

急勾配移動床水路での路床侵食評価における 実験式の適合性についての研究

STUDY ON THE APPLICABILITY OF EXPERIMENTAL EQUATIONS FOR RIVER BED EROSION IN A STEEP-SLOPE MOVABLE BED CHANNEL

小島 隆太郎¹・永野 博之²・高田 光³・森田年一⁴

Ryutaro KOJIMA, Hiroyuki NAGANO, Hikaru TAKADA and Toshikazu MORITA

¹群馬工業高等専門学校専攻科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

²群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

E-mail: hr-nagano@gunma-ct.ac.jp

³群馬工業高等専門学校専攻科 (現 鉄道建設・運輸施設整備支援機構)

⁴群馬工業高等専門学校環境都市工学科 (〒371-8530 前橋市鳥羽町 580 番地)

E-mail: t_morita@gunma-ct.ac.jp

Key Words: debris flow, erosion, numerical calculation, straight channel, flow experiment

1. はじめに

近年、発生が増加傾向にある土石流災害は¹⁾、人的被害や物的被害を与えるため、早急な対応が求められている。土石流災害の対策を行う上で、土石流の流出規模の評価は重要である。土石流は、流下過程において河床や側岸を激しく侵食し、その流出規模を増大させる。このため、土石流の流出規模を適切に評価するには、河道における侵食速度を適切に見積もることが重要である。土石流や掃流状集合流動を対象とした流路の侵食速度について、これまでも精力的に研究が行われており、いくつかの侵食速度式が提案されている(例えば^{2),3),4)}。高橋ら²⁾は、粒子濃度が平衡濃度以下であれば侵食が継続し、平衡濃度に達すれば侵食は生じないと考え、可変勾配水路を用いた水路実験の結果と侵食・堆積速度式を与えた数値計算の結果の比較を通して侵食速度係数の検討を行った。江頭³⁾は侵食も堆積も起こらない河床勾配として平衡勾配を導入し、それをもとに河床勾配と平衡勾配との差に依存する河床侵食速度式を誘導した。また、高岡⁴⁾は、河床と側岸の侵食が同時に発生するような流路変動機構を明らかにするために急勾配移動床水路を用いて、河床侵食のみ、側

岸侵食のみの実験を行い、それぞれの侵食速度式を提案している。高岡の侵食速度式は、実験による経験式ではあるが、高橋らと同様に平衡流砂濃度と実際の流砂濃度の差が大きいほど侵食傾向は増大するとの考えに立ち、侵食速度を流速と流砂濃度の差の関数とした簡潔な式で表される。近年では、流路変動の評価を行う上で、数値解析の活用は極めて有効であり、現象との適合性が良好であれば、簡潔な表現は解析モデルの構築にも有利である。一方で、高岡の提案式は、流路勾配 $6^{\circ}\sim 18^{\circ}$ の可変勾配水路での実験であるが、そこでの河床侵食の実験における土砂濃度(輸送濃度)は、概ね $0.2\sim 0.35$ 、粒径 $0.17\sim 0.71\text{ mm}$ の条件で行われており、比較的細粒の土砂が高濃度で流下する現象を対象にしているようであり、粒径や土砂濃度による適用限界については不明瞭な点がある。

このような背景を踏まえ、本研究では比較的粗な河床材料を用いた水路実験を、勾配を変化させて複数ケース実施した上で、侵食速度式に高岡の式を用いた1次元解析モデルを構築し、実験結果と解析結果の比較を通じて、経験的な侵食速度式の適合性について検討を行った。また、既往研究⁵⁾で用いた広く用いられている侵食速度式との比較も行った。

2. 検討手法の概要

(1) 実験方法の概要

本研究では、図-1 に示す可変勾配水路（水路長 4 m，幅 40 cm）を用いて実験を行った。河床材料として平均粒径 25 mm の川砂利を下流端から 300 cm 地点まで厚さ 10 cm で敷設した（図-2）。また、流路内に敷設された土砂の滑動を防ぐために、下流端に高さ 10 cm の合板製の堰を設置して固定した。加えて、アクリル製の流路床には、平均粒径 10 mm の川砂利を張り付けたベニヤ板を敷設することで粗度付けを行った。側面はアクリル板よりなる。流路勾配は 5°、10°、15° に変化させた。地下ピット内の水中ポンプから汲み上げた水を上流端の塩ビパイプ製の吐水口から 20 秒間供給し、水路内に敷設した土砂を移動させた。実験では土石流の流動深、下流端から 50 cm，150 cm，250 cm における、実験前後の河床高を計測する。土石流の流動深はビデオカメラにより判読する（図-3，4）。実験前後の河床高はレーザー距離計を用いて水路上方からの距離を下流端から 300 cm まで 10 cm 間隔で計測した。加えて、下流端から流出する土砂と水を、コンテナで捕捉し、各実験後に平均的な流出土砂濃度（輸送濃度）を算出した。実験結果は後述の解析結果と合わせて示す。

(2) 解析モデルの概要

既往文献^{2),6),7)}を参考に、侵食速度式に高岡式を用いた 1 次元解析モデルを構築し、(1) で示した実験の流れに適用した。また、参考として、広く用いられている侵食速度式として高橋式による解析結果と比較した。実験ケースと同様の解析ケースとし、流路勾配 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ とした。河床材料は平均粒径 25 mm，堆積厚 10 cm とした。ただし、実験では下流端に堰を設置していることを考慮し、実験時の河床の移動状況を参考に、下流端から 150 cm までの区間では基準面から 9 cm の高さまでは固定床とした。すなわち、下流端から 150 cm までの区間の移動床厚は 1 cm であり、それより上流で下流端から 300 cm 地点までの移動床厚は 10 cm である。下流端に設置されている堰は実験と同じ高さとし、固定床とした。流量は、水路実験で計測した時間平均流量を解析モデル上流端に 20 秒間与えた。水路実験では吐水口の放水開始にばらつきがあったため、解析モデルでは供給開始から 0.2 秒間の流量は線形に増加し 0.2 秒後から 20 秒目まで後述の設定流量を供給し続けた。

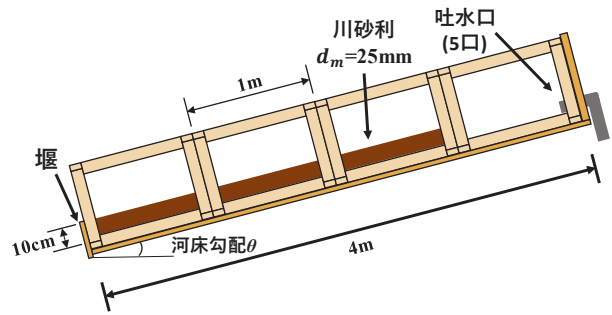


図-1 可変勾配水路の模式図



図-2 土砂の敷設状況 ($\theta = 15^\circ$)

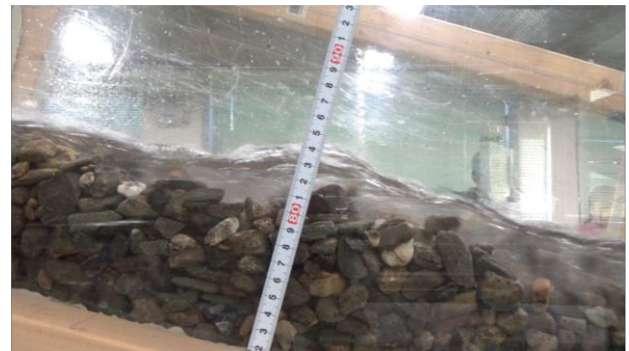


図-3 水路実験の様子 ($\theta = 15^\circ$) $t = 7.0 \text{ sec}$

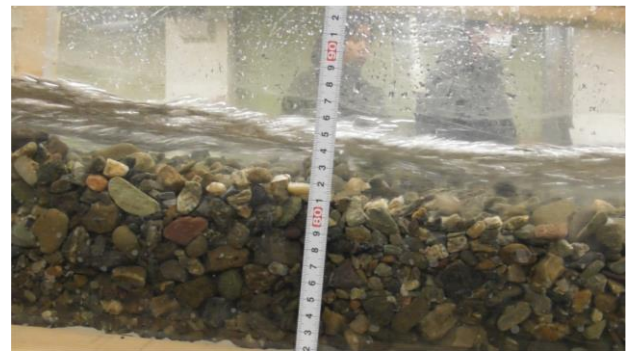


図-4 水路実験の様子 ($\theta = 5^\circ$) $t = 11.5 \text{ sec}$

(3) 解析モデルの基礎式

本解析で用いた基礎式は、式(1)の連続式、式(2)の運動量式、式(3)の河床の変動式を用いた。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = E \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} = gh \sin \theta_b - gh \cos \theta_b - \frac{\tau_b}{\rho_T} \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + E = 0 \quad (3)$$

ここに、 h :水深、 t :時間、 M :単位幅流量($M=uh$)、 u :流れの断面平均流速、 x :水路上流から下流に取った座標軸、 θ_b :河床の傾斜角度($\theta_b = \theta_0 + \tan^{-1}(\partial z/\partial x)$)、 θ_0 : x 軸の水平面からの傾斜角度、 ρ_T :流れにおける水と砂粒子の混合物の密度($\rho_T = \sigma C + (1-C)\rho$)、 σ :砂粒子の密度、 ρ :水の密度、 C :土砂体積濃度、 τ_b :底面せん断応力、 E :侵食・堆積速度、 z :河床高である。侵食・堆積速度 E は式(4)、(5)の高橋式、式(6)、(7)の高岡式で与えられる。

$$E = \delta \frac{C_\infty - C}{C^* - C_\infty} \frac{M}{d_m} \quad (4)$$

$$E = \delta' \frac{C_\infty - C}{C^*} \frac{M}{d_m} \quad (5)$$

$$E = k_b (C - C_{T\infty})^p \cdot u \quad (6)$$

$$E = -k_b (C_{T\infty} - C)^p \cdot u \quad (7)$$

ここに、 δ :侵食速度係数、 δ' :堆積速度係数、 C^* :河床の土砂体積濃度、 C_∞ :平衡土砂濃度、 $C_{T\infty}$:平衡流砂濃度、 d_m :砂粒子の代表粒径、 p :侵食速度指数である。高岡式における平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ は式(8)で与えられる。

$$C_{T\infty} = \frac{q_{s\infty}}{M} \quad (8)$$

ここに、 ϕ :砂粒子の内部摩擦角、 $q_{s\infty}$:単位幅当たりの平衡流砂量である。式(8)の平衡流砂量 $q_{s\infty}$ は、橋本らの平衡流砂量式⁸⁾(9)、(10)で与えられる。

$$\frac{q_{s\infty}}{\sqrt{sgd_m^3}} = \frac{\bar{u}_\delta}{u_*} \tau_*^{3/2} (1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}) \frac{1}{(\alpha - \tan \theta_0) \cos \theta_0} \times G(\tan \theta_0, \frac{h}{d_m}, \frac{w_0}{u_*}) \quad (9)$$

$$G \approx 1 + 0.1 \left\{ \ln \left(\frac{h}{d_m} \right) \right\}^2 (\tan \theta_0)^{-0.8} \times \exp \left\{ -2.5 \left(\frac{w_0}{u_*} \right)^{0.5} \right\} \quad (10)$$

ここに、 \bar{u}_δ :粒子間力層における層内平均速度、 u_* :摩擦速度であり、 $\bar{u}_\delta/u_* \approx 4.7$ とされる⁹⁾。 τ_* :無次元掃流力、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、 s :粒子の水中比重、 α :粒子比重の関数($\alpha \approx 0.875$)、 w_0 :粒子の沈降速度である。高橋式では底面せん断応力 τ_b は土砂濃度に

表-1 解析条件

| 項目 | 設定値 |
|--|---------|
| 水路幅 B [mm] | 400 |
| 計算断面間隔 dx [mm] | 50 |
| 時刻幅 dt [sec] | 0.00001 |
| 計算時間 [sec] | 40 |
| ピーク流量到達時間 [sec] | 0.2 |
| 給水時間 [sec] | 20 |
| 砂粒の代表粒径 d_m [mm] | 25 |
| 初期堆積土層厚 [mm] | 100 |
| 砂粒の密度 σ [g/mm ³] | 0.00265 |
| 間隙流体の密度 [g/mm ³] | 0.001 |
| 水の密度 ρ [g/mm ³] | 0.001 |
| 閾値水深 [mm] | 1.0 |
| 砂粒の内部摩擦角 $\tan \phi$ | 0.66 |
| 掃流状集合流動の最大土砂濃度 C_{max} | 0.26 |
| 掃流状集合流動の最小土砂濃度 C_{min} | 0.02 |
| マンシングの粗度係数 n [m ^{-1/3} s] | 0.01 |
| 流速係数 ϕ ($\theta = 5, 10, 15$ [degree]) | 9, 4, 3 |

よって土砂移動形態を区分し、式(11)~(13)で評価した。

土石流($C \geq C_{max}$)

$$\frac{\tau_b}{\rho_T} = \frac{1}{8} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 \frac{u|u|}{\left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\sigma} \left\{ \left(\frac{C^*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right\}^2 \right\}} \quad (11)$$

掃流状集合流動($C_{min} < C < C_{max}$)

$$\frac{\tau_b}{\rho_T} = \frac{1}{0.49} \left(\frac{d_m}{h} \right)^2 u|u| \quad (12)$$

掃流砂($C \leq C_{min}$)

$$\frac{\tau_b}{\rho_T} = \frac{gn^2 u|u|}{h^{1/3}} \quad (13)$$

ここで、 n :マンシングの粗度係数である。橋本式では、土砂敷設区間において、橋本⁹⁾の提案する高速・高濃度の固液混相流の流況を規定する無次元パラメータ $N_h \equiv (h/d)(\rho_T / \{\sigma F_{(C)}\})^{1/2}$ と流速係数 $\phi = u/u_*$ との関係を用いた。ここに、 σ :土粒子密度、 $F_{(C)}$:土砂濃度の関数で $F_{(C)} = (C/C^*)^2 / (1-C/C^*)$ である。無次元パラメータ N_h は、実験結果より得た土砂濃度と流動深より決定し、 $\theta = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ のケースでそれぞれ $\phi = 9, 4, 3$ とした。解析条件を表-1に示す。解析モデルの堆積層は完全に飽和しているものとした。各侵食・堆積速度式について高橋式では、侵食速度係数 $\delta = 0.0007$ 、堆積速度係数 $\delta' = 0.01$ 、高岡式では、侵食速度係数 $k_b = 0.01$ 、侵食速度指数 $p = 0.7$ と設定した。供給流量は実験に基づき、 $\theta = 5^\circ$ で $Q = 9.01$ L/s、 $\theta = 10^\circ$ で $Q = 7.69$ L/s、 $\theta = 15^\circ$ で $Q = 8.30$ L/sとした。

3. 解析結果・考察

(1) 河床変動高の縦断変化について

図-5 に流路勾配 $\theta = 15^\circ$ における解析結果を示す。図中で左上から右下に伸びている実線と点線は、解析前後の河床高を表している。白抜きのマーカーは流路実験における各地点の土砂の変動高、線付きのマーカーは数値解析における各地点の変動高を表している。実験結果では、計測区間内において $x = 1100 \text{ mm}$ 地点で最も侵食深が大きく、下流に向かって侵食深が減少し、 $x = 3100 \text{ mm}$ 地点付近から堆積傾向になっている。高岡式による解析結果では $x = 1000 \sim 2500 \text{ mm}$ の区間で侵食傾向となり、変動高は概ね実験結果と一致する。高橋式による解析結果では、変動高が実験結果よりも小さいものの、高岡式の結果と同じく $x = 1000 \sim 2500 \text{ mm}$ の区間で侵食傾向となる。なお、本研究では、高橋式の侵食速度係数を 0.0007 としたが、この式の侵食速度係数は 0.1 程度のオーダーまで様々な値が用いられるようである。高橋式による解析結果は、侵食速度係数の設定に依存する。本研究ではあくまで参考としての比較であり、以降のケースでも同様である。なお、 $x = 2500 \text{ mm}$ より下流では、実験結果が堆積傾向なのに対し、解析結果では用いた式に関わらず侵食傾向となり、実験と異なる傾向となった。本研究では下流端に設置した堰を考慮して固定床とする位置を設定しているものの、堰や断落ち部付近の流れを適切に表現できていない可能性が考えられるため、河床高の議論については 2500 mm より上流に限定する。

図-6 に流路勾配 $\theta = 10^\circ$ の解析結果を示す。実験結果では、 $x = 1300 \text{ mm}$ 地点まで侵食深が増加し、それより下流では徐々に侵食深が減少して $x = 2200 \text{ mm}$ 付近から堆積傾向を示した。高岡式による解析結果では、 $x = 1200 \sim 1700 \text{ mm}$ の区間で実験結果と概ね一致するが、 $x = 1700 \sim 2500 \text{ mm}$ の区間では、実験結果との乖離が目立つ。高橋式を用いた解析結果は、 $x = 1200 \sim 1900 \text{ mm}$ の区間で、変動高は小さいものの高岡式の結果と同様に侵食傾向となった。図-7 に流路勾配 $\theta = 5^\circ$ の解析結果を示す。実験では、浅い侵食と堆積を繰り返すが、解析結果では、侵食速度式に関わらず全区間でほぼ変動しない結果となった。

$\theta = 5^\circ \sim 15^\circ$ に変化させた流路実験結果と解析結果から、部分的に実験結果と変動高が一致しない区間は存在するものの、高岡式を用いた解析結果と実験結果との間に概ね良好な適合結果を得た。

図-8 に $\theta = 15^\circ$ における高岡式による土砂濃度の解析結果の時系列変化を示す。図-5 にて、実験結果

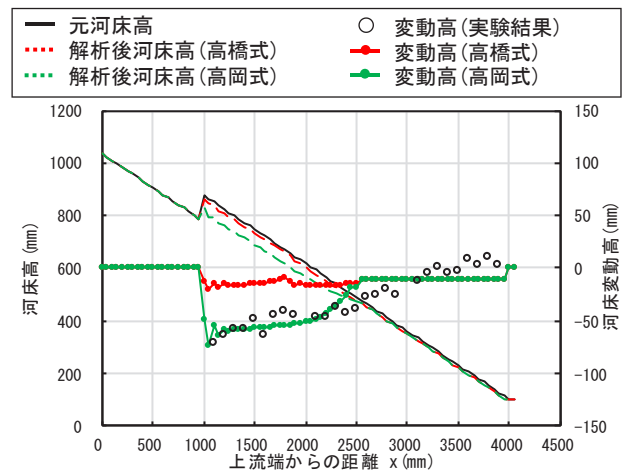


図-5 河床変動高の縦断変化($\theta = 15^\circ$)

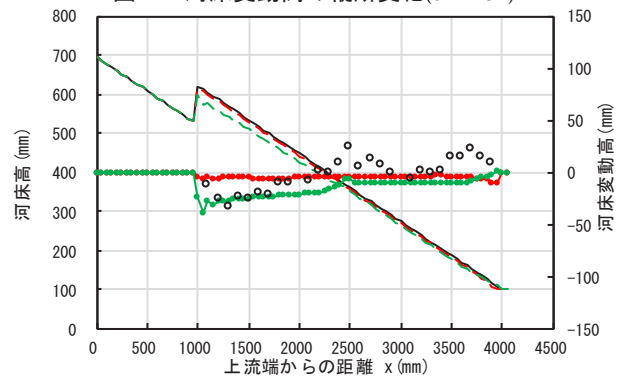


図-6 河床変動高の縦断変化($\theta = 10^\circ$)

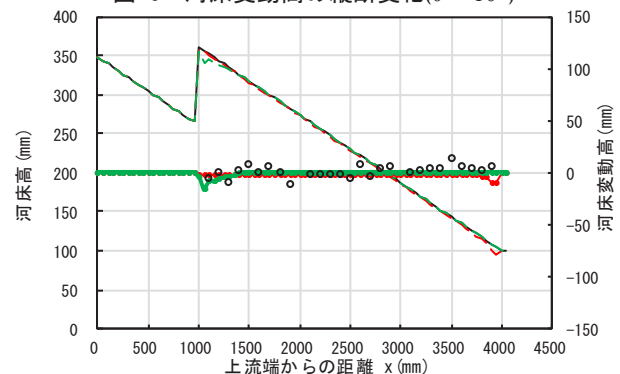


図-7 河床変動高の縦断変化($\theta = 5^\circ$)

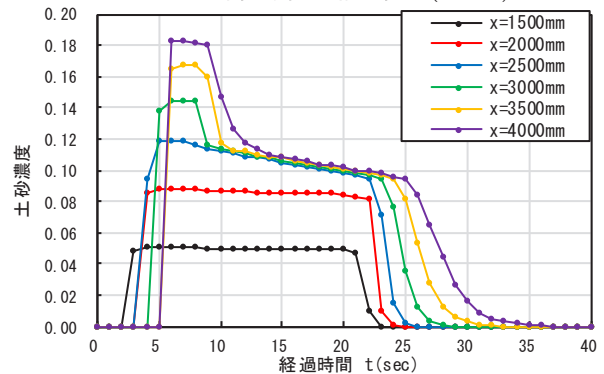


図-8 土砂濃度の時系列変化($\theta = 15^\circ$)

と概ね一致していた $x = 1000 \sim 2500 \text{ mm}$ の区間に着目すると、給水後5秒ほどの間に土砂濃度が増加し

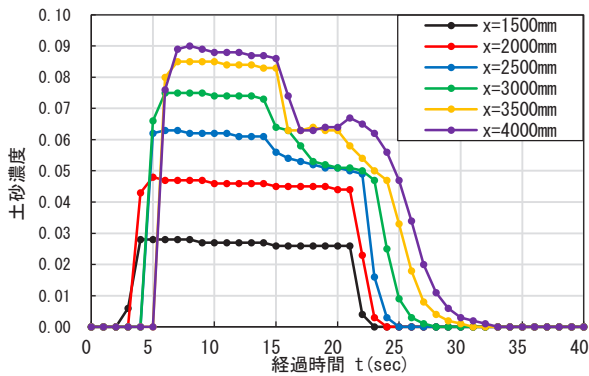


図-9 土砂濃度の時系列変化($\theta = 10^\circ$)

た後、緩やかに土砂濃度が低下し給水時間が終了したのちに急激に低下していることが確認できる。一方、 $x = 2500 \sim 4000 \text{ mm}$ では、 $x = 1000 \sim 2500 \text{ mm}$ の時と同様に、給水後 5 秒程度で土砂濃度の立ち上がりを示すが、数秒後に $x = 2500 \text{ mm}$ 地点の土砂濃度と同程度まで急激に減少している。このことから、 $\theta = 15^\circ$ の際の平衡土砂濃度は $0.1 \sim 0.12$ 程度だと推定できる。図-9 は $\theta = 10^\circ$ における土砂濃度の時系列変化である。各地点の波形は $\theta = 15^\circ$ と類似した傾向を示し、 $x = 2500 \sim 4000 \text{ mm}$ での低下後の濃度から、 $\theta = 10^\circ$ の平衡土砂濃度は $0.05 \sim 0.06$ 程度だと推定される。図-10 は $\theta = 5^\circ$ における土砂濃度の時系列変化である。他のケースと異なり、各地点の土砂濃度は、同じ波形が時間方向にスライドした様な傾向を示し、 0.004 前後の低濃度で全区間を流下したと考えられる。なお、実験時に下流端から流出した流れを約 3 秒間捕捉して算出した土砂の輸送濃度は、 $\theta = 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$ についてそれぞれ、 $0.199, 0.040, 0.007$ であった。

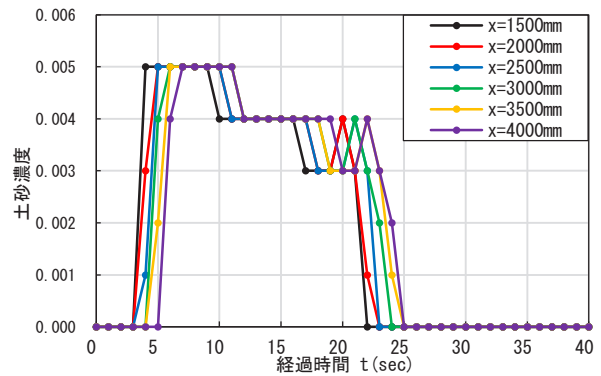


図-10 土砂濃度の時系列変化($\theta = 5^\circ$)

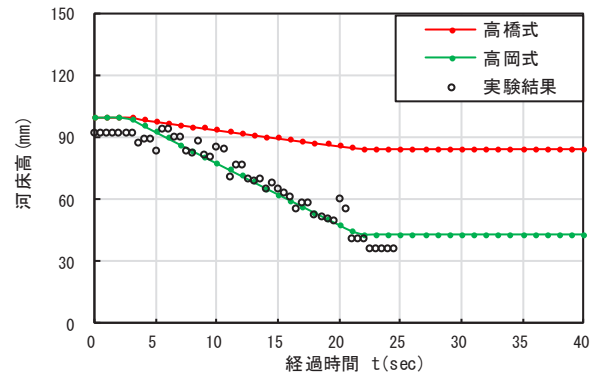


図-11 河床高の時系列変化($\theta = 15^\circ$)

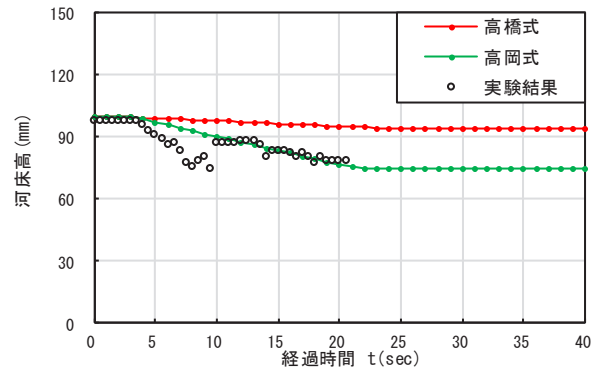


図-12 河床高の時系列変化($\theta = 10^\circ$)

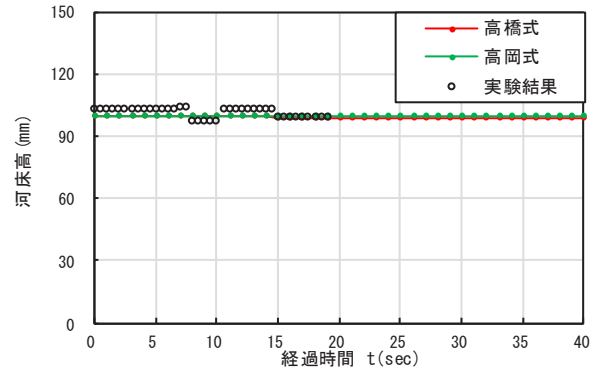


図-13 河床高の時系列変化($\theta = 5^\circ$)

(2) 河床高の時系列変化について

図-11~13 に流路勾配 $\theta = 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$ での上流端からの距離 $x = 1500 \text{ mm}$ 地点における河床高の時系列変化をそれぞれ示す。 $\theta = 15^\circ$ (図-11) では、高橋式と高岡式とも一定速度で侵食が進む結果となった。実験結果でも侵食が始まるとほぼ一定の速度で侵食が進む。高岡式の波形は実験結果と概ね一致しており最終的な変動高も概ね一致した。 $\theta = 10^\circ$ (図-12) でも、ほぼ一定の速度で侵食が進む解析結果となった。一方、実験では $t = 4 \sim 8 \text{ sec}$ で急速に侵食が進んだ後、 $t = 8 \text{ sec}$ 以降は一時的に堆積して変動が止まった後、 $t = 13 \text{ sec}$ 以降で再度侵食傾向を示す。 $t = 4 \sim 8 \text{ sec}$ では解析結果よりも大きい侵食速度となっているが、堆積に転じて $t = 10 \text{ sec}$ 以降では高岡式の波形は実験結果と概ね一致し、最終的な変動高も概ね一致した。 $\theta = 5^\circ$ (図-13) では、解析結果では

変動はほぼ見られない。実験では侵食と堆積の区間が交互に発生するが、最終的に元河床高とほぼ同程度の河床高となったことが確認できる。

図-11~13 より、本研究での高岡式の侵食速度は、

河床の侵食速度を平均的に表していると考えられる。

(3) 流動深の時系列変化について

図-14~16 に流路勾配 $\theta = 15^\circ, 10^\circ, 5^\circ$ での上流端からの距離 $x = 1500 \text{ mm}$ 地点における流動深の時系列変化を示す。実験では増加と減少が繰り返されるが、勾配が緩やかになるほど全体的に変動は小さくなる傾向にある。解析結果では、侵食速度式に関わらず、一度増加した後、流量供給終了時刻付近までほぼ一定の流動深となった。実験結果と高岡式による解析結果とを比較すると、波形の立ち上がり時刻は実験結果とほぼ一致した。立ち上がった後で実験結果における最大流動深の半分程度でほぼ一定の流動深となった後、流動深は低減した。低減開始時刻は実験よりやや遅いが、低減の仕方は実験結果と類似していた。以上より、高岡式を用いた解析は、どのケースについても、実験における流動状況を概ね適切に表現していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、実験より得られている高岡の侵食速度式⁴⁾について、既往実験よりも粗な粒径で低い土砂濃度の条件において検討を行った。その結果、全てのケースで、解析結果は実験結果に良く適合し、広く用いられている他の侵食速度式とも傾向は類似していた。本研究では、流動深波形の立ち上がりや低減の様子など、流れの状況が適切に表現されていると考えられた。流れに応じた抵抗則などが適切に選択された場合、高岡式は既往実験よりも粗な粒径や低濃度の流れなどより広範な条件にも適用できると考えられる。今後は堆積速度についての検討も行った上で、実現象へ適用することが必要と考える。

謝辞：本稿をまとめるにあたり、査読者の方から多大なご教示を頂いたことにより、有益な修正を施すことができた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：近年の土砂災害実績を踏まえた課題，https://www.mlit.go.jp/river/sabo/committee_kikohendo/200521/02shiryō.pdf (2024年5月28日最終閲覧)。
- 2) 高橋保，匡尚富：変勾流路における土石流の形成，京都大学防災研究所年報，第29号，B-2，pp.343-359，1986。
- 3) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)，砂防学会誌(新砂防)，Vol.46，No.1，pp.45-49，1993。
- 4) 高岡広樹：高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する研究，九州大学学位論文，2004。

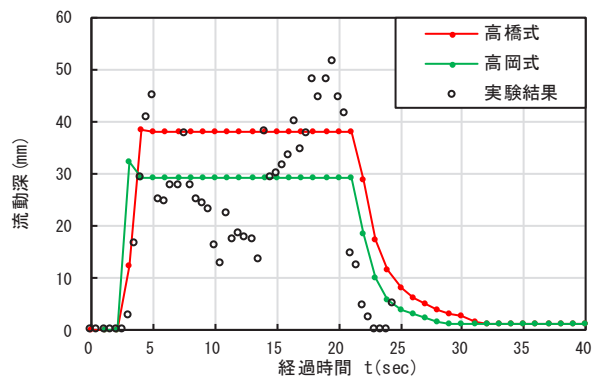


図-14 流動深の時系列変化($\theta = 15^\circ$)

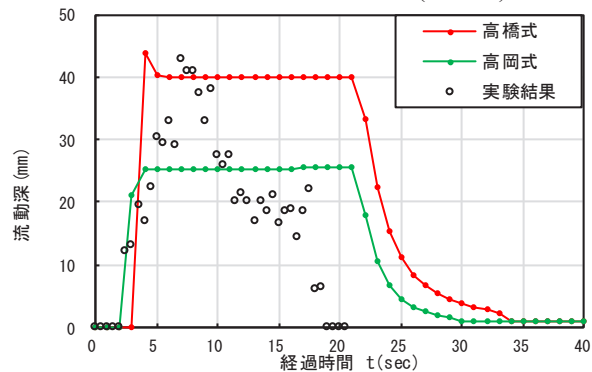


図-15 流動深の時系列変化($\theta = 10^\circ$)

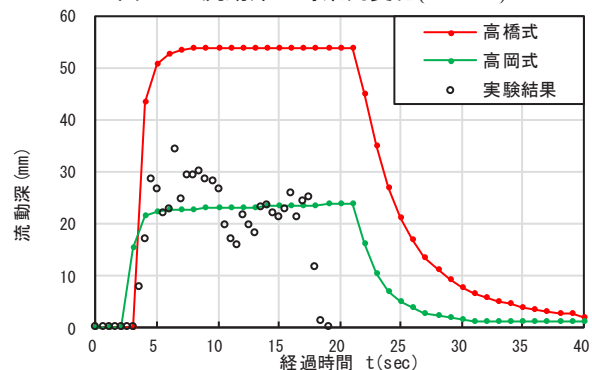


図-16 流動深の時系列変化($\theta = 5^\circ$)

- 5) 小島隆太郎，永野博之：崩壊により発生した土石流の数値解析における侵食速度係数の評価に関する一考察，第51回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，II-10，2024。
- 6) 中川一：土石流ハイドログラフの計算，水理公式集例題プログラム集，第2編 河川編，p.17，2002。
- 7) 土木学会：水理公式集[2018年版]，丸善出版，pp.250-260，2018。
- 8) 橋本晴行，朴埼璨，池松伸也，田崎信忠：急勾配移動床水路における種々の流砂形態に対する統合的流砂量式，水工学論文集，第47巻，pp.571-576，2003。
- 9) 橋本晴行：土砂の移動現象とそのメカニズム，ながれ29，pp.193-202，2010。

(2024. 5. 31 受付)