

黒部川愛本堰堤から排砂を促進するための技術 開発と交互砂州河道の回復

後藤 岳久¹・桶川 勝功²・福岡 捷二³・福田 朝生⁴

¹正会員 中央大学研究開発機構 機構助教 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: goto510@tamacc.chuo-u.ac.jp

²国土交通省 北陸地方整備局 前黒部河川事務所 建設専門官
E-mail: okegawa-k84nb@mlit.go.jp

³フェロー 中央大学研究開発機構 教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

⁴正会員 中央大学研究開発機構 機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
E-mail: t-fukuda@tamacc.chuo-u.ac.jp

黒部川では出し平ダムと宇奈月ダムとの連携排砂が行われているが、愛本堰堤上流では、堰堤の存在と河幅の不規則な広がりにより石礫土砂が河道に堆積し易く、下流河道に対して連携排砂が十分効果を発揮出来ていない。一方、愛本堰堤下流河道では、平成7年洪水以降、交互砂州の滞筋が護岸沿いに直線化し、滞筋の河床低下が進行し、水衝部対策としての既設縦工群が有効に機能しなくなっている。本研究では、2基の巨石付き盛土砂州と愛本堰堤からの石礫の排出促進により、既設縦工群を持続的に活用して安定で維持管理可能な交互砂州河道に是正することを目的とし、河川横断構造物から砂礫や石礫の排出を促進する石畳排砂水路を開発する。そして、愛本堰堤から下流河道への石礫土砂の排出促進が、下流河道の改善に及ぼす効果とその有効性を示す。

Key Words: cross-river structure, sediment flushing channel, stony bed river, alternate bar

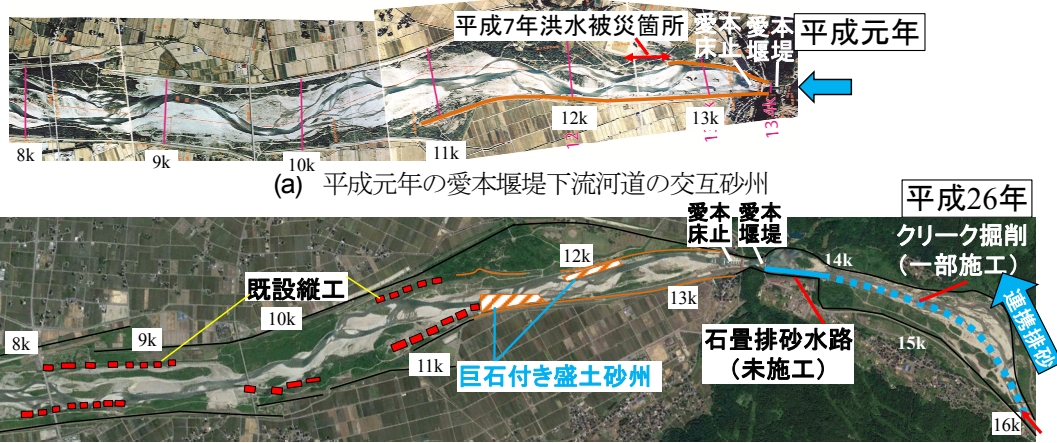
1. 序論

黒部川の扇頂部に位置する愛本地点の下流河道では、やや右岸に向けられた愛本床止(13.2km)の流れの攻撃角により、平成初頭までは水衝部位置の規定された交互砂州が形成されていた(図-1(a))。交互砂州の水衝部位置は過去約40年間、ほぼ変わらず安定しており、水衝部付近の堤防や高水敷を洪水流による侵食から防ぐために水衝部に縦工群を設置してきた¹⁾。平成7年7月には過去約40年間で最大規模の洪水が発生し、その結果、愛本床止直下流右岸の水衝部で河岸が大規模に侵食された。その後、被災箇所新たに護岸を設置したことにより、洪水流が床止直下流右岸の護岸沿いを走るようになり、護岸に沿って直線的な滞筋が形成されるようになり(図-1(b))、滞筋の河床低下が進行した。また、滞筋の直線化は、交互砂州の水衝部位置や水衝部への水流の当たり方を変化させたため、交互砂州の水衝部に設置された縦工群が有効に機能しなくなってきた。このため著者らは、

黒部川の過去の安定な交互砂州河道を回復し、既設の縦工群を持続的に活用して維持管理の可能な川づくりを目指している。

福岡らは、急流河川の望ましい河道とは、連続的に形成された自然砂州により洪水の主流が堤防から離れ、河岸の洗掘・侵食が軽減される河道であることに着目している。そこで常願寺川において、砂州を再生してその前面を巨石で保護し(巨石付き盛土砂州)、砂州の先端部で洪水流を適切に撥ねることで望ましい石礫交互砂州河道に是正して来た³⁾。黒部川においても愛本床止下流に2基の巨石付き盛土砂州を設置することにより(図-1(b))、護岸沿いの流れの集中を是正し、水衝部の既設縦工群を活用し得る交互砂州の低水路線形の蛇行が回復し得ることを示している⁴⁾。

一方、黒部川では、平成13年から宇奈月ダムと出し平ダムで連携排砂が実施され、近年では、宇奈月ダム貯水池からダム下流河道に大きい石礫が排砂されるようになって来ている²⁾。しかし、宇奈月ダムの下流約7kmに



(a) 平成元年の愛本堰堤下流河道の交互砂州
 (b) 現況河道（航空写真：平成26年）と河道是正策
 図-1 黒部川の交互砂州と対象区間で検討している一連の河道是正技術

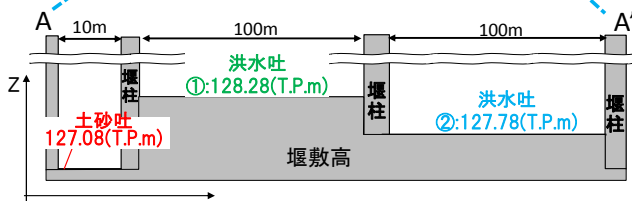
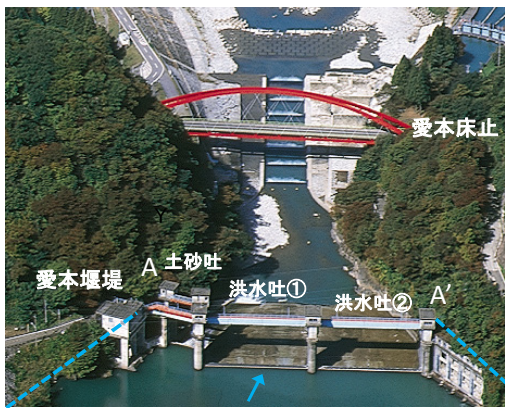


図-2 黒部川の愛本堰堤の土砂吐と各ゲート敷高

位置する愛本堰堤(13.55km)付近(図-2)では、堰堤の存在と15km付近の広い河幅により、ダムから排砂された土砂が堆積し易く、愛本堰堤の下流河道に対して連携排砂の効果を十分発揮出来ていないことが指摘されている²⁾。前述のように愛本堰堤下流河道の滞筋は河床低下傾向であるため、宇奈月ダムから排砂された土砂を愛本堰堤上流河道になるべく留めることなく、堰堤下流に排出することが不可欠である。

本研究では、愛本堰堤から石礫土砂の排出を促進する石畳排砂水路とクリーク水路の建設を提案し、これらと2基の巨石付き盛土砂州、既設縦工群が一体的に機能することで、安定な石礫交互砂州河道に是正する技術の提案を行う。

2. 黒部川の愛本堰堤から石礫土砂の排出を促進する技術の考え方

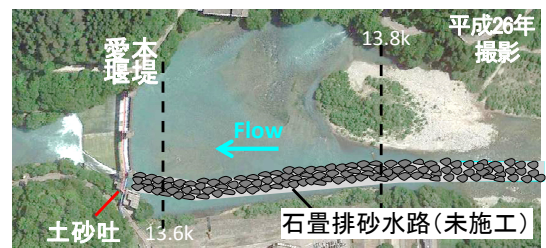


図-3 愛本堰堤上流の石畳排砂水路

図-1は、黒部川の平成元年と平成26年における交互砂州河道の航空写真および対象区間で検討している一連の河道是正技術を示す。まず、河幅の広がる15km付近では土砂が堆積し易いことから、クリーク水路を掘削して流れを集中させ、石礫が愛本堰堤直上流付近(14km)まで流下することを促進する。クリーク水路の勾配は平均河床勾配である1/100とし、愛本堰堤下流河道の河床を構成する粒径(10~20cm)が排砂促進出来るように、水路幅と掘削深が決定されている²⁾。

次に、クリーク水路を通じて14km付近まで排出されてきた石礫を、愛本堰堤下流に排砂促進する方法を説明する。図-2は愛本堰堤(13.55km)の各ゲート位置とその敷高を示し、図-3は愛本堰堤上流の石畳排砂水路設置イメージを示す。愛本堰堤には土砂吐が左岸側に設置され、その敷高は右岸側の洪水吐②より約70cm、中心の洪水吐①より約1.2m低くなっている。この土砂吐にクリーク水路を流下して来た石礫を導流するため、流れの抵抗が小さくなる石畳の排砂水路を図-3のように設置し、愛本堰堤下流に石礫の排出を促進する。ここで、石畳排砂水路は、巨石を河床に十分埋め込み造るものとする。

図-4は、平成25年6月洪水における宇奈月ダムと出し平ダムの連携排砂時の宇奈月ダム貯水位と流量ハイドログラフを示す。連携排砂時には、宇奈月ダムは水位低下操作を行い、ダム貯水池内を河道の状態(自然流下状態)とすることで、ダムから砂礫・石礫を下流河道に排砂している。宇奈月ダムの水位低下操作時や自然流下状態の時間帯では、ダムから流量約400~600m³/sを長時間

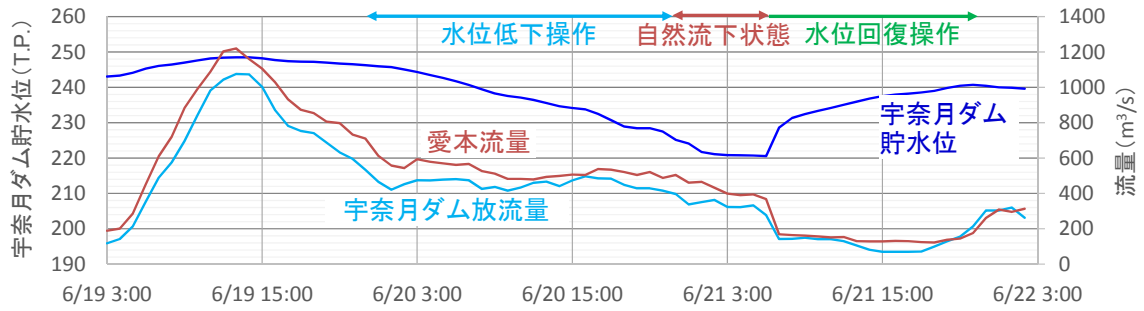


図4 平成25年6月洪水における連携排砂時の宇奈月ダム下流河道の流量ハイドログラフ

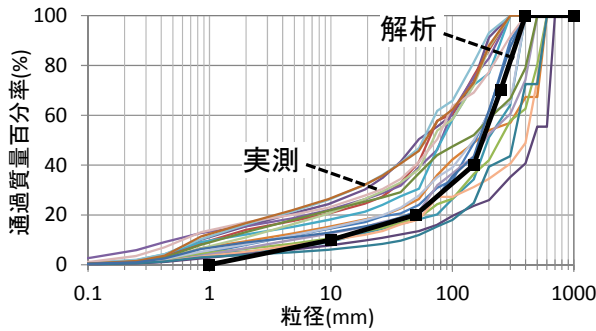


図5 河床材料粒度分布 (実測と解析)

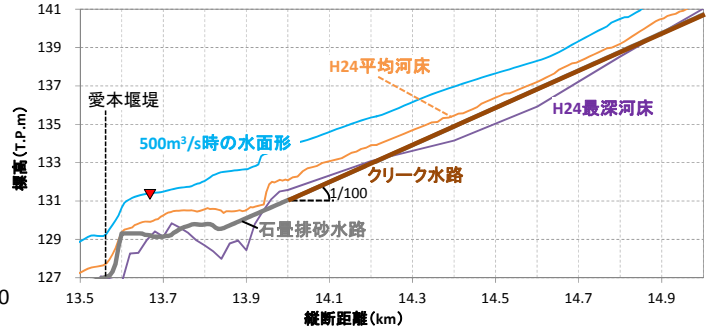


図6 現況河床高と石畳排砂水路、クリーク水路高の縦断分布

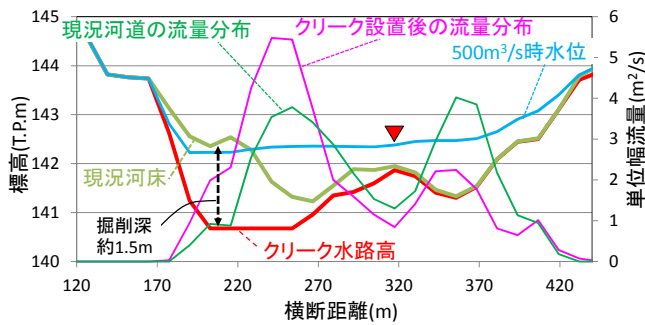


図7 クリーク水路の横断形状と流量分布(15.0km)

放流している。約 $400\sim 600\text{m}^3/\text{s}$ の流量は、愛本堰堤下流河道の低水路満杯程度の流量であり、下流河道では掃流力が著しく大きくなり、河岸や河床は極めて厳しい洪水流を受ける状況となる。このことから、 $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度の流量に対して、愛本堰堤から石礫の排砂促進を可能とする石畳排砂水路を設置し、堰堤下流河道の河床低下を抑制することを狙いとする。図-5 は、対象区間の河床材料粒度分布を示す。各地点で採取された河床材料の d_{60} の平均値は $10\sim 20\text{cm}$ であることから、石畳排砂水路はこれらの粒径集団が下流河道に排出されるように設計する。

図-6 は、愛本堰堤上流の現況河道(H24)の最深河床高・平均河床高と石畳排砂水路・クリーク水路の設置高を示す。クリーク水路の勾配は、前述のように黒部川の平均河床勾配(1/100)とし、水路幅は $40\sim 60\text{m}$ とした。これにより、河幅の広い 15km では、クリーク水路に流れが集中していることが分かる(図-7)。石畳排砂水路の幅はクリーク水路と連続性を持たせ、同様に $40\sim 60\text{m}$ とする(図-8)。石畳排砂水路の勾配は、石畳排砂水路上での水深の増加と流速の減少を小さくし、石畳排砂水路上に

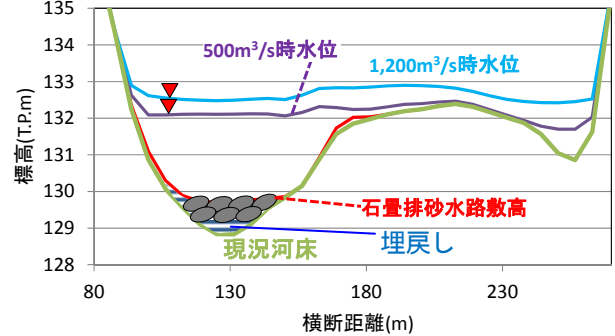


図8 石畳排砂水路の横断形状(13.8km)

表-1 実験結果の水力諸量

	石礫土砂層厚0.15(m)
水深	1.95(m)
水面勾配	1/100
平均流速	4.7(m/s)
逆算粗度	$0.033\text{m}^{-1/3}\text{s}$
摩擦速度	0.44(m/s)

石礫が出来るだけ堆積しないよう、次章の河床変動解析法を用いて試行錯誤的に図-6 のように設定した。

3. 石畳排砂水路上の流れと流砂運動を評価するための石礫河川の河床変動解析法の検討

石礫河川では、大きい石を含む幅広い粒径集団で河床材料が構成され、大きな石が河床表層の凹凸分布を形成して洪水流と流砂運動を規定していることから、長田らは河床表層の凹凸分布を考慮した石礫河川の河床変動解析法を構築してきた⁹⁾。このため、長田らの石礫河川の河床変動解析法は、我が国の代表的な急流石礫河川である常願寺川の洪水流と河床変動を精度良く説明してきた。

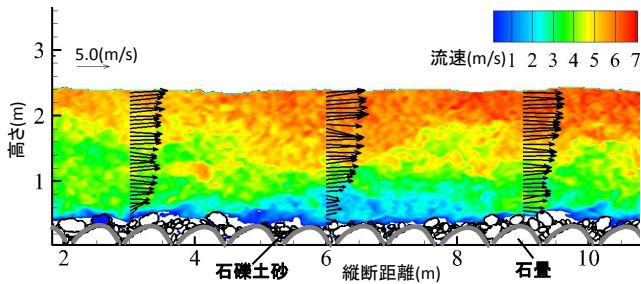


図-9 石畳排砂水路の数値移動床実験の流速分布と流速コンター

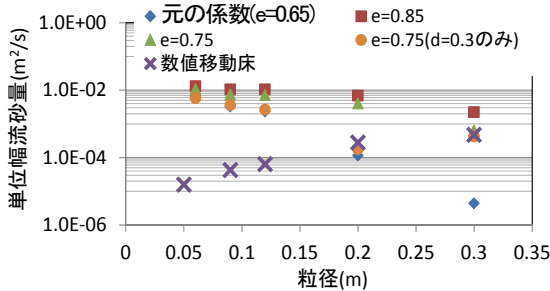


図-11 数値移動床実験と石礫河川の河床変動解析の単位幅流砂量の比較

そして著者らは、この河床変動解析法を用いて黒部川の2基の巨石付き盛土砂州の設置効果を検証した。しかし、本研究が提案する石畳排砂水路の水路床の凹凸分布は、石礫河川の河床表層の凹凸分布と異なるため、長田らの河床変動解析法を石畳排砂水路に適用するにあたっては、石畳床の流れの抵抗と流砂量の関係を把握し、これを河床変動解析法に考慮する必要がある。

福田らは個々の石礫粒子の運動と石礫粒子周りの流れを高精度で計算し、移動床現象を詳細に分析できる数値移動床実験水路⁶⁾を開発している。そのため、石畳水路上の石礫土砂の移動を対象とした数値移動床実験を行い、得られた石畳水路の数値実験結果の流れ場と流砂量を説明する河床変動解析法について検討する。

石畳水路の数値移動床実験では、巨石を石畳状に配置して石畳排砂水路を模した実験水路を作成し、石畳水路上に厚さ0.15mの石礫土砂を堆積させた。実験水路の勾配は、黒部川の平均河床勾配である1/100とし、数値実験の水深は、宇奈月ダム排砂時の流量500m³/sに対する愛本堰堤上流河道の平均的な水深約2mとした。表-1は実験結果の水利諸量を示し、図-9は数値移動床実験結果の流速分布と流速コンターを示す。石畳床の上の石礫土砂層厚が0.15の場合では、石畳を構成する巨石と巨石の間に小さい礫がはまり込むことにより、比較的凹凸の小さい水路床が形成されており、流れに対する抵抗を小さくしている。この時の石畳床の流れの抵抗を粗度係数で換算すると0.033(m^{-1/3}s)であり、石畳水路上の河床変動解析では、この逆算粗度係数で流れの抵抗を評価することとする。図-10は、数値実験結果における単位幅流砂量および断面平均流速の時間変化を示す。本数値実験では、流速分布が十分発達した通水100秒以降の結果を考

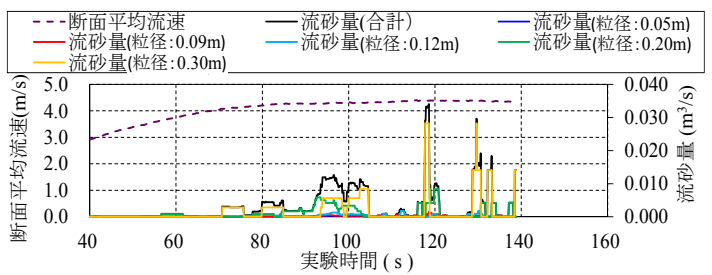


図-10 石畳床の数値移動床実験における断面平均流速と流砂量

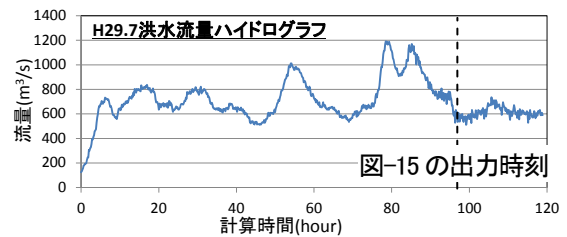


図-12 計算で与えた流量ハイドログラフ(H29.7洪水)

察する。数値実験結果より、大きい石礫の流砂量は、小さい礫の流砂量に比べて多くなっていることが分かる。これは前述のように、小さい礫は巨石間にはまり込むことで凹凸の小さい水路床を形成しているため、大きい粒径(30cm, 20cm径)の石礫は、その凹凸の小さい河床上を流下しているためと考えられる。

次に、長田らの河床変動解析法を石畳水路の数値実験(石礫土砂層厚:0.15m)と同一条件で計算し、数値実験結果の単位幅流砂量と長田らの河床変動解析法の単位幅流砂量を比較した(図-11)。図より、石礫河川の河床変動解析法では、細かい礫の単位幅流砂量は数値実験結果より多く計算され、粒径30cmの石礫の単位幅流砂量は数値実験結果より少なく計算されている。本検討の数値実験は、前述のように、小さい礫は巨石間にはまり込んでいるために流砂量が少ないこと、石畳排砂水路は大きい石礫の排砂が目的であることから、本研究では、粒径20~30cmの石礫の流砂量について比較検討する。長田らの河床変動解析法では、流砂量を石礫粒子の平均移動速度と流砂体積との積で評価し、石礫粒子の平均移動速度を計算する跳躍解析の反発係数には、常願寺川現地実験等を再現する0.65(図中の青色)を用いている。本研究では、石畳排砂水路の反発係数は、石畳床の数値実験結果における単位幅流砂量を再現する値として、20cmより大きい粒径では0.75(図中の橙色)を用いることにする。

4. 河川横断構造物からの石礫土砂の排出促進が下流河道に及ぼす効果

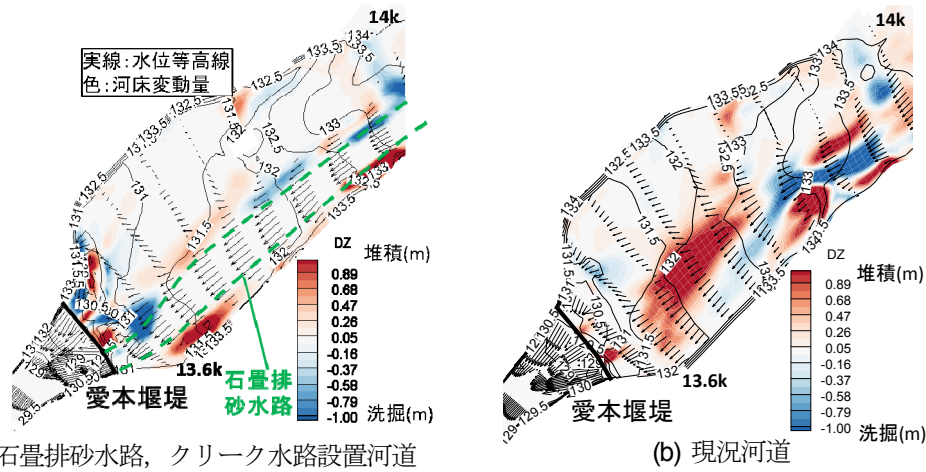


図-13 愛本堰堤上流の通水 100 時間後(約 600m³/s 時)の河床変動コンター・水位等高線と流速分布

本章では、3 章で検討した河床変動解析法を用い、クリーク水路と石畳排砂水路による石礫の排砂促進が下流河道に及ぼす効果を検討する。計算の条件は、近年の比較的大きな洪水である平成 29 年 7 月洪水の流量ハイドログラフである(図-12)。解析に用いた河床材料粒度分布は、前出の図-5 に示す。本解析では、石畳上に石礫が 50cm 堆積すると石礫河床と同様に扱うものとした。

図-13 は石畳排砂水路を設置した場合と現況河道における通水 100 時間後(約 600m³/s 時)の愛本堰堤(13.55km)直上流の流速ベクトルと水位等高線、河床変動コンターを比較する。現況河道では堰堤直上流で流れが広がり、土砂堆積が顕著になっているが、石畳排砂水路を設置した場合には、流れに対する抵抗が小さくなるため、水位が低くなり流速が加速され、土砂吐きに流れが集中する。このため、石畳排砂水路に輸送されてきた土砂の多くが堰堤下流に排出される。

図-14 は、愛本堰堤を通過する 10cm 以上の粒径の全幅の流砂量の時間積分値を示す。愛本堰堤から排出される石礫の流砂量は、石畳排砂水路を設置すると現況河道の 2 倍程度になっている。堰堤下流河道での土砂収支について考察すると、現況河道では床止下流河道(13.1km)から流出する流砂量が、堰堤から下流河道に供給される石礫の流砂量に比べて約 1,400m³ 多くなっているが、石畳排砂水路を設置した場合にはこの差が 1,000m³ 程度になり、床止直下流の河床低下を抑制することが分かる。

図-15 はクリーク水路と石畳排砂水路、巨石付き盛土砂州を設置した場合、巨石付き盛土砂州のみを設置した場合、これらいずれの対策を実施していない場合における解析後の最深河床高と 500m³/s 時、流量ピーク時(1,200m³/s)の水面形を示す。図より、巨石付き盛土砂州は流れに対して抵抗体となるため、その上流で水位を堰上げ、土砂堆積を生じさせており、12km 付近や 12.5km 付近の河床低下を緩和していることが分かる。一方、2 基の巨石付き盛土砂州の設置のみでは、愛本床止

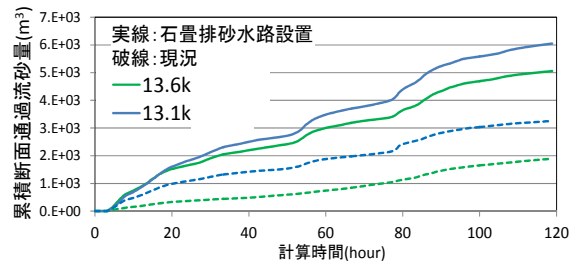


図-14 愛本地点を通過する粒径 10cm 以上の流砂量の時間積分値

(13.2km)直下流の河床低下をあまり抑制出来ていないものの、クリーク水路と石畳排砂水路を設置すると、図-14 に示したように愛本堰堤(13.55km)からの石礫土砂の供給量が増加するため、床止直下流の河床低下が抑制されている。このことから、クリーク水路と石畳排砂水路の設置は、愛本床止下流河道の河床低下の抑制に対して有効であることが分かる。図-16 は、クリーク水路・石畳排砂水路・巨石付き盛土砂州を用いて河道は正策を実施した場合と、これらの是正策を実施していない場合について、洪水後の河道に 500(m³/s)の流量を通水した時の流速コンターを示す。図より、一連の河道は正策を実施した場合には、愛本床止から 11km 付近までの区間で低水路線形の蛇行が回復傾向にあり、11km 付近右岸の縦工群に洪水流が当たっていることが分かる。

このように、2 基の巨石付き盛土砂州の設置により、水衝部に設置された既設縦工群を活用出来る交互砂州の低水路線形の蛇行が回復し始めており、そこにクリーク水路と石畳排砂水路による石礫の排砂促進の効果が加わることにより、愛本床止下流の河床低下を抑制し、持続的に維持管理の可能な河川となり得ることを示した。

5. まとめ

黒部川では、出し平ダムと宇奈月ダムが連携排砂を実施しており、ダムから排砂された石礫土砂を愛本堰堤の上流で留めることなく、河床低下の進行している愛本堰

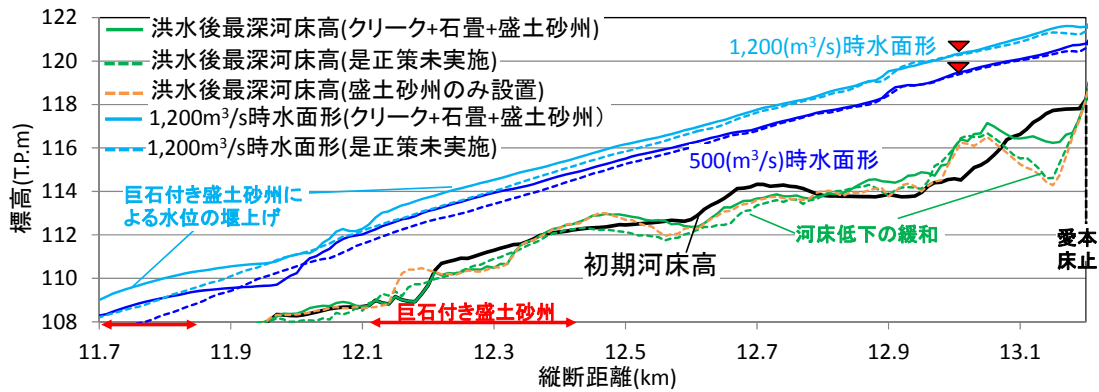


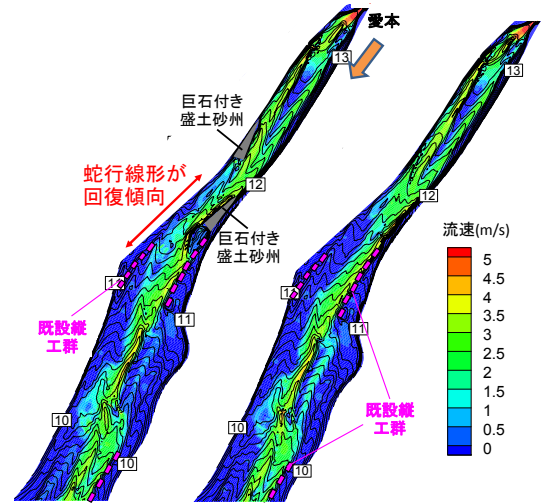
図-15 愛本床止下流河道の洪水後の最深河床高と水位縦断分布(500m³/s時, 1200m³/s時)の解析結果

堤下流河道に適正に排出することが求められる。これに対して本研究では、河川横断構造から石礫土砂の下流への排出を促進する石畳排砂水路とクリーク水路を開発し、その排砂促進効果を明らかにした。黒部川では、愛本床止め下流に既に設置された2基の巨石付き盛土砂州により、直線化した低水路が蛇行した低水路に是正されている。これに加えて愛本堰堤からの排砂促進技術により、既設縦工群を持続的に活用して維持管理の可能な河道となることを示した。今後、石畳排砂水路を堰堤上流の土砂堆積と堰堤下流の河床低下が問題となっている多くの河川に応用するため、具体的設計法の確立を目指す。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発制度地域課題分野(河川)の助成を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：黒部川の河道特性と河道計画，土木研究所資料第3139号，1993.
- 2) 北陸地方整備局 河川部 黒部河川事務所：第3回 黒部川河道検討会 資料，2014.
- 3) 北陸地方整備局 河川部，北陸急流河川研究会：治水と環境の調和した新たな河岸防護技術の手引き〜巨石付き盛土砂州を用いた河岸防護工〜，2013.
- 4) 加藤翔吾，石川伸，後藤岳久，福岡捷二：黒部川の既設縦



(a) 是正河道 (b) 是正策を実施していない河道
図-16 愛本床止下流における是正河道と是正策を実施していない河道の流速コンター(500m³/s時)

工群を活かした低水路交互砂州河道の是正に関する研究，河川技術論文集，第21巻，pp.177-182，2015.

- 5) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集B1，Vol.68，No.1，pp.1-20，2012.
- 6) T. Fukuda & S. Fukuoka：Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles，Advances in Water Resources，2017.

(2018. 5. 31 受付)

TECHNICAL DEVELOPMENT FOR ENHANCING SEDIMENT FLUSHING FROM CROSS-RIVER STRUCTURE AND RECOVERY OF ALTERNATE BARS

Takahisa GOTOH, Katsunori OKEGAWA, Shoji FUKUOKA and Tomoo FUKUDA

The Aimoto weir interferes with the movements of gravel in the stony Kurobe River. This arises bed degradations and changes in arrangement of alternate bars downstream of the weir since 1995s flood. As a result, longitudinal dikes installed at flow attacking points are not able to work effectively. Therefore, we developed the sediment flushing channel paved with boulders for enhancing the discharge of gravels and cobbles through the sediment flushing gate of the cross-river structure. Our numerical results indicated that the sediment flushing channel was able to guide flood flow and gravels toward the sediment flushing gate. These effects mitigated the bed degradations and the changes in alternate bar patterns downstream of the Aimoto weir. Developed technique using the sediment flushing channel promotes recovery of stable meandering patterns of the alternate bars.