

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 8 月 2 日現在

機関番号：54301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560631

研究課題名(和文) ダム下流の礫床河川への置き土供給による河床上昇と流路変動に関する研究

研究課題名(英文) River bed aggradation and channel variation due to sediment augmentation to gravel-bed rivers

研究代表者

三輪 浩 (Miwa, Hiroshi)

舞鶴工業高等専門学校・建設システム工学科・教授

研究者番号：70190832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：ダムの下流河川では、河床低下や流路の固定化が進行している。このような現象は治水機能面だけでなく生物生息環境面からも問題となる場合がある。本研究では置き土による河床上昇および粗礫の移動とそれに伴う河床・流路変動に着目し、置き土の設置形態と侵食・流送効率および河床変動への影響、粗礫の移動限界に及ぼす細砂の効果、細砂供給による粗礫の移動とアーモアコート(表層が粗礫からなる河床)の破壊等について検討した。その結果、高効率な置き土の設置形態の条件、粗礫層における細砂含有率と粗礫の移動限界の関係、置き土による河床および流路変動の効果等を明らかにした。また、実河川での置き土の運用法にも言及した。

研究成果の概要(英文)：Many rivers have ecological and physical values that have been impaired by sedimentation. For example bed degradation, armored gravel bed formation and loss of spawning and rearing areas for fish in rivers downstream of dams may be serious problems caused by the cutoff sediment supply. Although sediment augmentation may be useful technique for these problems, this is still in the development stage. In this study, we investigated the bed aggradation and channel variation due to sediment augmentation through clarifying 1) relationship between augmentation arrangements and flush efficiency and transportability of replenishment sediment, 2) effects of sediment augmentation on bed variation, 3) effects of sand content on initial gravel motion in gravel-beds and 4) gravel mobilization in an armor layer due to sand supply as an augmentation. The essential points for sediment augmentation technique in actual rivers are also suggested.

研究分野：水工水理学，土木環境システム

キーワード：礫床河川 アーモアコート 砂礫 移動限界 置き土 河床変動 流路変動

1. 研究開始当初の背景

ダム建設等の人為的インパクトは河道を著しく変化させることが多い。とくに、ダム下流では河床低下や粗粒化に伴う流路の固定化、河道内樹林化等が問題となっており、治水面だけでなく環境面にも配慮した土砂管理が求められている。これらの問題に対応するためには、ダム下流河川における水量と土砂量の供給を確保する必要があり、その一環として河道内に置き土を行い、ダム放流や中小洪水によってこれを侵食・流送させる土砂還元が試行的に実施されている。しかし、この方法は必ずしも体系化されておらず、客観的な指標に乏しいのが現状である。とくに、置き土による河床上昇効果や粗礫の移動とそれに伴う流路変動効果等、基本的かつ系統的な検討が求められている。

従来の置き土に関する研究は、置き土の侵食特性や置き土供給に伴う河床変動に着目したものが多く、しかし、河床上昇や流路変動をより促進させるためには粗粒化が進行して固定化した流路に対するアプローチが必要である。とくに、礫層に砂が混入すると礫の移動限界が低下することが定性的に明らかになっているので、河川においても置き土による細粒土砂の供給によって粗礫を移動させることができれば、流路は再び変動するのではないかと考えられる。礫床河川における粗礫移動に及ぼす細粒土砂含有の効果の定量評価はこれまでほとんど行われていない問題でもあり、本研究で実施することとした。本研究は、河川回復手法の新たな指針を与えるものであるといえる。

2. 研究の目的

本研究は、ダム下流において河床低下と粗粒化によって固定化された流路を対象として、置き土による土砂供給が河床上昇や礫の移動に伴う流路の変動に及ぼす影響を明らかにすることで、効果的な置き土の運用方法の検討に資することを目的としている。研究の主眼は、河床上昇と礫の移動に及ぼす置き土の設置形態の影響を検討すること、および、礫の移動と流路変動に及ぼす砂供給の効果を明らかにすることにある。このため、以下の4点について検討している。

- (1) 粗礫の移動限界に及ぼす細砂の影響評価と移動限界条件の定式化
- (2) 置き土の侵食と流送に及ぼす設置形態の影響と侵食・流送過程のシミュレーション
- (3) 置き土を用いた土砂供給による河床上昇効果
- (4) 置き土による粗礫層の破壊と河床および流路変動への効果

3. 研究の方法

本研究は各種の水路実験からなるが、必要に応じて数値シミュレーションを実施している。以下にそれらの概要を示す。

- (1) 粗礫の移動限界に及ぼす細砂の効果

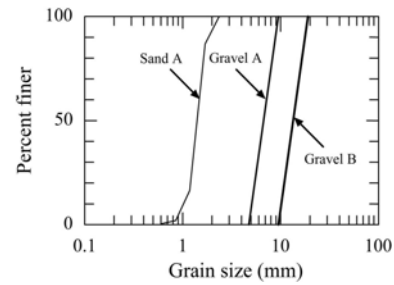


図-1 使用砂礫の粒度分布

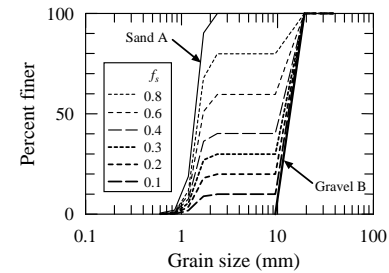
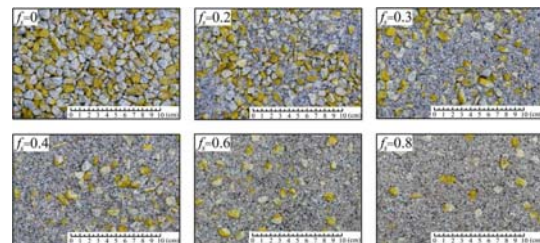
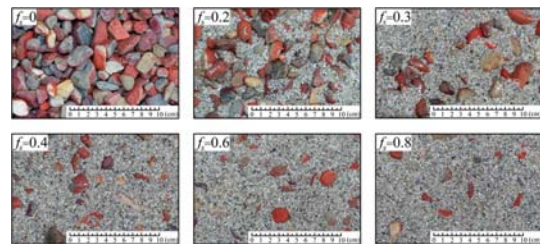


図-2 混合砂礫の粒度分布 (礫B)



(a) 礫Aを用いた混合砂礫



(b) 礫Bを用いた混合砂礫

図-3 実験前の河床状況(平面図)

実験には長さ16m、幅0.5mの直線可変勾配水路を用いた。この水路の中心線上に長さ0.92m、幅0.3m、深さ0.08mの移動床用の箱を設置し、その両側と上下流側に以下に示す礫をニスで貼り付けた固定床部を設けた。実験に用いた砂礫の粒度分布を図-1に示す。砂Aは平均粒径 $d_s=1.4\text{mm}$ 、礫Aと礫Bはそれぞれ $d_g=7.1\text{mm}$ と $d_g=14.3\text{mm}$ を有する。なお、これらの比重は $\sigma_s=2.65$ である。移動床部には礫のみ、または礫と砂を所定の割合で混合させた混合砂礫を充填した。図-2に礫Bを用いた混合砂礫の粒度分布を示す。礫Aを用いた混合砂礫の粒度分布も粒度の範囲が狭くなる他は同様である。図中、 f_s は混合砂礫に含まれる砂の含有率であり、次式で定義される。

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

ここに、 V_g は礫の体積、 V_s は砂の体積である。図-3は実験前の河床の状況を示したもので

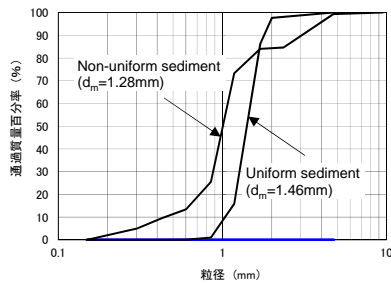


図-4 置き土の粒度分布

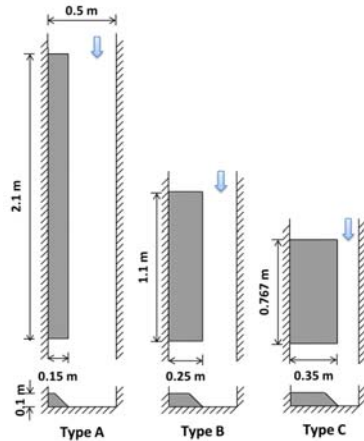


図-5 置き土の形状

あり、2種類の礫に対して $f_s=0$ から0.8まで6段階の混合砂礫を対象として礫の限界掃流力の測定を行った。

実験は、まず移動床部分を金網で被い、所定の流量を通水して等流状態を確認した後、網を取り除き、最初の30秒間とそれに続く150秒間に移動床部から固定床部に移動した礫の個数を計数した。通水中には超音波変位計で水面を測定し、二度の移動個数の計数後に河床面を測定した。なお、礫Aおよび礫Bを用いた混合砂礫の実験における河床勾配はそれぞれ $I=1/100$ 、 $I=1/50$ とした。

(2) 置き土の設置形態と侵食・流送特性

実験は上記(1)と同じ水路で行った。置き土には図-4に示すような粒度分布を有する一様砂と混合砂を用いた。比重は $\sigma_s=2.65$ である。置き土の形状は図-5に示すような3種類とし、土砂の総重量は同一とした。いずれのタイプも水路右岸に沿って設置した。なお、置き土の下流端から水路下流端までの距離は同一とした。本実験では置き土の侵食は側岸侵食によるものを前提としており、通水流量は $Q=5L/s$ と $7L/s$ の2種類とした。

実験は、水路勾配を $I_s=1/100$ に設定し、所定の流量を通水した。通水中は置き土の侵食状況を把握するために、5分ごとに流れ場のスケッチ(置き土の形状、崩落土砂の堆積形状および流れの特徴(跳水等))を行った。また、水路下流端において水路横断方向に10cmごとに区切った採砂箱を設置し、流出土砂を5分ごとに約30秒間採取して流出土砂量の横断分布を測定した。

置き土の侵食過程および土砂流送特性を

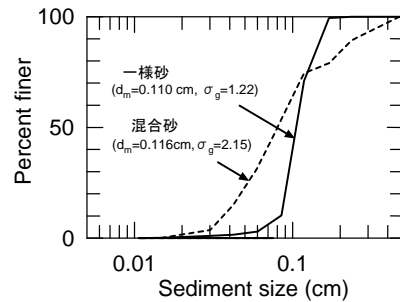


図-6 置き土の粒度分布(河床上昇実験)

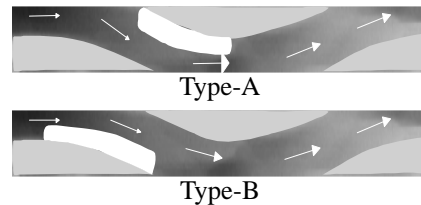


図-7 置き土の設置位置

汎用的に検討するために、数値シミュレーションによる侵食過程の再現計算を行った。計算にはNays2DHを用いた。基礎式は平面2次元流れの連続式と運動方程式および流砂の連続式である。流砂量式として、一様砂では芦田・道上の式、混合砂では芦田・江頭・劉の式を用いた。計算領域は置き土を含む長さ12m、幅0.5mの区間を縦断方向240分割、横断方向25分割($\Delta x=0.05m$ 、 $\Delta y=0.02m$)とした。計算では、CIP法、乱流場はゼロ方程式モデル、マンギの粗度係数は $n=0.02$ とした。それ以外のパラメータは実験と同じである。

(3) 置き土による河床上昇効果

実験には長さ12m、幅0.2mの直線可変勾配水路を用いた。また、実験に用いた砂の粒度分布図を図-6に示す。比重は $\sigma_s=2.65$ である。水路の下流端および上流部に長さ0.4mの固定床部を設置し、その間に上記の砂を敷き詰めて長さ10.8mの移動床区間を設けた。

水路は、単列の交互砂州河床から発達させた水みちを固定して初期河床とした。置き土の設置位置を図-7に示す。Type-Aは流心に近く流れが速い場所、Type-Bは流れが比較的遅い場所である。なお、置き土の寸法は $L=100cm$ 、 $W=5cm$ 、 $H=3\sim 4cm$ 程度である。

実験は、 $Q=400cm^3/s$ で通水して置き土を侵食・流送させた。通水中は5分間隔で置き土形状および流砂方向のスケッチと水路下流端からの流出土砂の採取(約1分間)を行った。通水開始後約10分後に先と同様の方法で水面と河床面を測定した。一つの実験はこれらの測定を3回繰り返した。

(4) アーマーコートの破壊と流路変動

本実験での礫河床への砂供給は、置き土の侵食・流送による方法と覆砂による方法を採用した。主として、前者は礫の移動性の検討、後者は流路の変動特性に着目している。

実験は上記(1)と同じ水路で行った。また、実験に用いた砂の粒度分布を図-8に示す。礫

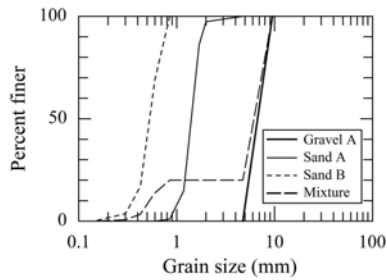


図-8 使用砂礫の粒度分布

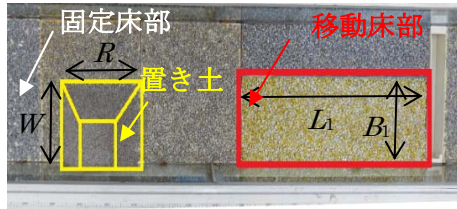


図-9 実験1の河床

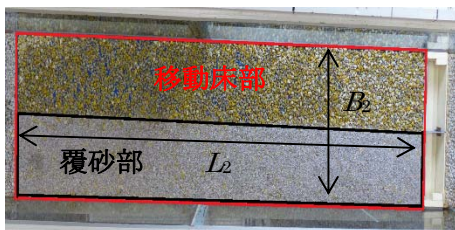


図-10 実験2の河床

Aと砂Aは図-1と同じであるが、本実験では新たに $d_s=0.052\text{cm}$ の砂Bを用いた。置き土による砂供給の実験(実験1)では、図-9のように、水路の右岸に沿って長さ $L_1=0.92\text{m}$ 、幅 $B_1=0.3\text{m}$ の移動床部を設置し、その周辺に上記の礫をニスで貼り付けた固定床部を設けた。移動床部には礫のみを充填した河床と、礫Aと砂Bを4:1の割合で混合した混合砂礫($f_s=0.2$)を充填し、これを流量 $Q_1=5\text{L/s}$ の下で通水してアーモアコート形成させた。また、移動床部の上流に長さ $R=0.315\text{m}$ 、幅 $W=0.25\text{m}$ 、高さ $H=0.1\text{m}$ の置き土を設置した。一方、覆砂による砂供給の実験(実験2)では、図-10のように水路に長さ $L_2=1.8\text{m}$ 、幅 $B_2=0.5\text{m}$ の移動床部を設置し、その上下流側を上記と同じ固定床部とした。なお、移動床部の砂礫も上記と同様としたが、さらに右岸側水路半幅のみ覆砂を行った。

実験1では、表-1に示すように移動床部の条件と置き土の有無および流量によって合計6ケースの実験を行った。なお、置き土の侵食は $Q_2=5\text{L/s}$ で実施し、流送された土砂が移動床部をカバーするように配慮した。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3回繰り返した。一方、実験2では、表-2に示すように先の置き土が覆砂に変わった他は同じ条件である。

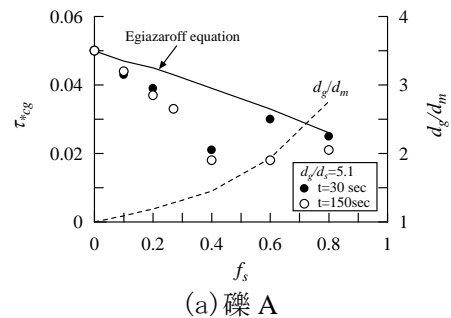
これらの実験での流量は、京都府の由良川にある大野ダムの下流部を想定してフルードの相似則によって決められている。現地の流路幅は約20mであり、縮尺は $\lambda=1/40$ である。したがって、 $Q=15\text{L/s}$ および 30L/s に対する現

表-1 実験1の条件

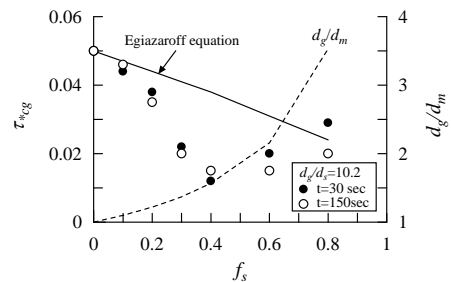
Run No.	Sand f_s	Armour coat Q_1 (L/s)	Augmentation Q_2 (L/s)	Gravel motion Q_3 (L/s)
A02	0	—	—	15
B02	0	—	5	15
C02	0.2	5	5	15
A05	0	—	—	30
B05	0	—	5	30
C05	0.2	5	5	30

表-2 実験2の条件

Run No.	Sand f_s	Armour coat Q_1 (L/s)	Sand covering	Gravel motion Q_3 (L/s)
RC01	0	—	—	15
RC02	0	—	○	15
RC03	0.2	5	○	15
RC11	0	—	—	30
RC12	0	—	○	30
RC13	0.2	5	○	30



(a) 礫A



(b) 礫B

図-11 礫の無次元限界掃流力と砂含有率の関係

地換算流量はそれぞれ $Q_p=150\text{m}^3/\text{s}$ と $300\text{m}^3/\text{s}$ となる。大野ダムは流入流量が $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上で洪水調節を開始するので、上記の流量は平時の放流で対応できる規模である。

4. 研究成果

(1) 混合砂礫河床での砂の含有率を考慮した粗礫の移動限界推定式

① 実験の平均水深と礫の移動個数の関係から、水深の増加に対して粗礫の移動個数が指数関数的に増加することが分かった。また、 $f_s=0.4$ 程度を境に粗礫の移動機構が礫構造河床から砂基盤河床に変化することも明らかとなった。

② 礫の限界掃流力は、礫のみに対する移動限界水深を基本として、細砂を含む場合の移動限界水深を先の近似式から求めて算出した。

$$\tau_{*cg} = \frac{u_{*c}^2}{(\sigma_s - 1)gd_g} \quad (2)$$

ここに、 u_{*c} は限界摩擦速度である。図-11は礫A、礫Bに対する無次元限界掃流力 τ_{*cg} と細

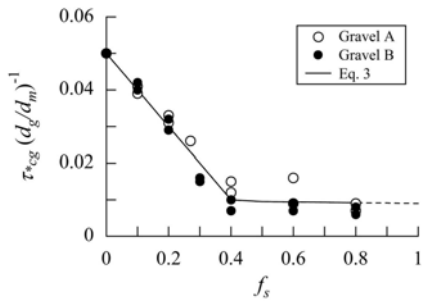


図-12 f_s に対する $\tau_{*cg} (d_g/d_m)^{-1}$ の変化

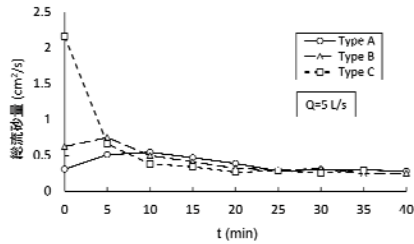


図-13 流砂量の時間変化(一様砂)

砂含有率 f_s の関係を示したものである。両粗礫とも f_s の増加に伴って τ_{*c} は漸減するが、 $f_s=0.4$ を越えると τ_{*cg} は漸増する。図中にはEgiazaroff式による礫の移動限界と礫径・平均粒径比 d_g/d_m が示されているが、Egiazaroff式と実験値との差は $f_s=0.4$ 程度で最も大きくなっていることが分かる。

③図-12は $\tau_{*cg} (d_g/d_m)^{-1}$ と f_s の関係を示したものであり、礫A、礫Bともほぼ同一の変化傾向を示す。これより、礫の無次元限界掃流力 τ_{*cg} は次式で表すことができる。

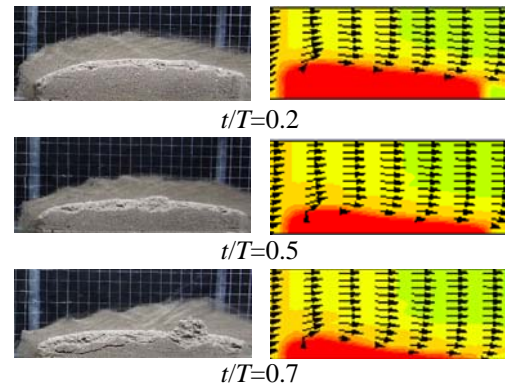
$$\tau_{*cg} = \begin{cases} (0.05 - 0.1f_s) \left(\frac{d_g}{d_m} \right) & f_s \leq 0.4 \\ (0.01 - 0.001f_s) \left(\frac{d_g}{d_m} \right) & f_s > 0.4 \end{cases} \quad (3)$$

(2) 置き土の設置形態と侵食・流送特性

①置き土のタイプ別ではタイプCが最も短時間で侵食が完了する。また、置き土の侵食速度は、置き土の量と高さが同じであれば、置き土の横断幅に比例し、長さに反比例する。また、一様砂に比べて混合砂の方が侵食効率が高い。これは、細粒分は流れが緩やかな場所でも移動しやすく、細粒分の移動によって相対的に露出した粗粒分が移動、これらが繰り返されることによって置き土の侵食が効果的に行われるためである。

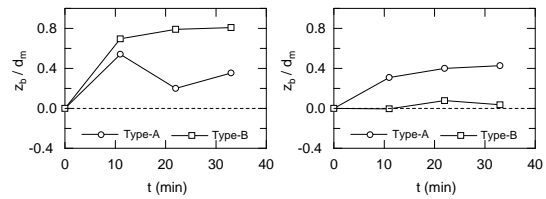
②水路下流端における置き土の横断分布は置き土の設置側に偏っているが、置き土のタイプに関わらず右岸から水路幅の2~4割の領域が最大で、全流砂量の約半分がこの位置に集中している。次いで水路中央部、右岸側壁近傍の順となっている。このような傾向は一様砂と混合砂で共通している。

③置き土のタイプ別の水路下流端における流砂量の時間的変化を図-13に示す。タイプC



(a)水路実験 (b)シミュレーション

図-14 置き土の侵食過程(混合砂, $Q=7L/s$)



(a)一様砂 (b)混合砂

図-15 河床上昇量の時間変化

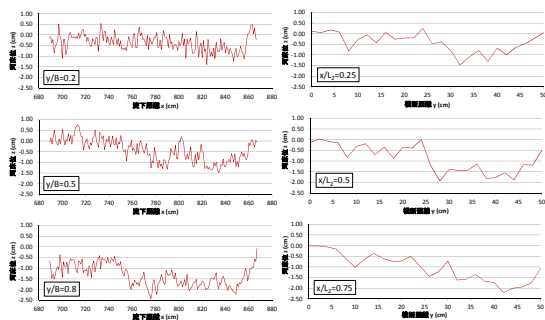
において侵食開始直後に相対的に大きな流砂量が認められるが、それ以降はいずれのタイプでも同程度の流砂量を示し、しかも時間的にも概ね一定値を示している。このことから、いずれのタイプの置き土でも、土砂の定常供給が期待できる。

④図-14は、通水開始からの時間を t 、置き土の侵食時間を T として、侵食過程に関する実験とシミュレーション結果を比較したものである。計算結果は実験結果を概ね再現しており、種々の条件の検討に対して有効であるといえる。

⑤置き土の質と形状の差は侵食時間と侵食初期の流砂量のみに影響するが、流砂量の横断分布や総流砂量の時間的変化にはほとんど影響しないことが分かった。置き土の設置を検討する際には、数値シミュレーションを援用するとともに、このような特性を考慮する必要がある。

(3) 置き土の流送・堆積性状と河床上昇効果

①置き土下流2m区間の河床変動量の平均値の時間変化を図-15に示す。まず、一様砂では両タイプの置き土で河床上昇がみられ、置き土の流送が河床上昇に寄与している。ただし、通水開始後11min時点では両タイプとも同程度の河床上昇を示しているが、その後は違いが見られる。これは、Type-Aの置き土は効率的に下流へ流送され、多くの土砂が置き土下流2m区間よりも下流に流送されたのに対し、Type-Bは下流への流送能力が低く置き土の直下流域に堆積したためである。一方、混合砂では、Type-Aにおいて河床上昇が確認できるが、Type-Bではほとんど上昇がみられない。これは、Type-Bでは置き土の残留と置き土の下流2m区間の堆積土砂が相対的に少



(a) 縦断形状 (b) 横断形状
図-16 移動床部の河床縦横断形状(Run RC13)

ないことに起因している。

②Type-Aは比較的広範囲に河床上昇がみられるが継続性に乏しい。一方、Type-Bは下流にまで流送は及ばないものの、狭い範囲で河床上昇が期待できる。このように、設置位置により河床上昇範囲に違いがあるため、河川の状態や状態、目的に応じて置き土位置を設定する必要がある。

(4)アーマーコートの破壊に及ぼす細砂供給の効果と流路変動

①置き土による砂の供給を行うことで置き土を行わない場合に比べて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。また、置き土を行った場合においてアーマーコート河床の方が礫流出量はより大きい。アーマーコート河床では礫の流出量増加に伴って河床中に存在する砂Bの流出量が増加し、上層の礫の移動によって混合砂礫層の下方まで侵食が及び、下層の砂Bが露出することによって礫の移動が促進したことが分かった。なお、このような効果は流量が大きいほど顕著に現れることも明らかとなった。

②覆砂を行うことによって粗礫の移動が活発となり、河床変動と流路の拡幅が促進される。図-16にその一例を示す。(a)は実験最終段階での移動床部の河床縦断形状、(b)はその河床横断形状である。(a)より、覆砂を行わなかった左岸側($y/B=0.2$)では河床はほとんど変化していないが、覆砂を行った右岸側($y/B=0.8$)で河床変動が顕著に生じていることがわかる。また、横断方向の河床変動に着目すると、(b)に示すように河床侵食は流下に連れて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、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している。

以上のように、砂を用いた置き土がダム下流における礫床河川の回復のための粗礫の移動に関する有効な選択肢の一つとなるといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ①Miwa, H.: Effects of sediment supply on low-flow channel formation, Proceedings of

the 11th International Conference on Hydro-Science and Engineering, pp.615-624, 2014.

- ②Miwa, H.: Low-flow channel variation due to sediment augmentation, Proceedings of the 12th International Symposium on River Sedimentation, pp.759-765, 2013.
③Miwa, H. and Parker, G.: Numerical simulation of low-flow channel evolution due to sediment augmentation, International Journal of Sediment Research, Vol.27, No.3, pp.351-361, 2012.

〔学会発表〕(計8件)

- ①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), 2016.
②山田啓太郎, 福井晶浩, 難波 萌, 三輪 浩: 礫河床への砂供給による砂礫の移動と流路変動, 平成28年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), II-18, 2016.
③三輪 浩, 樋口涼士, 廣田陽平, 大橋一弘, 増井志帆: 混合砂礫床における粗礫の移動限界に及ぼす細砂含有の効果, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集II (CD-ROM), pp.401-402, 2014.
④Miwa, H. and Parker, G.: Effects of fine sand on incipient motion of coarse gravel in gravel riverbeds, Poster presentation at the 8th International Gravel Bed Rivers Workshop (GBR8), Kyoto University, 2015.
⑤樋口涼士, 廣田陽平, 増井志帆, 大橋一弘, 三輪 浩: 二粒径混合粗礫床における粗礫の移動限界と細砂の影響, 平成26年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), II-20, 2014.
⑥足立嘉朗, 吉岡和哉, 三輪 浩: 粗礫の移動限界に及ぼす細砂含有の影響, 第68回土木学会年次学術講演会講演概要集II (CD-ROM), pp.209-210, 2013.
⑦三輪 浩: 粗礫の移動限界に及ぼす細砂の効果, 砂防オープンゼミ, 2013年6月, 京都大学.
⑧足立嘉朗, 吉岡元輝, 三輪 浩: 粗礫の限界移動限界に及ぼす細砂の影響, 平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), II-54, 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三輪 浩 (MIWA HIROSHI)

舞鶴工業高等専門学校・建設システム工学科・教授

研究者番号: 70190832

(2) 研究協力者

Gary Parker