

急流河川における土砂還元時の自然石落差工の効果に関する研究

株式会社ウエスコ 学生会員 加瀬瑛斗
玉野市 学生会員 浦上清彦
岡山大学 正会員 前野詩朗

エス・バイ・エル・カバヤ株式会社 伊藤祐哉
岡山大学大学院 学生会員 ○青木千卓
国土交通省中国地方整備局 宮崎 貢

1. はじめに

ダムの建設によって上流からの土砂供給が減少する下流河川では、アーマー河床化や河床低下が生じる。近年、こうした物理環境の変化が、河川生態へ与える影響（例えば、粗粒化による魚類や底生動物の種数・生息数の減少等）について指摘されている¹⁾。これら、土砂動態の変化による現状問題の対応策として、下流河川への人為的な土砂供給（土砂還元）が検討され、全国 20 箇所以上のダムで試行されている²⁾。しかしながら、ダムの立地に特有の急流河川では、土砂の通過速度が大きいために、河床に土砂がとどまりにくい。このため、土砂還元の効果が十分に発揮できない場合や、長期の持続が期待できない可能性がある。また、そういった河川では、岩盤が河床に露出している場合も多く見られるが、岩盤河床は粗度が小さく、土砂がとどまることは困難である。こうした課題に対して、著者らは河道内に分布する巨石を再配置して滞筋に落差工を構築し、流下エネルギーを低減させて土砂の流亡を抑制する手法を提案している³⁾。本研究では、提案の実施に向けた取り組みの一環として、自然石落差工の設置手法及び効果について、水路実験により検討した。

2. 実験概要

実験水路を図-1 に示す。縮尺は、想定する現地河道及び実験水路を考慮して約 1/10 とした。実験では、落差工の形状、段数、現地で想定する巨石のサイズを変化させ、流速分布及び、水面形を計測した。また、土砂還元を想定し、上流から土砂を供給した場合について、落差工周辺への堆積状況（堆積厚、堆積量）を把握した。

実験は、表-1 に示す 7 ケースで行った。Case2～Case4 については、図-2 に示すように自然石で落差工を構築する。自然石の粒径は、1 段の場合で約 0.2m、3 段の場合で約 0.1m とした。流量は、現地河道で年数回程度発生する洪水 ($Q=30\text{m}^3/\text{s}$) を想定し、 $0.095\text{m}^3/\text{s}$ とした。土砂供給は、落差工上流側で発生する跳水の影響を避けるため、落差工から十分に離れた位置で行った。供給量は、

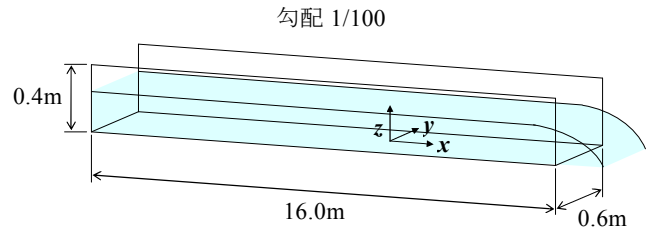


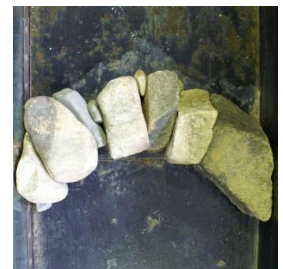
図-1 実験水路

表-1 実験ケース

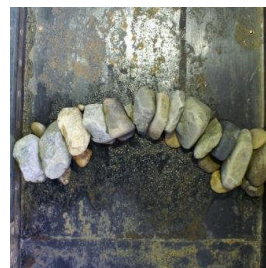
Case	落差工形状	供給土砂	礫投入
Case1	なし	単一粒径 (6.7mm)	なし
Case2	直線型 1 段		
Case3	アーチ型 1 段		
Case4-a	アーチ型 3 段	単一粒径 (3.5mm)	なし
Case4-b	アーチ型 3 段		
Case4-c	アーチ型 3 段		あり
Case4-d	アーチ型 3 段	混合粒径 (2.8～20mm)	あり



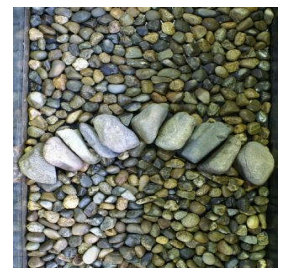
Case2



Case3



Case4-a, Case4-b



Case4-c, Case4-d

図-2 落差工の設置状況

いずれのケースも 0.05m^3 とし、供給箇所への堆積を防ぐため、60 分かけて連続的に供給した。土砂供給完了後 60 分間通水したのち、土砂の堆積状況を計測する。なお、供給する土砂の粒径は（想定する現地河道で不足し、供給が期待される粒径を参考に）、Case1～Case4-a が平均 6.7mm （単一粒径）、Case4-b, Case4-c が平均 3.5mm （単一粒径）、Case4-c が $2.8\sim 20\text{mm}$ （混合粒径）とした。Case4-c 及び Case4-d は、河床粗度が小さく土砂がとどまりにくい岩盤河床における対策として、落差工で創出された淵（落差工上流のプール）に礫を投入して粗度を増大させ、土砂の補足を促す施策について検討したケースである。

3. 実験結果と考察

3.1 落差工の形状に関する検討

ここでは、落差工の形状について、流況（水面形、流速）及び土砂堆積状況により、効果の比較検討を行う。対象とする実験ケースは、Case1, Case2, Case3, Case4-a の4 ケースとする。

a) 水面形

図-3 は、各ケースにおける水路中央（ $y = 0.3\text{m}$ ）の水面形を示している。Case1 を除いて、落差工による堰上げで水位が上昇する。Case2（直線型 1 段）と Case3（アーチ型 1 段）では、後者の方が落差工上流の水位が低い。アーチ型は落差工天端の越流幅が長く、単位幅流量が直線型に比べて減少するため、越流水深及びせき上げによる水位上昇が小さくなっている。Case4-a（アーチ型 3 段）は落差工に用いた自然石の大きさが他のケースより小さいため、1 段のせき上げ高は若干小さくなる。落差工設置による治水面・生態面（上下流の連続性）への影響を考慮すれば、（土砂堆積が期待できれば）せき上げの小さいアーチ型の“多段式”落差工が望ましいと考えられる。なお、アーチ型は、直線型に比べて力学的に破壊（自然石の流失による破壊）しにくいことが知られている。

b) 流速分布

各ケースの水路中央（ $y = 0.3\text{m}$ ）における流速の流下方向成分を図-4 に示す。落差工越流部の流速は、直線型に比べてアーチ型（Case3, Case4-a）で大きい。前述のように、アーチ型の方が越流水深が小さいためである。また、落差の段数に着目すると、3 段の場合（Case4-a）は、1 段（Case2, Case3）に比べて落差下流（Case4-a

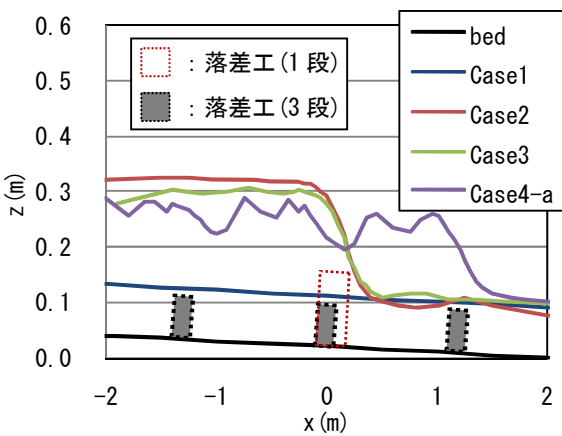


図-3 落差工周辺の水面形 (落差工形状の比較)

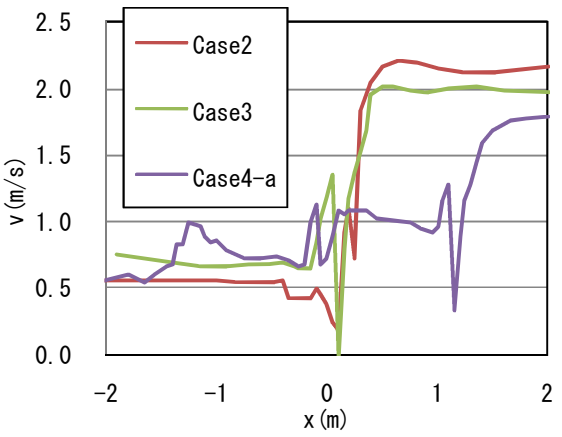


図-4 落差工周辺の流下方向流速 (落差工形状の比較)

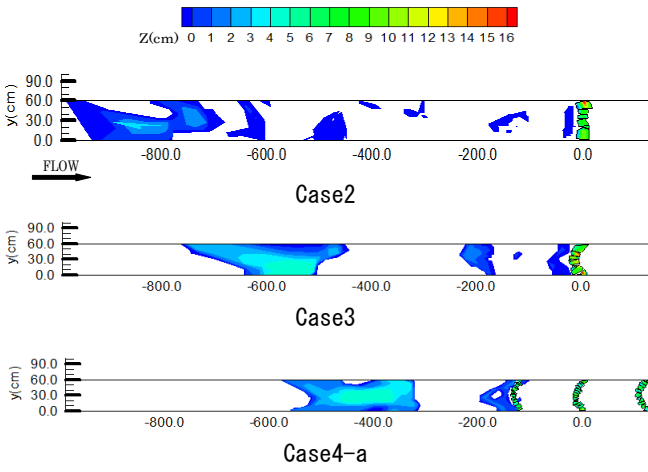


図-5 土砂堆積形状 (落差工形状の比較)

表-2 土砂堆積量 (落差工形状の比較)

Case	堆積量 (m ³)	堆積量/供給量 (%)
Case1	0.0000	0.0
Case2	0.0494	98.8
Case3	0.0500	100.0
Case4-a	0.0495	99.0

は最下流の落差の下流)の流速が小さい。一般的に、落差工の直下では跳水による洗掘が生じるが、落差が小さいことで、この影響が緩和できると考えられる。

c) 土砂堆積状況

鋼製の水路床は粗度が小さく、落差工なしの場合 (Case1) は、高速流と相まって、土砂は堆積せず全量が流失する。現地の岩盤河床でも、同様の現象が生じていると考えられる。一方、落差工を設置した場合は、いずれのケースでも落差工の上流側に土砂が堆積する (図-5)。通水終了後の堆積量は、概ね 98%以上であり (表-2)、設定流量 ($Q=0.095\text{m}^3/\text{s}$) では、十分な土砂補足効果を有することが確認された。

3.2 プール内への礫投入に関する検討

3.1 において、落差工による土砂流亡の抑制効果が示されたが、現地河道の岩盤河床区間では、河床粗度が小さく、十分な土砂補足効果が得られないことが指摘される。これに対しては、落差工上流に創出される淵に、スイカ大の礫を投入 (河床に敷設) し、粗度を増大させて土砂堆積を促す手法が提案される。ここでは、礫投入による土砂補足効果を検証するために、Case4-b と Case4-c を対象に、流況及び土砂堆積状況の比較を行った。なお、Case4-a の土砂堆積量 (99%) を考慮すれば、上流側の落差で全ての土砂がトラップされ、下流に供給されていないと考えられたため、供給土砂の粒径を小さくして (平均粒径 3.5mm) 実験を行った。

a) 水面形

図-6 に示すように、Case4-b 及び Case4-c で、水面形状に大きな違いは現れていない。波立ちの位相がずれているが、これは、礫敷設により各落差工間における流れの乱れが少なくなったためと考えられる。

b) 流速分布

平面流速分布を図-7 に示す。礫を敷設した Case4-c では、礫の粗度によって流速が低下すると予想されたが、実験結果では、有意な変化は見られなかった。これは、粗度増大よりも、落差工によるせき上げによる影響が大きかったためと考えられる。

c) 土砂堆積状況

土砂の堆積状況を比較すると (図-8)、Case4-c は Case4-b よりも流速が大きいにも関わらず、広範囲で土砂の堆積が確認された。河床において、敷設した礫の遮蔽効果によりせん断力が小さくなること、河床粗度が大

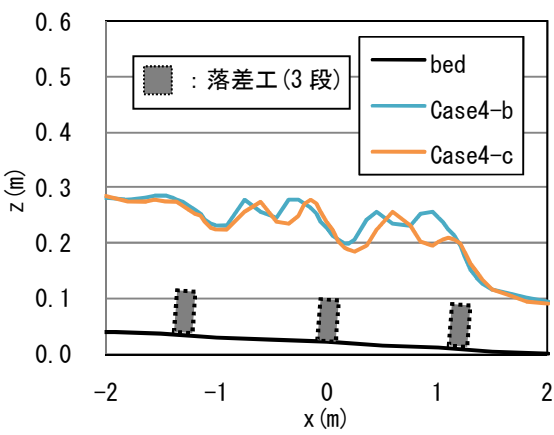


図-6 落差工周辺の水面形 (礫投入手法の効果検証)

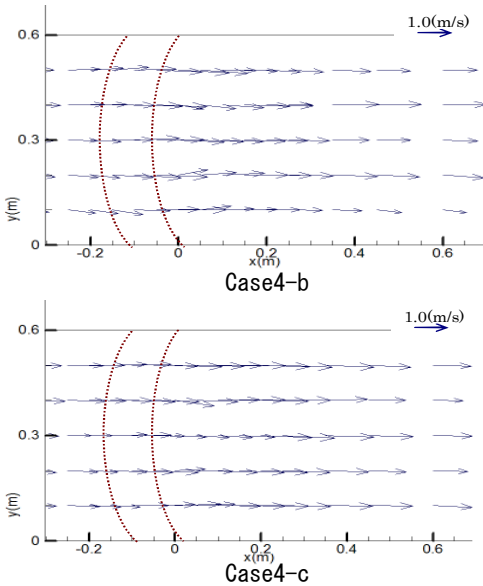


図-7 落差工周辺の平面流速分布 (礫投入手法の効果検証)

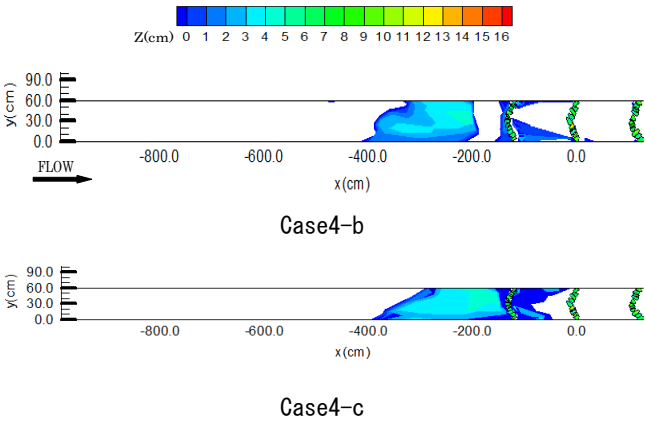


図-8 土砂堆積形状 (礫投入手法の効果検証)

表-3 土砂堆積量 (礫投入手法の効果検証)

Case	堆積量 (m ³)	堆積量/供給量 (%)
Case4-b	0.0474	94.8
Case4-c	0.0490	98.0

きくなり、底面流速が小さくなることなどが要因と考えられる。土砂堆積量を比較しても、Case4-cの方が、わずかに多かった(表-3)。

3.3 混合粒径を投入した場合に対する検討

ここまでは、落差工の形状や、礫投入による土砂補足の現象を理解しやすくするために、単一粒径の投入土砂を使用して実験、結果の解析を行った。実際の土砂還元では、河道に供給する土砂の採取場所(多くの事例では、当該流域の上流ダムや河道内の掘削土砂)によって異なるものの、大きささまざまなサイズの土砂が供給される。そこで、ここでは、Case4-cの供給土砂を混合粒径に変更してCase4-dとし、実験を行った。

通水終了後の堆積状況を図-9 上に示す。上流側の落差工上流に、ほぼ全ての土砂が堆積している。Case4-c(同時刻で、中央部の落差工上流にも土砂が堆積している)と比較して、土砂の移動が遅いことを示しているが、これは、供給土砂が、単一粒径の場合(Case4-c: 3.5mm)よりも大きい土砂(最大 20mm)を含んでいるためである。

Case4-dについては、計測後、さらに通水を続け、供給土砂の移動が収束した場合についても、土砂堆積状況を把握した。図-9 下に、土砂移動収束後(12 時間後)の堆積形状を示す。3 段の落差の上流全てに土砂が堆積していることが分かる。堆積量は、投入量比 85%であり、一部は下流へ流亡するものの、十分な土砂補足効果が確認された。なお、通水中、礫間に入り込んだ土砂は掃流されにくく、その場に留まるが、礫の上に堆積した土砂は、上流からの新たな土砂供給に伴って、徐々に下流へと移動していく様子が見られた。

4. 結論

本研究で得られた結果と考察について、以下にまとめる。

①落差工を設置した全ケースにおいて、土砂の捕足効果が確認された。治水面・生態面への影響を考慮すれば、せき上げの小さいアーチ型の多段式落差工が望ましい。

②プール内へ礫を投入(敷設)することにより土砂堆

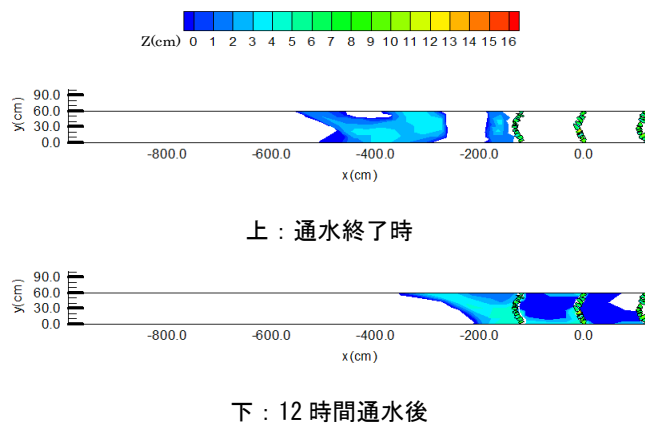


図-9 Case4-d の土砂堆積形状

積面積の拡大が確認された。土砂がとどまりにくい岩盤河床区間において、落差工の効果向上が期待できる。

③多段式落差工では、混合粒径の土砂を供給した場合においても、3 段の落差の上流全てに土砂の堆積が確認され、十分な土砂補足効果が得られることが示された。

課題としては、流量、供給粒径、河床に敷設する礫サイズ等の条件を変更した実験により、礫間への堆積状況や堆積機構に関する知見を蓄積するとともに、日々進行する河川環境の劣化を考慮すれば、まずは得られた実験結果を踏まえて現地で試験施工を行い、そのモニタリング結果をもとに、落差工構築手法を最適化していくことが求められる。

参考文献

- 1) 吉田隆年, 岩城安英, 五十嵐崇博: ダム事業が下流河川の物理環境や生物の生息状況に及ぼす影響, 平成 17 年度ダム水源地環境技術研究所所報, pp.72-77, 2006.
- 2) 角哲也, 藤田正治: 下流河川への土砂還元の現状と課題, 河川技術論文集, 第 15 巻, pp.459-464, 2009.
- 3) 加瀬瑛斗, 前野詩朗, 宮崎貢: 温井ダム下流河川における土砂動態の現状と環境改善のための河道システムの検討, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1255-1260, 2010.