

石礫河川における河床変動解析法の改善—離脱・堆積について

中央大学研究開発機構 正会員 ○長田 健吾  
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 目的

著者らは、常願寺川現地実験により得られた石礫河川の河床変動機構をもとに、石礫河川の河床変動解析法を構築し、現地での実験に適用してきた<sup>1), 2)</sup>。この解析法では、流砂量を、離脱・土砂移動・堆積という各段階に分けそれぞれをモデル化することにより評価しており、流砂量式によらない点に特徴がある。石礫河川の土砂移動に関して解析モデルの説明力は従来モデルに比して広いが、いくつかの仮定が含まれている。さらに説明力を高めるには、いくつかの仮定が含まれる離脱量式の改善、石礫河川における土砂停止機構の組み込みを行う必要があることが明らかとなった。本研究では、離脱モデルの改善策および石礫河川の河床表層の凹凸を考慮した土砂停止量の評価方法について検討する。

2. 離脱量算定式の改善策

離脱量の算定は、各粒径の離脱判定、河床安定の判定および離脱量式による各粒径の離脱量の算定という各段階で構成される<sup>1), 2)</sup>。しかし、提案した離脱量式にはいくつかの仮定や複雑な式形が含まれていることから、改善が必要であった。ここでは、離脱量算定式の改善策について述べる。石礫河川の離脱量の算定には、凹凸の付いた河床表層の表現方法、各粒径に作用する流速と大きな石による遮蔽効果の考え方が重要な課題となる。著者らの石礫河川の河床変動解析法では、河床面の凹凸（空隙空間）を表現するために、各粒径の高さと表層割合を算定する方法を構築している。その各粒径の高さは、図-1 上段の河床状態のように解析メッシュ内での平均的な高さを評価したものである。しかし、実際には図-2 のように、各粒径の高さは平均的な高さを基準として分布を持ち、その中で高い位置に存在するものが離脱の可能性が高いと考えられる。関根ら<sup>3)</sup>、村上ら<sup>4)</sup>は一樣粒径を敷き詰めた場合の河床表層の凹凸を測定し、平均河床高を基準に標準偏差 0.3d 程度の正規分布に従うことを明らかにしている。この成果と各粒径の高さ（図-1 上段）を用いて図-1 下段のように河床表層の状態を表現する。この河床表層の凹凸の表現に関しては、石礫河川の粒度分布と河床表面の凹凸の関係を調査し、修正を加える必要があるが、現状ではこの表現を用いた。この河床表層の状態から、離脱量の算定方法を考える。上述したように、各粒径において離脱する可能性があるものは、粒子高さが高い位置に存在するもの（例えば図-1 下段の A 粒子や B 粒子）に限られると考えられる。そこで、図-3(a) に示すように、平均高（赤色粒子）に対して半径分高い位置に存在する粒子（黄色）を対象に離脱判定を行う。離脱判定式を以下に示す。

$$\beta = \frac{\frac{\alpha_z}{2} \rho C_D \varepsilon_k \alpha_2 d_k^2 u_f^2 + \frac{\alpha_x}{2} \rho C_L \varepsilon_k \alpha_2 d_k^2 u_f^2}{\alpha_x \cdot (\sigma - \rho) g \alpha_3 d_k^3} \quad (1)$$

$\beta \geq 1$  : 離脱する,  $\beta < 1$  : 離脱しない

ここに、 $C_D$  : 抗力係数 (=1.0),  $C_L$  : 揚力係数で揚力効力係数比<sup>4)</sup>を考慮して 0.85 と設定した。 $\alpha_x, \alpha_z$  は、図-3(b) に示す離脱角度  $\theta_k$  を用いて算出する。離脱角度は、既往論文では、複雑な式形<sup>1), 2)</sup>を用いてきたが、図-3(c) に示すように平均粒径との関係から式(2)を用いて算出する。

$$\theta_{i,j,k} = \text{MAX} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{d_k}{d_k + d_{mi,j}} \right), 60 \right\} - \theta_{C,i,j} \quad (2)$$

ここに、 $\theta_c$  : 河床・側岸の勾配角である。粒径が平均粒径に比して小さいほど角度が大きくなり、離脱しづらい状態となる。平均粒径以上の粒子は 60 度で一定とした。式(1)の  $\varepsilon_k$  は、各粒径の投影割合であり、これも図-3(c) の平均粒径との関係で以下の式で求める。

$$\varepsilon = 1.0 - \frac{0.5d_m}{d_k} \quad (\varepsilon \geq 0.4) \quad (3)$$

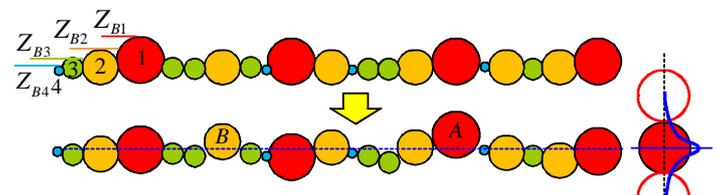


図-1 石礫河川における河床表層の表現

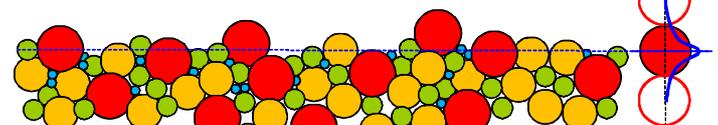


図-2 石礫河川の凹凸のついた河床表層の状態

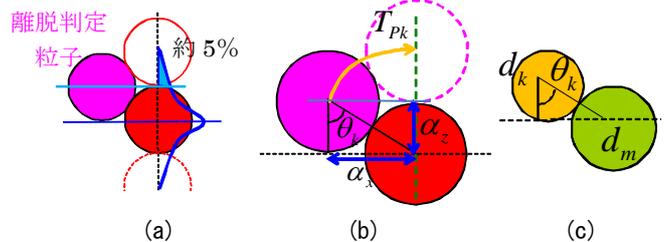


図-3 離脱計算の概要

キーワード 石礫河川, 河床変動解析法, 現地実験, 粒度分布

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1611

既往の研究<sup>4)</sup>では、0.4程度の値が用いられており、本研究でも最低値を0.4と設定した。粒子に作用する流速は、図-3(a)の離脱判定粒子の7割の高さに掛かる流速値を対数則分布から求めた。離脱量の算定式は以下のようなものである。

$$V_{P_{i,j,k}} = \frac{\epsilon_{P_{i,j,k}} N_{P_{i,j,k}}}{T_{P_{i,j,k}}} \alpha_3 d_k^3 \quad (4)$$

ここに、 $\epsilon_{P_k}$  : 大きな石の遮蔽効果を考慮した離脱可能割合、 $N_{P_k}$  : 表層に存在する個数、 $T_{P_k}$  : 離脱時間である。離脱可能割合は、図-3(a)に示す離脱判定粒子より高い位置に存在する割合(5%)を基準にして、大きな石の遮蔽効果を付加して各粒径の値を算定する。大きな石による遮蔽効果は、図-4に示すように平均粒径より大きな粒径の後流域を考え、離脱判定粒子の河床表層割合のうち大きな粒径が形成する後流域に入る割合を求め、離脱割合(5%)から差引き求めた。後流域の長さは粒子の直径と同じとした。

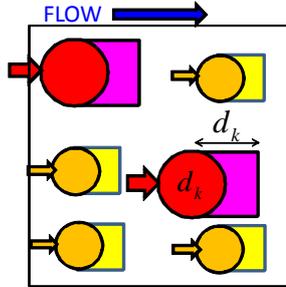


図-4 後流域の考え方

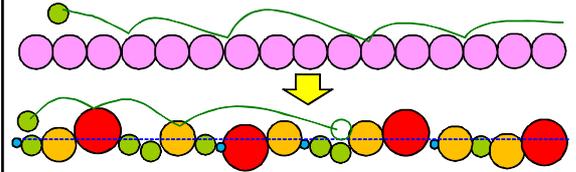


図-5 凹凸を考慮した跳躍解析

### 3. 石礫河川の土砂停止機構を取り入れた堆積量算定方法

河床への堆積量は、流砂体積に1秒あたりの停止割合を掛けることにより求めている。既報<sup>1), 2)</sup>の解析法における停止割合の評価法は、図-5 上段に示すように河床の平均粒径を整列に並べた平面を想定し、各粒径の跳躍解析から河床との衝突割合を算出し、この衝突割合を停止割合として取り扱ってきた。石礫河川における土砂の停止機構には、河床表層の粒度分布と凹凸の大きさが影響すると考えられる。しかし、解析モデル<sup>1), 2)</sup>では、石礫河川の凹凸の大きな河床面を平均粒径の高さで一律に表現したこと、また、河床との衝突割合をそのまま停止割合としたことから、特に凹凸の大きな河床などにおいては土砂の停止現象を扱うには不十分であると考えられる。この点を改善するため、解析より得られる河床粒度分布と各粒径の高さから、それに見合う粒度および凹凸の付いた河床を形成し(図-5 下段)、その凹凸のある河床上で跳躍解析を行うことにより、停止割合(土砂停止量)を評価する方法を構築した。以下にその方法を記述する。図-5 下段の河床状態において各粒径について数十回の跳躍解析を行い、平均停止時間 $t_{sk}$ を算出する。停止時間分布が指数関数に従うとして平均停止時間から以下の式により1秒あたりの停止割合を求める。

$$P_{C_{i,j,k}} = \int_0^1 \frac{1}{t_{s,i,j,k}} \exp\left(-\frac{t}{t_{s,i,j,k}}\right) dt \quad (5)$$

### 4. 現地実験データへの適用と考察

構築した解析法を2009年常願寺川現地実験データに適用する。実験は、複断面蛇行-直線水路で行われ、流量は $2\text{m}^3/\text{s}$ から $12\text{m}^3/\text{s}$ が通水された。図-6に河床高と粒度分布の実測との比較を示す。直線区間のNo.2や蛇行入口のNo.6では河床高は再現されている。しかし、No.6より下流のNo.8では、河床高・粒度分布ともに再現性があまり良くない。提案した解析法には、河床表層の凹凸の表現法などに課題があり、今後、現地実験や詳細な調査から精度アップを図る予定である。

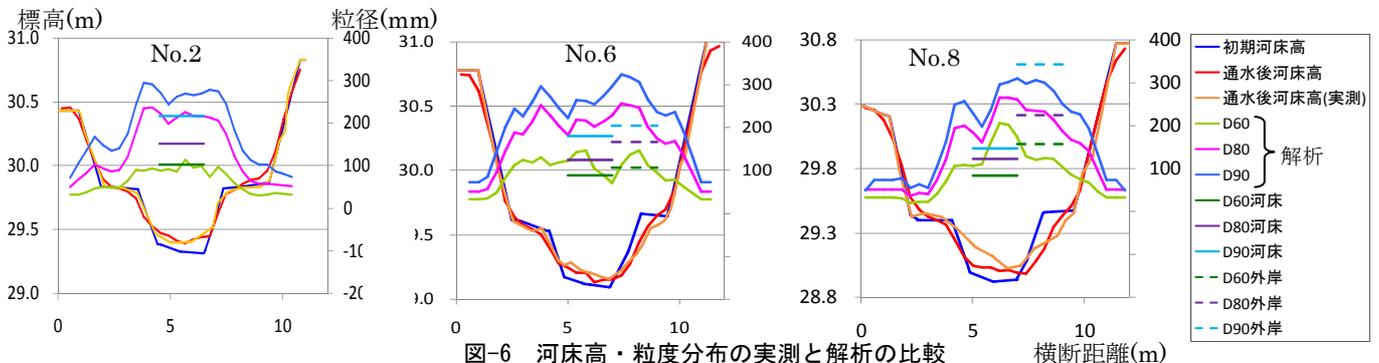


図-6 河床高・粒度分布の実測と解析の比較

### 参考文献

- 1) 長田・福岡：石礫河川の土砂移動機構に着目した一次元河床変動解析法の開発，水工学論文集，第52巻，2008
- 2) 長田・福岡：石礫蛇行河川の二次元河床変動解析法に関する研究，河川技術論文集，第15巻，2009
- 3) 関根・吉川：掃流砂の停止機構に関する研究，土木学会論文集，第399号/II-10，1988
- 4) 村上・辻本・中川：河床砂礫の pick-up rate 推定式について，土木学会論文集，No. 443/II-18，1992