

澱筋化・低下した石礫河川の 河床高回復技術の開発研究

THCHNOLOGY DEVELOPMENT OF RIVER BED LEVEL RECOVERY OF DEGRADED STONY-BED RIVERS

須賀正志¹・前嶋達也²・藤本昌利³・長田健吾⁴・福岡捷二⁵
Masashi SUGA, Tatsuya MAESHIMA, Masatoshi FUJIMOTO, Kengo OSADA
and Shoji FUKUOKA

¹正会員 工修 国土交通省北陸地方整備局河川部地域河川課長 (〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町1-1-1)

²学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所調査第一課係長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

⁴正会員 博士 (工学) 中央大学研究開発機構助教 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁵フェロー Ph.D 工博 中央大学理工学部特任教授, 研究開発機構教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

The sediment transports in stony-bed rivers is different from gravel-bed rivers or sand-bed rivers. Authors have investigated the mechanism of sediment transport and stable cross sectional form and clarified characteristics of grain size distributions on stony-bed rivers by performing field experiments in the Joganji River. Currently, stony-bed rivers have degraded their bed elevation, due to the past extraction of bed materials and lack of bed materials transported from the upper region. Then, hydraulic structures such as levee of stony-bed rivers are susceptible to break by large momentum of flood flows. It is important to know how much stone and gravel layer is needed to maintain river bed level properly.

In this study, we investigated the development of river bed level recovery method by using large stones. Secondly we showed the usefulness of 2D riverbed variation analysis for this technology development.

Key Words : stony-bed river, field experiment, grain size distribution, river bed stability, river bed level recovery method, two-dimentional bed variation analysis

1. 序論

石礫河川は、洪水時の流水のエネルギーが大きく土砂移動が活発であり、河床洗掘や河岸侵食により堤防や他の河川構造物が被災する恐れがある。石礫河川は、河床に大きな石が存在し砂河川や砂礫河川と河床安定機構・土砂移動機構が異なるため、河床材料特性の理解は重要である。著者らは、2004年から2006年にかけて我が国の代表的な石礫河川である常願寺川の高水敷に水路を掘削し大規模現地実験を行い、石礫河川の河床安定機構・土砂移動機構^{1,2)}及びそれらに果たす河床粒度分布、特に石の役割³⁾を明らかにしている。

近年、多くの河川で過去に行われた砂利採取や河川工事の影響で河道内の巨石が減少し、さらに上流から大きな河床材料を含む十分な土砂供給がないために河床が低

下し、護岸際の深掘れや澱筋の固定化が進んでいる。その結果、洪水時に大きな流体力が働くようになり河床が洗掘され、洗掘抵抗の小さい基盤層の露出^{4,5)}や河川構造物周りの局所洗掘等、河川の安全性を低下させる問題⁶⁾が生じている。一度基盤層が露出すると、再び河床に石礫が堆積することは困難になり河床の低下が進行する。どのような粒径集団の河床材料がどのくらいの厚さで河床に存在すれば基盤層が露出しないかを検討することは、石礫河川本来の安全性や景観を回復する上で重要で緊急の課題となっている。

本研究では、上述の課題の解明を目指して、大きな石の河床安定に果たす効果を調べ、大きな石を用いた河床高回復という新しい技術開発を目的として検討している。具体的には、現地石礫河川において大きな石を河道内から取り除いたり、戻したりすることによる河床の石礫の移動機構と河床高の変化を調査する。また、上流から流

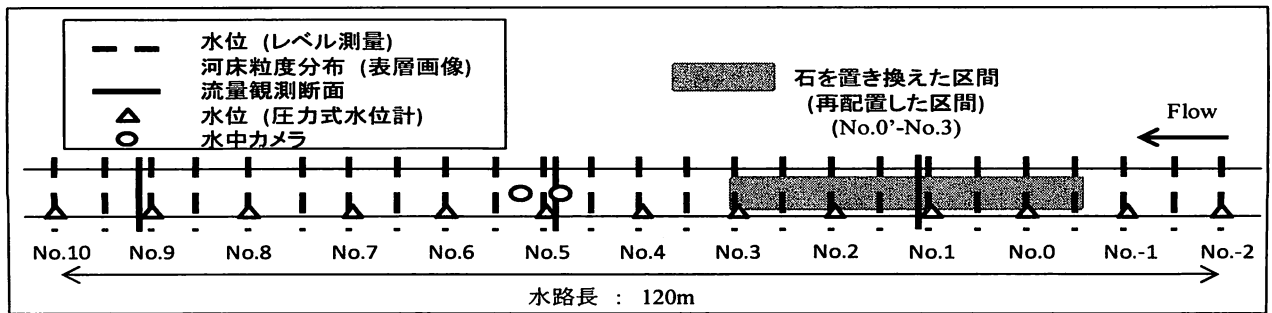


図-1 実験水路平面図

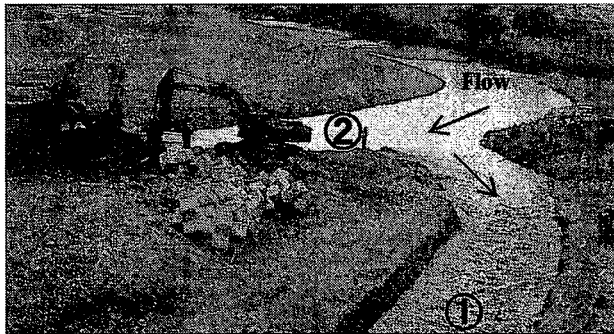


写真-1 流量調節状況

下してくる石礫の大きな石による捕捉効果を調べる。さらに、河床高回復の可能性を二次元河床変動解析を用いて検討し、実験と解析により河床高回復のための大石の配置等の技術開発の基本的な考え方を検討する。

2. 常願寺川現地実験概要

石礫河川における大きな石の役割と土砂移動機構に基づき上流から流下する石礫を捕捉し、河床高を回復させる技術を確認するものとする目的で大規模現地実験を行った。実験は、常願寺川6.1kmの砂州上に掘削した直線水路で行った。実験水路の河床勾配は約1/160、河床材料d60は30mm～70mmとなっている。実験は、河床から大きな石を取り除いたり再度配置することで河床構成材料に占める大きな石の割合を変化させ、そのことによる河床形状や河床高の変化、河床材料の移動状況を調査するものである。図-1に実験水路平面図を示す。実験水路は、有効水路長120m、初期水路幅4m、側岸勾配1:1で河床材料は現地にあるものを使用している。通水中の水位と流量は以下の方法で測定した。水位は、レベル測量と圧力式水位計を用い、流量は、上流・中流・下流の3断面で横断方向に3点、鉛直方向に2点流速を測定し求めた。中流での流量観測断面においては、鉛直方向に5点流速を測定し石礫河川の流速分布を調査した。通水終了後、排水して河床材料、河床縦横断形状、置き換えた黄石、青石の移動状況を調査した。河床縦横断形状は、3Dレーザースキャナー測量によって空間的に詳細に測定した。また、水路中流部に水中カメラを設置し、通水中の河床構成材料の移動について撮影を試みた。写真-1に流

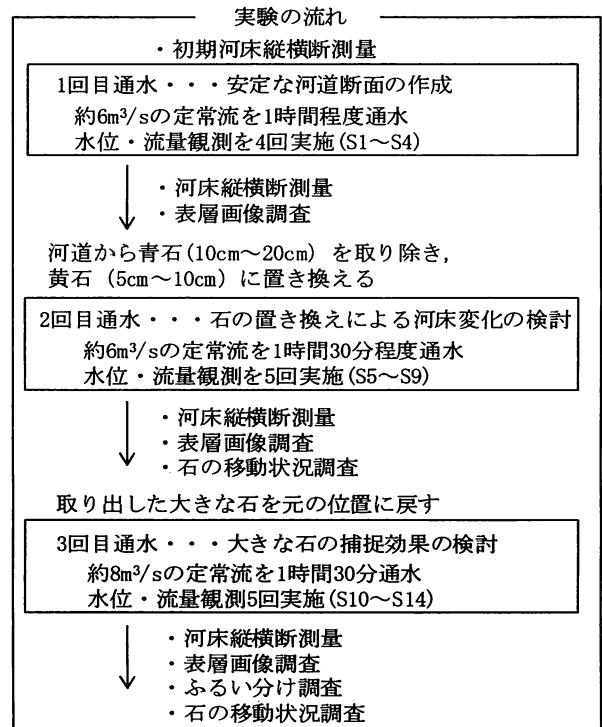


図-2 実験フロー

入流量の調節状況を示す。2007年度の実験⁹⁾では、実験水路①の上流端でブロックと河床材料を盛ることで開口部の締め切り幅を変化させ流入流量の調節を行った結果、大量の砂が流れと一緒に水路内に流入した。これを避けるため、本実験では自然流路②を締め切ることににより、実験水路①への砂の過剰な流入を防ぐ工夫をした。

図-2に実験フローを示す。通水は3回、流量観測はS1からS14までの14回行った。Sの呼称は、一回ごとの実験流量が定常(Steady)であることを意味している。1回目の実験は、安定な河道断面の形成を目的とした。1回目通水後、上流区間(No.-1'～No.3)の河床安定に寄与していると考えられる大きな石(10cm～20cm程度)に青く着色し(青石)、番号を付けそれらの位置を測量で調べ水路外に取り出した。代わりにあらかじめ用意しておいた黄色の着色石(黄石5cm～10cm程度)を河床高の変化を小さく保つように置き換え、2回目の通水を行った。置き換えた黄石はトレーサー石として1～1000の番号を付けてあり、通水後に移動状況を調査できるようにした。取り出した青石の数は、No.0～No.2区間では河床表面積の10%程度、その他の区間では7%程度に相当する。2回

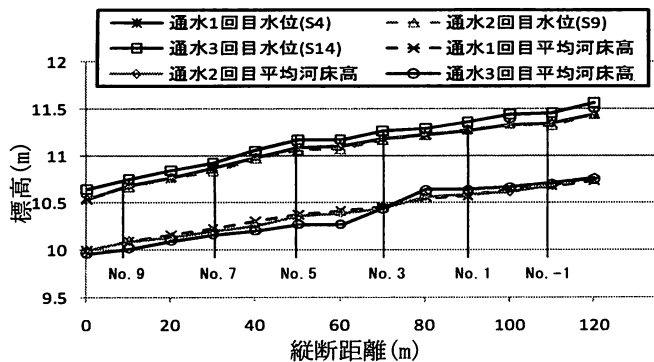


図-3 観測水位・平均河床高の縦断面図

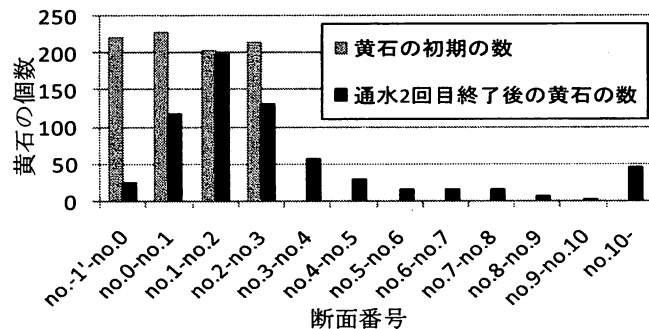


図-4 2回目通水前後の黄石の状況

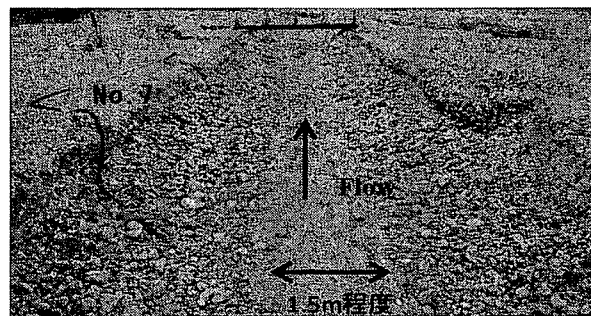
目通水終了後、青石を当初あった位置に戻し3回目の通水を行った。3回目通水終了後、河床材料について表層画像調査とふるい分け調査を行った。実験流量は通水1回目、2回目が $6\text{m}^3/\text{s}$ 、通水3回目が $8\text{m}^3/\text{s}$ の定常流である。通水3回目の流量増加は、実験前夜の降雨により本川水位が上昇したため、実験水路への流入量が增大したことによる。流量増大に伴い多少の側岸侵食は生じたが、再度配置した青石はほとんど移動せず、実験の目的に与える影響は小さいと考えられる。本実験流量を単位幅流量で表すと $1.5\text{m}^2/\text{s} \sim 2.0\text{m}^2/\text{s}$ であり、これは常願寺川の平均年最大流量の単位幅流量($2.6\text{m}^2/\text{s}$)の6割～8割に相当する。

3. 石礫河川の粒度分布が土砂移動に与える影響

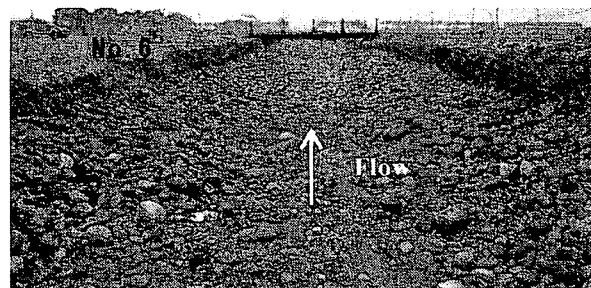
(1) 河床材料と土砂移動の関係

図-3に水位計で測定した観測水位と平均河床高の縦断面図を示す。平均河床高は、横断面形状の勾配変化点である水路中央から左右約1.5mまでの河床高の平均値である。通水3回目(S14)の観測水位は、流量増大により上昇している。しかし、石を置き換えた区間(No.-1'～No.3)を含む全区間の水面勾配の変化はほとんど見られない。No.5地点の水位が堰き上がっているが、これは水中カメラの設置により水面勾配が変化したためである。

写真-2は、通水1回目終了後と通水2回目終了後の下流河道の状況を示す。写真-2(a)が示すように、通水1回目終了後にNo.4地点より下流の河道中心部に幅約1.5m、厚さ5cmから10cm程度の砂の堆積が見られた。これは、側岸侵食により供給された砂の量が多かったために1回目



(a) 通水1回目終了後(下流)



(b) 通水2回目終了後(下流)

写真-2 通水1回目終了後と通水2回目終了後の下流河床の比較

の流量($6\text{m}^3/\text{s}$)、通水時間(60分)では、水路下流端から流送させるには不十分な通水時間であったことを示している。2回目の通水で同流量を約1時間30分通水すると、側岸侵食による砂の供給は停止し、写真-2(b)に示すように堆積していた砂は流送され、河床には主要な表層河床材料の石礫が現れた。このことは石礫河川であっても上流から過剰な砂の供給があれば主流部を砂が主要な河床構成材料として移動すること、砂の排出には流量と通水時間が大きく影響することが分かる。河床に溜まった砂はどのくらいの流量を、どのくらいの時間通水すれば流送されるのかについて、特に、河川環境との関連で検討されねばならない重要な課題である。

通水1回目と通水2回目の実験結果の比較より、大きな石(青石10cm～20cm)を取り除き、黄石(5cm～10cm)に置き換え大きな石が少なくなったことによる河床高、河床材料の変化、トレーサー石の移動状況について検討した。図-4に2回目通水前後の黄石の存在状況を示す。通水後の黄石は、河床に露出する形で約80%確認できた。側岸に配置した黄石はほとんど動かなかったが、河床に配置した黄石は大部分が移動した。特にNo.1～No.2区間で黄石が多く見られ、これらの半数は上流から流下してきたものであった。停止した黄石の中には、石礫に完全に埋まっているものも見られ、通水時の土砂移動が活発であったことがわかる。また、最下流断面No.10を越えて流下した黄石は全体の5%ほどであった。図-5に2回目通水終了後河床の1回目通水終了後河床からの河床変動量カウンターを示す。青石を黄石に置き換えた区間の上流では、黄石を含む種々の粒径の河床材料の流出により河床が低下し、一方で、No.1からNo.3区間では、移動した河床材

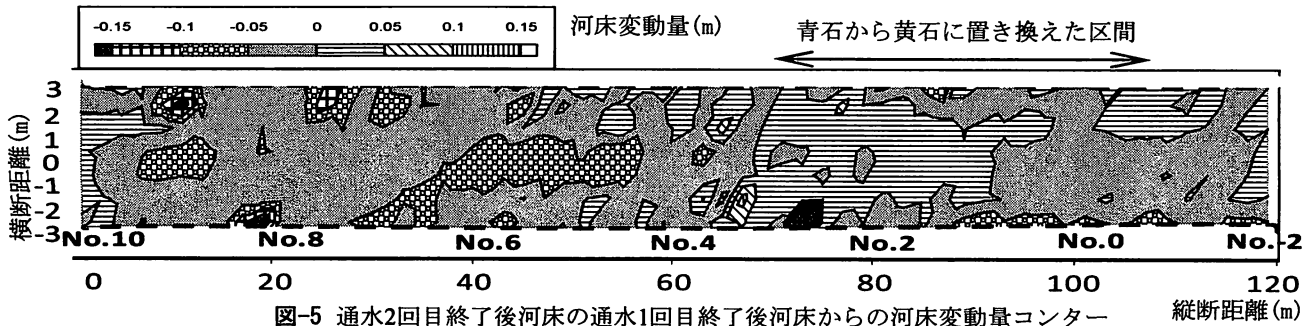


図-5 通水2回目終了後河床の通水1回目終了後河床からの河床変動量カウンター

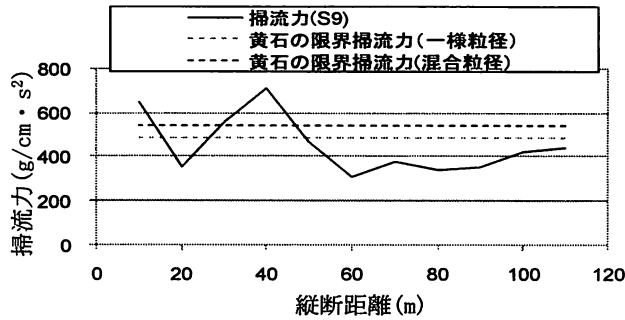


図-6 掃流力と黄石の限界掃流力の関係

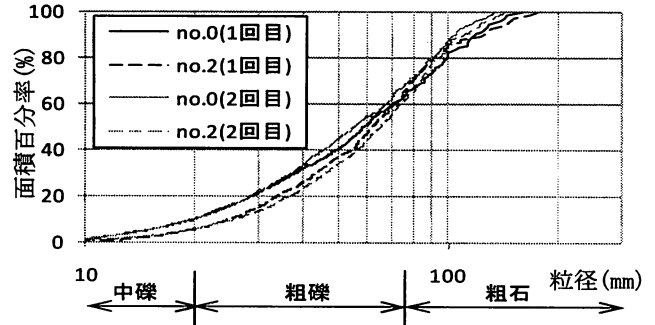


図-7 表層画像解析法による河床粒度分布

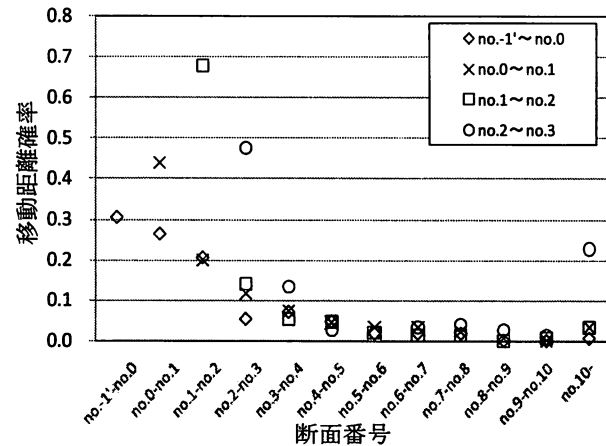


図-8 黄石の移動距離確率

料の堆積により河床上昇が見られた。図-6に通水2回目(S9)の水位，エネルギー勾配から求めた掃流力と黄石の限界掃流力の比較を示す。石を置き換えた区間における黄石の限界掃流力が流れの掃流力より大きくなっているが，実際には黄石は移動している。これは，大きな石を取り除いたこと，石を置き換えたことで表層にある石同士がかみ合っていない不安定な状態にあること等が移動原因と考えられる。図-7に通水1回目終了後と通水2回目終了後の表層画像解析より求めた河床粒度分布を示す。青石を取り出したことにより，No.0，No.2地点でd90が小さくなっている。

次に，河床構成材料と土砂移動の関係を考察する。図-8は，黄石の移動距離確率を示す。移動距離確率は，黄石の初期配置断面からある距離移動した黄石の数を，初期配置断面内から移動した全黄石の数で除すことにより求めている。この時の黄石を数えた単位表面積は河床幅(5m)×断面間隔(10m)である。No.-1'～No.2区間に置いた黄石の移動距離は，通水1回目終了時に砂の堆積

していなかったNo.4付近まで指数関数的に減少している。一方，図-8に○のマーカで示したNo.2～No.3区間から移動した黄石は，No.10断面を越えて流下している割合が多い。さらに，砂の堆積していたNo.4より下流には，ほとんど黄石が存在していないことが分かる。急勾配流路では，低水路河道内に大量の砂が供給されると，砂が主流部河床を掃流状態で流下するようになり，河床の凹凸が小さくなる。その結果，河床表面を流下してきた石礫に働く流体力が大きくなり石礫は河床に止まりにくくなる。水中カメラの映像からも大きな粒径が，大量の砂と一緒に滑るように流下していくのが見られた。また，上流から流下してきた石礫がぶつかることで止まっていた礫が動き出す現象がよく見られた。石礫河川の石礫移動は，流体力だけで決まるのではなく，河床を構成する粒度分布や，その凹凸関係などが大きく影響することが視覚的に確認できた。

(2) 大きな石の役割

通水2回目と通水3回目の実験結果を比較し，河床に青石を再度配置したことによる河床高，河床材料の変化を検討する。図-9に通水3回目終了後河床の通水2回目終了後河床からの河床変動量カウンターを示す。青石を再度配置した区間(No.-1'～No.3)では，青石が流下してきた砂礫や側岸侵食により供給された石礫を捕捉することで河床を上昇させていることが分かる。一方，No.3断面より下流では，上流断面と同様に側岸からの土砂供給はあるものの上流からの土砂供給量が少ないため河床が低下している。図-10にNo.0断面とNo.4断面の横断面形状を示す。石を配置していないNo.4断面では，局所的に深掘れし，No.0の断面形状と大きく異なっている。図-11に通

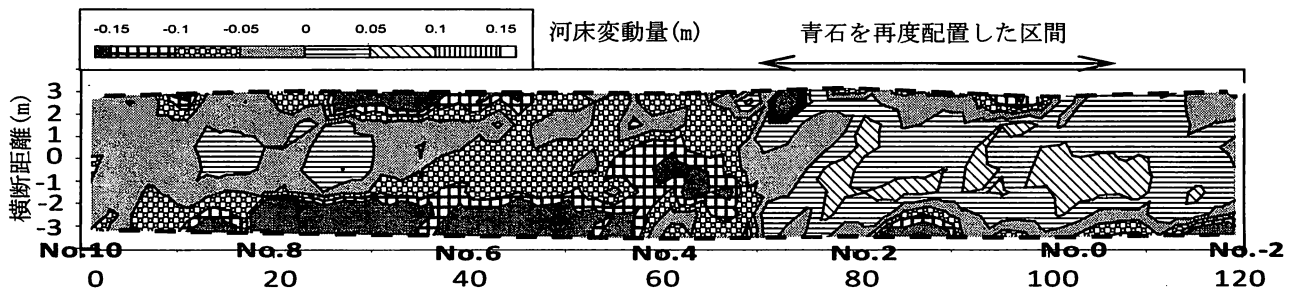
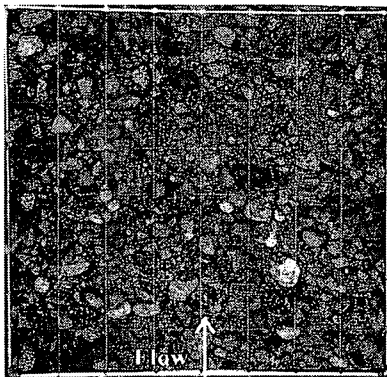
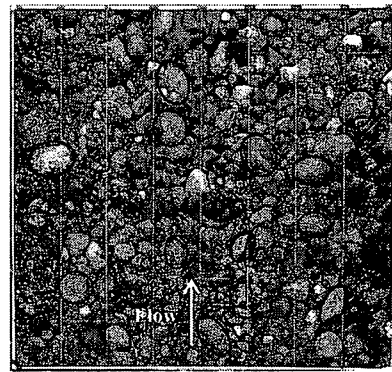


図-9 通水3回目終了後河床の通水2回目終了後河床からの河床変動量コンター



(a) 2回目通水終了後



(b) 3回目通水終了後

写真-3 No.0地点の河床表層写真

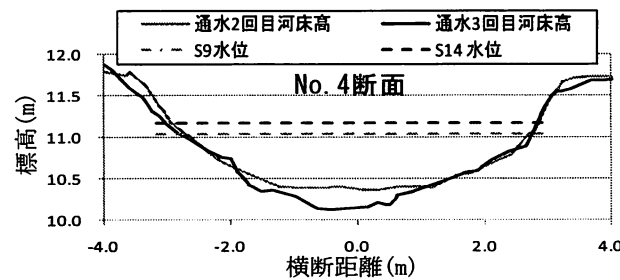
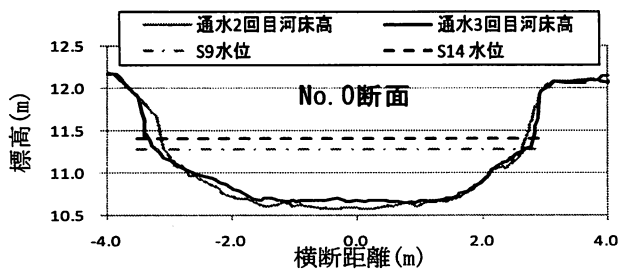


図-10 横断面形状

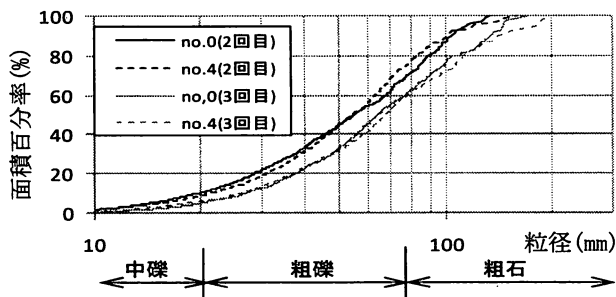
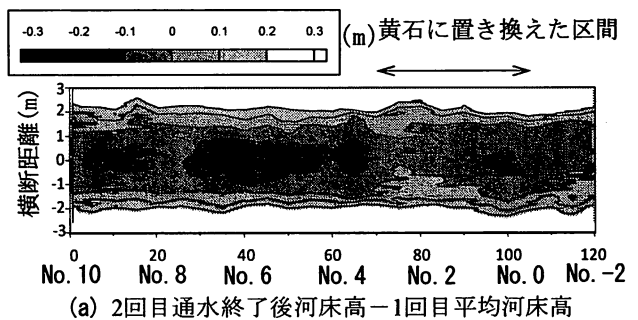
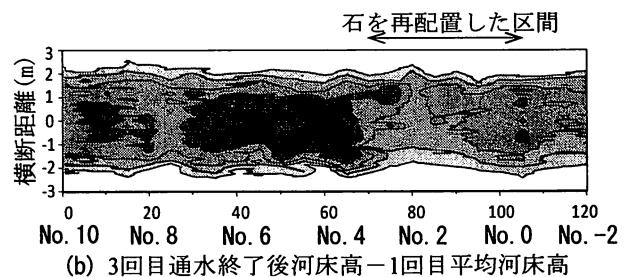


図-11 表面画像解析法による河床粒度分布

水2回目終了後と通水3回目終了後河床の河床粒度分布を示す。No.0地点では青石を再配置したことにより石礫を捕捉し、粒度分布が全体的に大きくなっている。No.4地点も同様に粒度分布が大きくなっているが、これは、河



(a) 2回目通水終了後河床高-1回目平均河床高



(b) 3回目通水終了後河床高-1回目平均河床高

図-12 河床形状コンター

床が洗掘された結果大きな河床材料が現れたもので、同じ粒度分布形状をしていても両者の持つ意味は異なる。

写真-3(a), (b)にNo.0地点の通水2回目終了後と通水3回目終了後の河床表層写真を示す。(b)の黒丸は青石を示している。(a), (b)を比較すると(b)では青石と青石の間に礫が密集して堆積し、大きな石に捕捉されていることが分かる。図-12は各通水後の河床高から通水1回目の平均河床高を引いた河床形状コンターである。通水3回目終了後にNo.2付近左岸寄りに土砂堆積による砂州が形成されたのがわかる。上述したようにNo.0~No.2区間では青石を河床表面積の10%程度配置し、他の区間(河床表

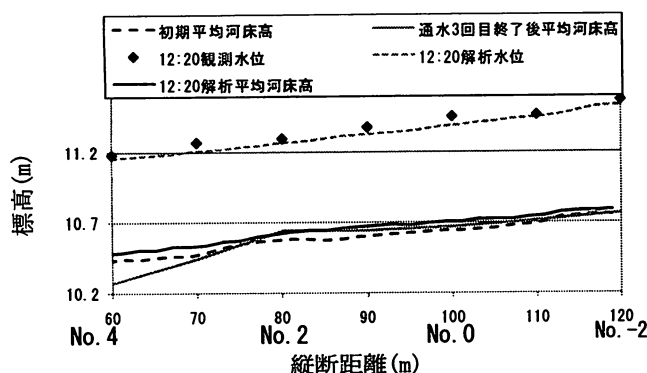


図-13 解析水位と解析河床高の縦断面図

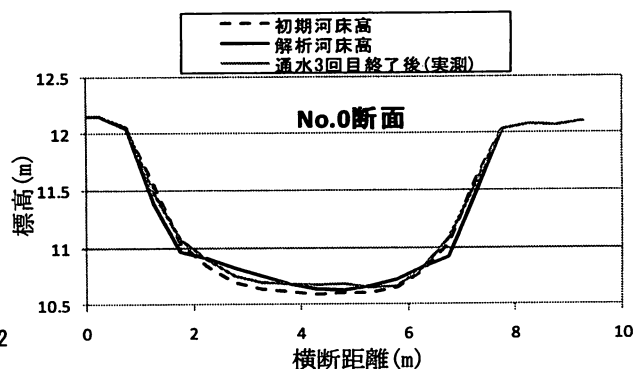


図-14 解析横断面形状と実測値の比較

面積の7%程度)に比べて青石の割合が多いことがNo.2付近に砂州を発生させた原因と考えられる。

4. 大きな石の配置による河床高回復に関する

数値解析

(1) 解析方法、解析条件

河床低下や流路が滞筋化している河川において、大きな石の適切な配置による滞筋幅の是正と河床高回復を目的とした新しい技術を確認するための支援技術として、3章までの実験結果を数値解析を用いて検討する。使用するモデルは、長田・福岡による石礫の土砂移動機構を考慮した二次元河床変動解析法⁷⁾を用いた。上下流端の境界条件には、No.-1断面とNo.8断面の観測水位を与えている。解析対象は、大きな石を再配置した通水3回目の11時05分から12時20分とした。解析で用いる河床粒度分布は、2回目通水後の表層画像解析結果を使用した。No.-1'~No.3区間において青石を配置したことによる粒度分布の粗粒化を考慮するため、青石に相当する粒径をNo.1, No.2断面については10%、その他の区間には7%割増した粒度分布を初期粒度分布として与えた。

(2) 解析結果と考察

図-13に解析水位と解析河床高の縦断面図を示す。解析河床高は、図-3に示した平均河床高と同様に、水路中央から左右1.5mまでの河床高の平均値である。解析で得られた水面形は、実測の水面形をおおむね再現できている。石を配置した区間(No.-1'~No.3)では、縦断的に実測河床高をやや上回るが河床高の上昇を再現している。図-14に解析横断面形状と実測横断面形状の比較を示す。解析横断面形は、実測値に比べて側岸が侵食され河床への土砂供給が多くなっている。実験では、側岸の侵食によって供給された大きな河床材料は側岸部に堆積し、側岸侵食を抑制する。本解析では、側岸の粒度分布を正しく考慮できていないため、側岸侵食量が多くなり、それが河床に堆積したと考えられる。

数値解析を用いた検討は技術開発の一つの支援策である。重要なことは、現地河川で試験的に大きな石の配置法や配置割合、必要な粒径サイズ等について地道に検討

を進め技術力を高めていくことである。

5. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)大きな石を河床に配置すると、大きな石が核となり流下してくる石礫を捕捉し、河床を上昇させる機構があることを現地実験で示した。
- (2)大きな石と置き換えた黄石の移動状況より、河床材料と土砂移動の関係を考察した。石礫河川における土砂移動は、河床材料粒度分布が大きく影響する。また、河床に砂が大量に供給されると、河床の主流部を砂が掃流状態で移動するため、その上を移動する石礫は河床に止まりにくくなることを示した。
- (3)大きな石を用いた河床高回復技術を支援する石礫河川の二次元河床変動解析法を適用し、河床高回復に果たす大きな石の効果を説明した。

参考文献

- 1)塚本洋祐, 福岡捷二, 須賀正志, 澤原和哉, 長田健吾: 石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状, 河川技術論文集, 第14巻, pp.7-12, 2008.
- 2)黒田勇一, 福岡捷二, 山本輝, 吉田和弘, 井内拓馬: 礫床河川の滞筋形成機構と河床粒度分布特性, 河川技術論文集, 第11巻, pp.363-368, 2005.
- 3)福岡捷二, 長田健吾, 安部友則: 石礫河川の河床安定に果たす石の役割, 水工学論文集, pp.643-648, 2008.
- 4)米沢拓繁, 福岡捷二, 鈴木重隆: 水衝部の河床表層材料と河床洗掘の関係の調査研究, 河川技術論文集, 第13巻, pp.345-350, 2007.
- 5)忠津哲也, 鈴木研司, 内田龍彦, 福岡捷二: 洪水流による土丹河床高さの経年変化と堰周辺の砂州変形に伴う洗掘深の増大について, 河川技術論文集, 第15巻, 2009.
- 6)福岡捷二: 石礫河川の移動床水理の諸問題と解決への道筋, 第44回水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ, 08-A-1, pp.1-25, 2008.
- 7)長田健吾, 福岡捷二: 石礫蛇行河川の二次元河床変動解析に関する研究, 河川技術論文集, 第15巻, 2009.

(2009. 4. 9受付)