

土砂供給で変動する河床の石礫の露出高を 予測する方法の提案

ESTIMATION OF EXPOSED HEIGHT OF RIVER-BED STONES, CHANGED BY
DEPOSITION OF SANDS ASSOCIATED WITH SEDIMENT SUPPLY

宮川幸雄¹・小野田幸生²・萱場祐一³・角哲也⁴・竹門康弘⁵
Yukio MIYAGAWA, Yukio ONODA, Yuichi KAYABA, Tetsuya SUMI,
and Yasuhiro TAKEMON

¹正会員 博(工) 土木研究所 水環境研究グループ自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

²非会員 博(理) 土木研究所 水環境研究グループ自然共生研究センター
(〒501-6021 岐阜県各務原市川島笠田町官有地無番地)

³正会員 博(工) 土木研究所 水環境研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 農博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The exposed height of river-bed materials decreases when sediment supplied from upstream is deposited. The estimation of the exposed height should contribute to evaluate the effects of sediment supply on the habitat of attached algae and fish. Hence, we developed a new model to estimate the average height of exposed stones and their distribution. In the new model, mixed particle sizes on the river bed were classified on the basis of their sizes, and it was assumed that the vertical positions of materials in the same class had a normal distribution. In addition, the measured data on exposed height at downstream of a dam was gathered for comparing the results of model.

The average heights calculated by the model were from 80 to 90 mm, similar to the measured heights. The distributions of calculated heights showed good agreement with the measured heights, when the measured data had a normal distribution. The model showed that the exposed height in fine river-bed materials decreased easily than that of the height in coarse river-bed materials, and that the height in river-bed materials of equal sizes decreased easily than that in river-bed materials of different sizes.

Key Words: River-bed material, exposed height, surface roughness, prediction model, sediment

1. はじめに

ダムの貯水池に堆積した土砂を人工的に下流へ供給する技術は、貯水容量の回復だけでなく、供給された細粒土砂の河床表層への堆積により、河床の粗粒化やアーマー化を解消する効果も期待されている¹⁾。一方、細粒土砂の堆積厚の上昇とともに、河床材料を構成する石礫の河床地盤から露出している高さ(以下、露出高)が減少することが報告されている^{2),3)}。このことは、石礫に付着する藻類の生育可能な面積の減少につながり、付着藻類を主な餌資源とするアユ等の水生生物に影響をおよぼすおそれがある⁴⁾。また、堆積量が極端に多い場合に

は、魚類生息密度に一時的な低下が見られることも報告されている⁵⁾。上記の事例は、水生生物が河床を餌場として利用することの多い瀬を対象に報告されている。したがって、これらの影響を石礫の露出高を用いて定量化することで、ダム下流への土砂供給に対する水生生物の応答の予測・評価に活用できると考えられる。

しかし、潜水目視等により広範な領域に分布する個々の石礫の露出高を測定する作業は膨大で、現実的な方法とは言い難い。このため、河床材料の粒径加積曲線等、現場で測定しやすく、過去の蓄積も多いデータから、露出高を予測する方法が求められる。既往研究において石礫の露出高は、河床表層の石礫の粒径とそれよりも細かい粒子の堆積厚との差から推定されており、例えば、粒

径が一樣な擬石を用いた室内実験²⁾、河床の平均粒径から石礫の粒径を設定して現場のモデル予測を行った事例がある⁶⁾。これらの研究では、一樣な粒径の石礫を同じ高さに配置した場合を想定している。しかし、現場の石礫の粒径および中心点の位置は一樣ではないため、河床は凹凸しており、河床表層の石礫の露出高は幅広い分布をもつ。このため、露出高の評価の際に活用できる平均値または頻度分布を現場データから推定するためのアプローチが必要となる。

そこで本研究では、ダム下流の瀬を対象に、河床表層の石礫の露出高を現場で簡易に予測する手法を提案する。具体的には、粒径加積曲線等、一般的な河床材料の調査で得られるデータをもとに、混合粒径、河床表層の石礫の鉛直方向の分布を考慮した上で、石礫の露出高の平均値および頻度分布をモデルで予測する方法を提案する。

2. 方法

モデルの仕組みを説明するにあたり、はじめに、河床表層における石礫の鉛直方向の配置の設定方法について解説する。このとき、説明の簡易化のため、単一粒径の河床を想定して説明する。次に、現場の河床の状況として、混合粒径の河床を想定した露出高の設定方法を説明する。そして、予測値と現場での観測値を比較する方法を解説する。最後に、精度を確認したモデルを用いて、様々な河床粒径分布の条件下における露出高を予測する。また、本研究では簡易な予測とするため、現場では様々な形状の石礫を、一律の扁平率を有する楕円体と近似している。さらに、現場では河床の基盤となる大粒径の石礫は覆瓦構造をなし⁷⁾、傾斜角度も様々と考えられるが、その上部または周辺に堆積する中・小粒径の石礫も含めると、石礫の長軸は概ね河床面と並行（倒れた状態）であると仮定し、モデルを構築した。

(1) 河床表層の石礫の鉛直方向の配置の設定

はじめに、河床表層において、石礫が互いに隣接し連なっている状態を仮定した（図-1）。このとき、各石礫の鉛直方向の中心位置（以下、中心高）が異なることで、河床表層の凹凸が形成されるといえる。また、これらの石礫底部より下の部分の構造は考慮しないものとする。

次に、これらの石礫の中心高の平均値を z_a (m) とし、個々の石礫の中心高 z (m) を、村上らの既往研究をもとに、 z_a を平均値として、正規分布していると仮定した（図-1）⁸⁾。このとき、河床表層において、ある石礫の中心高が z (m) である確率 $P(z)$ は、確率密度関数の式を用いて表される（式(1)）。

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-z_a}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1)$$

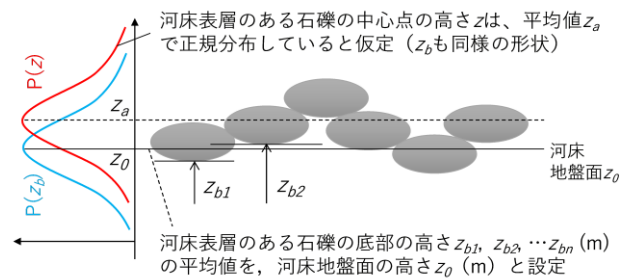


図-1 河床表層の石礫の分布の設定
(村上ら, 1992の図をもとに作成)

ここで、 σ は標準偏差を表し、石礫が単一粒径かつ完全球体の場合は、石礫の粒径 d (m) の約0.3倍とされる⁸⁾。また、石礫の露出高 x (m, > 0) は、石礫の天端高さ z_h (m) と河床地盤の高さ z_0 (m) との差と設定する（式(2), 図-2）。ここで、河床地盤の高さ z_0 は、河床表層の石礫の底部の高さ z_b (m) の平均値と定義する（図-1）。 z_b は z と同じ形状の正規分布にしたがうことから、同じ確率密度関数で表される（式(3)）。ある石礫の厚さを S (m) とした場合（式(4)）、式(3)は z_b と z_0 を消去し、露出高 x を変数とした式(5)に変換される。これは、石礫の露出高 x が、石礫の厚さ S を平均値とした正規分布にしたがうことを表す（図-2）。この石礫の厚さ S は、石礫を完全球体とみなした場合は粒径の値となるが⁸⁾、現場に即して楕円体と仮定した場合（図-1, 2）、粒径に扁平率をかける等の補正が必要である。

$$x = z_h - z_0 \quad (2)$$

$$P(z_b) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z_b - z_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3)$$

$$S = z_h - z_b \quad (4)$$

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5)$$

最後に、露出高の平均値 x_a を、 x と式(5)との積の積分値から推定するモデルを構築した（式(6), $x > 0$ ）。

$$x_a = \int_0^{\infty} x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - S}{\sigma}\right)^2\right) dx \quad (6)$$

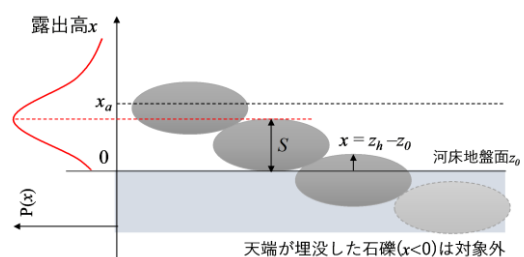


図-2 河床表層の石礫の露出高の分布状況

(2) 混合粒径の河床における石礫の露出高の平均値および分布状況の予測

2. (1) では単一粒径の河床条件のもと、河床表層の石礫の鉛直配置を設定したが、現場の河床表層は様々な粒径の石礫で構成されている。ただし、混合粒径の組成は、正規分布しているとは限らないため、2. (1) のような確率密度関数で表すことは困難である。そこで本研究では、石礫の組成を引用事例の多いWentworthの粒径区分に基づき⁹⁾、石礫を巨石 (257 mm以上)、石 (65~256 mm)、および礫 (17~64 mm) の3つに分類し、それぞれの河床表層中の存在割合で表した。このときの巨石、石、礫の存在割合 $F(i)$ を、それぞれ $F(1)$ 、 $F(2)$ 、 $F(3)$ とした。また、粒径が礫未満の砂・砂利の存在割合は $F(4)$ とした。そして、ある粒径区分 i ($i=1\sim3$) における露出高の分布および平均値 x_{ai} から、混合粒径の河床における露出高の分布および平均値 X を予測した。

具体的には、図-1の河床表層の石礫の配置をもとに、3つに区分された各粒径の石礫は、混合粒径下において粒径区分ごとに正規分布していると仮定した¹⁰⁾ (図-3)。このときの確率密度関数は下記で表される (式(7)、(8))。式中の a_i は、ある粒径区分における露出高 x_i を無次元化した値である¹⁰⁾。

$$P(a_i) = \frac{1}{\sigma_i S_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{a_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \quad (7)$$

$$a_i = \frac{x_i - S_i}{S_i} \quad (8)$$

ここで、 S_i は粒径区分 i の石礫の厚さの代表値である。また、区分ごとの標準偏差 σ_i は、 S_i が小さいほど大きく、0.435~0.6の間で変動する¹⁰⁾。そして、式(7)、(8)と各区分の石礫の存在割合 $F(i)$ との積から、混合粒径における露出高の頻度分布 $P(x)$ および平均値 X を予測するモデルを構築した (式(9)、(10))。

$$P(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{F(i)}{F(1)+F(2)+F(3)} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma_i S_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{a_i}{\sigma_i}\right)^2\right) dx_i \quad (9)$$

$$X = \sum_{i=1}^3 F(i) \int_0^{\infty} x_i \frac{1}{\sigma_i S_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{a_i}{\sigma_i}\right)^2\right) dx_i \quad (10)$$

X は土砂供給により石礫の平均粒径および高さが減少することで低下するものである。

ただし、この場合、粒径区分 i ごとの石礫の底部の高さ z_{bi} 、すなわち河床地盤の高さが異なってしまう。そこで、露出高0の位置を統一するため、河床地盤の高さ z_0 を巨石・石・礫の底部の平均高さ z_{ba1} 、 z_{ba2} 、 z_{ba3} と、 $F(1)\sim(3)$ を組み合わせた式で設定し (式(11))、それに基づき式(7)~(10)の露出高 x_i を x_i' に補正した (式(12)、図-3)。

$$-(z_{bi} - z_0) = \frac{1}{2} S_i - \sum_{i=1}^3 \frac{F_i \cdot \frac{1}{2} S_i}{F(1) + F(2) + F(3)} \quad (11)$$

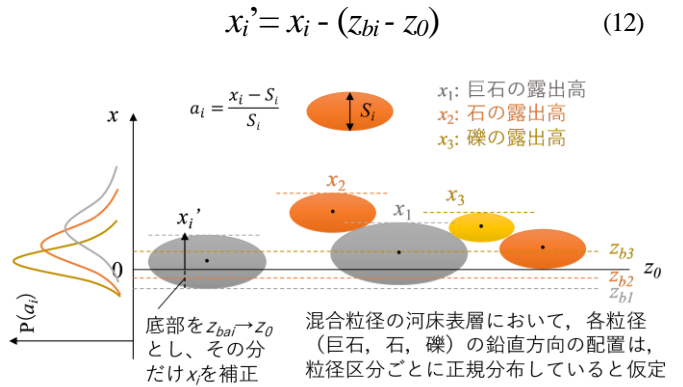


図-3 混合粒径の河床表層における巨石、石、礫の露出高の分布の設定

(3) モデルによる予測値と現場の観測値との比較

2. (2) で構築したモデルの精度を検証するため、ダム下流における観測値との比較を行った。対象地点として、矢作川 (岐阜県恵那市、愛知県豊田市) の矢作第二ダム下流を選定した。ここでは、下流環境の改善等を目的として、試験的な土砂供給が継続して実施されている (2018年度時点)。この土砂供給地点の上流および下流の2016年度の観測値を用いて分析を行った (図-4)。



図-4 石礫の露出高の観測地点 (矢作第二ダム下流 土砂供給地点の上下流, A地点:上流側, B地点:下流側)

予測に必要なデータおよび設定方法について以下に説明する。はじめに、2. (2) の各粒径区分の存在割合 $F(i)$ を現地の河床の被度割合のデータをもとに設定した (表-1)。観測時は土砂供給がまだ行われておらず、B地点の河床の方がA地点よりも粗い状態であった。次に、礫、石、および巨石の代表粒径 d_i を、それぞれ50、150、300 mmとした。このとき、石礫の扁平率を、既往研究をもとに0.5に設定し¹¹⁾、 d_i と扁平率との積から、礫、石、および巨石の厚さの代表値 S_i を、それぞれ25、75、150 mmとした。最後に、標準偏差 σ_i をそれぞれ0.6、0.5、0.435と設定し¹⁰⁾、式(7)~(11)からA、B地点の露出高の平均値 X と確率密度関数 $P(x)$ を算出した。A、B地点における露出高の観測値は、各地点の瀬において、潜水目視で計測されたものである。データ数は、上下流ともに約40個である。これらのデータから各地点の露出高の平均値 X および頻度分布を求め、モデルによる結果と比較した。

表-1 矢作第二ダム下流の観測地点A, Bにおける各粒径区分の石礫の存在割合 $F(i)$

(粒径区分ごとの d_i , S_i は設定値. $F(i)$ は水域のコードラート調査により得られたデータ)

	巨石 ($i=1$)	石 ($i=2$)	礫 ($i=3$)	砂・砂利 ($i=4$)
d_i (mm)	300	150	50	
S_i (mm)	150	75	25	
$F(i)$				
A地点	0.35	0.35	0.15	0.15
B地点	0.35	0.5	0.05	0.1

(4) 河床粒径分布に対する予測モデルの感度分析

2. (3) のモデルの精度を確認後、現場での適用を考え、河床粒径分布（石礫の厚さ S_i ）に対する感度分析を実施した。具体的には、河床粒径の平均値および分布状況に応じて、巨石割合が多い（パターン1）、礫割合が多い（パターン3）、パターン1と3の中間（パターン2）、パターン2と同じ平均粒径で、かつ粒径分布が一様（パターン4）、かつ粒径分布が多様（パターン5）の5条件でモデル計算を行った（表-2）。モデル計算を行う手順は、2. (3) で示したとおりである。ここで、粒径区分ごとの被度割合のデータがある場合は、被度割合をそのまま入力して露出高を予測可能である。一方、被度割合がない場合は、粒径加積曲線をもとに、各粒径区分の被度割合を入力可能である（図-5）。

最後に、土砂供給による露出高の変化量の目安として、確率密度関数 $P(x)$ の累積値から、土砂の堆積厚の上昇による石礫の露出割合を算出した。この露出割合は、ある堆積厚に対し、露出高 x が上回っている石礫の割合を表すものである。

表-2 モデルの感度分析を行う際に入力する河床粒径分布のパターン

パターン	$F(i)$			
	巨石 ($i=1$)	石 ($i=2$)	礫 ($i=3$)	砂・砂利 ($i=4$)
d_i (mm)	300	150	50	
S_i (mm)	150	75	25	
1 巨石多	0.3	0.5	0.2	0
2 1と3の中間	0.2	0.4	0.3	0.1
3 礫多	0.1	0.2	0.4	0.3
4 分布が一様	0.1	0.5	0.4	0
5 分布が多様	0.3	0.3	0.2	0.2

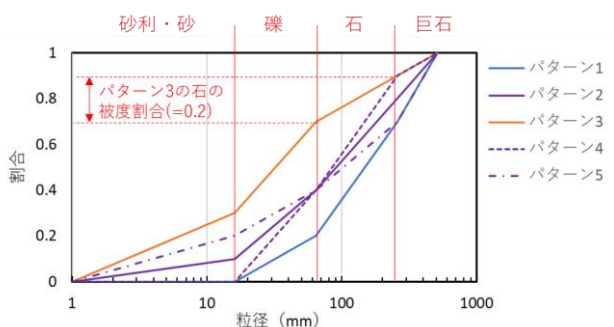


図-5 各粒径分布のパターンにおける粒径加積曲線および粒径加積曲線からの各粒径区分の被度割合の推定方法

3. 結果

(1) モデル値と観測値の比較

2. (2) および(3) の計算の結果、A, B地点の露出高の平均値 X は、それぞれ81.8, 90.5 mmとなった。一方、現場で観測されたA, B地点の露出高の平均値は、それぞれ78.2, 93.1 mmであり、モデル値と観測値はほぼ一致した。さらに、礫、石、巨石（それぞれ、 $S_i = 25, 75, 150$ mm）の露出高の確率密度関数 $P(x)$ 、およびA地点、B地点の $P(x)$ の結果を示す（図-6）。この $P(x)$ をもとに作成した石礫の露出高の頻度分布を現場データと比較した結果、A, B地点ともに、ピークの区間はほぼ一致した（図-7, A地点：0~40 mm, B地点：40~80 mm）。

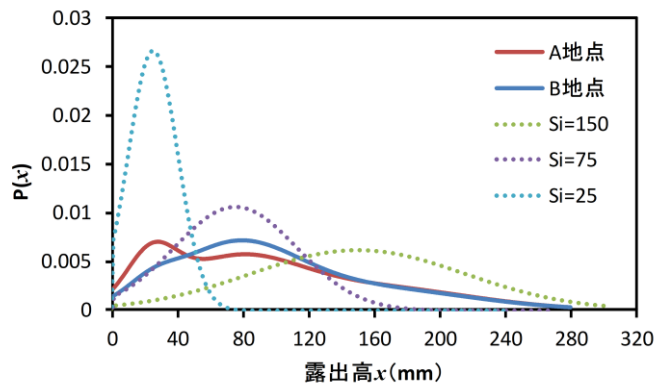


図-6 矢作ダム下流、土砂供給地点周辺における石礫の露出高 x の確率密度関数 $P(x)$

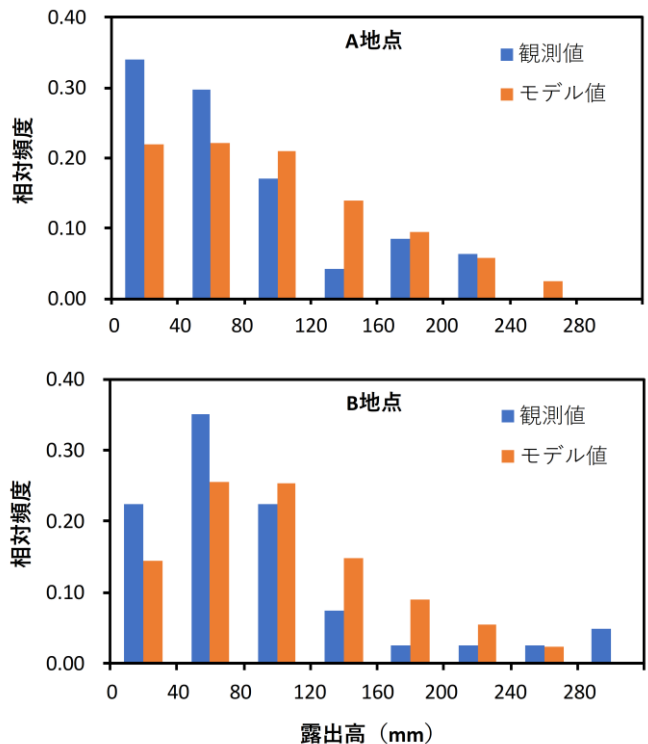


図-7 矢作ダム下流、土砂供給地点周辺における石礫の露出高の観測値とモデル値の頻度分布 (280 mm以上の値は280より右にまとめて示した。)

ただし、全体の分布状況について、A地点では、0～80 mmの区間で観測値がモデル値より高く、120～160 mmの区間でその逆になる等、観測値とモデル値に乖離が見られた(図-7)。一方、B地点では、モデル値と観測値で、区間ごとの頻度の増減傾向が一致したものの、280 mm以上の露出高が現場で観測されたことが、モデルで示されない等の乖離が見られた(図-7)。

(2) モデルの感度分析

2. (4)において、河床の被度割合からパターン1～5における露出高の平均値 X を予測した結果、それぞれ86.8, 67.3, 40.0, 62.6, 71.7 mmとなった。さらに、各パターンにおける石礫の露出高の確率密度関数 $P(x)$ の分布を見ると、パターン3のように河床が細かい場合に、露出高が小さく狭い範囲で分布し、パターン1のように粗い場合に、大きく広い範囲で分布する傾向であった(図-8)。さらに、同じ平均粒径でもパターン4のように粒度分布が一樣の場合は、パターン5のような多様な場合と比べて平均値周辺に分布が偏る傾向であった(図-8)。

さらに、図-8の結果から、各パターンにおける土砂の堆積厚に応じた石礫の露出割合を算出した結果、同じ土砂の堆積厚でも、河床材料が細かい場合の方が粗い場合よりも露出割合が少なくなると予測された(図-9)。また、平均粒径が同じ場合でも、粒度分布が一樣な場合の方が多様な場合よりも露出割合が少なくなると予測された(図-9)。

4. 考察

(1) モデルの精度

本モデルは、混合粒径の石礫を粒径区分によりいくつかのグループに分け、各グループの鉛直方向の配置が正規分布しているという仮定のもと、露出高を予測するものである。3.(1)の結果から、モデルによる露出高の平均値 X は、観測値と概ね一致した。また、露出高の頻度分布も、現場の石礫の露出高が正規分布に近い場合には、モデルとの当てはまりがよかった(図-7)。しかし、現場の露出高が、A地点の120～160 mmの区間およびB地点の280 mm以上の区間のように、その前後の区間に比べて極端に増加または減少している(非正規分布している)場合には、モデルとの当てはまりが必ずしもよいとはいえない(図-7)。このため、本モデルのダム下流の河床における適用性について議論するためには、現場で観測される露出高が一般的に正規分布に近い形状を持つのかを確認する必要があるといえる。この点について、今後、より多くの現場において露出高の分布状況を確認することで、上記の疑問の解明に貢献できると考えられる。

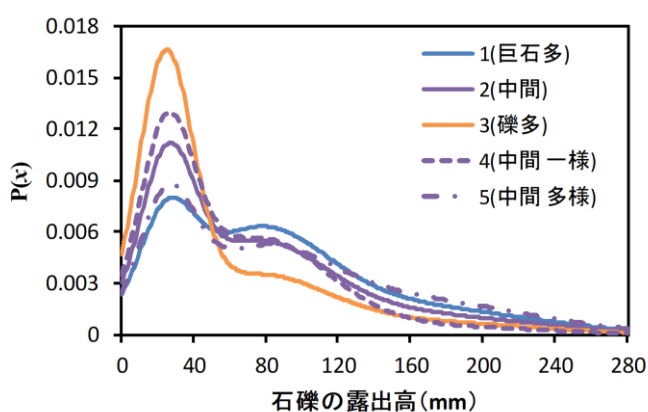


図-8 矢作ダム下流を想定した複数のパターンにおける石礫の露出高 x の確率密度関数 $P(x)$ の予測

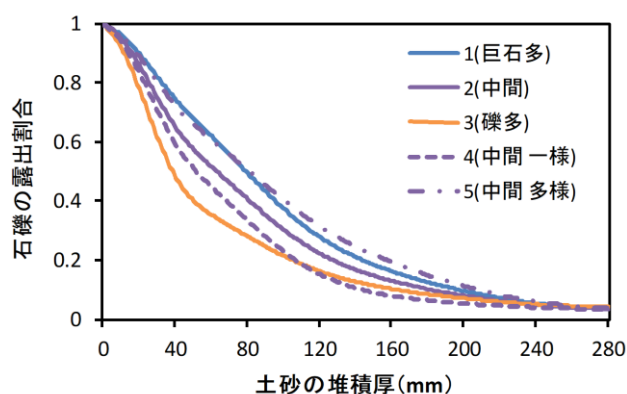


図-9 矢作ダム下流を想定した河床における土砂の堆積厚に対する石礫の露出割合の予測
(堆積厚が0 mmのときの露出割合を1とした場合)

(2) 河床粒径分布と露出高の変化との関係

3. (2)のモデル計算の結果から、河床材料が細かいパターン3の場合の方が、粗いパターン1の場合よりも、土砂の堆積厚の増大に対し、石礫の露出割合がより早く減少するといえる(図-9)。この理由として、河床材料が細かい場合の方が、粗い場合よりも、石礫の露出高の平均値および標準偏差が低いためと考えられる(図-8)。すなわち、河床材料が細かい場合、個々の粒径が小さい上、鉛直方向の高さも小さな粒径に依存して小さい値に集中しやすいと考えられる。特に、露出高の分散幅が狭い点については、ある土砂の堆積厚において石礫の露出割合が急激に減少する範囲が確認される(図-9、土砂の堆積厚が0～40 mmの範囲)。したがって、河床材料が細かい場合、供給した土砂の堆積により、露出高が極端に変動しやすい環境であると考えられる。一方、河床が粗い場合は、露出高が広範囲に分散するため、土砂の堆積厚に対する石礫の露出高の増加速度も緩やかで、かつ急変する範囲がみられないといえる(図-8)。このことから、河床材料が粗い場合には、細かい場合と比べて、供給した土砂の堆積により石礫の露出高が変動しにくい環

境であると考えられる。

ただし、河床材料の平均粒径が同じ場合でも、河床粒径分布が一様な場合と多様な場合で、露出高の分布は異なる傾向であった。具体的には、一様な場合の方が露出高の平均値および標準偏差が小さく（図-8）、土砂の堆積厚に応じてより急激に石礫の露出割合が減少する傾向であった。このため、一様な河床粒径分布の方が、多様な場合よりも、土砂供給により露出高が変動しやすい環境であると考えられる。土砂供給が実施されるケースは、概ね河床が粗い場合であり、土砂の堆積厚に対し石礫の露出高には即座に影響する可能性は少ないと予想される。ただし、河床材料の粒径が一様な場合、露出高の分布がある範囲に集中しているケースも想定されるため、ある土砂の堆積厚に対し、急激に露出高が減少する範囲が存在する可能性も想定する必要があるといえる。

5. まとめ

本研究では、石礫の露出高を現場で簡易に予測することを目的として、ダム下流の瀬を対象に、石礫の露出高を、混合粒径にて石礫の鉛直方向の配置を考慮して予測するモデルを構築した。土砂供給による土砂の堆積厚の上昇量が河床変動計算等から予測できれば、本モデルを用いることで、土砂供給前後における石礫の露出高の変化の定量予測に貢献できるといえる。以下に、本研究で得られた成果を記す。

- 1) 本モデルは混合粒径に対応するため、河床の石礫を粒径ごとにいくつかに分けてグループ分けし、粒径加積曲線等のデータから、各粒径の被度割合をもとに露出高を予測する手法を提案した。
- 2) 本モデルは石礫の鉛直方向の配置を考慮するため、配置を正規分布と仮定して、1)で分類したグループごとに分布を数値化して、それらの総和から露出高の平均値を予測した。
- 3) 本モデルを矢作ダム下流の観測値と比較した結果、露出高の平均値について、予測値と観測値は概ね一致した。一方、露出高の分布について、観測値が正規分布を持つ場合、予測値と観測値は概ね一致する傾向であったが、非正規分布の場合、部分的に乖離が見られた。このため、現場で観測される露出高が一般的にどのような分布を持つのかについて確認が必要と考えられる。
- 4) 本モデルを用いて様々な河床粒径分布の条件で、露出高の変化を分析したところ、河床材料が細かい場合は露出高の平均値および標準偏差が小さく、土砂の堆積厚が上昇する初期の段階で、石礫の露出割合が急激に減少する傾向が予測された。一方、河床材料が粗い場合は、露出高の平均値および標準偏差が大きく、土砂の堆積により露出高が変動しにくい傾向であると予

測された。

- 5) 河床材料が一様な場合、河床材料が粗い場合であっても、土砂の堆積厚に対し、石礫の露出割合が急激に減少する範囲が存在する可能性もあり、土砂供給の際には、供給前の河床粒径分布に留意する必要があると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所には、矢作ダムの河床に関するデータを提供いただき等、ご協力を頂いた。また、本研究の一部は、公益財団法人河川財団の河川基金助成事業によって実施したものである。これらのご協力について、ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 角哲也：水系一貫の土砂管理について、第49回水工学に関する夏期研修会講義集、水工学シリーズ、13-A-5、2013。
- 2) 藤田光一、山原康嗣、富田陽子、伊藤嘉奈子、小路剛志：大礫床表面における砂の堆積状況と浮遊砂量との関係についての実験的研究、水工学論文集、Vol.52、pp.547-552、2008。
- 3) 小野田幸生、堀田大貴、萱場祐一：土砂供給に伴う河床環境変化の評価に向けた露出高による石礫の埋没度の定量化、河川技術論文集、Vol.24、(投稿中)、2018。
- 4) 宮川幸雄、角哲也、竹門康弘：砂面の変動高、礫の被度面積を考慮した付着藻類の現存量の変動予測、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.73、No.4、pp.1183-1188、2017。
- 5) 小野田幸生、萱場祐一：石礫河床への大量の覆砂が魚類生息密度に及ぼす影響について、河川技術論文集、Vol.19、pp.525-530、2013。
- 6) 田代喬、渡邊慎多郎、辻本哲郎：掃流砂礫による付着藻類の剥離効果算定に基づいた河床攪乱作用の評価について、水工学論文集、Vol.47、pp.1063-1068、2003。
- 7) 福留脩文、有川崇、西山穂、福岡捷二：石礫河川に組む自然に近い石積み落差工の設計、土木学会論文集F、Vol.66、No.4、pp.490-503、2010。
- 8) 村上正吾、辻本哲郎、中川博次：河床砂礫のpick-up rate推定式について、土木学会論文集、Vol.443、No.2、pp.9-16、1992。
- 9) Wentworth C. K.: A scale of grade and class terms for clastic sediments, The Journal of Geology, Vol.30, No.5, pp.377-392, 1922。
- 10) 長田健吾、福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法、土木学会論文集B1(水工学)、Vol.68、No.1、pp.1-20、2012。
- 11) 中島重旗、小田泰史、松並裕子：河床礫の状態と底生動物相指標の相関、陸水学雑誌、Vol.45、No.3、pp.220-230、1984。

(2018. 4. 3受付)