

ダム下流のアーマー化河床における粗度層内流速分布に関する現地観測と 水理実験

埼玉大学 学生会員 ○松尾 昂祐
 埼玉大学大学院 正会員 田中 規夫
 埼玉大学大学院 学生会員 Saqib Habib
 埼玉大学 非会員 今岡 健志

1. 目的

河川上流では運搬される土砂による礫の侵食・堆積により、動的に河川環境が保たれているが、ダムや堰などにより川の流れが阻害されると運搬される土砂がせき止められ下流の河床が粗粒化する。粗粒化した河床では水生昆虫の多様度の低下や付着藻類の異常繁茂に伴う景観の悪化、悪臭問題などの環境面での問題が発生する。そうしたダム下流での対策として、フラッシュ放流や土砂還元事業が行われている。土砂還元を効率的に行うためには、還元土砂の移動に関与する河床付近の流れ場を把握する必要がある。既往の研究により相対水深の小さい流れにおいては従来の対数分布則が成り立たず、粗度層で指数分布、礫上で後流分布、直線分布またはS字分布が成り立つことがわかっているが汎用的な知見にはなっていない¹⁾。また、環境調査を行う際に、調査箇所²⁾の6割水深の高さを簡易計測することで水深平均流速を求める場合がある²⁾。これは流速分布に対数則が成り立つことを前提として行っており、粗粒化河川で正しく平均流速を評価しているかは不明である。

以上を踏まえ、本研究では、1)河床における礫の配置と流速分布の関係、2)実験で得られた知見の実河川への適用可能性、3)粗粒化河床における流速分布と平均流速の関係、を明らかにすることを目的として水理実験と現地における流速観測を行った。

2. 現地における流速分布の観測

2015年10月二瀬ダム下流約2.7km地点の平瀬を対象として流速調査を行った。地点の粒度分布を図-1に示す。現地の50%粒径は92mm程度である。相対水深(水深/代表粒径相当の巨礫)が2~3程度、礫間距離(巨礫の流下方向の礫長に対する巨礫の間隔)約

1~3倍程度の河床の箇所を選定して観測を行った。河床の骨格を形成する巨礫の間隔(以降、礫間隔)の異なるM地点、N地点、O地点の3地点で行った(図-2)。礫間隔はM、N、O地点で、それぞれ0.9倍、1.5倍、2.5倍であった。田中³⁾によれば、平板上の半球背後における剥離域の再付着点距離は半径(半球高さ)の1.7倍程度であり、その前後の距離によって特性が大きく変わることが想定されたためである。

現地では水路実験のような整った礫の配置が存在しないため、図-3のような礫によって遮蔽領域が作られる空間を選定し、電磁流速計を用いて流速の測定を行った(図-4)。使用した電磁流速計は株式会社ケネック製の「VMT2-200-04P型」である。サンプリングは100Hzで1分間行った。測定は礫の中央測線上のA. 上流側の礫裏、B. 側面の礫による加速域、C. 下流側の礫の前面の3点で行い、測定した流速を平均することにより粗粒化河床の時空間平均した流速分布を得た。鉛直方向の測定に関しては、流速分布が急激に変化する粗度層内と礫周辺高さでは細かく、礫上では間隔を広げて計測を行った。観測区間における礫のデータを表-1に示す。ただし流れに対し上流側の礫をF、左岸側の礫をL、右岸側の礫をR、下流側の礫をBとした。観測に使用した礫の一例を、図-5に示す。

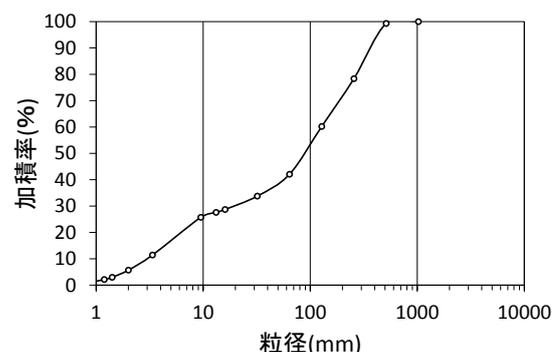


図-1 現地観測地点における粒度分布

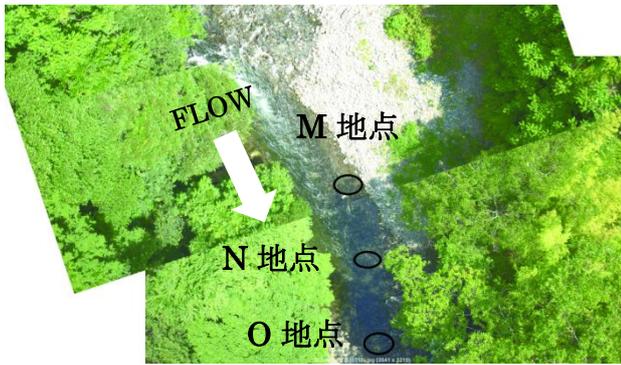


図 - 2 計測を行った地点

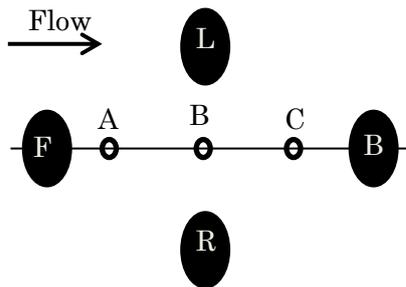


図-3 流速分布の計測線の位置概要



図-4 流速分布測定状況

表-1 調査区間における礫データ

M地点	F	L	R	B
長軸[cm]	36	22	23	49
短軸[cm]	34	12	15	22
厚さ[cm]	28	12	12	20
N地点	F	L	R	B
長軸[cm]	25	23	32	44
短軸[cm]	20	22	20	21
厚さ[cm]	22	15	23	24
O地点	F	L	R	B
長軸[cm]	30	21	21	39
短軸[cm]	22	20	17	23
厚さ[cm]	18	19	19	30



図-5 調査に使用した礫の一例(表 - 1 の M 地点 R)

3. 現地実験に類似した条件での室内実験

現地の粗粒河床を模した水理模型を用いて流速分布を求めた。実験には水路長 14.0m, 水路幅 0.5m, 深さ 0.4m, 最大流量 $2.5 \times 10^4(\text{cm}^3/\text{s})$ の水路を用いて行った。水路上端 2.5m の地点より小礫(平均粒径 16mm, 標準偏差 5.3mm)を敷き, その上に大礫(平均粒径 103mm, 標準偏差 6.3mm)を流下方向の礫の長さの 3 倍となるように千鳥配置で設置した。通水は相対水深が 3 倍となる水深 12cm となるよう行った。

解析は上端から 6.3m の地点で PIV(Particle Image Velocimetry : 粒子画像流速測定法)を用いて行った。PIV 解析ではトレーサー粒子を投入した流れ場中にレーザーを照射し, 可視化したトレーサー粒子の動きをハイスピードカメラで撮影し, そのデータを画像処理ソフトで解析することで流れ場の流速やレイノルズ応力を求めた。解析に用いた動画撮影カメラには高速度カメラ「High Speed Digital Camera K - II」, 解析ソフトには, カトウ光研株式会社の 2 次元流体化ソフトフェア「Flow Expert Ver1.2.6」, トレーサーを可視化するためのレーザーはグリーンレーザー「PIV Laser」を使用した。PIV 解析は, 図-6 に示す 5 断面で行い, 時空間平均により, 流速分布を求めた。

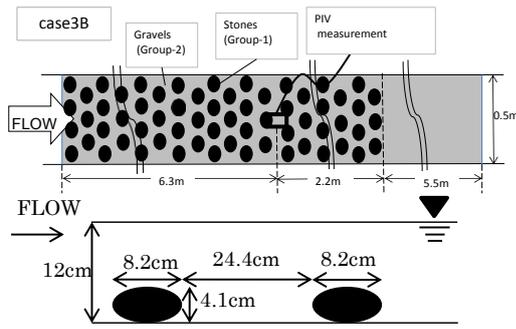


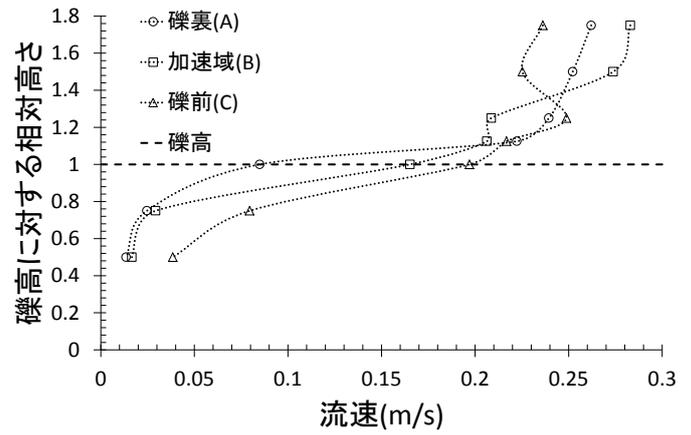
図-6 水理模型実験概要
(田中ら¹⁾から一部引用)

4. 水理実験と現地観測結果の比較・考察

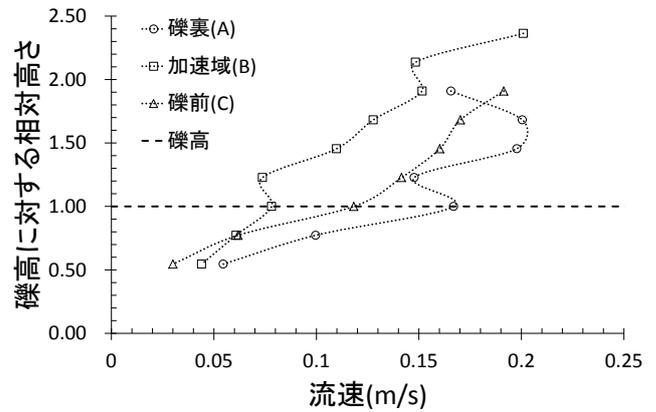
図-7 (a)-(c), 図-8 に, それぞれ, 現地における礫間隔ごとの流速分布, 室内実験における流速分布の計測結果を示す. はじめに(a)から(c)をそれぞれ比較する. 礫間隔の狭い(a)M地点では粗度層内で指数分布, 礫上でS字分布もしくは対数分布に近い分布形状を示すが, (b) N地点, (c) O地点と礫間が1.5倍から2.5倍へと広がるにつれ, 礫上層の流速分布と礫層の指数分布を接続する水深が底面近くになっているのがわかる. 底面付近の流速も同様に礫間隔が広がる毎に大きくなっている. これらは大礫の間隔が広いことで, 礫上層と礫層の間で活発な運動量の交換がなされていたことが原因として考えられる. また, 巨礫の間に充填している中規模礫間において生じる浸透流も無視することはできない. さらに, 礫高付近では計測線毎に流速が異なっている. これは礫頂点付近で生じた剥離流れによるものであると推測できる.

次に室内実験により得られた各断面の流速分布を比較する. L1~L3 までと L4・L5 とでは底面流速に差が生じている. これは礫間の加速流により加速されたことが原因であると考えられる. このことからL3とL4との間に礫の後流の境界が存在することが推察される. L5においては流れの粗度による遮蔽効果が及ばないことから指数分布的な流速分布を示していない.

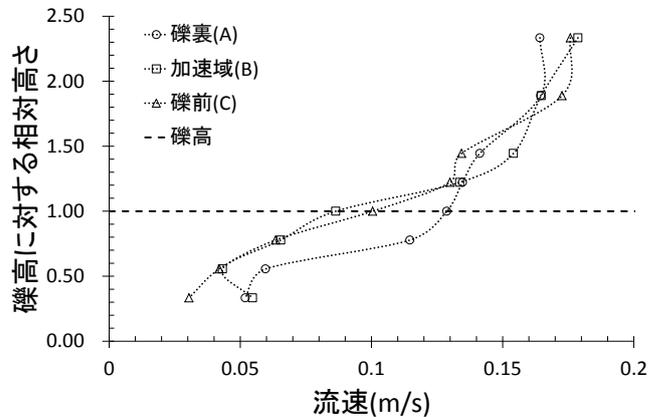
L1~L3は現地の礫裏・加速域に, L4・L5は礫前の流速分布に類似した傾向を示している. このことから現地観測・室内実験で得られたデータを



(a) M地点(礫間隔0.8倍)



(b) N地点(礫間隔1.5倍)



(c) O地点(礫間隔2.5倍)

図-7 異なる礫間隔での流速分布比較

(A, B, Cについて図-3参照)

それぞれ平均したものは類似の意味を示すと考えられる. そこで, これらのデータに加え, Habibら⁴⁾が行った既往の研究データを引用・利用して水理実験と現地観測結果の比較を行った(図-9). 比較に用いたデータは河床条件が室内実験に最も近い礫間隔2.5倍のケースを用いた. Habibら⁴⁾の実験では礫間の間隔が狭いCase1, Case1と本実験の礫間隔の間であるCase2が行われた. 現地で得られたデータ

を平均化したものは粗度層の半分程度の高さまで指数分布、それより上層はS字分布もしくは対数分布のような分布形となっている。巨礫の間隔においては、Case3が本実験で行われた条件に最も近いが、礫層内の指数分布の傾向はCase1に最も類似している。水理模型実験におけるCase3でははっきりとした指数分布は底面のごく近傍に限られ、巨礫が原因の指数分布は明確に確認できない。これらのことから粗粒化河床の乱流構造の発達においては巨礫間に充填された小・中礫が流れに大きな影響を与えることが示唆される。現地では巨礫と底面の礫の直径比は2.5程度で、底面付近の影響を強く受け、底面礫の下面付近から中央付近まで指数分布の流速分布が形成されていると考えられる。これは山地河川の底面の取り方、代表粒径の取り方の難しさを示している。こうした流速分布とそれに基づく真の底面せん断力評価が還元土砂の移動評価に重要であることから、礫の粒度分布を考慮した流速分布について、さらなる研究が必要である。

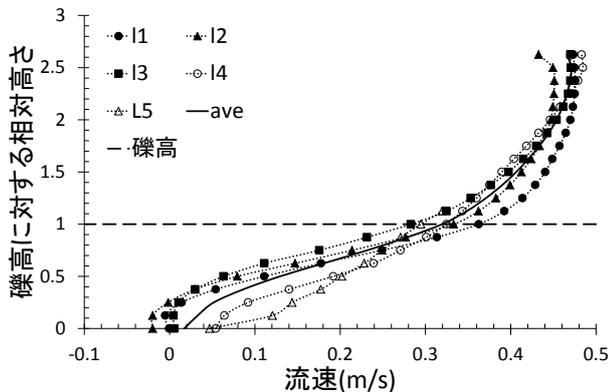


図-8 室内実験における流速分布

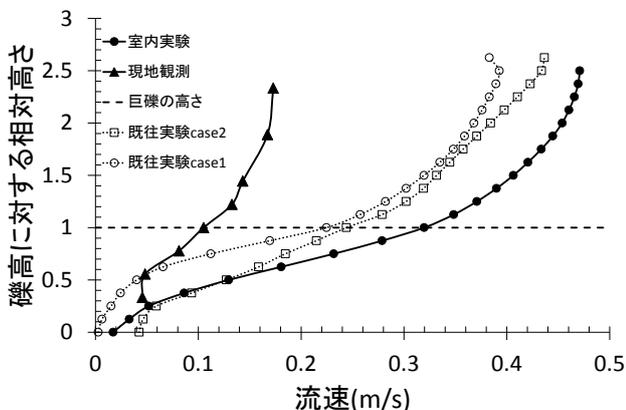


図-9 現地観測と水理実験における流速分布の比較 (Case1, Case2はHabibら⁴⁾より)

本観測において6割水深の高さで水深平均流速をとらえると、0.16m/sであった。これは本研究の平均流速の0.13m/sの1.2倍になり、過大評価してしまうことがわかる。本研究で礫層を含む水深平均流速は底面から約4割の高さ、礫高から約1割の高さになり、6割水深とは大きく異なることを指摘できる。底面のとらえ方、水深平均流速のとらえ方について、一般化していくことも今後の課題である。

5. 結論・今後の課題

本研究により、実河川において乱流構造を評価する場合、河床を構成する材料のうち大粒径だけでなく粒度分布に起因する大粒径と小・中粒径の比を評価することが重要であることが示唆された。また、平均流速の定義に用いられている6割水深流速は粗粒化河川のような相対水深の小さい河川では流速を過大評価してしまうことが示された。今後の課題としては大粒径間に充填された小・中粒径の礫が流速にどの程度影響を及ぼすか確かめる必要がある。

謝辞 本研究を実施するにあたり、河川財団・H26-27年度河川整備基金(代表者：田中規夫)の支援を受けた。八木澤順治准教授に計測器の使用方法などのご指導をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Tanaka, N., Yoshizawa, Y., Habib, S., Boundary layer development in roughness layer at modeled armored gravel bed stream and the sand movement in the region, E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands, 2015.
- 2) 川那部浩哉, 水野信彦(監修), 中村太士(編集): 河川生態学, 講談社, pp.8-10, 2013.
- 3) 田中規夫: 底面上の3次元ならびに2次元物体後方の組織的渦構造の変動特性, ながれ 10(2), 93-105, 1991.
- 4) Habib, S., Tanaka, N., Yoshizawa, Y., Turbulence characteristics in open channel gravel bed with small water depth relative to roughness elements height, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.72, No.4, 2016 (in press).