

礫床河川の澱筋形成機構と河床粒度分布特性

FORMATION MECHANISM OF GRAVEL BED RIVERS AND ITS CHARACTERISTICS OF GRAIN SIZE DISTRIBUTION

黒田勇一¹・福岡捷二²・山本輝³・吉田和弘⁴・井内拓馬⁵

Yuichi KURODA, Shoji FUKUOKA, Teru YAMAMOTO, Kazuhiro YOSHIDA and Takuma IUCHI

¹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長 (〒930-8537 富山市石金3-2-37)

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 大阪府港湾局建設部港湾課 (〒540-8570 大阪府中央区大手前2丁目)

⁴国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所 (〒930-8537 富山市石金3-2-37)

⁵学生会員 広島大学大学院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

To estimate the scouring depth and river-bed variation in steep channels is important for the flood disaster prevention. The river bed material in steep channels which has a wide grain size distribution provides useful information on river-bed scouring and variation. But reasonable methods to estimate the grain size distribution are not established well and needed for the steep channel design.

In this study, we analyzed the past flood data and bed variation data and carried out the field experiment in the floodplain of the Jyoganji River. From the present research we clarified the characteristics of the river-bed variation on gravel rivers and the grain size group which controls the stability of the river bed. Furthermore, we found availability of the use of the pictures of the bed's surface for understanding the grain size distribution in steep slope river.

Key Words : gravel rivers, field experiments, graded sediment, grain size distribution, thalweg

1. はじめに

我が国の河川の勾配は諸外国の河川と比べ急峻であり、その上、土砂の生産域の近くに多くの人口や資産を抱えており、災害を受けやすい環境にある。急流河川は大洪水といえども水位はそれほど高くはない場合が多いが、流速が早く河岸を侵食し流路を変動させる。このため、必ずしも大洪水が危険性が高いのではなく、中小洪水時の河床洗掘によって破堤が懸念される。それに対して、現在では護岸の根入れ工を深くしたり、根固め工の根継ぎをすることが主要な治水対策となっている。これに対しては、対策費がかかることと、有効性からも再検討が必要となっている。従って、急流礫床河川の合理的な治水対策を検討する際、いつ、どこで、どのような大きさの洗掘深が発生するかを精度良く判断できる技術の確立が必要不可欠となる。急流河川の出水時の諸現象や急流河川工法についての調査、研究は少ない。福岡・土屋²⁾は北陸の急流河川の河道特性と洪水流特性を整理し、加えて急流河川の流れと河床変動に対する現地、水理模型実験と数値解析の結果を比較し、それぞれの検討の有

効性を示している。しかし、洪水時の水量と洗掘深、河床粒度分布等の関係は明らかにされておらず、最大洗掘深推定法の確立には至っていない。そこで、本研究ではわが国有数の急流礫床河川である常願寺川において、河床変動が生じる要因を明らかにし、最大洗掘深の推定法の確立につなげることを目指している。河床変動は土砂移動の収支によって引き起こされ、土砂移動は河床材料の粒度構成に支配される。さらに、粒度分布は最大洗掘深や洪水時の粗度係数、河川環境の把握などに非常に有用な情報となるが、これまでの河床材料調査法は利用目的ごとに定められておらず、同一の採取法に沿って行われてきた。急流礫床河川の河床材料は広い分布を持つ混合粒径によって構成されていることから、利用目的に応じた河床材料の調査法の確立が課題である。

本研究では、最初に、縦横断河床高、河床粒度分布、洪水流量等の既存の経年データの分析より洪水による礫床河川の河床変動を検討し、さらに、常願寺川における大規模現地実験により、礫床河川の河道の形成過程を把握する。

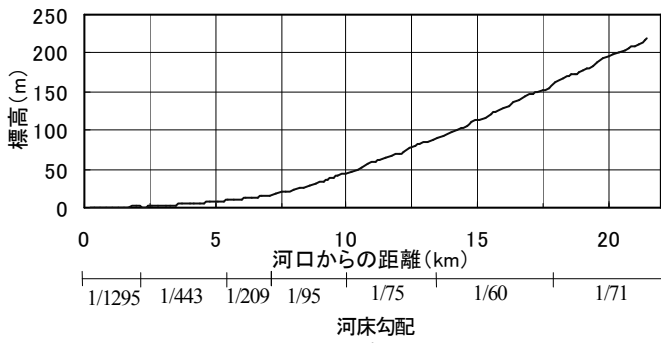


図-1 河床縦断面図

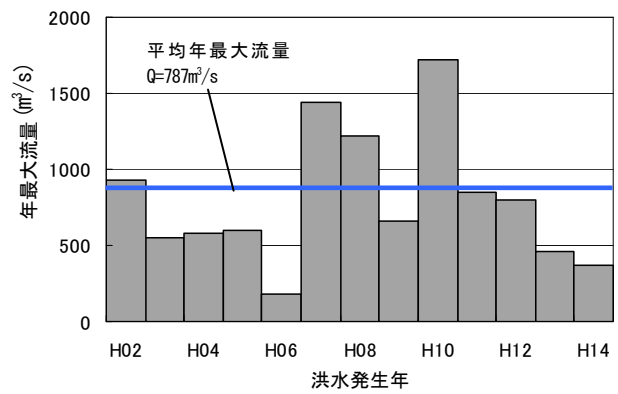


図-3 年最大流量

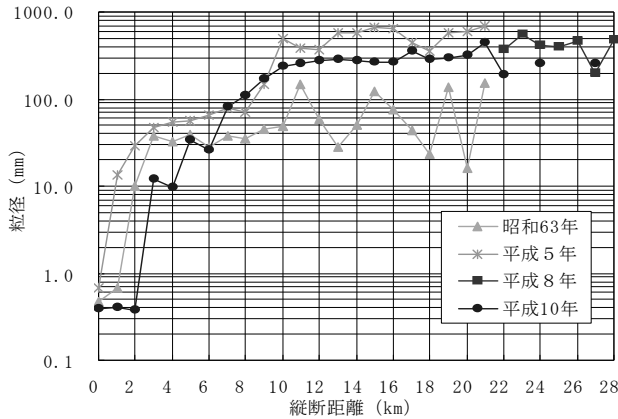


図-2 D_{60} の縦断変化

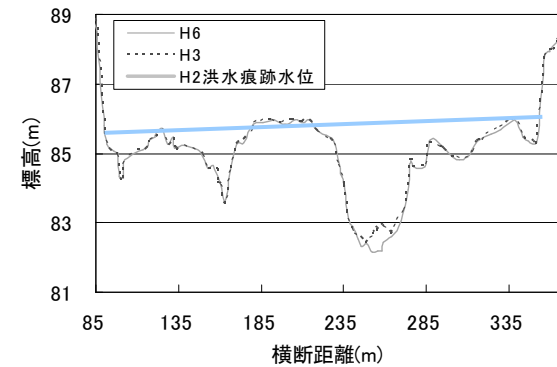
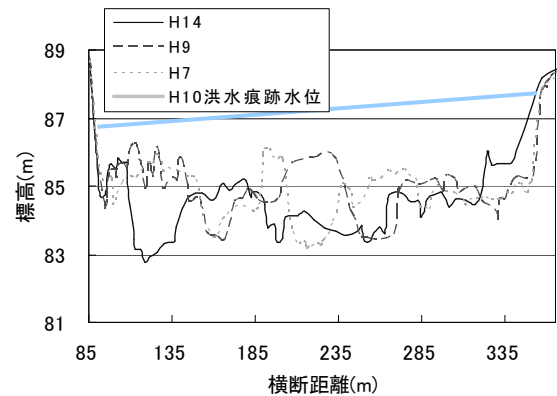


図-4 河床横断面図 (13.1km地点)

2. 常願寺川河道経年データの分析

(1) 常願寺川の概要

常願寺川は、我が国有数の急流・扇状地河川であり、図-1 に示すとおり河口から7km付近が勾配変化点となっている。河床勾配は河口付近で1/1,300程度であったものが、河口からわずか10kmで1/70まで急激に変化している。図-2 は河床材料 D_{60} の縦断分布であり、下流域の数 cmから10km地点では30 cm程度と大きく変化する。常願寺川の河床の形態は複数の滞筋を形成する複列砂州の領域に区分される。

(2) 河床変動特性

a) 洪水規模と河床変動の関係

図-3 と図-4 にそれぞれ年最大流量の経年変化と13.1km地点の河床横断面図を示す。平成7年から9年の間には $1200\text{m}^3/\text{s}$ 、平成10年には $1,700\text{m}^3/\text{s}$ の洪水が発生している。図-4 よりこのような $1,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水が発生すると、滞筋と砂州の位置関係や洗掘深が大きく変化し、河道全体で河床変動が生じているのがわかる。平成10年の洪水痕跡水位を見ると、砂州上の水深は1~2 m程度あり、砂州上の河床材料も動くと考えられる。それに対して $500\text{m}^3/\text{s}$ 程度の洪水の起きている平成3年から6年の期間では、砂州部はほとんど変化が無いが、滞筋部は洗掘深が増加している。これらのことから、急流河川におい

て滞筋の洗掘問題を考える際には、中小洪水についても考慮する必要があるといえる。

b) 滞筋の変動特性

最大洗掘深は滞筋に現れるため、洗掘問題を考える際に滞筋の形成と変動特性を把握しておくことは重要である。図-5 に滞筋本数の縦断分布を示す。ここでは、便宜上、滞筋は低水路平均河床高よりも低い部分と定義している。また、平成3年から14年の間に5回の横断測量が行われており、滞筋最大本数は5回の測量のうち各横断面内に現れた最大の本数、滞筋平均本数は5回の平均の本数である。常願寺川の河床形態は複列砂州に区分され、河道内には平均的に2,3本の滞筋が存在している。滞筋の本数は低水路幅と堤間幅に強く依存しており、幅が広がる断面では本数が増加し、狭まっていく断面では減少している。このことから、堤間幅、低水路幅が洪水の流

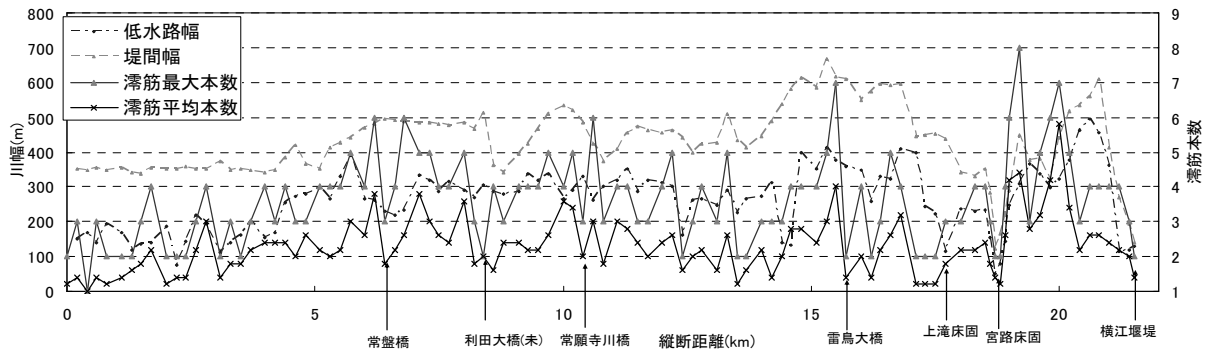


図-5 滞筋本数の縦断分布 (平成3年～平成14年)

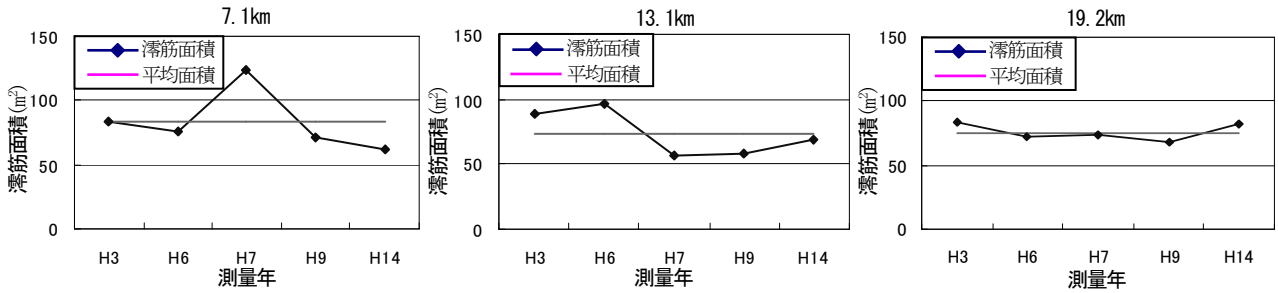


図-6 滞筋面積の変動

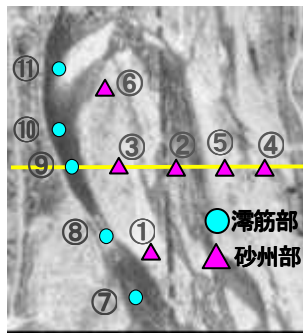


図-7 平面調査位置 (13.1km)

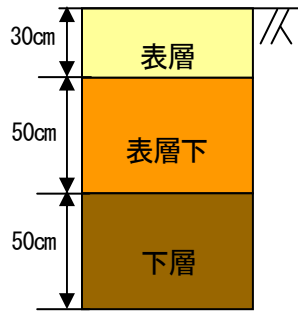


図-8 鉛直方向調査位置

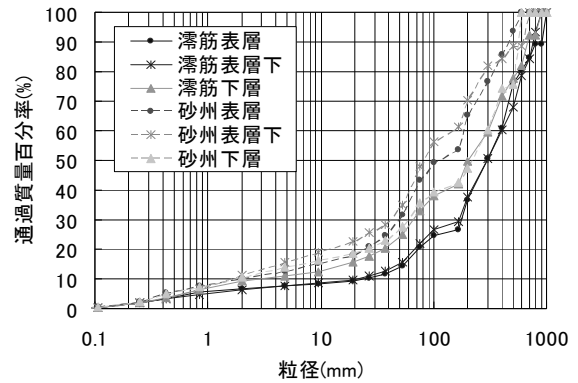


図-9 各層の平均粒度分布 (13.1km)

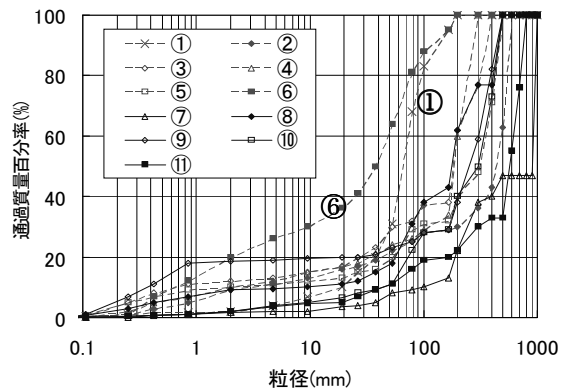


図-10 表層粒度分布 (13.1km)

れ方と、流砂の運動を特徴づける重要な要素であり、より運動の自由度が高いほど多くの滞筋を形成する。また、橋梁や床固、堰堤などの構造物が存在する場所では流水と流砂の動きが制限されるため、滞筋の本数が少なくなり、滞筋の横断位置の変化も小さくなることが確認された。

図-6 に3断面の滞筋面積の経年変化を示す。滞筋面積は断面内の全滞筋の断面積を合計したものである。グラフより、それぞれの断面で滞筋面積の経年的な変化はそれほど大きくないといえる。滞筋本数の経年的な変化が大きい19.1km断面 (図-5 参照) においてもそのようなことから、断面ごとに平均的な滞筋面積がほぼ、決まっており、洪水で滞筋の本数やその位置が変動しても、その平均の面積に近づくような河道の構造になるように変化していると考えられる。

(3) 河床粒度分布特性

河道形態による粒度分布特性の違いを把握するために、7.1kmと13.1km断面において、図-7 に示すとおり砂州部と滞筋部の両方で河床材料調査を行なった。また、河床

深度による粒度特性の違いを把握するため、図-8 に示す様に表層30 cm、表層下50 cm、下層50 cmの3層に分けて河床材料を採取し、ふるい分析が行われた。

a) 河床形態による粒度分布特性の違い

図-9 に河道形態別の各層の平均粒度分布を示す。表層、表層下のどちらも砂州部よりも滞筋部の粒径が大きくなっている。これは、滞筋部のほうが流れの掃流力が

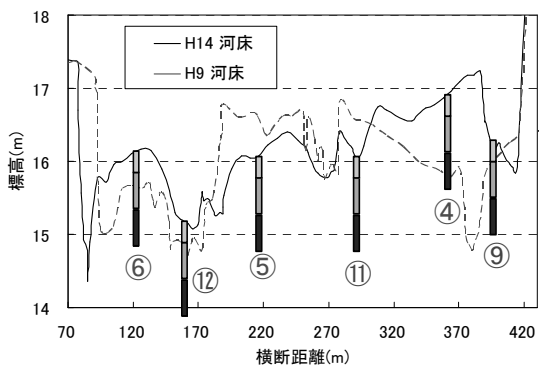


図-11 鉛直・横断採取位置(7.1km)

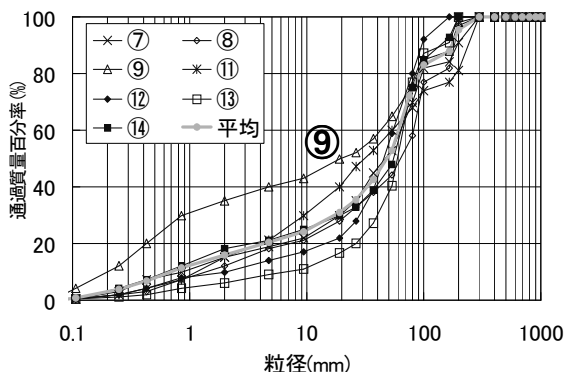


図-12 湍筋部表層下粒度分布(7.1km)

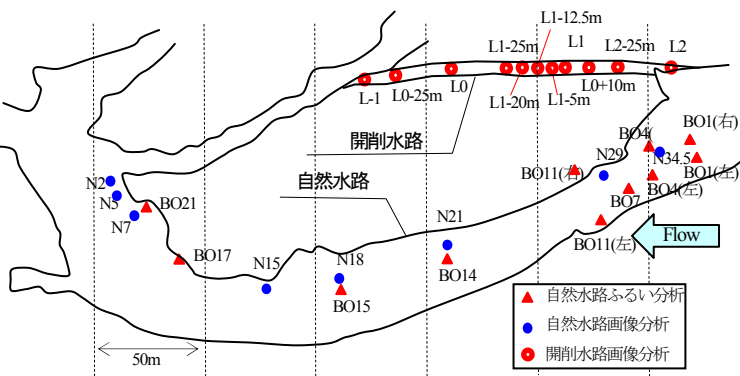


図-13 水路平面図及び河床粒度調査位置

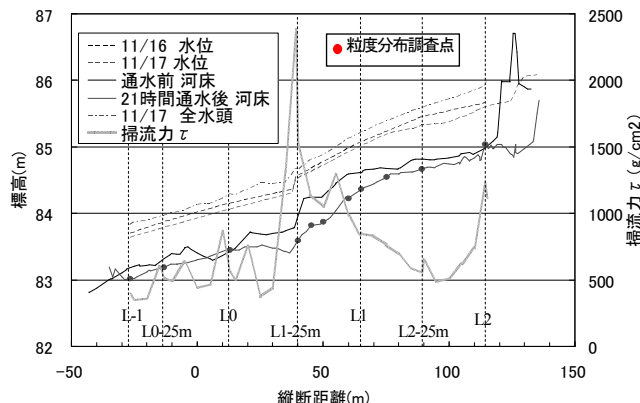


図-14 開削水路の河床高、水位、掃流利縦断分布

大きく、河床材料がふるい分けられるためである。また、砂州部は堆積が卓越するため図-10 の①や⑥のように特異な粒度分布形状を示す場合が見られる。

b) 深度特性

表層、表層下は砂州・湍筋それぞれ特徴的な粒度分布となっているが、下層では両者の粒度分布がほぼ一致している。図-11 に示す横断面内の調査位置を見ると、砂州部の下層はほぼ湍筋の河床面の高さであり、大きな洪水時には湍筋となって土砂が移動していた層であると考えられる。そのため砂州部の下層には混合した河床材料が堆積しており、湍筋部下層と一致するといえる。図-12 は湍筋部表層下の調査結果であるが、⑨の粒度が特に小さくなっている。横断面内の調査位置に着目すると、表層下がちょうど平成9年時に砂州であった部分に当たり、砂州部を調査したことに相当しているためである。逆に砂州の表層下が以前の湍筋部分になっているケースも見られた。以上のことから、急流河川の河床粒度分布特性は河道形態の違いや、洪水による河床変動履歴の影響を受けるため、河床材料の調査法や調査結果を検討する際にはそれらの点を考慮する必要がある。

3. 常願寺川現地実験

(1) 実験概要

礫床河川の流路形成機構とそれに伴う河床材料特性を明らかにするため、また河床材料調査法を検討するため、現地水路を開削し実験を行った。現地実験は図-13 に示す常願寺川の13.1km地点付近で行った。これ以降実験のために河道内に新設した水路を「開削水路」、それに対して元々河道内に存在する湍筋流路を「自然水路」と呼ぶこととする。開削水路は河床を素掘りにしたもので、全長約170 m、水路幅約4 mの直線水路である。開削水路の上流端は、盛土により締切られている。締切り土を取り払い自然水路に締切りを設けることにより流れを自然水路からの流れを開削水路へと切り替える。流れを切り替え、自然水路を締め切ることにより、自然水路には水流が絶たれ、河床粒度分布、河床形状の測定が可能となる。一方、水流のある開削水路において、縦断水位、流量を測定する。開削水路の河床高が平衡状態になるまで通水した後、開削水路から自然水路へと流れを戻す。ここで、開削水路の河床表面粒度分布、縦断河床形状を測定することにより掃流利と河床変動、河床粒度分布の関係等を調べる。河床粒度分布は河床表面を(2 m×3 m)四方の大きさの区域を(1 m×1 cm)の6個の小区域に分けたデジタル画像の解析よりそれぞれの小区域の粒度分布を求め、それらを平均することにより求めた。自然水路についてはこの方法に加え、表層0～40 cmと表層下40 cm～80 cmの河床材料を採取し、それぞれふるい分析を行い、画像解析による方法との比較を行った。実験初日の

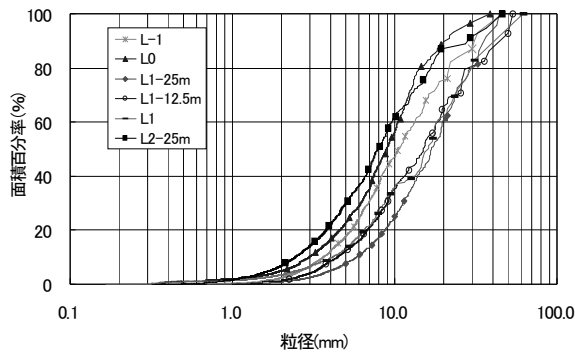


図-15 開削水路粒度分布

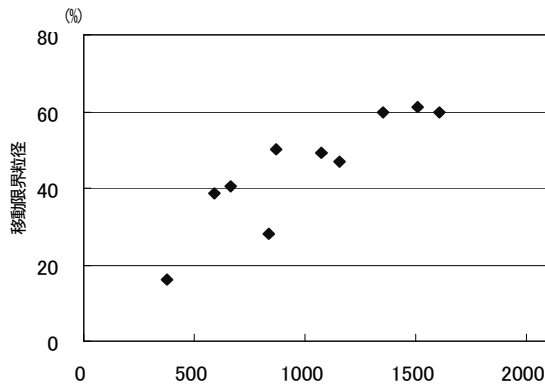


図-16 掃流力と限界粒径の関係

11月16日に降雨があったため、開削水路内の流量は初日が $8.09 \text{ m}^3/\text{s}$ 、17日には $7.00 \text{ m}^3/\text{s}$ まで低下していた。

(2) 開削水路の河床変動

図-14 に水位、全水頭、河床高、掃流力の縦断分布を示す。掃流力は、河床形状が形成されたと考えられるピーク時の流量($8.09 \text{ m}^3/\text{s}$)を用い算出している。通水によって初期河床の勾配が大きい区間(L1-25m~L1)の河床が大きく洗掘され、さらに勾配が大きくなっている。また、測岸の侵食についても急勾配で掃流力の大きいL1-25m~L1区間において侵食量が大きいことが確認された。これらのことから、河床変動・河岸侵食と掃流力の間には強い関係があり、流路が一様な直線区間であれば、最も掃流力が大きくなる急勾配部で最大洗掘が生じる。

(3) 開削水路の河床粒度分布

図-15 に画像分析による粒度分布調査結果を示す。急勾配区間であるL1~L1-25mの粒径が大きく、反対に緩勾配部であるL0~L-1区間、L2-25m~L1+10m区間の粒径は小さくなっている。ピーク流量時($8.09 \text{ m}^3/\text{s}$)の水量を用いて算出した掃流力の縦断分布と比較すると、掃流力は急勾配部で大きく、緩勾配部で小さくなっており、河床粒度分布の大小関係と同様な関係になっている。図-16 の横軸は各粒度分布調査地点の掃流力、縦軸はその掃流力を移動限界掃流力として求めた粒径がその場の粒度分布の何%粒径に相当するかを示したものである。掃流力の大きい場所ほど移動限界粒径が大きくなってお

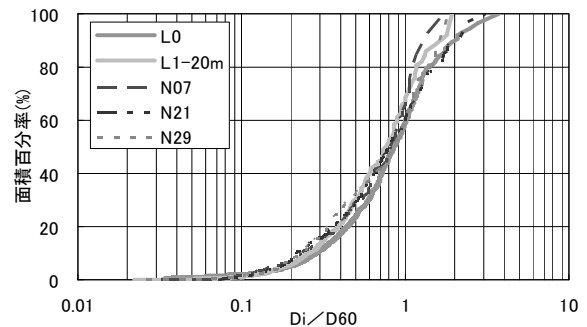


図-17 粒度分布形状の比較

り、大部分の河床材料が移動する河床粒度と掃流力の関係となっている。このことから、掃流力の大きい場所では大きい粒径範囲の河床材料が河床の安定に対して必要な量が露出するまで河床が低下することになる。

(4) 河床粒度分布の形状

図-17 は、各調査場所の粒度分布を D_{60} で無次元化して粒度分布形状を比較している。自然水路と開削水路の両方で D_{80} 以上を除いてどの場所でも形状がほぼ一致している。 D_{80} 以上の粒度分布の形状が変わるのは、それぞれの粒度分布に大粒径の礫がどの程度含まれているかによる。自然水路と開削水路の比較から、両者の粒度分布形状特性は概ね一致している。これは、常願寺川の河床は非常に広い粒径幅を持ち、異なる掃流力に対しても応答できるほどの粒度分布を有していることを示している。以上のことから、流水の作用を受けた河床表面の粒度分布の粒径を D_{60} で無次元化した形状はほぼ同様になることから、 D_{60} によって粒度分布を評価することが可能であり、掃流力等から D_{60} を予測することができれば、その場の河床粒度分布の概略を求めることも可能であると考えられる。

(5) 礫床河川の流路・河床変動機構

これまでの結果を踏まえ、礫床河川の流路・河床変動機構を考察する。平均年最大流量以下の規模の洪水が流下すると、掃流力に耐えられない小さい粒径の河床材料は流送され、河床は低下し、粗粒化していく。同時に濡筋測岸の侵食も進行し、大きい礫は河床に転がり落ちて留まり安定な河床に近づいていく。礫床河川は粒径の幅が広いので、濡筋はある程度大きな掃流力に対しても粗粒化することで河岸侵食に耐える河床粒度を形成し安定化する。そのため、開削水路や自然水路において局所的な急勾配部や緩勾配部が濡筋内に連続して存在することになる。この点が、下流の緩勾配区間の河床材料がほぼ様な粒径からなるために河床勾配もほぼ一様となることと、大きくことなる点である。流量が増大し水深が濡筋満杯以上になると、主流となっていた濡筋から他の濡筋に流れが流入し分派する。それに加え、流速の小さい砂州部と大きい濡筋部の流れの混合により、流量が増

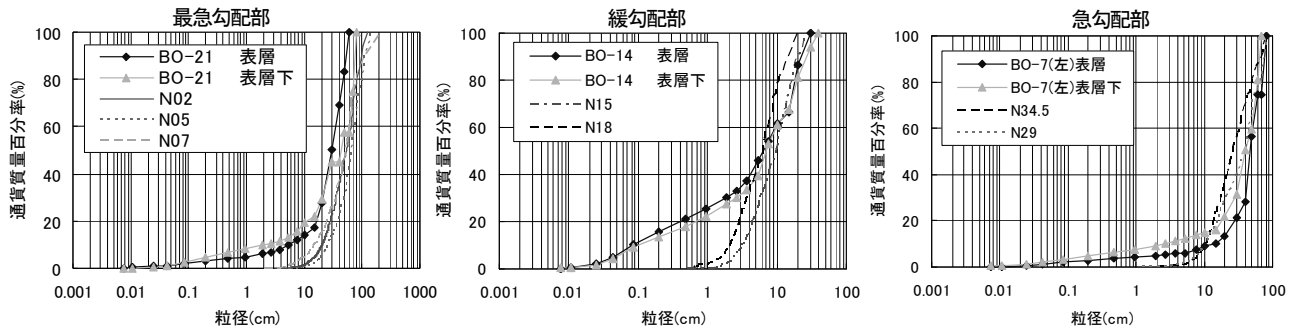


図-18 ふるい分析と画像分析の比較

大してもある範囲内では濡筋内の掃流力の上昇が抑制される³⁾と予想される。さらに大きい平均年最大流量規模の洪水が流下すると、砂州上の水深が大きくなり砂州部でも河床材料の移動が始まる。また、濡筋部においても河床粒度の変化では掃流力に対応できなくなり、濡筋と砂州の位置関係が変化するような、河道全体での河床・流路変動が生じるものと考えられる。

(6) 河床材料調査法の検討

図-18 は自然水路におけるふるい分析と画像分析の結果である。自然水路は、上流の急勾配部、中流の緩勾配部、下流の最急勾配部により構成されている。急勾配部、最急勾配部において二つの分析方法を比較すると、 D_{20} ～ D_{30} 程度より小さな粒径で、両者の差が大きくなっている。これは、画像分析では数 mm以下の粒径の河床材料を分析することが困難であり、逆にふるい分析では河床表層下の細粒分まで分析可能なためである。河床表層に多くの細粒分が存在する緩勾配部では、ふるい分析と画像分析の差が顕著に現れている。しかし最大粒径や D_{60} などは両者ほぼ同様の値を示しており、特に急勾配部では画像分析によって、ふるい分析結果の特徴を表している。以上の結果から画像分析の特徴を示す。

- ・ 広範囲の河床粒度を容易に把握でき、尚且つ多くの点を平均化できる。
- ・ ふるい分析結果の特徴を表せる。
- ・ 細粒分の分析が困難である。

これらに加え、河床表面の粒度分布は掃流力や洗掘深と対応したものとなっていることから、粒度分布から掃流力など流れの特徴を知ろうとする場合や、河床表面が重要である粗度係数の推算に河床表面画像の分析は有効である。次にふるい分析の特徴を示す。

- ・ 深度特性を把握できる。
- ・ 細かい粒径を分析できる。

以上のことに加え、図-9 に示されているように河床の下層は平均的な粒度分布になることから、ふるい分析は河道の平均的な粒度を把握したい場合や、細粒分も重要である河川環境の把握に有効であると考えられる。

5. 結論と今後の課題

河床変動特性と粒度分布特性について

礫床河川の特徴は、河床が広い粒径集団から構成されていることから、洪水の規模（掃流力）に応じた河床材料が河床で卓越するように濡筋の構造（大きさ、深さ、数等）が決まることである。

- ・ 年最大流量(800 m³/s)程度の洪水で河道内全体での河床変動が見られるが、中小洪水でも濡筋内では河床変動が生じており、洗掘問題を考える際には中小洪水についても考慮する必要がある。
- ・ 礫床河川の流路・河床変動と河床粒度の間には洪水規模に対応した密接な関係がある。
- ・ 直線部であっても、水面勾配は局所的に大きく変化する。水面勾配が局所的に最大となる急勾配部で最大洗掘が生じる。
- ・ 河床材料の粒度分布は河床変動の履歴や、濡筋・砂州など河床形態の違いの影響を受ける。
- ・ 掃流力の大きい場所では、大きい粒径範囲の河床材料が河床安定に重要な役割を果たしている。
- ・ 河床表面の粒度分布は、粒径 D_{60} で無次元化するとほぼ同様な形状をとる。
- ・ 河床表面の画像分析から求めた粒度分布は、ふるい分けで得られる粒度分布とほぼ同じ分布を与える。画像解析から求めた粒度分布は掃流力、粗度係数等の流れの把握に有効な情報を与える。

このような大規模現地実験によって、礫床河川の流路・河床変動と河床材料の間に洪水規模に対応した密接な関係があることが明らかとなり、礫床河川の河道形成について展望が開けたといえよう。さらに、大きい洪水流量について開削水路を用いて現地実験を再び行い、流路変動機構と河床粒度の形成機構を調べ、本文で得られた結果が広い範囲で成立するかを確認することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 建設省北陸地方建設局富山工事事務所：常願寺川の急流河川工法，第一共同印刷，1979。
- 2) 土屋進：急流河川の河道計画と河床変動対策，広島大学学位論文，2001。
- 3) 福岡捷二：洪水の水理と稼働の設計法，治水の環境の調和した川づくり，森北出版，2005。

(2005. 4. 7受付)