

細粒土砂の砂防堰堤からの流出機構

広島大学 学生会員 阪上 健
 広島大学 正会員 内田龍彦

1. 序論

H30 年 7 月の豪雨災害では、大きな粒径を含む土砂流は砂防施設によって捕捉されたが、後続の水流によって河道に細粒土砂が多量に供給された結果、土砂・洪水氾濫を引き起こし、各地で大きな被害となった。このため、流れによる砂防堰堤からの土砂流出量を適切に評価し、河道の形状や河床材料など河道の通砂能力を越えないようにすることが不可欠である。混合粒径土砂の河床変動解析に用いられてきた、従来の交換層を用いた手法¹⁾では空隙率の時間変化を考慮することが困難である課題がある。そこで、Uchida ら²⁾は、粒度分布から直接空隙率の変化と河床高の変化を計算する手法を提案した。しかし、混合粒径河床の流砂量の評価は検討が不十分である。そこで、本研究では、オイラー型土砂堆積モデルを用いた、流砂の連続式の妥当性を検証するとともに、河床高の時間変化と連続式から各時間、各場所の流砂量を算出し、流砂量の評価法を検討する。

2. 砂防堰堤からの土砂流出実験方法と実験結果

実験は高さ 0.6m、幅 0.5m の片側面が強化ガラス板の実験水路で行う。まず、粗粒子粒径 $d_c=0.0753\text{mm}$ 、細粒子粒径 $d_f=0.00155\text{mm}$ の二粒径土砂を、 $S=0.17$ の初期勾配で堆砂する。一定流量 $Q=4.0\text{L/s}$ で通水する。実験開始時刻 $t=0$ は、堆砂形状の上流端を越流した時点とする。その後、細粒子の流出とともに、河床低下と粗粒化が進行し、細粒子の流出がほぼ 0 になった時点で終了とする。

粗粒子と細粒子の堆積高の時間変化は側方から撮影したカメラ映像から 30 秒ごとに測定する。堰堤から流出する細粒土砂については下流で、30 秒ごとの細粒子の重さから体積を算出し、土砂流出量を測定する。堆積土砂を上から動画を撮影することで各時間での表層の粗粒子存在割合と粗粒子の移動個数を測定する。図-1 は河床形状の時間変化について示す。河床形状は直線的に変化していき、実験開始から 5 分以降ほとんど変化がみられず平坦となっていることが分かる。また凸凹しているのは細粒子が流出し、粗粒子が表面に露出する影響と考えられる。

3. 流砂量の解析方法と考察

(1) 細粒子流砂量の時空間分布の算出

細粒子の堆積高 z_f は細粒子の流砂量 q_f を用いて式(1)で表される²⁾。

$$\frac{\partial z_f}{\partial t} = -\frac{1}{\lambda_f(1-\lambda_0)} \frac{\partial q_f}{\partial x} \quad (1)$$

ここに、 λ_0 は一様砂の空隙率、 λ_f は細粒子が侵入できる粗粒子間の空隙率であり、式(2)-(5)で評価される²⁾

$$\lambda_f = 1 - \alpha P_c \quad (2)$$

$$\alpha = 1 + \frac{\lambda_0}{1-\lambda_0} \gamma^{C_2} (1-\beta)^{C_1} \quad (3)$$

キーワード 砂防堰堤からの混合粒径土砂流出実験、細粒子流砂量、オイラー型土砂堆積侵食モデル

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学工学部第四類社会基盤環境工学プログラム

TEL 082-424-7821

$$\beta = (1-\gamma) \left\{ 1 - \frac{P_c}{(1-\lambda_0)} \right\} \quad (4)$$

$$\gamma = \min \left(C_3 \frac{d_f}{d_c}, 1 \right) \quad (5)$$

ここに、

P_c : 粗粒子の表層粒子割合、

α : 粗粒子間の空隙を埋める細粒子についての係数²⁾

$C_1 = 1$, $C_2 = 0.5$, $C_3 = 2$ である。

式(1)を用いて計測された細粒子の堆積高 z_f 、粗粒子の粒子存在割合 P_c から、細粒子の単位幅流砂量 q_f の時空間分布を算出する。

図-2 は細粒子の河床高の時間変化を用いて式(1)により計算される細粒土砂の流出土砂量の時間変化と、下端からの流出土砂量の時間変化の計測値と比較したものである。また、侵入可能空隙率の有効性の検証のために、従来の流砂の連続式(6)により計算される細粒土砂の流出量の時間変化を比較した。

$$\frac{\partial z_B}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda_0} \frac{\partial q_f}{\partial x} \quad (6)$$

ここに、河床高 z_B は河床表面高とした。空隙率の時間変化を考慮しない式(6)の流砂量は実験値よりかなり小さく、分級を生じながら細粒子が流出する現象の計算に、妥当でないと分かった。一方、式(1)より計算される細粒子の流砂量は実験値と一致しており、本手法の妥当性は示せたと考えられる。図-3 は式(1)による細粒子の流砂量の時間変化の縦断分布である。図-2 より、空隙率の時間変化を考慮した流砂の連続式が妥当であると考えられるため、各点における細粒子の流砂量は正しく示せたと考えられる。図-3 より、細粒子の流砂量は、 $t=30\sim 60$ 秒で最大となり、それ以降、減少するのがわかる。また、各時間で、堰堤付近での細粒子の流砂量が大きくなることが分かった。

(2) 細粒流砂量の評価法の検討

前節で求めた局所流砂量を用い、細粒土砂量の評価方法を検討する。単位幅当たりの細粒子の流砂量は、Meyer-Peter Muller 流砂量式を変形した式(7)で評価する。

$$q_f^* = \beta \tau_f^* (1 - \frac{\tau_{cf}}{\tau})^{3/2} \quad (7)$$

ここに、 q_f^* : 細粒子の無次元流砂量 τ_f : 細粒子に作用するせん断力 τ_{cf} : 細粒子に対する限界掃流力 τ : 河床せん断力 β は定数で実験結果を再現するように定めた ($\beta=4$)。

各点の全粒径に対するせん断力 τ は、各区間のエネルギー勾配から式(8)を用いて、計算する。

$$\left(\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_1 \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_1 \right) = \frac{\tau_{1-2}}{\rho g h_{1-2}} \Delta x \quad (8)$$

ここに、 v_1, v_2 : 点 1,2 での流速、 h_1, h_2 : 点 1,2 での水

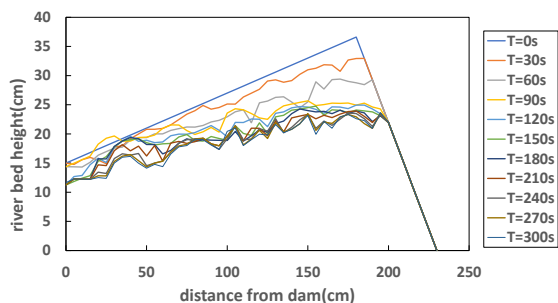


図-1 河床高の時間変化

深, z_1, z_2 : 点 1, 2 での土砂堆積高, $\tau_{1\sim 2}$: 点 1~2 間のせん断力, ρ : 水の密度, Δx : 点 1, 2 の距離である.

一方, 全粒径に対するせん断力 τ は粗粒子に対するせん断力 τ_c , 細粒子に対するせん断力 τ_f , および, 粗粒子の表層粒子割合 P_c を用いて, 式(9)と表すことができる.

$$\tau = \tau_c P_c + \tau_f (1 - P_c) \quad (9)$$

マンシングの流速公式より全粒径, 細粒子, 粗粒子に対するせん断力 τ , τ_f , τ_c は, それぞれの作用 U , U_f , U_c 流速とマンシングの粗度係数 n , n_f , n_c を用いて, 式(10)で表す.

$$\tau = g \frac{n^2 U^2}{h^{1/3}} \quad \tau_f = g \frac{n_f^2 U_f^2}{h^{1/3}} \quad \tau_c = g \frac{n_c^2 U_c^2}{h^{1/3}} \quad (10)$$

ここで, U は水深平均流速である. 粗粒子に作用する作用流速 $U_c = U$ とする. 一方, 細粒子に作用する流速 U_f は粗粒子より高さが低いため, 細粒子の河床高と粗粒子の河床高の違いから生まれる誤差を補正するために, 式(11)を用いる.

$$U_f = U \left\{ \exp \left(-\alpha \frac{\Delta z}{d_c} P_c \right) \right\} \quad (11)$$

Δz : 細粒子の表面高と粗粒子の表面高の差であり,

α は定数で実験結果に合うように求める. ($\alpha=8.7$)

式(8)~(11)を用いて, 細粒子に対するせん断力は式(12)と表せる.

$$\tau_f = \frac{\left\{ \exp \left(-\alpha \frac{\Delta z}{d_c} P_c \right) \right\}^2 n_f^2}{P_c n_c^2 + (1 - P_c) \left\{ \exp \left(-\alpha \frac{\Delta z}{d_c} P_c \right) \right\}^2 n_f^2} \tau \quad (12)$$

各粒径のマンシング係数はマンシング・ストリクラーの式(13)より, 算出する.

$$n = 0.0417 k_s \quad (13)$$

粗度係数は, 粗粒子, 細粒子の粒径とする.

図-4 は, 各点でのせん断力と各点における細粒子の単位幅流砂量の関係である. 横軸を細粒子に対するせん断力とし, 縦軸を実験から得られた細粒子の単位幅流砂量, 式(7)から求められる細粒子の単位幅流砂量の計算値とし, 比較した. 実験値と計算値は概ね一致しており, 相関関係がみられる. しかし, 図-5 に示す, 従来の方法でもとめた各点でのせん断力と各点における細粒子の単位幅流砂量の関係では, 細粒子の流砂量は適切に評価できないことが分かった.

5. 結論

オイラー型土砂堆積・侵食モデルを考慮した, 二粒径における流砂の連続式は実験値と解析値が概ね一致したことから, 混合粒径堆積土砂から分級を伴って細粒

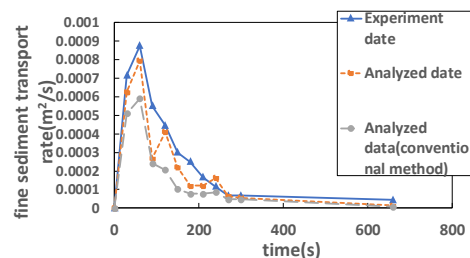


図-2 下流端からの細粒土砂の流出量の直接測定結果と河床高の時間変化と連続式からの計算結果の比較

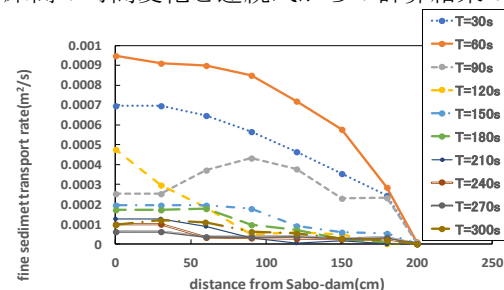


図-3 細粒子の流砂量の縦断分布の時間変化

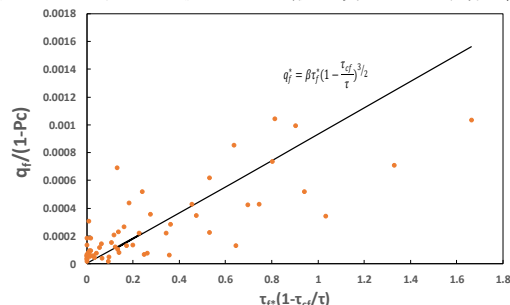


図-4 各点でのせん断力と各点における細粒子の単位幅流砂量の関係

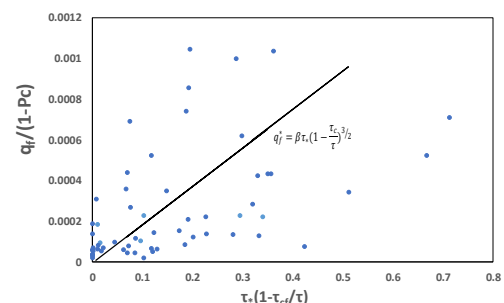


図-5 各点での従来の方法で求めたせん断力と各点における細粒子の単位幅流砂量の関係

土砂が流出する土砂量の評価法として, 適切であると考えられる. 次に, 各点における, せん断力と細粒子の単位幅流砂量の関係を導き, 新たな細粒砂量式は実験値の相関関係がみられ, 概ね一致したと考えられる.

参考文献

- 1) 平野宗夫: Armoring をともなう河床低下について: 土木学会論文集, No.195, pp.55-65, (1971)
- 2) Uchida, T., Kawahara, Y., Hayashi, Y., and Tateishi, A.: Eulerian deposition model for sediment mixture in gravel bed rivers with broad particle size distributions, Journal of Hydraulic Engineering, 146(10), 04202007.
- 3) 中島奈桜, 田丸雄大, 内田龍彦, 河原能久: 流れによる砂防堰堤からの流出土砂量の評価に関する基礎的研究, 河川技術論文集, 第 26 巻, pp.615-620, 2020.