization and channel evolution. A subsurface layer in an armored bed may contain not only gravel but also sand. We also examined the effect of sand in the subsurface layer on gravel mobilization experimentally.

Key Words : Gravel-bed, Sand covering, Gravel mobilization, Friction angle, Channel evolution

1. はじめに

ダムの下流では土砂供給の停止による河床低下や河床砂礫の粗粒化によって流路の固定化が進行する例が多い。一方、ダム貯水池の堆砂問題はダム機能の低下も引き起こしており、治水・利水の両面において課題がある。また、環境面でも生態系の保全・回復の観点からの方策が求められている。近年、これらの問題に対応するため、貯水池の掘削土砂を下流河道に置き土し、放流によって侵食・流送させる土砂還元法が全国の河川で実施されている¹⁾。この方法は特別な設備を必要とせず、比較的小規模で容易に実施できることから、その効果が期待されている。また、河道への土砂供給は河床変動等の物理環境や生物の生息環境に変化を与えることが指摘されているため、土砂供給と河床変動の関係、土砂の流下特性、粒度の変化等、土砂供給の効果や影響などを予測するための系統的な検討も必要である。

河道への土砂供給による物理環境面への効果や影響については、河床低下や粗粒化などの問題が顕在化していた二瀬ダムで土砂還元実験が実施され、土砂供給が粗粒化の解消や河床材料の細粒化に効果を発揮することが確

認された²⁾。また、真名川ダムではフラッシュ放流による河川環境改善事業が試行され、置き土による砂供給とフラッシュ放流を組み合わせることで、現地河床を構成する最大粒径(約50mm)程度の礫を移動させる効果があることが示された³⁾。一方、生物の生息環境面での効果や影響については、異常に繁茂した付着藻類の剥離や更新による魚類の餌環境改善などの成果が報告されている⁴⁾。矢作川では、人為的に砂を河床に堆積させる置き土実験や覆砂実験が実施されており、堆砂量と生物との関係把握が進められている⁵⁾。平成23年には国土交通省によって下流河川土砂還元マニュアル(案)⁶⁾が提示され、置き土に関する系統的な指針が示された。このように、置き土に関する検討が活発に行われているのに対して、覆砂による土砂供給が河床の物理環境に及ぼす影響について着目した例は少ない。

一方、ダムの下流河川における河床の粗粒化や河道の固定化の問題を解決するための手法として、覆砂によって表層の礫を移動させることが試みられている⁷⁾。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⁸⁾が、定量的な評価は必ずしも多くない。Wilcock & Crowe⁹⁾は河床表層の平均粒径に対する無次元掃流力と表層に占める砂の

割合の関係式を提案し、混合砂礫に関する土砂輸送モデルを示した。また、Miwa & Parker¹⁰⁾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系統的な実験を行い、砂が礫の移動限界に及ぼす効果を、河床基盤の構造と砂含有率 f_s によって説明している。また、砂の含有率が0.4程度で礫の無次元限界掃流力は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、河床への砂の供給は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。

以上のように、ダム下流河道への土砂還元は河川の物理環境、生物生息環境の保全および回復に効果を発揮している。本研究では、河床の粗粒化や固定化への対策として覆砂による砂供給の効果について検討する。覆砂はターゲットとする場所のみに砂供給を行うものであるが、土砂の移動現象を河床変動への影響を含めて把握するまでには至っておらず、系統的な検討が必要である。そこで、覆砂が礫の移動性に及ぼす効果を明らかにするとともに、河床変動や流路変動への影響について検討する。

2. 実験の概要

実験は長さ $L=18\text{m}$ 、幅 $B=0.5\text{m}$ 、深さ $D=0.5\text{m}$ の変可勾配直線水路を用いて行った。実験には図-1に示すような粒度分布を有する平均粒径 $d_m=7.1\text{mm}$ の礫、 $d_m=1.4\text{mm}$ の砂1および $d_m=0.52\text{mm}$ の砂2を準備し、礫と砂2を用いて河床を形成した。実験では図-2に示すように、水路に長さ $L_1=1.8\text{m}$ 、幅 $B_1=0.5\text{m}$ 、深さ $D_1=0.08\text{m}$ の移動床部と採砂箱を設置し、それらの上下流側は上記の礫をニスで貼り付けて固定床部とした。なお、覆砂は砂1を用いて移動床部の右岸側水路半幅分のみに行うこととし、層厚を5種類設定した。図-3は、移動床部の砂礫の状況を模式的に示したものである。本実験では、河床の砂礫構成と覆砂の有無による礫の移動性と流路の変動特性について検討を行うため、移動床部を3種類設定した。Case 1は礫のみで覆砂を行わない河床、Case 2は礫のみで覆砂を行う河床、Case 3は礫と砂2を4:1の割合で混合($f_s=0.2$)した砂礫河床に対して礫が移動しない流量 $Q=5\text{L/s}$ の下で通水して粗粒化させた河床に覆砂を行う河床である。

表-1に実験条件を示す。いずれの実験でも水路勾配は1/100に設定された。実験では、流量 $Q_2=30\text{L/s}$ の下で約1分間に移動床部から流出した礫と砂の重量を測定し、これを5回繰り返した。なお、この流量は縮尺 $\lambda=1/40$ とし

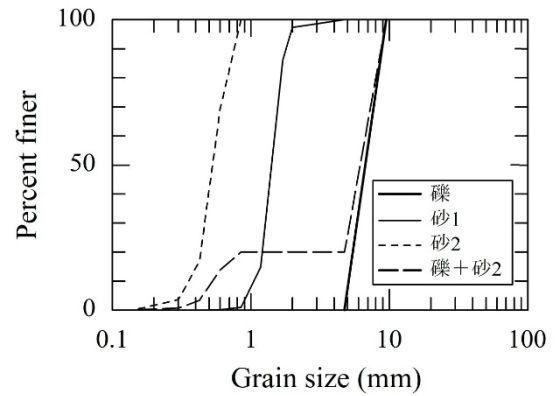


図-1 使用砂礫の粒度分布

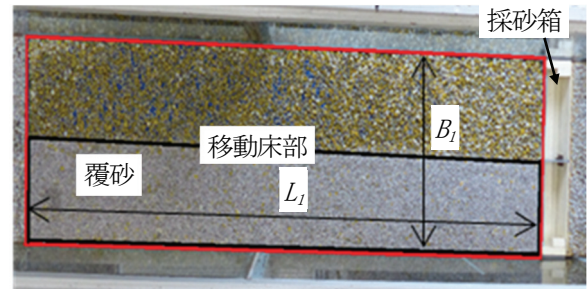


図-2 実験河床 (平面)

表-1 実験条件

Run	Case	Sand covering D/d_g	Q_2 (m^3s^{-1})	h_m (cm)	I_c	F_r	u_* ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	τ_{*g}
RC41	1	0	30	7.60	0.0137	0.92	9.0	0.071
RC42	2	0.54	30	7.59	0.0136	0.92	9.1	0.071
RC43	3	0.11	30	7.48	0.0156	0.93	9.6	0.080
RC44	3	0.30	30	7.99	0.0141	0.84	9.3	0.075
RC45	3	0.66	30	7.83	0.0173	0.85	10.1	0.089
RC46	3	0.97	30	7.60	0.0166	0.87	9.6	0.080
RC47	3	1.31	30	7.58	0.0179	0.88	10.0	0.086

たとき現地では約 $300\text{m}^3/\text{s}$ に相当し、移動限界の粒径は約 27cm となる。表中の D/d_g は礫の平均粒径に対する平均的な覆砂の層厚(覆砂前後の平均河床位の差)を示している。なお、表層の礫が覆砂で覆われたときの下限の値は条件設定の状況から概ね $D/d_g=0.3\sim0.4$ 程度である。通水中には超音波変位計を用いて水面を測定し、停水後にレーザー変位計を用いて河床面を測定した。

3. 覆砂による砂供給が砂礫移動に及ぼす影響

図-4は河床条件別の流出土砂量の時間変化を示したものである。図中には、Case 3の場合の表層下の砂2の

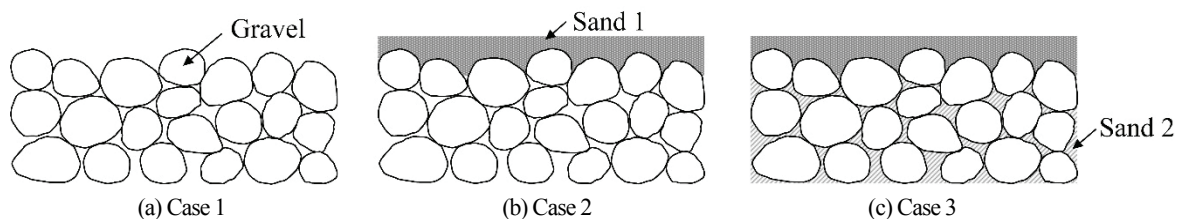


図-3 移動床部の砂礫の充填状況 (側面)

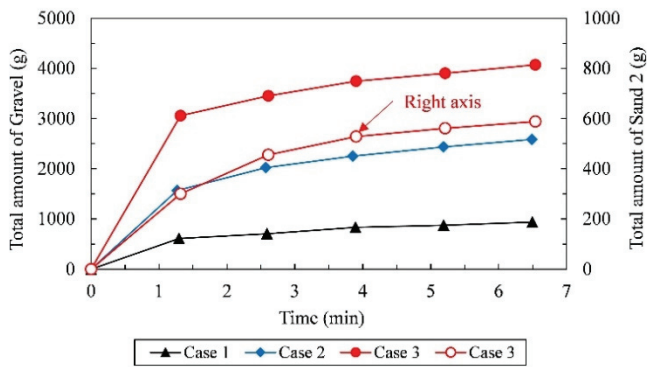
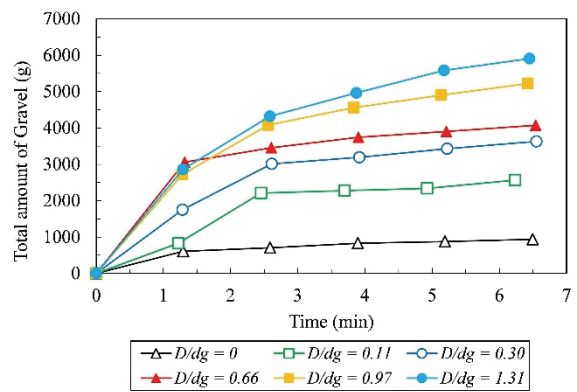


図-4 流出土砂量の時間変化 (○は砂2:右軸)

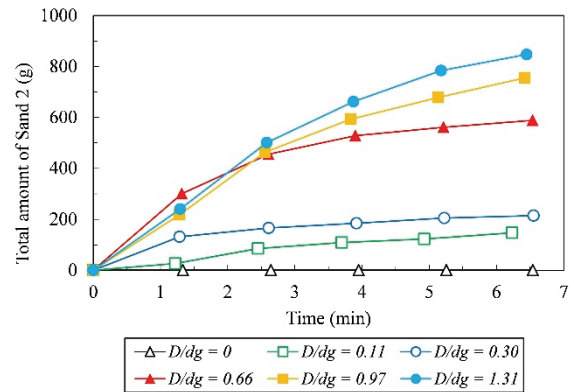
流出量を右軸に示している。同図より、覆砂を行う (Case 2, Case 3) ことで礫の流出量が大幅に増加しており、礫層上の砂の存在が礫の移動に効果を発揮したことがわかる。さらに、粗粒化層に覆砂を行ったCase 3の方が、礫のみの河床に覆砂を行ったCase 2に比べ礫の流出量は大きい。また、Case 3では礫の流出増加に伴って下層に存在する砂2の流出量も増加している。これは、覆砂による砂供給によって上層の礫が移動し、下層に存在する砂2が露出することで礫の摩擦角が減少して礫の移動が促進されたためであると考えられる。

河道への砂供給を行うことを想定した場合、コストや砂礫移動に伴う濁水の発生などの生物環境の問題などから、できるだけ少ない砂供給量で効率的に河川環境を改善することが求められる。そこで、砂礫の移動に及ぼす覆砂量の影響を検討する。図-5は、礫と下層に存在する砂2の流出量の時間変化を覆砂層厚・礫径比 D/d_g 別に示したものである。図-5(a)より、覆砂量が多くなるほど礫の流出量は大きくなっていることがわかる。ただし、最初の停水時までの流出量に着目すると、 $D/d_g=0.66$ 、 0.97 および 1.31 では同程度の値となっている。これは、通水当初に覆砂の砂のみが流され、礫の移動に効果を発揮しない状況が生じたためであり、通水初期の礫流出量に限っては覆砂量に上限があることを示唆している。図-5(b)は下層に存在する砂2の流出量の時間変化を示している。覆砂量が多いほど流出量も増加していることから、図-5(a)の $D/d_g=0.66$ 以上で通水2回目以降に礫の流出量に差が生じているのは、前回通水時の覆砂の残量と砂2が効果を発揮しているためであると推察される。

つぎに、覆砂層厚と総礫流出量の関係を図-6に示す。同図より、覆砂層厚が大きいほど礫の流出量も多くなっているが、その変化は徐々に緩やかになり、本実験では $D/d_g=0.3$ を境に覆砂層厚に対する礫の流出量の傾向が異なると見ることができる。すなわち、 $D/d_g=0.3$ までの覆砂層厚に対する礫流出量の増加割合は、これ以上よりも相対的に大きい。これは、礫粒径に対する覆砂の層厚が小さいときにはほとんどの砂は礫の間隙を埋めるが、 $D/d_g=0.3$ 以上では河床表層に砂のみの層ができるためである。このような状態では覆砂量を増加させても、通水



(a) 礫流出量



(b) 砂2 流出量

図-5 流出土砂量の時間変化

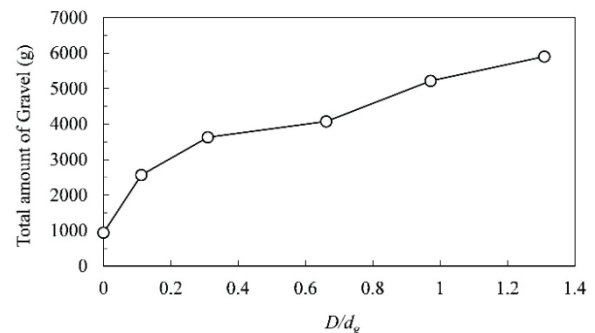


図-6 覆砂層厚と総礫流出量の関係

初期には礫の移動に十分な効果を発揮することができないと判断される。なお、礫の流出量に及ぼす覆砂量の効果は、流量条件によっても変化すると考えられるため、今後この点に着目した検討が必要である。ただし、表層の礫が覆砂で覆われたときの下限の値である $D/d_g=0.3 \sim 0.4$ 程度の値は一つの判断基準になるものと考えられる。また、覆砂量に係る土砂移動のメカニズムについても今後の検討が望まれる。

4. 覆砂による河床変動・流路変動特性

河道への土砂供給は河床の物理環境や生物の生息環境に変化を与えるため、河床変動や流路変動特性について

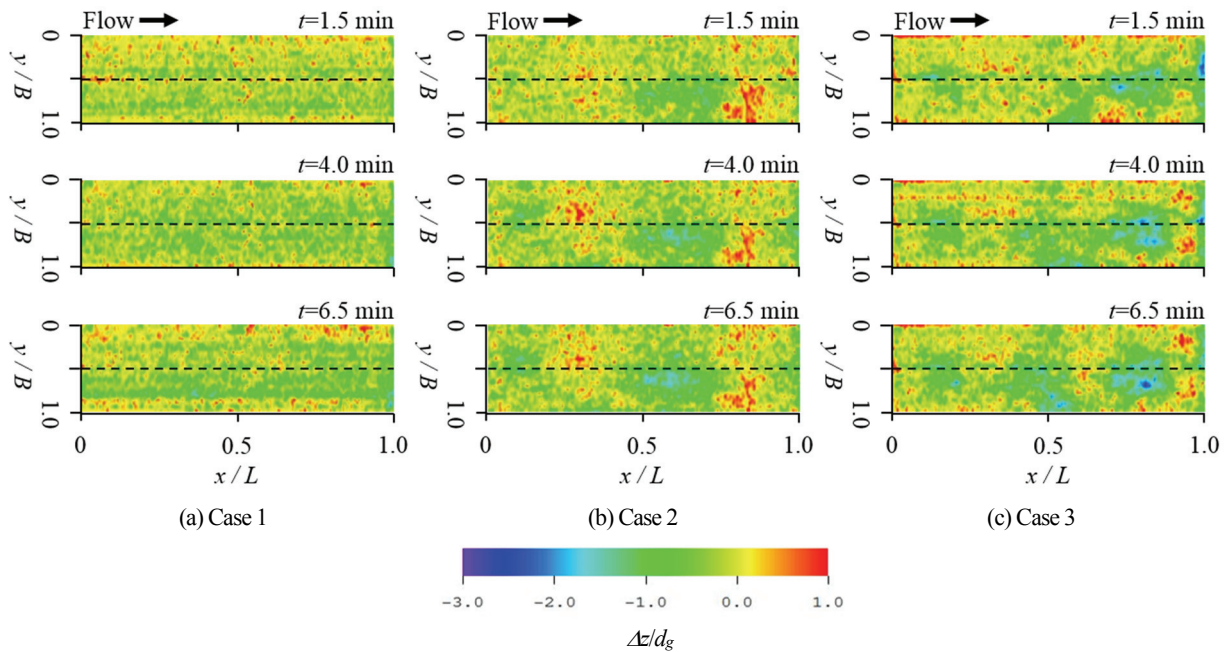


図-7 河床条件別の移動床部の侵食状況

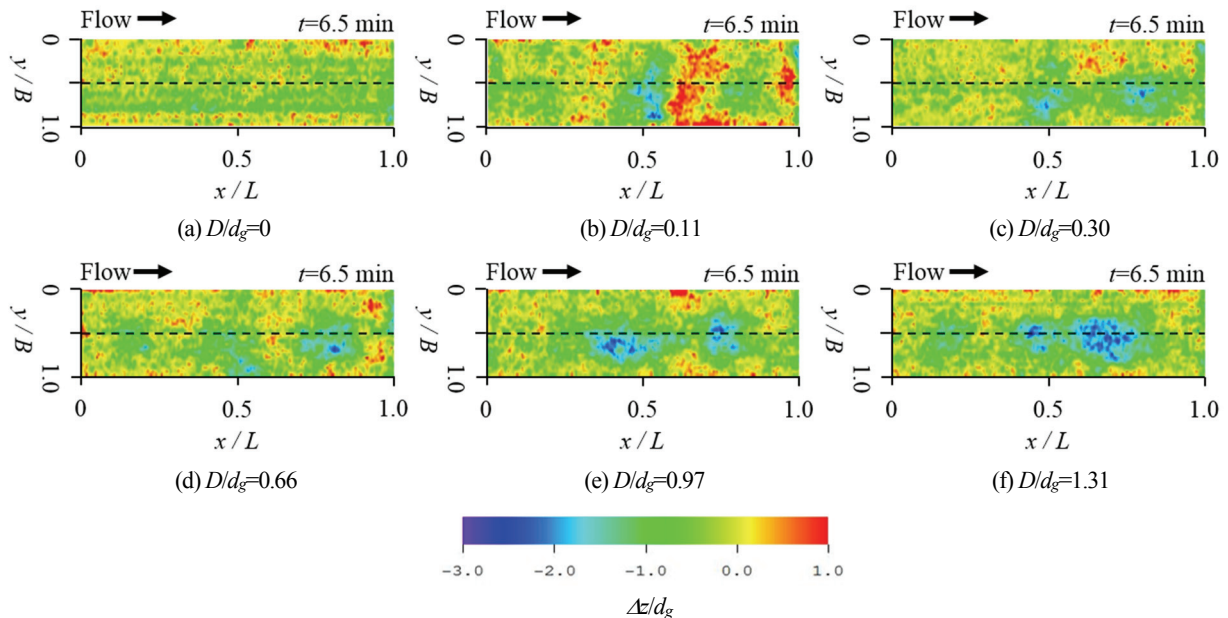


図-8 覆砂量別の移動床部の侵食状況 (Case3)

も検討が必要である。図-7は河床条件別 (Case 1 : RC41, Case 2 : RC42, Case 3 : RC45) の移動床部の侵食状況の変化を示したものである。ただし, Case 2およびCase 3の D/d_g はそれぞれ0.54と0.66である。同図より, 覆砂を行わなかったCase 1では明確な河床変動は見られない。これに対して, 水路の右岸側半幅に覆砂を行ったCase 2とCase 3では主として右岸側で河床変動の進行が確認できる。より詳しく見ると, Case 2では, 覆砂を行わなかった左岸側半幅部分の河床侵食はほとんど見られないが, Case 3では河床侵食が一部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。これは, 覆砂の砂1が左岸側まで運ばれるとともに礫の移動によって下層の砂2が露出し, 礫の移動を促進させた

ためであると考えられる。

図-8はCase 3の河床条件における最終段階の移動床部の河床平面形状を覆砂層厚別に示したものである。同図より, 覆砂層厚が比較的薄い $D/d_g=0.3$ 以下でも, 部分的ではあるが覆砂を行わない左岸側まで河床侵食が及んでいることが確認できる。この影響をより詳しく見るために, 図-9に通水最終段階における移動床部の横断形状 ($x/L=0.75$)を示す。同図より, $D/d_g=0.3$ 以下では左岸側の河床侵食の範囲は狭く, 流路変動に繋がるような流路幅の拡大とはなっていない。図-8(b), (c)から, 別の横断位置では左岸側まで侵食が及んでいる箇所が確認できるものの, 明確な効果は示していない。これに対して $D/d_g=0.66$ 以上の場合, いずれの覆砂層厚においても,

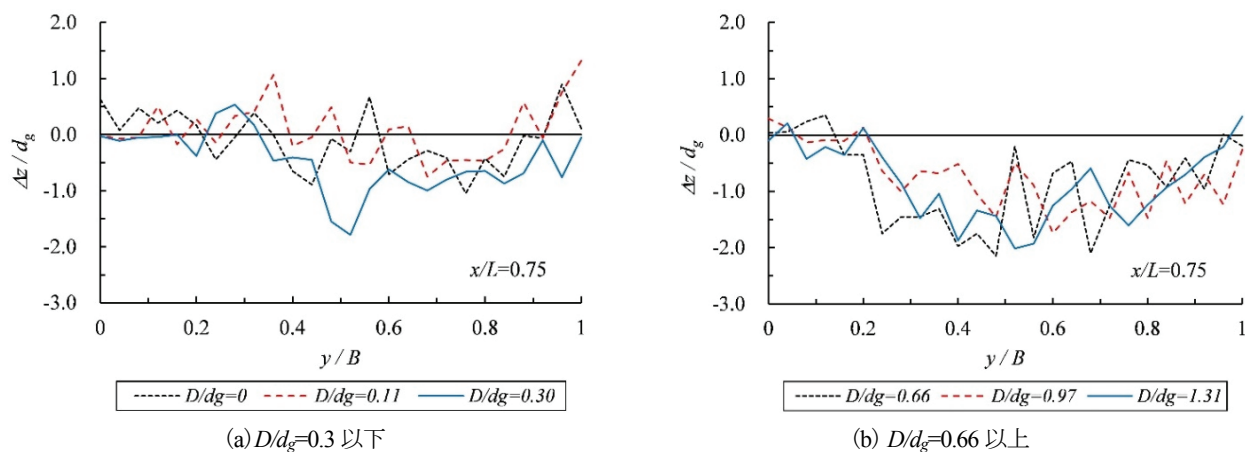


図-9 移動床部横断形状 ($x/L=0.75$)

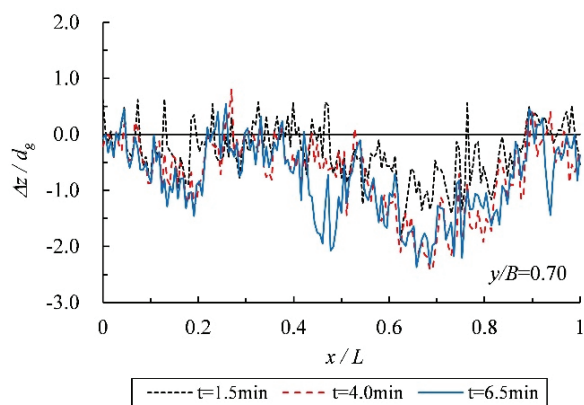


図-10 移動床部縦断形状 ($y/B=0.7, D/d_g=1.31$)

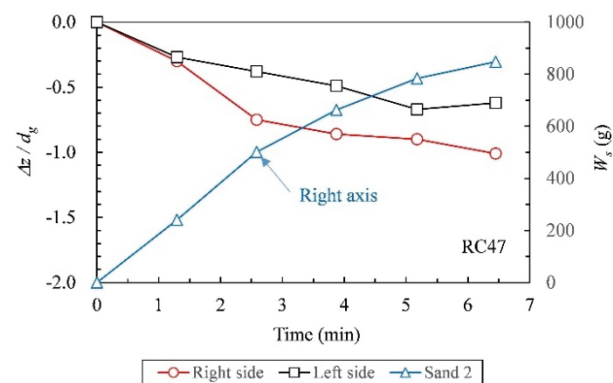


図-11 平均河床低下量 ($x/L=0.4\sim0.8$)

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。

さらに、河床侵食過程について検討を行うために、最も河床が変動したRC47の移動床部の縦断形状($y/B=0.7$)の時間変化を図-10に示す。同図より、河床侵食は移動床部の下流側から発生し、次第に上流側に伝播することがわかる。これは、通水初期には上流側から流送された砂が下流側で効果を発揮し河床侵食が進み、時間の経過に伴ってその影響が上流側にも及ぶことを示唆している。なお、この実験では $x/L=0.4$ より上流側では明確な河床変動は生じていないが、これは覆砂が全て流送されたためである。図-11はRC47の中流部から下流部 ($x/L=0.4\sim$

0.8)における平均河床低下量と下層に存在する砂2の流出量を示している。ただし、河床低下量は覆砂を行った右岸側と行わなかった左岸側を別に示している。同図より、当該範囲では右岸側で礫粒径程度、左岸側でも礫粒径の0.6倍程度の河床低下が認められる。一般に河床の粗粒化が起こるのは表面部分と考えられている¹¹⁾ことから、覆砂を行うことで広範囲にわたって粗粒化の解消が期待できる。また、河床侵食に伴い砂2の流出量も増加していることから、覆砂による砂供給によって表層の粗粒化層よりも下層まで河床侵食が及んでいることがわかる。以上より、覆砂による砂供給を行うことで河床侵食が促進され、流路変動や河床の粗粒化解消につながる可能性があることが示された。ただし、実験では最大で礫粒径の3倍程度まで河床位が低下している場合も確認された。ダム下流河川における過剰な河床低下は、河川の生態環境に悪影響を及ぼす可能性も有しているため、これを制御することも今後検討する必要がある。

5. 現場適用に向けての考察

前節までに礫河床への覆砂が砂礫の移動や河床変動・流路変動に与える影響について検討した。その結果、覆砂によって礫の移動が活発化すること、覆砂量の違いにより土砂の流出量に違いが生じることが確認できた。とくに、 $D/d_g=0.3$ 程度を境に覆砂層厚の変化に対する礫の移動効果が異なることは、覆砂による土砂供給の影響評価に対して重要な情報である。これらの結果をもとに、実河川において覆砂を行う際の留意点について考察する。

a) 適応できる河川物理環境の検討

現在、ダムの下流河川では河床低下や流路の固定化、河床材料の粗粒化など様々な問題が生じている。これらに対して、覆砂による砂供給を行うことで表層の礫が移動するだけでなく流路幅の拡大にも効果を発揮することが示された。したがって、覆砂は流路の固定化と河床材料の粗粒化への対策に適した土砂供給方法であるといえる。しかし、河床低下への対策としては、局所的な河床

侵食を引き起こす可能性も有していることから、現段階では適していないと判断される。

b) 実施時期の考慮

実河川において覆砂を行う場合には、河道への砂供給後にダムによる放流を行って砂を流送させることが考えられる。本実験での通水流量は年最大流量程度の出水を想定したものであるが、河道への土砂供給は河川の生態環境にも影響を及ぼすことから、水生生物の産卵時期等を考慮しなければならない。

c) 適用範囲の検討

実験では河床侵食は覆砂を施した範囲の下流側から発生し、徐々に上流部かつ覆砂を行っていない左岸側にも及ぶことが分かった。また、河床の侵食はとくに覆砂した範囲の中・下流部で顕著であることから、ターゲットとする地点の上流側に覆砂を行うことが有効であると考えられる。なお、覆砂量が多いほどその影響は広範囲に及ぶことが予想される。

d) 土砂供給量についての検討

実際に、河道への覆砂を行う際に最も重要となるのは覆砂量の設定である。本研究では、覆砂量が多いほど礫の流出量は増大し、河床変動・流路変動にも効果を発揮することが示された。一方、コストや生態系への影響を考慮すると、できるだけ少ない覆砂量で効果を発揮させる必要がある。例えば、実河川では覆砂を複数回に分けて実施することも有効な手法の一つであると考えられる。実験結果では、覆砂層厚・礫径比 D/d_g が0.3程度までは覆砂層厚の増加に伴い礫の流出量も大幅に増加するが、これを越えると覆砂層厚の増加に伴う礫の流出効果は低下することが示されており、一度に大量の覆砂を行うことの礫移動への効果はあまり期待できない。本研究では、複数回の覆砂による影響は検証していないが、現場での適用に向けてその効果や影響を検討する必要があると考ええる。

6. おわりに

本研究では、覆砂による礫河床への砂の供給方法が礫の移動性に及ぼす効果を明らかにするとともに、河床変動・流路変動への影響について検討を行った。その結果、以下のことが示された。

- (1) 礫河床に覆砂を行うことで礫の移動性が増し、河床からの流出量が増大する。また、粗粒化河床の下層に存在する砂は、礫の移動を促進させる効果がある。
- (2) 覆砂層厚が大きくなるほど継続的に礫を移動させる効果があり、礫の流出量は大きくなる。しかし、覆砂層厚・礫径比が0.3程度を境に覆砂層厚に対する礫の流出量の傾向が異なる。すなわち、0.3程度までは覆砂層厚の増加に伴って礫の流出量は増加するが、これを越える

と覆砂層厚の増加に伴う礫の流出効果は低下する。

(3) 礫層への砂の供給は河床侵食を促進させる効果があるが、覆砂層厚・礫径比が0.3程度以下の覆砂量では流路幅の拡大までは期待できない。一方、これ以上になると河床侵食が覆砂を行っていない範囲まで及ぶことが確認され、流路変動や河床の粗粒化解消につながる可能性がある。

(4) 覆砂による砂供給を実河川で適用する際の留意事項に関して、覆砂に適した物理環境、実施時期、適用範囲および覆砂量と実施方法について例示した。

謝辞：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。また、混合砂礫の骨格構造と細砂の挙動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。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡野眞久, 菊池幹男, 石田裕哉, 角 哲也: ダム貯水池堆砂とそのダム下流河川還元についての研究, 河川技術論文集, 第10巻, pp.191-196, 2004.
- 2) 山田政雄, 門脇真樹: 二瀬ダムからの実施報告, 置き土シンポジウム, pp.7-14, 2008.
- 3) 岡村政彦: 真名川ダムからの影響調査報告, 置き土シンポジウム, pp.39-44, 2008.
- 4) 坂本博文, 谷崎保, 角 哲也: 河川土砂還元を組み合わせた真名川ダム弾力的管理試験「フラッシュ放流」, 河川技術論文集, 11巻, pp.273-278, 2005.
- 5) 清原正道, 高柳淳二: 排砂の影響検討における置き土実験と覆砂実験の活用, ダム水源池技術研究所報, pp.12-20, 2010.
- 6) 国土交通省河川局河川環境課: 下流河川土砂還元マニュアル(案), 第2版, 2011年3月.
- 7) 山田啓太郎, 三輪 浩, 福井晶浩, 難波 萌: 礫河床における砂礫の移動に及ぼす砂供給の効果, 第71回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅱ(CD-ROM), pp.133-134, 2016.
- 8) 池田 宏, 伊勢屋ふじこ: 粗礫の運ばれやすさに及ぼす砂の影響, 筑波大学水理実験センター報告, No.9, pp.43-47, 1985.
- 9) Wilcock, P.R. and Crowe, J.C.: Surface-based transport model for mixed size sediment, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.129, pp.120-128, 2003.
- 10) Miwa, H. and Parker, G.: Effects of sand content on initial gravel motion in gravel-bed rivers, *Earth Surface Process and Landforms*, Vol. 42(9), pp. 1355-1364, 2017.
- 11) 山本晃一: 洪水時における土砂の移動形態, 沖積河川学, 山海堂, pp.77-95, 1994.

(2018. 4. 3受付)