

石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状

CHARACTERISTIC GRAIN SIZE DISTRIBUTIONS AND STABLE CROSS-SECTIONAL FORM IN RIVERS WITH BOULDERS AND COBBLES

塚本洋祐¹・福岡捷二²・須賀正志³・澤原和哉⁴・長田健吾⁵
Yosuke TSUKAMOTO, Shoji FUKUOKA, Masashi SUGA, Kazuya SAWAHARA
and Kengo OSADA

¹正会員 工修 (株) 建設技術研究所河川部 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

²フェロー会員 Ph. D 工博 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)

³正会員 工修 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課長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

⁴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)

⁵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)

The river-bed elevation of stony bed rivers is controlled by boulders and cobbles. The authors have clarified mechanism of river-bed variation, characteristics of grain size group and river-bed stability in stony bed rivers from results of field experiments of straight channel conducted in the Joganji River in 2004 and 2005.

In this study, we analysed the results of field experiments using a meandering channel of the Joganji River in 2006. We examined characteristics of grain size distribution in meandering rivers with boulders and cobbles, and the effects of meander and revetment on river-bed elevation grain size distribution. Furthermore, we clarified a physical parameter forming the stable cross-section of stony bed rivers based on the all field experiments. A method of bed material survey applicable to stony bed rivers is proposed by comparing with the existing sieve analysis method.

Key Words : *stony bed rivers, field experiment, grain size distribution, boulders, cobbles, stable cross-sectional form*

1. はじめに

石礫河川の河床高は、大きな粒径集団、特に巨石・巨礫により支配されている¹⁾。石礫河川の河床洗掘・河岸浸食対策を合理的に行うには、巨石・巨礫が石礫河川の河床高や河床材料粒度分布に与える影響を明らかにしなければならない。著者らは、2004年、2005年に我が国の代表的な石礫河川の常願寺川砂州上を掘削し作成した直線水路を用い大規模現地実験を行い、流量変化に伴う河床変動機構と河床材料粒度分布特性、巨石・巨礫による河道安定機構を明らかにしてきた^{1), 2), 3), 4)}。また、石礫河川の河床材料調査方法の1つとして表層画像解析法の有効性を示し⁵⁾、これまで行われてきた現地実験により、石礫河川の河道形成機構を知る上で貴重な情報を得ることが出来た。

石礫河川では一般に、主要な滞筋が分岐・合流を繰り返すことで複雑な平面形状を有している。また、滞筋が河岸際に近づく箇所では、河床洗掘、河岸侵食対策とし

て護岸工が施工されている。石礫河川の滞筋の形成や護岸工が河床高や河床材料分布に及ぼす影響を明らかにし、河岸侵食や局所洗掘深を推定できるようにすることは急流河川の災害を軽減する上で重要である。

また、河床材料調査方法として、一般にふるい分け試験法が用いられる。しかし、ふるい分け試験法は、河床形態や粒径集団の大きさに関係なく、同じ方法でサンプリングが行われている。石礫河川は粒径が大きいことから、従来の方法では採取範囲が狭すぎることに起因して、石礫河川の特徴を考慮したふるい分け試験となっていないこと等の課題がある。

本研究では、最初に2006年に常願寺川で行われた現地実験結果を基に、蛇行流路で護岸工を有する場合と有しない場合の石礫河川の河床高と粒度分布特性について検討する。次に、これまで行われた常願寺川現地実験結果から、石礫河川の安定横断形状について考察している。さらに、石礫河川の支配的な粒径集団を考慮した河床材料調査方法について検討を行う。

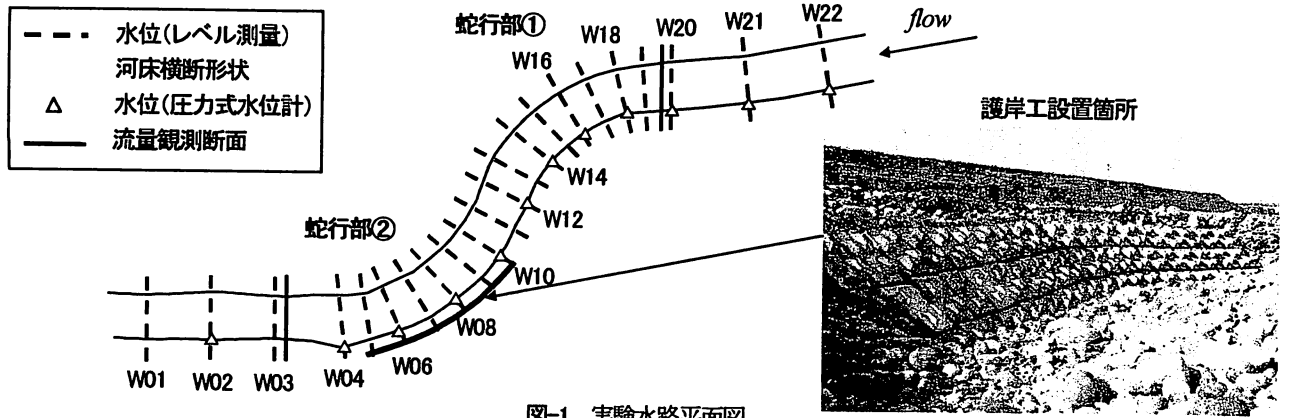


図-1 実験水路平面図

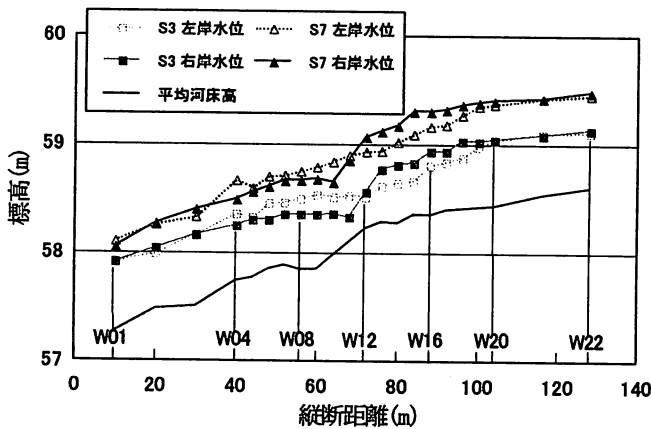


図-2 水位・平均河床高縦断分布

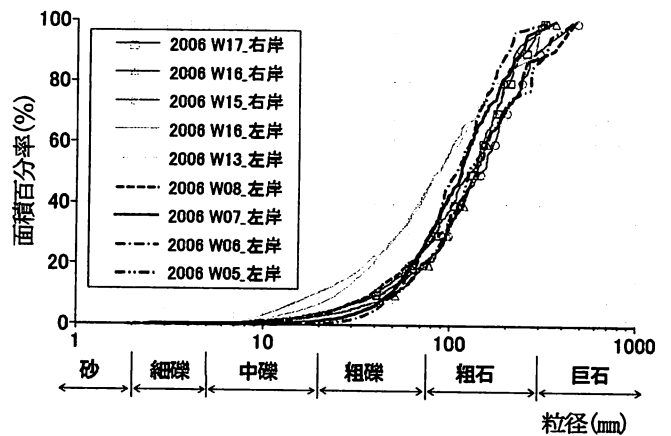


図-3 表層画像解析法による蛇行部の河床材料粒度分布

表-1 観測流量

実験ケース	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
上流側観測流量(m^3/s)	4.0	6.3	10.9	3.9	9.9	15.3	15.4
下流側観測流量(m^3/s)	2.8	5.7	10.1	3.1	10.7	15.0	16.3

2. 常願寺川現地実験

(1) 現地実験概要

著者らは、2004年、2005年、2006年に我が国有数の石礫河川である常願寺川において、河川敷上に水路を掘削し、現地河川の河床材料を直接用いて、石礫河川の河道形成機構の解明を目的に実験を行ってきた。本研究では、2006年に行われた蛇行実験結果を基に検討を行う。

図-1に実験水路平面図を示す。現地実験は常願寺川11.1km地点の河道内砂州を掘削することにより作成された2つの蛇行部を有する水路で行われている。蛇行部①の河岸は自然河岸、蛇行部②の河岸は護岸工が設置されている。測定項目は、水位、流量、河床横断形状、河床材料粒度分布であり、河床材料粒度分布は表層画像解析法とふるい分け試験法で行っている。

実験水路は実際の河床材料で構成されているので、単位幅流量は実洪水規模に相当する流量を通過し、この流量規模に見合った安定状態の河道を形成させ、そのときの水位の縦断形・流量の観測を行う。約 $10m^3/s$ 通水のS3実験後と、最大流量約 $15.5m^3/s$ 通水のS7実験後に、水路上流端を締め切ることで水路内の水を排水し、河床横断測量を行う。次に、破堤した時の氾濫流量ヒドログラ

フを算出する計算法の確立を目的とした堤防決壊実験を行っている。洪水流を模擬する非定常流を通過し、詳細に水理量を測定し、W13地点右岸側の水衝部河岸を破堤させている。破堤実験の報告は他の論文で発表することとし、本文では、実験終了後の河床縦横断測量、表層画像解析とふるい分け試験による河床材料調査結果を用いる。

(2) 実験結果

図-2に水位と平均河床高の縦断分布を示す。蛇行外岸部である蛇行部①の右岸側、蛇行部②の左岸側は、内岸側と比べ水位が高い。河床勾配は全体で1/90であり、蛇行部①と蛇行部②の遷移部において河床勾配が大きくなっている。表-1に観測流量を示す。上流側の流量観測断面において、S3の流量は $10.9m^3/s$ 、ピーク流量であるS7の流量は $15.4m^3/s$ である。図-3に表層画像解析法により得られた蛇行部の河床材料粒度分布を示す。河床は2mm程度の細粒分から50cmまでの巨石で構成されている。蛇行部では内岸側と外岸側で河床形状、河床材料が異なるため、河床の横断勾配を考慮し、左右岸で分けて粒度分布を求めている。図-4にS3通水後、S7通水後、堤防決壊実験終了後の河床高コンターを示す。S3の流れを通過することで、蛇行流れに応じた河道形状が形成されている。特に護岸工の設置されている蛇行部②では、護岸工前面に局所洗掘が生じ、その内岸側では堆積が生じ

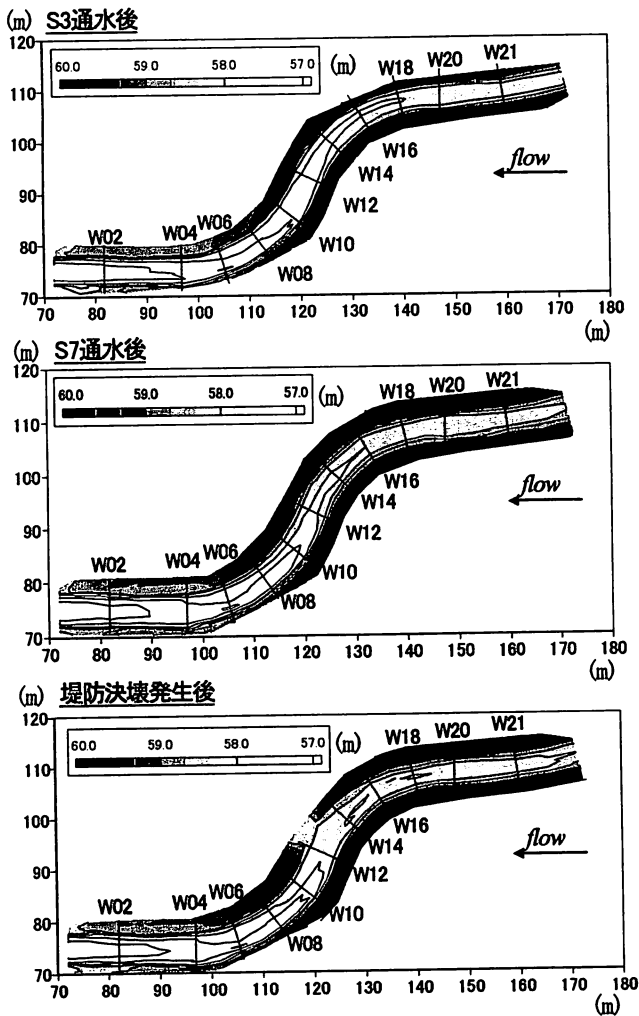


図-4 河床高コンター

ている。S7通水後は、自然河岸である蛇行部①において、S3通水後と比べ河岸が侵食されていることが分かる。また、護岸工前面では河岸侵食で発生した土砂が局所洗掘箇所に堆積している。堤防決壊実験後は、堤防決壊点から発生した土砂が主流に乗って流送され、W08地点の護岸工前面に堆積している。図-5にW05、W16地点の河床横断面形状と河床表層写真を示す。河床を構成する大きな材料は、みんな下流向きに傾いて並んでいるのが見てとれる(伏臥状構造)。これは、流れから力を受け、流れと同じ向きになることで抵抗を受けにくくなるためである。蛇行外岸部では河床材料が大きく、内岸部では細粒分が多い。W05左岸には護岸工があるために河岸侵食はなく、その前面の河床は深くなっている。W16の右岸側は、自然河岸のため侵食され、河床に堆積したため、外岸よりの河床は横断方向に滑らかな斜面をなしている。十分に広く、かつ、大きい河床材料を有する河川では、河床形状と河床材料の関係は、流れの状況を明確に表していることが分かる。

3. 石礫河川の河道形成機構

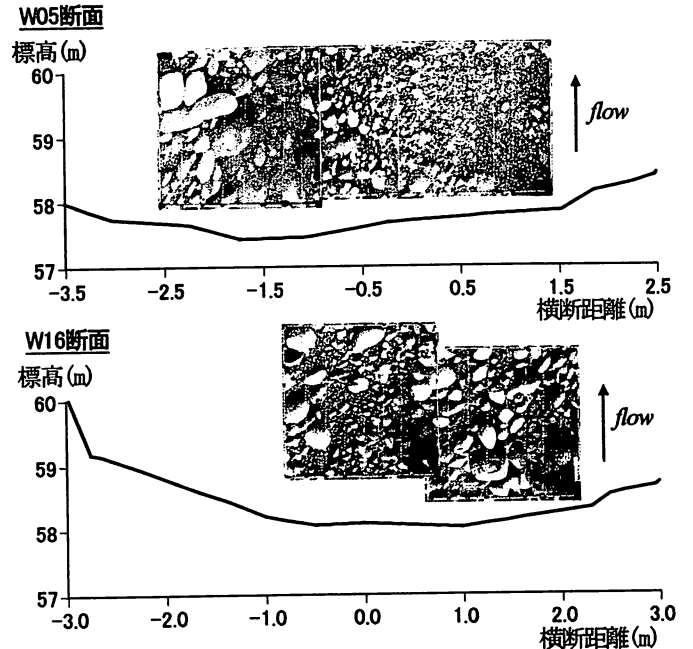


図-5 河床横断面形状と河床表層写真の比較

(1) 石礫蛇行河川の粒度分布特性

現地実験結果を基に、河道線形や護岸工の有無が石礫河川の河床形状・河床材料粒度分布に与える影響を検討する。図-3に示す蛇行部の粒度分布より、自然河岸外岸部では、粒度が全体的に大きく細粒分が少ない。また、二次流により内岸側に細粒分が多く堆積している。一方、護岸工前面では自然河岸外岸部の粒度分布と比べ全体的に粒径が小さいことが分かる。また、W08とW05の粒度分布は、護岸工前面の他の場所の粒度分布と異なり、比較的自然河岸の粒度分布に近い分布形状を有している。図-6に護岸工設置箇所であるW07地点、W08地点と自然河岸であるW16地点の河床横断面形状を、図-7にピーク流量時の摩擦速度コンターと主流速線を示す。摩擦速度は、二次元非定常流解析結果⁹⁾から求めたものである。自然河岸である蛇行部①では、摩擦速度が 0.5m/s と上流側の直線区間と比べ大きな摩擦力が働いている。自然河岸では、この大きな流体力により河岸が侵食され、侵食された土砂が崩れ落ちることで横断勾配が緩くなる(図-6a)。各流量規模に応じてこの過程を繰り返し、最終的に図-8aに示す様な安定河道を形成する。このとき、河岸からは巨石を含む土砂が供給されることで静的平衡状態となり、広い粒度分布を有する河床を形成する。静的平衡状態とは、流れの掃流力に耐えうる巨石等の大粒径の材料が、河岸や河床の洗掘により河床表面に出現しそれらが掃流力を受け持つことで、小粒径の河床材料も静止する状態である。護岸工が設置されている蛇行部②では、護岸工前面で摩擦速度が 0.7m/s と大きい。また、主流速線が護岸前面に寄っていることが分かる。護岸工前面では、流れが集中することで局所洗掘(図-6c)が生じるものの、大粒径の河床材料が出現することで洗掘が止まり、図-8bに示す様な安定状態となる。このとき、

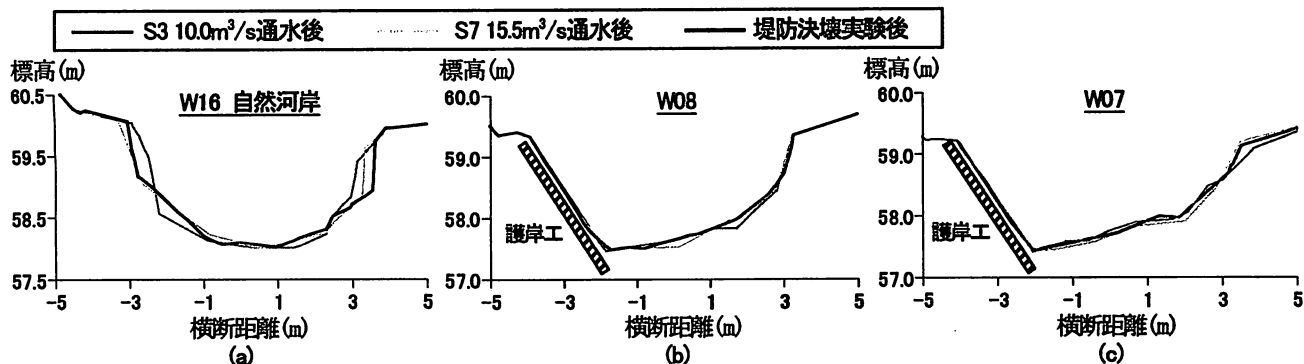


図-6 河床横断面形状

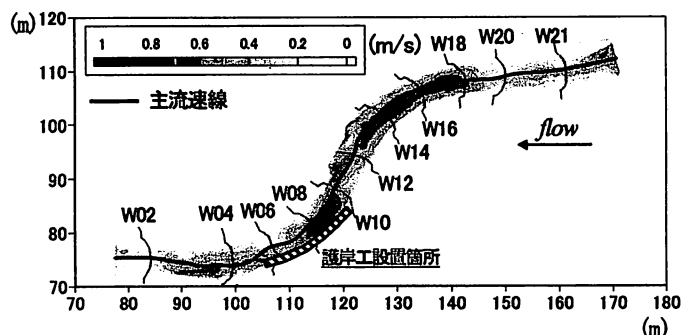


図-7 摩擦速度コンターと主流速線



図-8 安定状態の河岸

護岸工が設置されていることより河岸からの巨石等の土砂供給が無いこと、上流から連続的に輸送されてくる自然河岸部分よりも小さい粒径集団が河床を構成している。堤防決壊部から発生した巨石を含む土砂が主流に乗って流送されW08地点で堆積しており、この巨石を中心に粒度分布を形成している。図-6のW08とW07地点の河床横断面形状を比較すると、W08では決壊部から移動してきた巨石が局所洗掘箇所へ堆積し、この巨石を中心に河床を形成したため、局所洗掘が緩和されている。

W05地点は護岸工と自然河岸の境界であり、図-8bに示すように護岸工によって生じた速い流れが外岸側に寄ることで、護岸工直下流の自然河岸が大きく侵食されおり、よく知られているように固い護岸と柔らかい自然河岸のつなぎ目の部分が著しい侵食を受ける状況を示している。ここで、河岸侵食によって巨石を含む材料が河床に供給されることで粒度分布が大きくなり、安定な河道となっている。

以上の検討より、石礫河川では河岸と河床の巨石の存在が河道形状を規定し、これに加えて、河道線形や護岸工の有無による土砂移動形態の違いが河床形状と河床材料粒度分布に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

(2) 石礫河川の安定河道断面

一般に、流量、勾配、河床材料の関係から、河道の断面形状は概ね決まると考えられる。砂礫河川について、池田らが安定断面形状について検討している⁷⁾。ここでは、石礫河川の断面決定機構について検討を行う。図-9に石礫河川の流量と水面幅の関係を示す。直線水路で行われた実験結果を併記しており、横軸に流量 Q 、代表粒径 d_{80} 、

エネルギー勾配 I_0 を用いた無次元流量を、縦軸に d_{80} を用いた無次元水面幅を用いている。石礫河川は、巨石等の大粒径の河床材料が存在することで河床が安定するため、代表粒径に d_{80} を用いている。 d_{80} を用いた方が良いが、 d_{80} の存在割合は低く、求まる精度が高くないため d_{80} を選んでいる。自然河岸直線水路と自然河岸蛇行水路の水面幅を比較すると、異なる傾向が見られる。これは、自然河岸蛇行部では、河岸侵食に伴い巨石が崩落し供給されることで、直線水路と比べ粒度が大きくなるためであると考えられる。また、蛇行部の護岸工設置箇所では、本研究では、直線部と比べ無次元流量、無次元水面幅ともに大きい値が得られた。これは、護岸工が設置されていることで河岸からの土砂供給がなく、自然河岸と比較して河床の粒度が小さいためである。図-10に流量規模と安定水深の関係を示す。図-9と同様に横軸に無次元流量を、縦軸に河床材料を用いた無次元水深を示す。直線や蛇行に関係なく、無次元流量が大きくなるにつれて無次元水深が大きくなる事が分かる。これらの値は、著者らによる石礫河川の抵抗関⁴⁾において抵抗係数がほぼ一定値を取る領域に相当している。巨石が出現すること

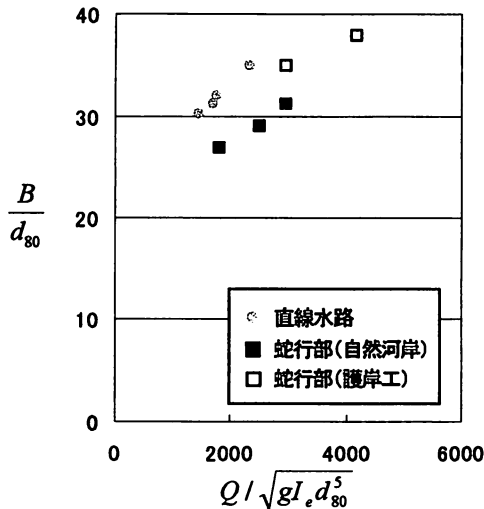


図-9 石礫河川の流量と水面幅の関係

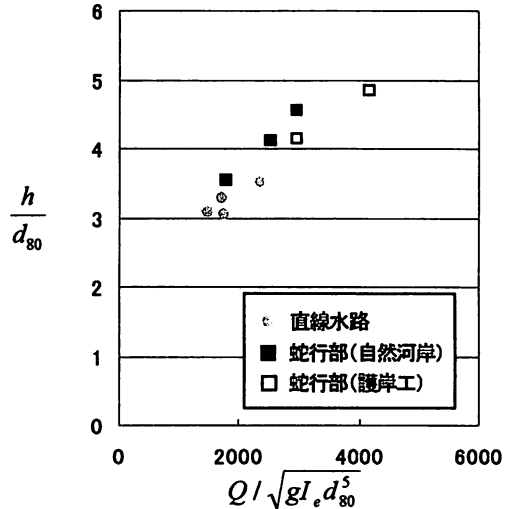


図-10 石礫河川の流量と水深の関係

により河床が静的安定状態となっており、主に巨石の抵抗により水深が決まっているためであると考えられる。

これまでの検討を基に石礫河川の河道の形成機構についてまとめる。流量の増大に伴い、流れの掃流力によって小さい河床材料が動かされ、河床が洗掘される。河床洗掘に伴い巨石が地中から出現することで河床表面の凹凸が大きくなり、巨石が流れの掃流力を受け持つことで、この巨石を中心に静的平衡状態となり広い粒度分布を形成する。さらに流量規模が大きくなると、河床は巨石によりほぼ安定状態となっているため河床洗掘を起こすよりも河岸を侵食し、河積を増大させることで安定状態となろうとする。このとき、河岸侵食に伴い巨石を含む土砂が河床に崩れ落ち、この過程を繰り返すことで側岸勾配は徐々に緩くなる。河岸侵食により供給された巨石を中心に側岸においても静的平衡状態を形成し安定状態となる。特に蛇行部では、直線部と比べ大きな流体力が働いており、河岸侵食が激しく、また、それに伴い河床への土砂供給量も多いため、直線部に比べ大きな粒径集団によって構成される。この段階では、河床も側岸も動かない静的安定横断面形状となる。護岸工が設置されている場合は、流れが護岸工前面に集中することで洗掘が生じるものの、巨石が出現することでやがて洗掘が止まり安定状態となる。護岸工が設置されているため河岸から巨石を含む土砂供給がないために、自然河岸に比べ相対的に小さな粒径集団によって河床が構成される。

さらに流量規模が大きくなった場合も同様に、この一連のプロセスを繰り返し、幅を拡げつつ安定状態の滞筋を形成する。しかし、流量が滞筋満杯水位以上になると、滞筋から溢れ出た流れが、他の滞筋を形成し、最終的には、滞筋の数と滞筋相互の位置関係が変化するような平面的な変動をとると考えられる¹⁾。

4. 石礫河川の河床材料調査法に関する検討

(1) 表層画像解析法とふるい分け試験法の比較

図-11にふるい分け試験により得られた河床材料粒度分布を示す。ここで行われているふるい分け試験は、1.0m×1.0mの調査枠を用い深度方向に0.5mまでをサンプリングし粒度分析を行っている。W19、W16の右岸側は明らかに粒度分布が大きい側に寄っていることが分かる。図-12にW19、W16の右岸側の表層画像解析法とふるい分け試験の比較を示す。W19、W16の右岸側では、ふるい分け試験の粒度が表層画像解析法と比べ大きく、最大で粒径が50cm～70cm程度のもまで含まれている。しかし、撮影されたこの地点の河床表層写真には50cm～70cmの巨石を確認することができず、表層下に存在していたか、一部露出していたものと考えられる。このとき、1.0m×1.0mの調査範囲に対して、50cm～70cmの粒径は大きすぎるため、大粒径の河床材料が1つ含まれることで分布形状が大きく変化してしまう。また、河床表層に存在する巨石には、巨石の半分程度が埋まっている「はまり石状」のものと、「浮石状」のものが存在する。特に、巨石の半分程度が地中に埋まっている状態の材料は、河床表層にはその一部しか露出しておらず、表層画像解析では実際の粒径よりも小さく評価され、表層画像解析法とふるい分け試験とで得られる粒径分布に差が生じることになる。

(2) 従来のふるい分け試験の問題点と改善策

従来のふるい分け試験は、河道形態や河床材料による区別なく、河床表面から30cm以上の表層を取り除き、その下層にある砂礫を採取して粒度分析を行う。また、100mm以上のふるい分け試験の出来ない河床材料については、現地で長径と短径を計測し、100mm以下の試料は現場から試験室へ試料を持ち帰り試験を行う⁵⁾。

この従来の河床材料調査法を石礫河川に適用すると①河床材料調査範囲が石礫河川の粒径集団に対して小さいこと、②河床表層を取り除きその下層の材料を分析すること、よって両者方法の分布に差異が現れることになる。

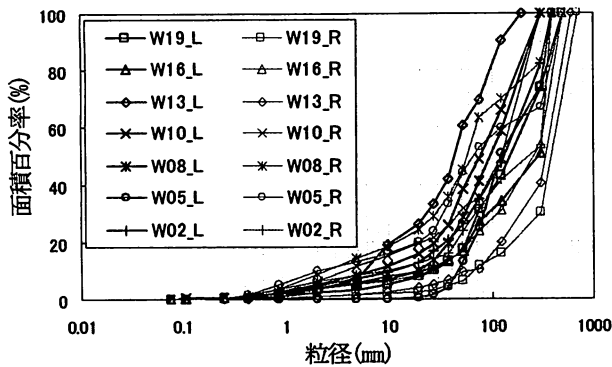


図-11 ふるい分け試験結果

石礫河川では河床表層の材料が重要であると考えられるが、ふるい分け試験により深度方向の影響を含んだ河床材料を考慮することは、流量増大時に起こっている河床低下を考えると重要な意味を持つ。また、ふるい分け試験は表層画像解析法と比べ大きな粒度分布が得られるので、河床材料を安全側で評価することができる。石礫河川では、土砂輸送から見ると河道の滞筋部が侵食型、河床低下型の流れ部を構成しており、砂州の部分は堆積型の流れ部を構成している。治水上の視点から河床材料を見ると、滞筋の河床材料が洪水の最盛時の河床材料を代表していると考えてよく、砂州の部分は洪水の引き水時の堆積したものと考えられる。従って、石礫河川では、滞筋の河床材料粒度分布を測ることが特に大切である。

以上の検討より、ふるい分け試験法を、石礫河川の河床材料粒度分布調査に用いるときに、認識しておくべき重要なことは以下の通りである。石礫河川に適した調査位置、調査範囲、調査深度で河床材料調査を行うことが重要である。調査範囲としては、表層画像解析法で1.6m×1.6mの調査枠を用い石礫河川の特徴を表現する滞筋の粒度分布が得られていることから、常願寺川の粒径集団に対しては最低限1.6m×1.6mの調査範囲が必要であると考えられる。深度方向については、滞筋の河床表層の材料を含め深さ方向に0.5mまでサンプリングを行い、粒度分析することが変動の大きい石礫河道にとって有効であると考えられる。

5. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

(1) 蛇行石礫河川の粒度分布特性と安定河道形状

石礫河川は巨石・巨礫が存在することで静的平衡状態を形成しており、特に蛇行部や護岸工が設置されている場合は、土砂移動の違いが河床形状と河床材料粒度分布に影響を及ぼしていることを明らかにした。また、流量、勾配、河床材料を用いた無次元流量と無次元幅、無次元水深の関係から石礫河川の安定断面形について検討した。その結果、安定水面幅・水深は巨石等の大粒径の河床材料により規定されていることを示した。

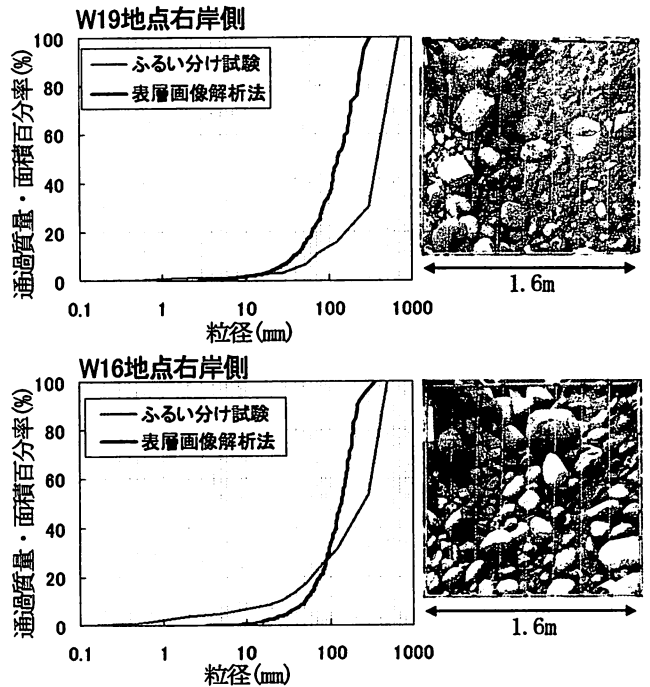


図-12 表層画像解析・ふるい分け試験の比較とそれに対応する河床表層写真

(2) 石礫河川に適した河床材料調査法

従来のふるい分け試験では、粒径集団の大きさに関係なく同じ方法でサンプリングを行っているが、石礫河川に適した調査位置、調査範囲、調査深度で河床材料調査を行う必要がある。また、対象とする粒径集団や目的に応じて、河床材料調査法を使い分けることが重要であることを示した。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 長田健吾: 石礫河川の河床安定に寄与する石の役割, 水工学論文集, CD-ROM(52), 2008.
- 2) 黒田勇一, 福岡捷二, 山本輝, 吉田和弘, 井内拓馬: 礫床河川の滞筋変動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, 山崎憲人, 黒田勇一, 井内拓馬, 渡邊明英: 急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究, 河川技術論文集, 第12巻, pp.55-60, 2006.
- 4) 福岡捷二, 寺沢直樹, 山崎憲人, 塚本洋祐: 巨石を有する礫床河川の水利, 河川技術論文集, 第13巻, pp.339-344, 2007.
- 5) 山崎憲人, 寺沢直樹, 福岡捷二: 巨石を含む広い礫径分布を有する礫床河川における粒度分布調査法, 河川技術論文集, 第13巻, pp.141-146, 2007.
- 6) 塚本洋祐, 福岡捷二, 安部友則: 水面形の時間変化を用いた氾濫流量ハイドログラフの計算法, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, II-064, 2008.
- 7) 池田駿介, Gary PARKER, 千代田将明, 木村善孝: 直線礫床河川の動的安定横断形状とそのスケール, 土木学会論文集, 第375号, pp.117-126, 1986.

(2008. 4. 3受付)