

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

AN EVALUATION METHOD FOR SEDIMENT DISCHARGE
FROM A SABO DAM

中島奈桜¹・田丸雄大²・内田龍彦³・河原能久⁴
Nao NAKASHIMA, Yudai TAMARU, Tatsuhiko UCHIDA, Yoshihisa KAWAHARA

¹ 正会員 株式会社建設技術研究所 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2丁目 26-2 (日暮里 UC ビル))

² 正会員 株式会社日水コン (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-22-1 (新宿スクエアタワー))

³ 正会員 博(工) 広島大学大学院准教授 先進理工系科学研究科社会基盤環境工学プログラム
(〒739-8527 広島県市鏡山 1-4-1)

⁴ フェロー会員 工博 広島大学副学長 学術・社会連携室 (同上)

One reason of sediment-flood disasters is that the amount of sediment supplied from sabo dams exceeds the amount of sediment that can be transported by water flow. Therefore, it is necessary to evaluate the sediment discharge from over the sabo dam with the water. The sediments in the sabo dams have a wide particle size distribution. The objective of this study is to clarify the amount of sediment discharged from a sabo dam through experiments and to develop a method of the prediction. In the experiment on the sediment discharge from the sabo dam using mixed particle size, sediment discharge from the sabo dam was more than 20 times greater than the erosion volume. The Eulerian deposition model that can evaluate the porosity was extended to the erosion process, was coupled with sediment transport models. The present method captured the sorting process of the riverbed and reproduced variations in volume and the sediment size distribution simulating the porosity of sediment.

Key Words: *sediment transport, porosity, sediment precipitation flood, numerical simulation*

1. 序論

2018年に発生した西日本豪雨により、大屋大川では土砂洪水氾濫により甚大な被害が発生した。大屋大川上流の砂防堰堤に堆積した土石流堆積土砂が後続流の作用により流出し、これが下流河道の通砂能力を超えてしまったため、土砂洪水氾濫が発生したと考えられる。このため、流れによる砂防堰堤からの土砂流出量と下流河道の通砂能力を適切に評価し、砂防堰堤の設置計画や下流河道の改修を行う必要がある。しかし、下流河道の計画において、上流にある砂防堰堤からの土砂流出量は適切に考慮されておらず、砂防堰堤の計画においても後続流による土砂流出量は考慮されていない。江崎¹⁾は満砂後に砂防ダムを越流する掃流砂量の挙動を明らかにすることは、砂防ダムの下流河道への影響の予測評価に関した重要な問題と考え、砂防ダムが満砂状態に達した後の堆砂縦断形状の時間的変動を式による検証を行った。堆砂

縦断形状に関しては、既往実験資料にかなり近似する結果を与えることを示した。堀内ら²⁾は格子型砂防堰堤の模型を用いて、砂防堰堤上方からの土砂流出量の制御に関する実験を行い、砂防堰堤上方にネットを設置することにより土砂流出抑制効果があることが明らかになった。しかし、土砂越流量と堆砂形状の関係性に関して測定結果がなく、粒度分布の影響についての検討が不十分である。

土石流により砂防堰堤に堆積した土砂はコアストーンと呼ばれる巨石を含む幅広い粒度分布を持つ。そのため、砂防堰堤からの土砂流出量を評価するには混合粒径による、粒度分布や堆積土の空隙率の変化を考慮しなければならないと考えられる。従来の混合粒径の河床変動解析法では交換層と呼ばれる河床表層の土砂が一様に混合するコントロールボリュームの概念を導入し、河床変動量と粒度分布について河床が上昇する場合と低下する場合に分けて定式化した連続式が用いられる³⁾。しかし、この

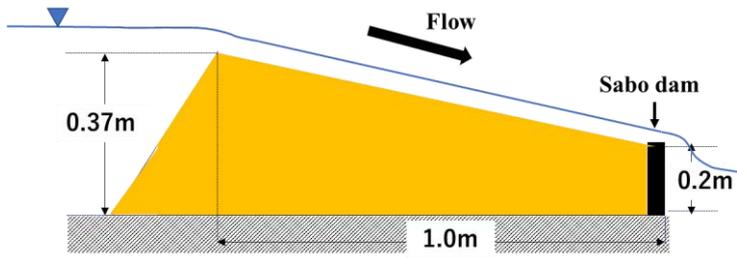


図-1 初期形状

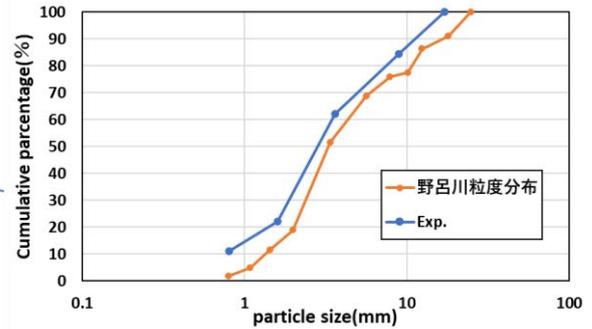


図-2 粒度分布

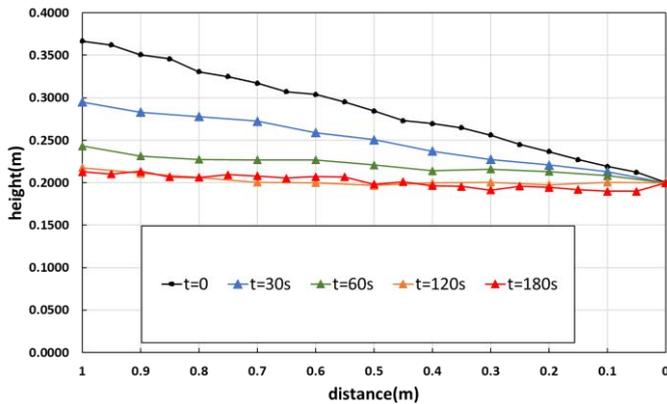


図-3 河床高の時間変化

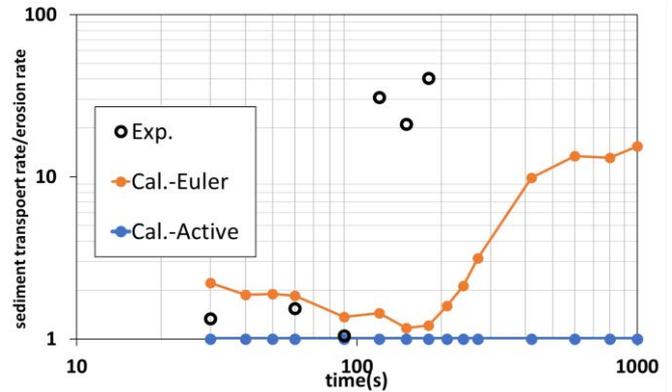


図-4 土砂流出量と侵食量の関係

モデルは空隙率の変化と交換層の厚さの評価に課題がある。近年、混合粒径の河床変動解析において、藤田ら⁴⁾は、空隙率を粒度分布の関数として評価し、空隙率の時間的変化を考慮できる河床変動解析法が開発されている。著者らは、混合粒径の土砂体積について、粒度分布から直接空隙率の変化と堆積を計算できるオイラー型モデルを開発した。しかし、侵食過程についての検討は不十分であり、土砂輸送解析には至っていない。

本研究では、後続流による砂防堰堤からの土砂流出量現象を実験的に明らかにすることとその解析法を検討する。解析法において、著者らが開発したオイラー型堆積モデル⁵⁾⁷⁾を侵食過程に拡張し、掃流力から算出した流砂量式を組み合わせた河床変動解析法を開発し、混合粒径を用いた砂防堰堤流出実験を対象にモデルの検証を行った。

2. 砂防堰堤からの土砂流出実験

(1) 実験方法

実験では、混合粒径の土砂を用いて土砂流出過程における挙動などを調べた。実験には、幅0.2m、高さ0.6mの側面がアクリル板のコンクリート素材の直線水路を用いた。図-1のように水路に不透過型の砂防堰堤模型(0.2m)を配置し、砂防堰堤上流に土砂を計画堆砂勾配(0.17)で堆砂させ、初期水深が0m状態から一定流量(9.0L/s)を流し、

上流端から越流させた。時間軸は、下流端から水が流れ始めた時を0秒とした。混合粒径実験の水利条件とH30年度7月豪雨災害で被害にあった広島県呉市大屋大川上流の砂防ダムを参考にフルード相似則を用いて決定している。(図-2)。本研究では5粒径を用いた混合粒径実験を行った。下流端の砂防堰堤直下で網を設置し実験開始から180秒間、30秒ごとに流砂量を計測した。網で捕捉した流砂量は篩を用いて粒度分布を測定した。河床高の測定は、側面からの撮影による画像判定と通水前後にポイントゲージを用いて計測をした。砂防堰堤上流の堆積土の表層の粒度分布は画像判定により計測した。

(2) 実験結果

図-3に河床形状の時間的変化を実験開始から1800秒までの結果を示す。縦軸は河床高、横軸は下流端からの距離である。実験開始120秒ほどで河床形而上は平坦となった。また、河床形状はほぼ線形を保って低下していきことが分かった。図-4に土砂流出量と侵食量の比の時間変化を示している。縦軸は土砂流出量と侵食量の比、横軸は時間である。ここで、土砂流出量は砂防堰堤下流で6秒間に流出した単位幅土砂量、侵食量は各計測時間の堆積が減少した部分の量とした。実験初期では土砂流出量と侵食量の比は2倍ほどであるが、100秒以降、数十倍となった。これは大きい粒子の間に充填された小さい粒子が流出し、骨格となる大きい粒子の移動がないため

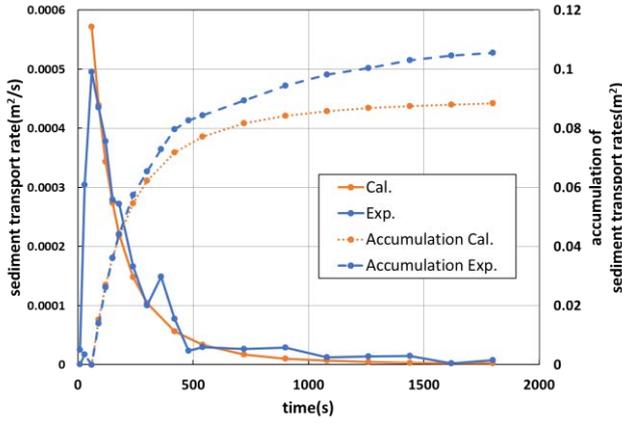


図-5 流砂量(一様粒径)

だと考えられる。120 秒以降はほとんど河床高の変化がなく、この現象が顕著に見られたと考えられる。

3. 砂防堰堤から流出する土砂量の評価法

(1) 砂防堰堤の土砂流出量の評価法

混合粒径を用いた砂防堰堤からの土砂流出実験をするにあたり、一様粒径を用いた予備実験を行った。この実験を対象に等流を仮定して掃流力を評価し、この掃流力を用いて流砂量式により流砂量を算出した。図-5 に流砂量の時間変化と図-6 に河床形状の実験値と解析値を示す。縦軸は河床高、横軸は下流端からの距離である。計算値は実験結果を概ね表すことができている。そのため、本研究では混合粒径の場合も等流仮定を用いて計算された流砂量を用いた。掃流力の評価式と流砂量式⁹⁾を以下に示す。

$$\tau = \rho g R I \quad (1)$$

$$q_{i*} = 17 P K_i (\tau_{i*} - \tau_{ci*}) (\tau_{i*}^{1/2} - \tau_{ci*}^{1/2}) \quad (2)$$

ここで、 τ : 掃流力, $P K_i$: i 粒子の存在率, R : 径深, I : 河床勾配, q_{i*} : i 粒子の無次元流砂量, τ_{i*} : i 粒子の無次元掃流力 ($\tau_{i*} = \tau_{i*} / s g d_i$, s : 水中比重, d_i : i 粒子の直径), τ_{ci*} : i 粒子の無次元限界掃流力, $P K_i$: i 粒子の存在率である。限界掃流力は Egiazaroff の式¹⁰⁾を 芦田・道上 が修正した式を用いる。

$$\begin{cases} d_i/d_m \geq 0.4: \frac{\tau_{ci*}}{\tau_{cm*}} = \left\{ \frac{\log_{10} 19}{\log_{10}(19d_i/d_m)} \right\}^2 \frac{d_i}{d_m} \\ d_i/d_m \leq 0.4: \frac{\tau_{ci*}}{\tau_{cm*}} = 0.85 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 d_i : i 粒子の粒径, d_m : 平均粒径, τ_{cm*} : 平均粒径の無次元限界掃流力をである。

次に、粒度分布による空隙率の時間的変化を考慮できるオイラー型堆積モデル⁵⁻⁷⁾について説明する。まず、流砂量から各粒径の単位面積当たりの土砂堆積量 D_i (負の場合は侵食を表す) は Exner 方程式より次式で表される。

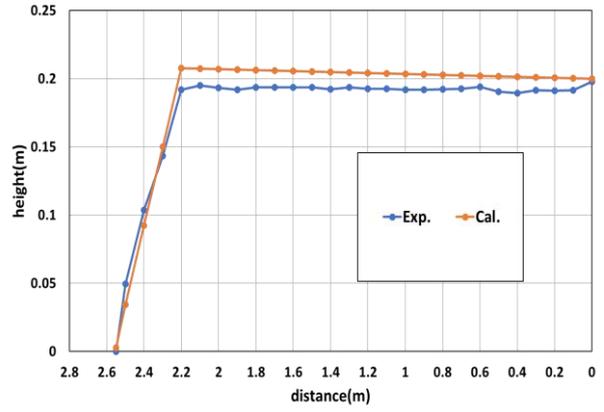


図-6 河床形状(一様粒径)

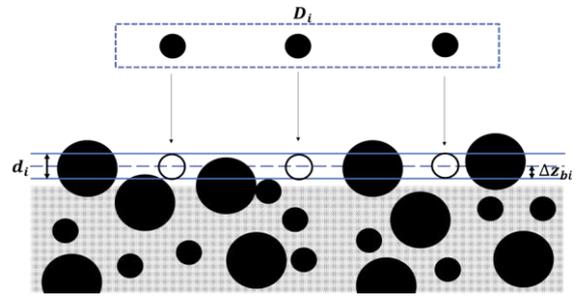


図-7 混合粒径堆積土への堆積過程

$$D_i = \frac{\partial q_{bix}}{\partial x} \quad (4)$$

オイラー型堆積モデルでは、図-7 に示すように混合粒径の堆積土砂に i 粒子が土砂収量 D_i 分、堆積するとき堆積土では河床高から i 粒子の粒径 d_i だけ i 粒子の存在率が変化する。よって、以下の式⁷⁾が成立する。

$$d_i \delta P_i = \delta t D_i - (p_i)_{z_{bi}} \delta z_{bi} \quad (5)$$

ここで、 δ : δt 間の微小変化量, p_i : 任意地点の i 粒子の存在率, P_i : i 粒子の存在率, z_{bi} : i 粒子の堆積高さであり、 P_i の最大値は i 粒子の侵入可能な空隙 λ_i と一様空隙率 λ_0 を用いて $\lambda_i(1 - \lambda_0)$ で表されるため、 i 粒子の存在率 P_i が最大値となる saturated condition と最大値以下になる unsaturated condition の状態に分けられ、以下の式(6)により i 粒子の存在率と堆積高の変化量を求められる。

$$\begin{cases} \delta z_{bi} = \frac{\delta t D_i}{\lambda_i(1 - \lambda_0)}, \delta P_i = 0 \quad (\text{unsaturated condition}) \\ \delta z_{bi} = 0, \delta P_i = \frac{\delta t D_i}{d_i} \quad (\text{saturated condition}) \end{cases} \quad (6)$$

i 粒子の侵入可能な空隙率 λ_i は i 粒子より大きな粒子の存在率 P_j を用いて以下の式で表す。

$$\lambda_i = 1 - \sum_{j=i+1}^k \alpha_{ij} P_j \quad (7)$$

ここで、 i 粒子 < j 粒子である。 α_{ij} は粒径比の関数であり、二粒子充填実験の結果から以下の式で表す。

$$\alpha_{ij} = 1 + \frac{\lambda_0}{1 - \lambda_0} \gamma_{ij}^n (1 - \beta_{ij})^m \quad (8)$$

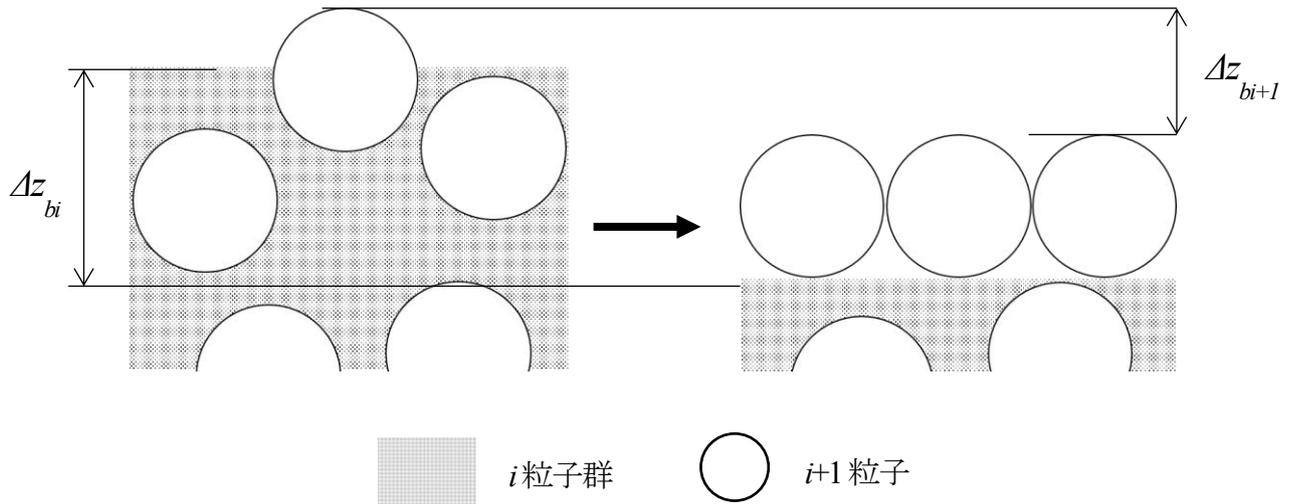


図-8 小さい粒子の侵食に伴う大きい粒子の河床変動高

$$\beta_{ij} = (1 - \gamma_{ij}) \left(1 - \frac{P_j}{1 - \lambda_0}\right) \quad (9)$$

$$\min\left(a \frac{d_i}{d_j}, 1\right) \quad (10)$$

また、小さい粒子の空隙に大きい粒子は侵入することができないため以下の式(11)が成り立つ。

$$z_{bi+1} > z_{bi} \quad (11)$$

ここで i 粒子 < $i+1$ 粒子, z_{bi+1} : $i+1$ 粒子の堆積高さである。

以上の堆積モデルを侵食モデルに拡張する。侵食過程では表層の i 粒子の存在率 P_i が 0 の状態、empty condition の時に侵食するとし、式(6)同様に以下の式で表される。

$$\delta z_{bi} = \frac{\delta t D_i}{\lambda_i (1 - \lambda_0)}, \delta P_i = 0 \text{ (empty condition)} \quad (12)$$

数値解析において、各粒径ごとに計算を行い、全体の解析層の計算に反映させる。大きい粒子は小さい粒子の空隙に侵入することが出来ないため、大きい粒子の堆積高さは小さい粒子の堆積高さより高くなるので、全体の解析層の堆積層の変化量は最大粒径の変化量とした。ここで、全体の解析層の各層の高さは最大粒径で定義されている。(図-9)

侵食過程に拡張するにあたり、小さい粒子の侵食に伴い侵食量がない大きな粒子も式(11)の条件から河床高が低下する現象が考えられる。本研究では、図-8 に示す図のように、小さい粒子が侵食した高さ分、大きい粒子が最密に堆積すると考え、式(6)から以下に式を用いて評価した。

$$\delta z_{bi+1} = \delta z_b - \delta z_b \times (P_{i+1})_{\text{deposition layer}} / (\lambda_{i+1} (1 - \lambda_0)) \quad (13)$$

ここで i 粒子 < $i+1$ 粒子, $(P_{i+1})_{\text{deposition layer}}$ は $i+1$ 粒子の堆積層の存在率である。

(2) 解析条件

解析条件を表-2 に示す。オイラー型堆積モデルでは

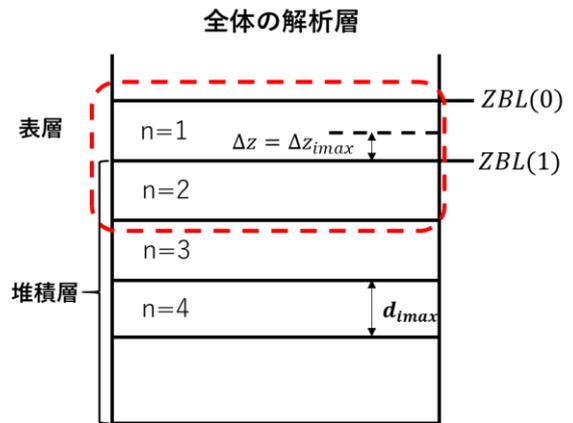


図-9 全体の解析層

全体の解析層と各粒径の解析層において、初期の粒子存在率と堆積高さを定義しなければならない。初期の空隙率は実験値より 0.305 とした。また、各粒径の堆積高さは初期の河床高とした。掃流力が作用するのは全体の解析層の表層(n=1)と堆積層の一層目(n=2)としている。(図-9)

比較として交換層の概念を用いた従来の方法²⁾により計算を行った。掃流力と流砂量はオイラー型堆積モデルと同様に式(1), (2)で評価した。粒度分布は式(14)の連続式より算出した。

$$(1 - \lambda_0) \frac{\partial PK_i a}{\partial t} + (1 - \lambda_0) PK_{Li} \frac{\partial (z - a)}{\partial t} + D_i = 0 \quad (14)$$

ここで、 a : 交換層厚さ, PK_i : i 粒子の交換層内の存在率, PK_{Li} : i 粒子の交換層下の存在率である。今回、交換層厚さは最大粒径とした。

(3) 結果

図-10 に河床形状の時間変化, 図-11 に表層の d50 粒径

表-1 解析条件

単位幅流量	m ² /s	0.046
初期勾配	-	0.17
dx	m	0.05
刻み時間	s	0.001

の縦断分布, 図-12に単位時間当たりの総流砂量, 図-13から図-17に各粒径の流砂量を示す. 計算結果は, 流砂量のピークが実験値合うように時刻調整をおこなった. 河床形状の時間変化では, 解析値と実験値で概ね一致していた. 表層の d50 粒径の縦断分布においてはいずれの解析値は実験値の上流に向かって粗粒化する傾向を捉えることができている. 流砂量の時間変化量を比較するといずれの解析値は実験値の傾向を捉えることが出来た. しかし, 累計値を比較すると解析値の方が実験値より低い値を示した. 図-13から図-17に示すように大きい粒径(粒径 9.5-19.1 mm と粒径 4.75-9.5 mm)は実験値に比べ解析値の方が流砂量が少ない. 実験では, 最大粒径の下に存在する小さい粒子(粒径 0.5-1.0 mm)の流出に伴う乱れの影響により大きい粒径(粒径 9.5-19.1 mm と粒径 4.75-9.5 mm)が流出する現象が発生していた¹¹⁾. 本研究で用いた流砂量式では, この現象による流砂が考慮できないため, 流砂量を適切に評価できなかつたと考えられる. 粒径 1.0-2.0 mm では流砂量の解析値が実験値に比べ大きい, 粒径 0.5-1.0 mm では解析値の方が小さい. 小さい粒径の存在率と流砂量の評価法に課題があると考えられるため, 今後検討する必要がある.

図-4に土砂流出量と侵食量の時間変化を示す. 初期では解析値と実験値で一致が見られるが, 120秒後から実験値では, 土砂流出量が侵食量の20倍以上となっている. 時間が経過すると, オイラー型堆積モデルの解析値でも侵食量に対する土砂流出量が10倍以上となった. 本解析では流砂量を適切に評価できなかつたため, 土砂流出量と侵食量の時間変化を捉えることが出来なかつたが, 空隙率の時間変化による見かけの侵食量と土砂流出量を捉えることが出来た.

4. 結論

本研究では下流河川の通砂能力の評価法として一次元河床変動計算法を用いて実験を対象に検証を行った. 砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては, 混合粒径による空隙率の時間的変化が考慮できるオイラー型堆積モデルを考慮した河床変動計算法を用いて実験を対象に検証を行った. 以下に本研究で得られた主要な成果を示す.

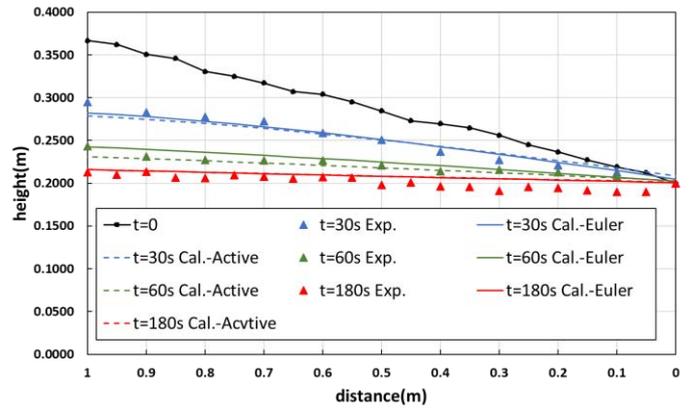


図-10 河床高の時間変化

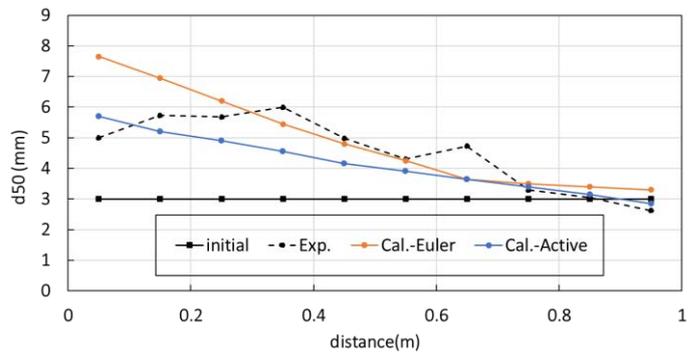


図-11 表層のd50の縦断分布

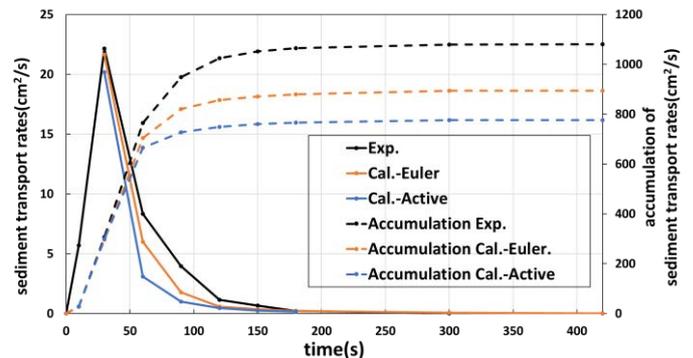


図-12 単位時間当たりの総流砂量

- 1) 混合粒径を用いた砂防堰堤からの土砂流出実験において, 河床高は直線的に減少することが分かった. また, 侵食量に対する土砂流出量は初期では2倍程度であったが河床変化がほぼなくなった100秒以降は20倍以上になった.
- 2) 砂防堰堤からの土砂流出量の評価法においては, オイラー型堆積モデルを侵食過程に拡張したモデルと掃流力から評価される流砂量式を組み合わせたモデルを用いた. 河床変動, 流砂量の時間的変化を概ね再現できた. しかし, 河床が安定状態になるまでの時間は解析値と実験値で異なつたため,

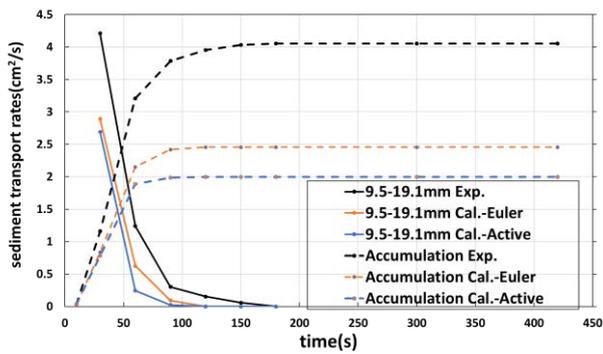


図-13 単位時間当たりの流砂量(9.5-19.5mm)

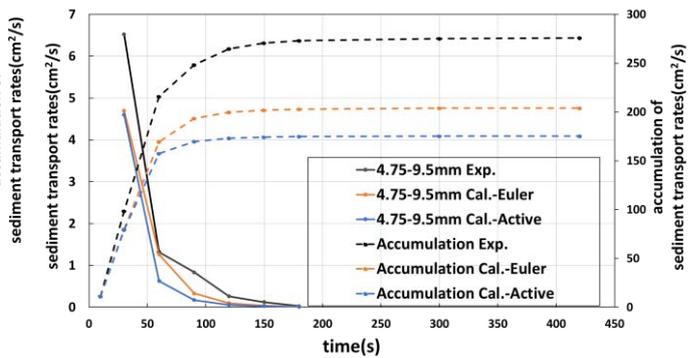


図-14 単位時間当たりの流砂量(4.75-9.5mm)

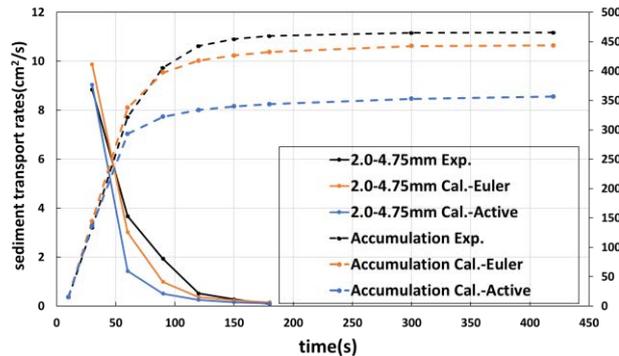


図-15 単位時間当たりの流砂量(2.0-4.75mm)

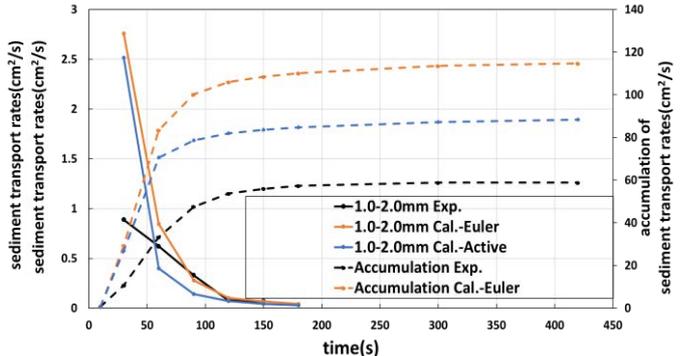


図-16 単位時間当たりの流砂量(1.0-2.0mm)

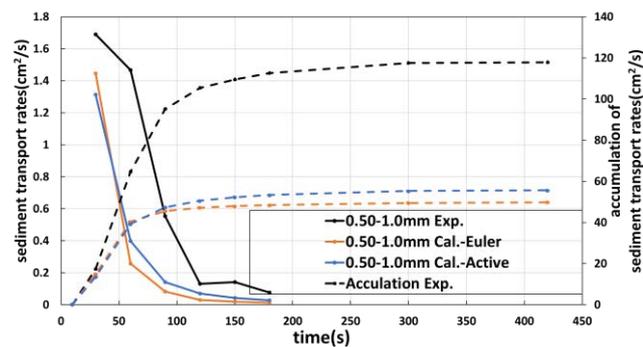


図-17 単位時間当たりの流砂量(0.5-1.0mm)

土砂流出量と侵食量の比の時間的を再現することが出来なかった。

参考文献

- 1) 江崎一博：砂防ダムの堆砂縦断形状について，新砂防，第35巻4号，p.27-31，1983.
- 2) 堀内 成郎，田畑 茂清，小野 慎吾，伊藤 隆郭，水山 高久：格子型砂防堰堤の格子上方から流出する土砂の制御に関する実験的研究，砂防学会誌，64巻1号，p.11-16，2011
- 3) 平野宗夫."Armoring をともなう河床低下について。土木学会論文報告集 1971.195，55-65.1971.
- 4) 岩見収二，細井寛昭，藤田正治：空隙率変化を考慮した平面二次元河床変動モデルによる空隙率空間分布の算定，水工学論文集，第73巻，p. I_925-I_930，

2017.

- 5) 立石彩乃，内田龍彦，河原能久：礫床河川における広い粒度分布を持つ河床材料の空隙率と土砂堆積高の解析法，河川技術論文集，第24巻，pp95-100,2018
- 6) 林勇輔，内田龍彦，河原能久：分級作用に伴う混合粒径土砂の空隙率と堆積変化に関する基礎的研究，水工学論文集，第75巻，2019.
- 7) 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, forthcoming. 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001783
- 8) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69,1972.
- 9) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号 pp. 1-21, 1956
- 10) Egiazaroff, I.V. : Calculation of Nonuniform Sediment Concentrations, Proc. ASCE, HY 4, 1965 Gyr, A., Kinzelbach, W. (2004): Bed forms in turbulent channel flow, Applied Mechanics Reviews, Vol.57, Issue 1. pp.77-93.
- 11) Maarten G, Kleinhans: Grain-size sorting in grain flows at the lee side of deltas, Sedimentology Volume 52, Issue 2 First published: 30 March 2005

(2020.4.2. 受付)