

巨石を有する礫床河川の水理

HYDRAULICS IN GRAVEL BED RIVER WITH BOULDERS

福岡捷二¹・寺沢直樹²・山崎憲人³・塚本洋祐⁴

Shoji FUKUOKA, Naoki TERASAWA, Norihito YAMAZAKI and Yosuke TSUKAMOTO

¹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)

²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課長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

³国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所河川環境課環境調査係長 (〒930-8537 富山県奥田新町2-1)

⁴学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 博士課程前期課程 土木工学専攻
(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

In steep gravel bed rivers, cobbles and boulders play an important role on stability of the river bed. So we have to consider the resistance of boulders existing on the river bed as well as bed forms in gravel bed rivers. It is important to assess the channel geometry as width and depth formed as a function of flow rate, bed slope and bed materials in gravel bed river. In this study, we used the results of field experiments carried out in the flood plain of the Jogajji River. At first, we clarified characteristics of the stable bed form in a gravel bed river with boulders. Secondly we estimated frictional and form resistances and bed geometry in gravel bed rivers from observed data.

Key Words : *gravel bed river, bed material, boulder, form resistance, hydraulic design*

1. はじめに

急流礫床河川では、既往の研究^{1),2)}より、流れの掃流力に耐えうる巨石等の大粒径の河床材料が、河床表面に出現し、その周りに中小の様々な粒径の河床材料が留まることで、広い粒度分布を形成し、安定な河床形状を形成することが明らかにされている。一般的に流れの抵抗を考える際、緩流河川においては、河床形態が流れの主要な抵抗要素となる。しかし、急流礫床河川では、この河床形態による抵抗に加え、洗掘や堆積により出現した粗石・巨石等の大粒径の河床材料自体が、流れの抵抗になると考えられる。よって、摩擦抵抗だけでなく、大粒径の河床材料が存在することにより生じる形状抵抗を考慮することが必要である。

また、合理的な水理設計を行う際、安定水面幅、水深等を考える必要がある。既往の研究として、池田ら⁴⁾により、混合粒径の直線礫床河川の動的横断形状を対象とした研究が行われている。しかし、この研究は、混合粒径を対象としているものの、常願寺川のような大粒径の河床材料が存在する河川までは考慮されておらず、粗

石・巨石等が存在する礫床河川に適した水理設計法について検討を行う必要がある。

本研究では、2004年から2006年の3年間常願寺川で行われた大規模現地河川実験の結果を基に、流量規模と水面幅・水深～河床材料の関係から急流礫床河川の形状特性について検討を行う。次に、流速、径深、粒径、相当粗度、摩擦損失係数の関係から、急流礫床河川における流れの抵抗評価を行い、巨石を有する礫床河川の水理設計のための有効な基礎資料を提供する。

2. 常願寺川現地実験

2004年から2006年にかけて、わが国有数の急流河川である常願寺川の河川敷に水路を掘削し、礫床河川の洪水と河床変動の解明を目的に、みお筋規模の水路における大規模現地実験を行った^{1),2)}。本研究では、この現地実験のデータを基に、礫床河川の横断形状、流体抵抗の検討を行っている。2004年実験¹⁾は常願寺川13.1km地点、2005年実験²⁾は11.3km地点の河道砂州を直線状に掘削することにより実験水路を作成した。また、2006年実験は

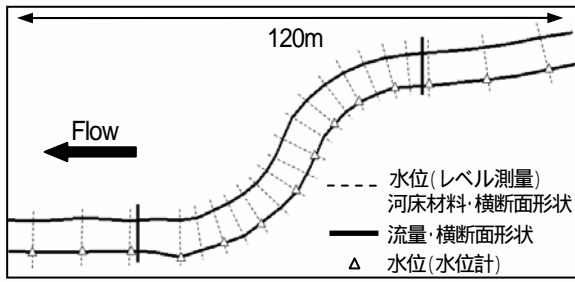


図-1 2006年実験平面図

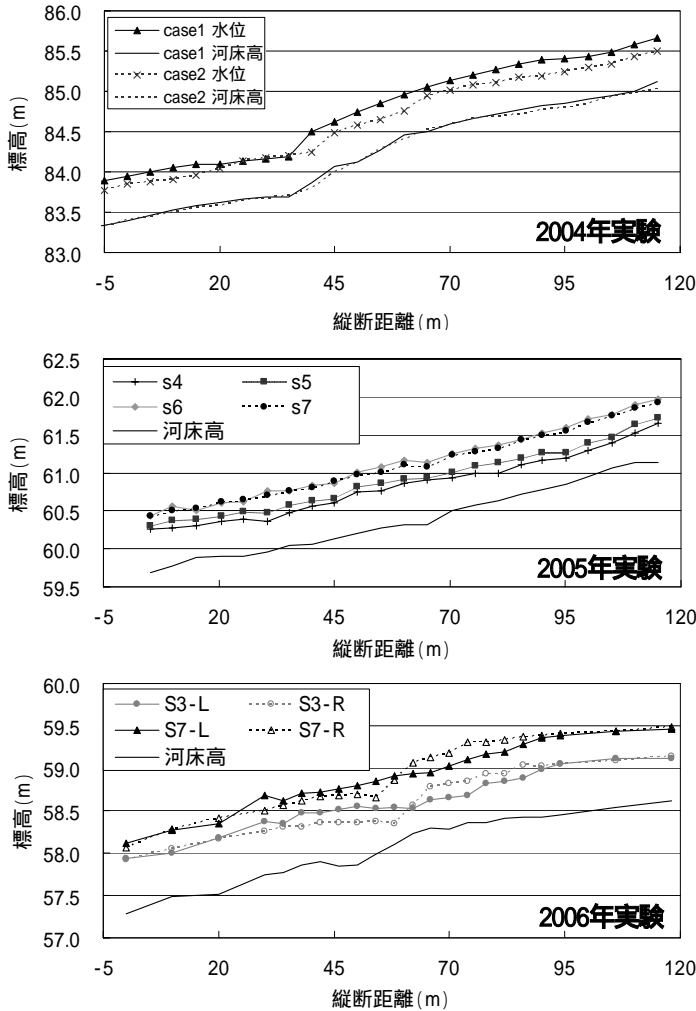


図-2 水位縦断分布と平均河床高

11.1km地点の河道砂州を、図-1に示すような二つの蛇行部を有する蛇行形状に掘削することにより実験水路を作成した。実験開始時の水路幅は、2004年、2005年実験は4m、2006年実験は3mであり、側岸勾配は1:1である。常願寺川11.3km地点における平均年最大流量時の単位幅流量は $2.71\text{m}^2/\text{s}$ 、現地実験の単位幅流量は $2.40\sim 2.57\text{m}^2/\text{s}$ であり、しかも現地の河床材料を用いていることから、これらの実験は、常願寺川の一つの澗筋規模で、流量は平均年最大流量規模の洪水に相当する実験を行っていると考えてよい。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、特に水位は縦断的に密に計測

表-1 観測流量・無次元掃流力・無次元限界元掃流力

		$Q(\text{m}^3/\text{s})$	$*d_{80}$	$*cd_{80}$
2004	case1	7.0	-	-
	case2	3.8	-	-
2005 上流側	S4	9.1	0.052	0.042
	S5	10.0	0.041	
	S6	15.6	0.059	
	S7	16.4	0.065	
2005 下流側	S4	8.2	0.031	0.040
	S5	11.7	0.035	
	S6	18.9	0.053	
	S7	16.3	0.052	
2006 上流側	S3	10.9	0.020	0.043
	S5	9.9	0.012	
	S6	15.3	0.020	
	S7	15.4	0.014	
2006 下流側	S3	10.1	0.028	0.044
	S5	10.7	0.028	
	S6	15.0	0.042	
	S7	16.3	0.042	

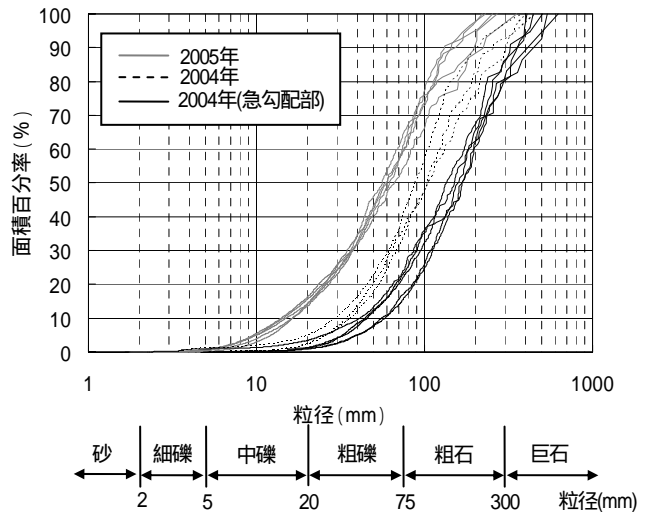


図-3 河床材料粒度分布(2004年・2005年実験)と粒径区分

されている。また、2005年、2006年実験は水路の上下流部で流量観測を行っており、流量観測断面では河床横断面形状の時間変化を測量している。2006年実験は蛇行水路で実験が行われているが、流量観測断面は蛇行部の上下流部に位置する直線区間である。

図-2に水位縦断分布、平均河床高を示す。2004年実験は水路の中央部に急勾配部が存在し河床勾配は1/47、急勾配部より上流側では1/118、下流側では1/77であり、2005年実験では水路全体で一様に1/76、2006年実験は蛇行部で左右岸に分けて水面形が示されているが、河床勾配は水路全体で一様に1/90である。表-1に観測流量、無

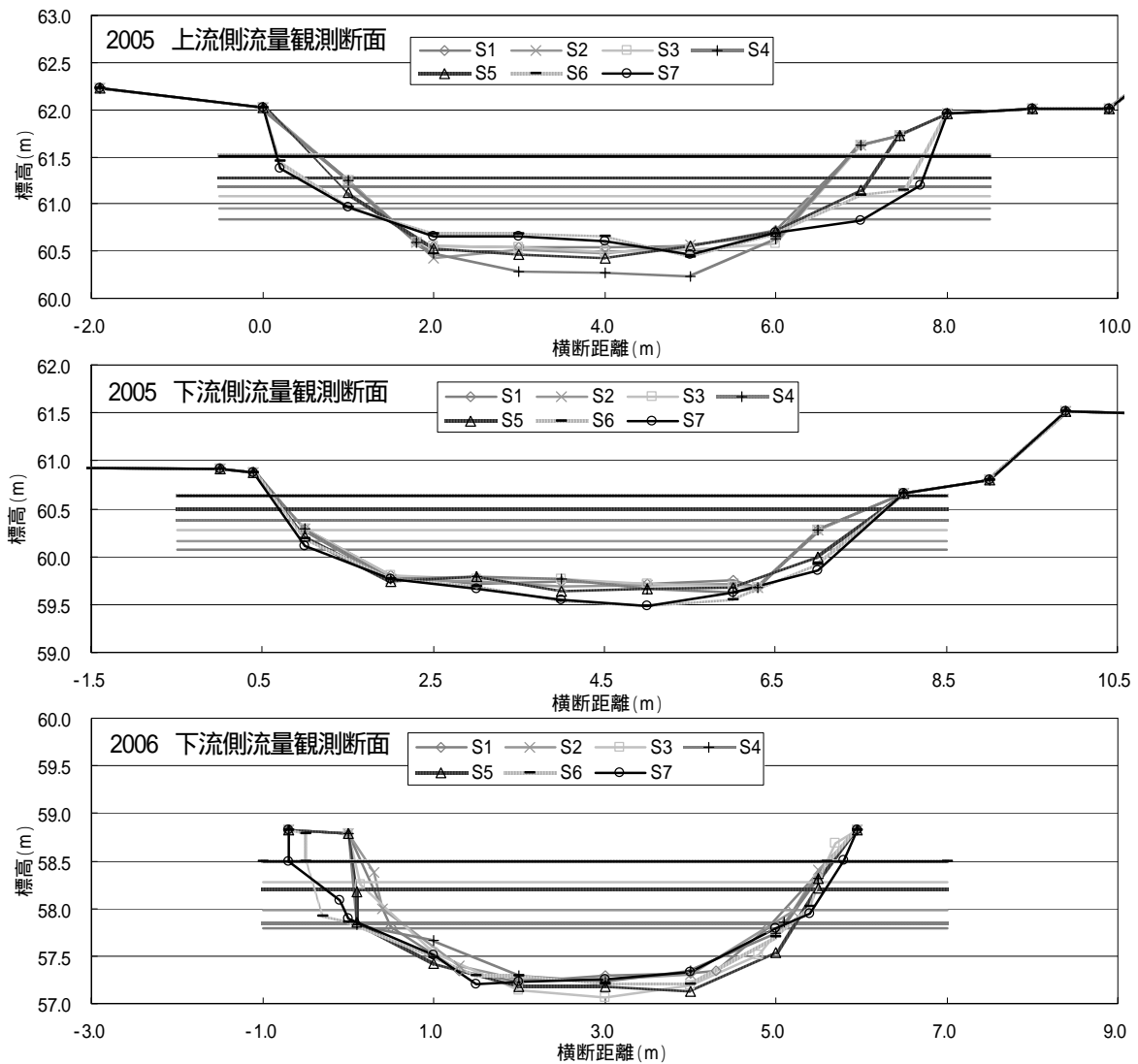


図-4 2005年・2006年実験 流量観測断面の水位と河床横断面形状の時間変化

次元掃流力, d_{80} の無次元限界掃流力を示す. 2004年実験は $3.8\text{m}^3/\text{s} \sim 7.0\text{m}^3/\text{s}$, 2005年実験は $8.2\text{m}^3/\text{s} \sim 18.9\text{m}^3/\text{s}$, 2006年実験は $9.9\text{m}^3/\text{s} \sim 16.3\text{m}^3/\text{s}$ の流量で実験が行われており, 2005年, 2006年実験は2004年実験の2倍に相当する流量で行われている. また, 2006年実験は流量が表-1に示されるS3の時に一度通水を止め, 河床横断面形状, 河床材料粒度分布を詳細に調べている. いずれの実験も, 各流量規模において河床が安定するまで定常流を通水している. 代表粒径 d_{80} に対応する無次元掃流力は $0.028 \sim 0.065$, Egiazaroffの式から求めた無次元限界掃流力は $0.040 \sim 0.044$ の値をとる. 2006年実験の上流側流量観測断面では, 無次元限界掃流力が無次元掃流力より大きくなっている. これは, 流量調節作業に際して, 締め切り部分の部分開削に伴い, 締め切り土を構成する巨石・粗石等が流入し, 上流直線域では流れの掃流力に見合わない大きな粒径の河床材料が堆積したためと考えられる. よって, この地点は検討から除外している. 図-3に2004

年, 2005年実験の河床表層の河床材料粒度分布と粒径区分を示す. 粒径区分は日本土質工学会の土質分類基準³⁾に準じており, 300mmを超える粒径の河床材料を巨石, 75mm~300mmの粒径の河床材料を粗石と定義している. 2004年実験は2005年実験より上流で行われているため全体的に河床材料が大きいことが分かる. また, 2004年実験では, 急勾配部で掃流力が大きくなるため, それに対応する河床材料も大きくなっている.

3. 礫床河川の河床形状特性

(1) 礫床河川の河床変動機構

池田ら⁴⁾は, 直線礫床河川の動的横断面形状を対象とした研究を行い, 動的安定横断面形状が成立するには, 流路中央部で土砂移動が存在し, かつ側岸部では静的安定状態(限界掃流力状態)になっていることが必要であるとの考えのもとに, Parkerの一樣粒径の河川動的安定理論⁵⁾

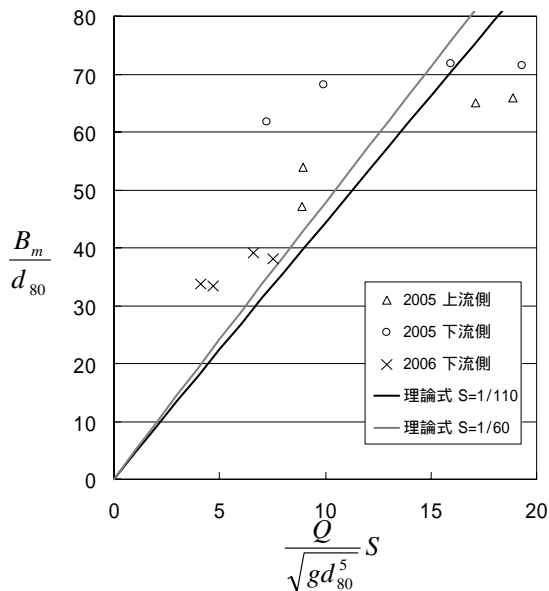


図-5 流量規模と水面幅の関係

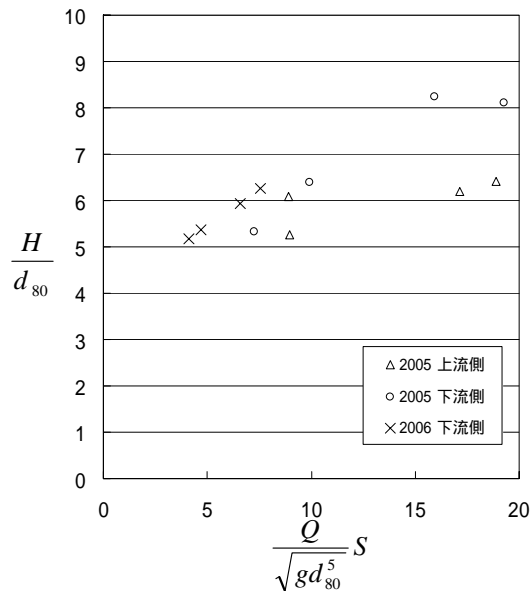


図-6 流量規模と水深の関係

を基礎とし、混合粒径の効果をとり入れた河川の動的安定形状を取り扱っている。理論式として中央部水深、動的安定幅に関する式を導出し、この二式をベキ表示式で近似することで式(1)、(2)を導出している。

$$H_{cm} = 0.0620 d_{50} S^{-1} \sigma^{0.431} \quad (1)$$

$$\frac{B_m}{d_{50}} = 12.4 \left(\frac{Q}{\sqrt{g d_{50}^5}} \right)^{0.986} S^{1.11} \sigma^{-0.5} \quad (2)$$

ここで、 H_{cm} ：中央部水深、 B_m ：動的安定幅、 S ：水面勾配、 $\sigma = d_{90} / d_{50}$ 、 g ：重力加速度、 Q ：流量、下付き m は混合粒径を示す。

図-4に2005年・2006年実験流量観測断面の水位と河床横断面形状の時間変化を示す。2006年実験は2005年実験と比べ実験水路の幅が狭く、また、2005年・2006年実験は同程度の流量を通水しているため、2006年実験の水深が2005年実験と比較して大きくなる。2005年実験ではS4～S5通水時に、2006年実験ではS3・S5通水時に河床の洗掘が進み、それ以降の大流量通水時に側岸が侵食し、この側岸侵食に相当する分、河床が上昇している。

(2) 礫床河川の安定水面幅・水深

流量、勾配、河床材料の関係から安定水面幅・水深の考察を行う。図-5に流量規模と水面幅の関係を示す。横軸に流量を無次元化した $Q / \sqrt{g d_{80}^5} S$ を、縦軸に水面幅を無次元化した B_m / d_{80} を示している。図中の理論式は池田の式(2)を近似したものを、プロット値は著者らの実験で得られた流量観測断面の水面幅の値を示している。常願寺川は、巨石・粗石等の大粒径の河床材料が存在することで河床が安定していると考えられるため、代

表粒径に d_{80} を用いている。実験値は流量規模が大きくなるに従い、水面幅が大きくなる傾向が見られるものの、理論式と傾きは異なっている。図-6に流量規模と水深の関係を示す。図-5と同様に横軸に流量の無次元量を、縦軸に平均水深を無次元化した H / d_{80} を示している。全体の傾向として、流量規模が大きくなるに従い水深が大きくなってはいるが、その変化量は小さい。

池田の動的安定横断面形状理論では、側岸部では静的安定状態であるが、水路中央部では、土砂移動が存在していることが条件である。池田が行なった移動床実験では、中央粒径1.3mm、 $\sigma = 1.72 \sim 2.4$ の混合砂を用いており、この場合には動的安定横断面形状が起こりうる。しかし、常願寺川のような巨石を含む大粒径から小粒径まで存在する河床、側岸では、巨石や粗石が河道の安定に重要な役割を果たし、動的安定横断面形状は起こりづらい。即ち、ある一定流量の条件の下で、河床構成材料の移動によって河床変動が起こっても、大きな粒径の河床材料が表面に現れてくると、それらが卓越した抵抗要素となり、相対的に小さな粒径の礫は、大きな河床材料の遮蔽効果を受けて、やがて全ての河床材料が移動しなくなる状況が起こる。この段階では、河床部も側岸部も静止状態になる。巨石を含む広い粒径集団の河床や側岸の場合には、動的安定横断面形状は成立せず、全ての領域が限界掃流力状態になる。このことが、池田の理論から求まる川幅、水深と常願寺川実験の川幅、水深が異なる理由であると考えられる。

常願寺川のような場合の平衡川幅や水深を求めるには、巨石を含む広い粒径集団の限界掃流力を適切に評価できなければならない。混合粒径の限界掃流力を示す Egiazaroffの式は、このような巨石を含む場合には適用で

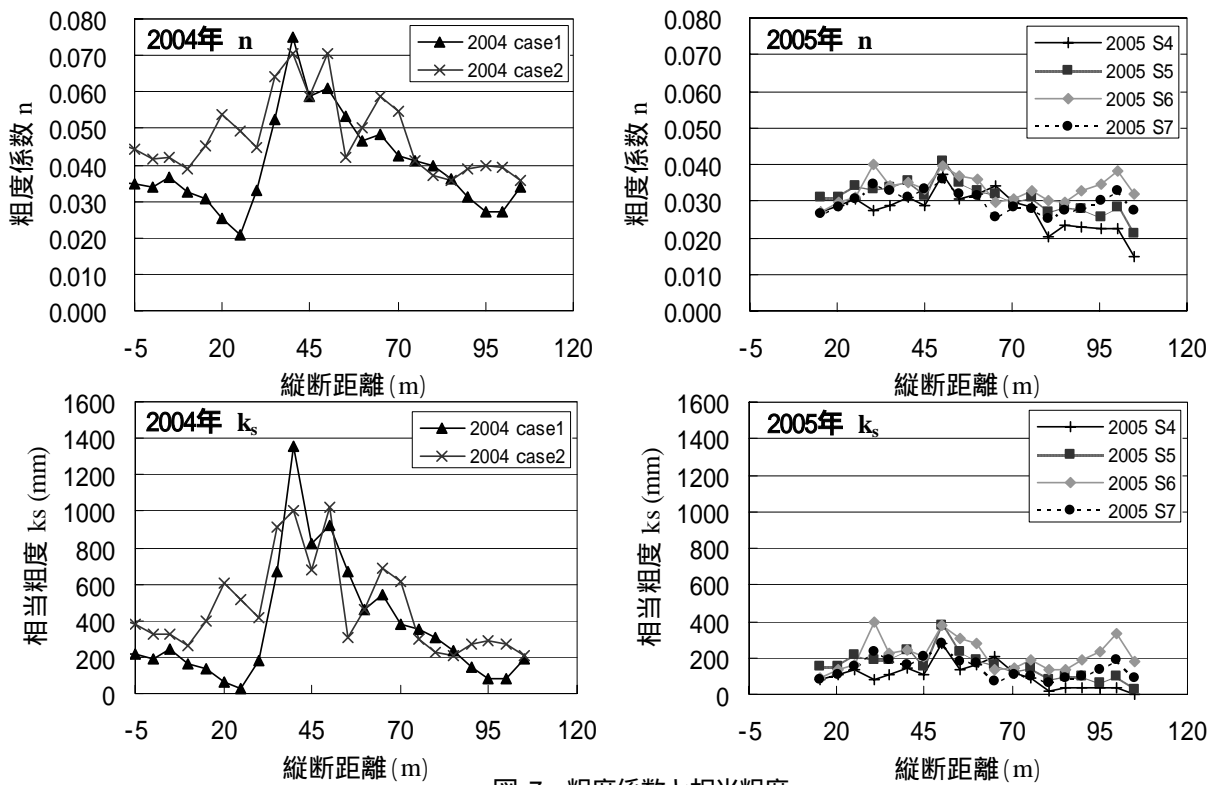


図-7 粗度係数と相当粗度

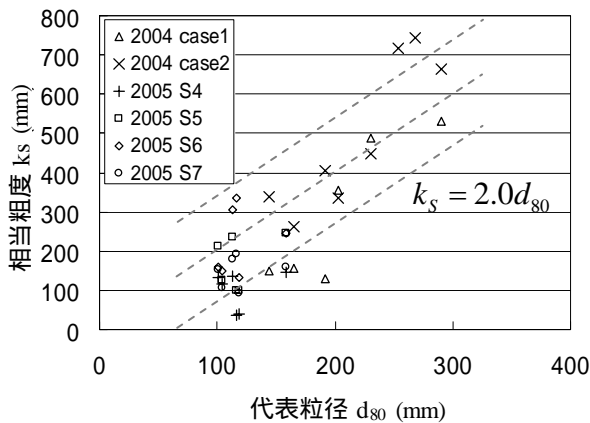


図-8 相当粗度 k_s と代表粒径 d_{80} の関係

きないことが、著者らによって示されている^{1), 2)}ので、新たな力学的考え方に基づく限界掃流力や、河床の土砂輸送の理論が必要である⁶⁾。

4. 巨石を有する礫床河川の抵抗評価

(1) 粗度係数・相当粗度

図-7に実験から得られた流量、水面幅、水深、水面勾配を用いて求めた粗度係数 n と相当粗度 k_s を示す。相当粗度 k_s は粗面に対する対数分布式(3)より算出してい

$$\frac{u}{u_*} = 6.0 + 5.75 \log_{10} \frac{R}{k_s} \quad (3)$$

る。ここで、 u ：流速、 u_* ：摩擦速度、 R ：径深であ

る。2004年実験では、急勾配部において粗度係数、相当粗度がともに大きくなる。これは、急勾配部では河床形状と巨石等によりエネルギー損失が大きいことが原因である。2004 case1は、急勾配部で $n=0.040 \sim 0.070$ 、 $k_s=400\text{mm} \sim 1400\text{mm}$ 、その他の区間では $n=0.030 \sim 0.040$ 、 $k_s=200\text{mm} \sim 400\text{mm}$ 程度であり、2004 case2は、急勾配部で $n=0.050 \sim 0.070$ 、 $k_s=600\text{mm} \sim 1000\text{mm}$ 、その他の区間では $n=0.040 \sim 0.050$ 、 $k_s=300\text{mm} \sim 600\text{mm}$ 程度の値をとる。2005年実験は $n=0.025 \sim 0.035$ 、 $k_s=100\text{mm} \sim 300\text{mm}$ 程度の値をとる。

(2) 礫床河川の抵抗図

図-8に相当粗度 k_s と代表粒径 d_{80} の関係を示す。 $d_{80}=100 \sim 300\text{mm}$ にかけて $k_s = 2.0d_{80}$ の関係が見られる。図-9に礫床河川の抵抗図を示す。この図は、管路流のムーディ図⁷⁾に準じている。実験は完全粗面で行われており、 f' には、ムーディ図横軸に用いられているレイノルズ数は関係しないことから、代わりに、 d_{80} を用いた流量の無次元表示である $Q/\sqrt{gd_{80}^5}$ を横軸に選んでいる。摩擦損失係数 f' は式(4)に、開水路流の粗面の対数分布式(3)を代入することにより求めた。

$$f' = 2 \left(\frac{u_*}{u} \right)^2 \quad (4)$$

ここでは河床に存在する巨石・粗石等により生じる形状抵抗が考えられるが、すべて摩擦抵抗に含め計算して

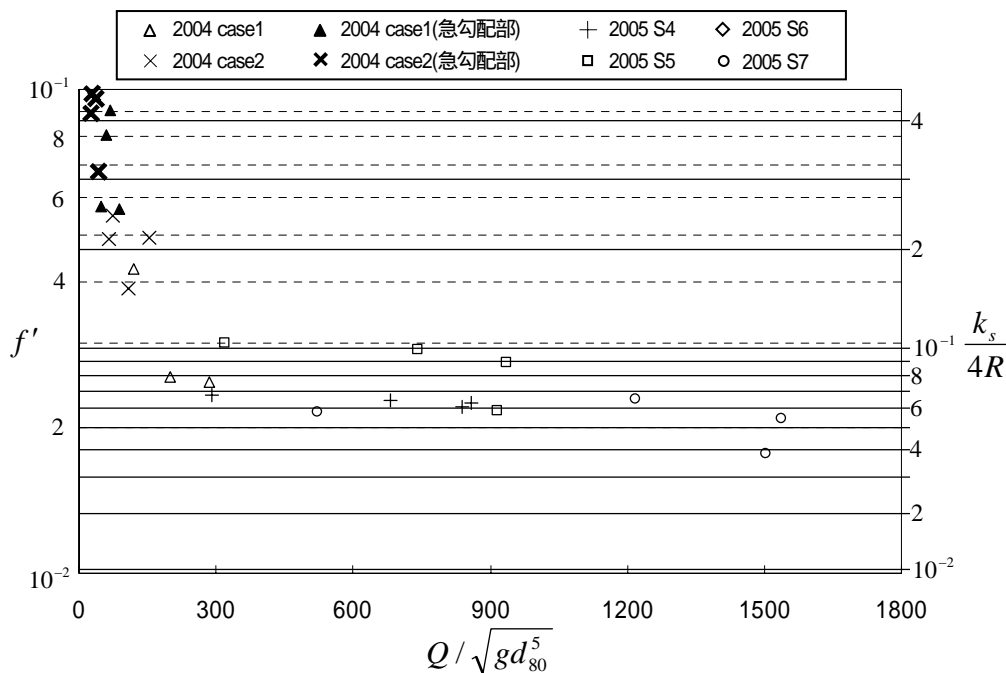


図-9 礫床河川の抵抗図

いる。右軸は相対水深を示している。図-8に示す $k_s = 2.0d_{80}$ の関係から、相対水深は粒径と水深（径深）の比でもある。この図より、摩擦損失係数 f' は $Q / \sqrt{gd_{80}^5}$ が300より大きければ、 $k_s / 4R \sim k_s / d_{80}$ によって決まり、 f' は0.02～0.03の値をとることがわかる。 $Q / \sqrt{gd_{80}^5}$ が小さくなるに従い f' と粒径・水深（径深）比が大きくなる。これは、河床材料が大きな抵抗を及ぼしているためである。粒径の異なる他の礫床河川においても図-9に示す礫床河川の抵抗図がどのような特性を示すか検討する必要がある。

5. おわりに

以下に、本研究で得られた結果と課題を示す。

(1) 礫床河川の安定横断形状特性

水面幅、水深、河床材料について、実験値と既往の研究とを比較し検討を行った。その結果、流量、河床材料、水面勾配の関係から巨石等を含む広い粒径集団により河床・河岸が構成されている河川の水面幅・水深は池田らの動的安定形状をとらず、むしろ、静的安定横断形状となることが示された。静的安定横断形状を解析的に検討するには、巨石等を含む河床材料の限界掃流力の評価が課題であることが示された。

(2) 礫床河川の流体抵抗

実測された流量、代表粒径 d_{80} 、相対粗度 k_s / R を用いて、礫床河川の摩擦係数 f' を求める抵抗図を作成し、流体抵抗の評価を行った。本実験では、抵抗係数

は無次元流量が300以上では $f' = 0.02 \sim 0.03$ の値をとることが明らかとなった。

(3) 水理設計

得られた礫床河川の抵抗図と安定横断形状の関係を用いて、多くの礫床河川の水理量を検討し、水理設計のための資料を蓄積していくことが重要である。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 山崎憲人, 黒田勇一, 井内琢磨, 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.
- 2) 黒田勇一, 福岡捷二, 山本輝, 吉田和弘, 井内琢磨: 礫床河川の濁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) 土質工学会編: 土の見分け方入門, 土質工学会, pp.63-72, 1981.
- 4) 池田駿介, Gray 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.
- 5) Parker, G: Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 2. The gravel river, JFM, vol.89 Part 1, pp.127-146, 1978.
- 6) 長田健吾, 福岡捷二: 礫床河川の河床変動機構に基づいた新しい河床変動解析法の提案, 第34回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, -070, 2007.
- 7) Hunter Rouse: Elementary Mechanics of Fluid, Dover Publications, 1946.