

固液相間の相対運動を考慮した土石流の侵食速度式の検討

東京大学大学院農学生命科学研究科 足立 一雲 ○堀田 紀文
宇都宮大学農学部 酒井 佑一

1. 研究の背景と目的

土石流の到達距離や氾濫範囲の予測精度向上は被害予測の高度化のために重要である。この予測には数値計算が広く用いられており、一般には、粒子相と流体相を一体の連続体として扱う1流体モデルに基づき、浅水方程式系へ土石流の構成則と侵食速度式を導入する方法が採られる。また既往の侵食速度式は、現在状態と平衡状態との差に応じて侵食・堆積が進行する形で定式化されている。ここで、侵食・堆積時には粒子と流体の流線が必ずしも常には一致せず、粒子-流体間の相対運動が生じる。このため、1流体モデルの仮定の下では、この相対運動が応力状態や流動特性に及ぼす影響を十分に表現できていない可能性がある。

本研究では、粒子-流体間の相対運動を考慮した侵食速度式を提案し、水路実験の再現計算を通じて、堆積過程に対するその妥当性を検証した。また、数値計算を用いて侵食速度式を比較した既往研究と、同一条件で数値実験を行い、堆積過程および侵食過程の両方における既往の侵食速度式との応答特性の違いを比較した。

2. 方法

粒子と流体が相対運動を生じる場合、内部では圧力勾配が発生する。これによって内部の応力状態が変化し、河床面における有効応力が変化すると考えた。河床面での間隙水圧のうち、粒子と流体の相対運動に伴って生じる成分を過剰間隙水圧 P_{ex} と表すと、ある断面平均濃度 \bar{c} の平衡状態における河床面での力の釣り合いは

$$\{\bar{c}(\sigma - \rho) + \rho\}gh \sin \theta_{eff} = [\bar{c}(\sigma - \rho)gh \cos \theta_{eff} - P_{ex}] \tan \Phi_s \quad (1)$$

と表せる。 σ は砂礫密度、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 h は流動径、 Φ_s は砂礫の内部摩擦角である。ここで θ_{eff} は過剰間隙水圧の影響を反映した平衡勾配(ある濃度において侵食も堆積も生じない河床勾配)として定義し、この θ_{eff} を用いて

$$E = \bar{u} \tan(\theta - \theta_{eff}) \quad (2)$$

と、江頭らの侵食速度式^[1]と同様の枠組みで侵食速度 E を表した。 \bar{u} は断面平均速度、 θ は現在の河床勾配である。ここで θ_{eff} の算出には、粒子-流体間の相対運動に伴う圧力勾配の定式化と、それに先立つ粒子-流体間の相対速度の評価が必要となる。後者には式(2)に本来の平衡勾配を適用した江頭らの式による潜在的な侵食速度を採用し、前者については、既存の複数の既往の圧力勾配モデルの比較解析のうえで、水路実験に適合するモデルを用いることとした。

数値計算では、浅水方程式を支配方程式とし、一次精度風上差分法を用いて数値解を求めた。また、構成則には宮本・伊藤(2002)^[2]のものを用いた。まず、土石流の堆積に関する田澤ら(2019)^[3]の水路実験の再現計算を実施した。侵食速度式としては、江頭らの式と本研究で提案する式(2)を用いて計算し、堆積過程および最終堆積形状について、実験結果と計算値のRMSE(Root Mean Squared Error)で再現性を評価した。

次に、純粋な数値実験として、鈴木ら(2009)^[4]、経隆ら(2015)^[5]と同一条件での計算結果を比較した。それぞれ、流量変化に対する堆積・侵食の各過程と、河床形状の違いによる侵食過程とハイドログラフの変化について、式(2)の挙動を分析することを狙いとした。

3. 結果と考察

既往の圧力勾配モデルとの比較検討の結果、過剰間隙水圧の評価には、粘性領域から慣性領域にわたって適用可能なHotta(2011)^[6]のものを採用した。

再現計算では、粒径 $d = 0.67, 0.28, 0.14$ cm、流量 $Q = 1.0, 3.0$ L/sを組み合わせた計6ケースを対象に、勾配が急減する水路条件で数値計算を行った。各ケースでは供給時間を調整し、総土砂供給量を一定とした。各ケースにおける最終堆積形状のRMSEを図1に示す。式(2)は主に粒径が小さく、流量が大きい条件において再現性を改善した。

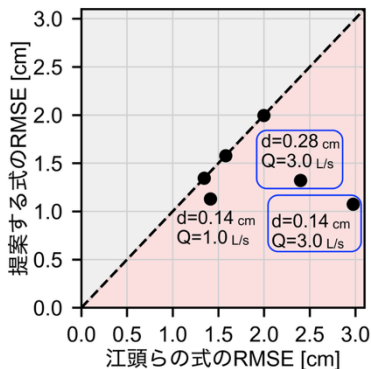
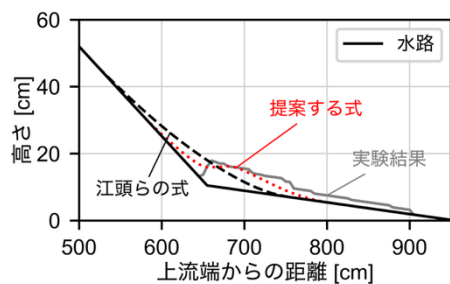
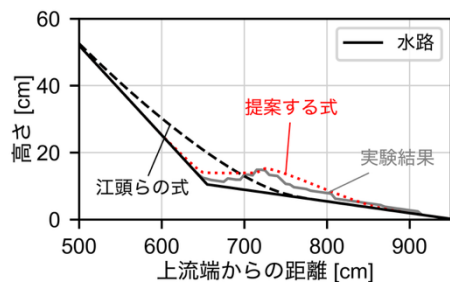


図1. 堆積実験の再現計算結果の比較

中でも改善が顕著であった $d = 0.28 \text{ cm} \cdot Q = 3.0 \text{ L/s}$ および $d = 0.14 \text{ cm} \cdot Q = 3.0 \text{ L/s}$ のケースについて、実験値と計算値の最終堆積形状を図2に示す。江頭らの式による計算値が、流量や粒径によらず同様の堆積形状を示すのに対し、式(2)による計算値は、堆積域の下流側への推移を再現した。



(a) $d = 0.28 \text{ cm} \cdot Q = 3.0 \text{ L/s}$ のケース



(b) $d = 0.14 \text{ cm} \cdot Q = 3.0 \text{ L/s}$ のケース

図2. 改善が顕著なケースの最終堆積形状

数値実験での鈴木ら (2009) [4]との比較では、江頭らの式と式(2)に加え鈴木らの侵食速度式による結果も比較した。粒径 $d = 0.20 \text{ cm}$ に固定し、流量 $Q = 1.0, 1.5, 3.0, 5.0 \text{ L/s}$ での堆積・侵食過程を比較した。結果としては、堆積過程では、式(2)を用いた計算において流量の増加に伴い堆積域が下流側へ推移するという、再現計算を踏襲する結果であった。一方で、侵食過程につい

ては、式(2)において、流量増大に伴って侵食が小さくなるなど不合理な結果が見られた。

経隆ら (2015) [5]との比較では、粒径 $d = 20 \text{ cm} \cdot$ 流量 $Q = 60 \text{ L/s}$ の定常供給条件のもと、水路勾配 $20^\circ \cdot 30^\circ$ の直線水路に対して起伏なし・起伏小・起伏大の3種類を与えた計6ケースを実施した。平均勾配 20° では江頭らの式と式(2)は同様の河床変動と流出応答を示した一方、平均勾配 30° では式(2)において侵食が抑制され、初期ピーク流量が低下するとともに、段波状のハイドログラフが現れた (図3)。この結果は、土石流の実態に近いように見える。

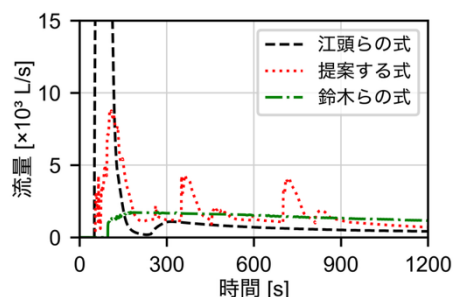


図3. 平均勾配 30° で大きな起伏を与えた場合の下流端ハイドログラフ

以上の結果より、本研究で提案する侵食速度式は堆積過程では有効であることが示された一方で、侵食過程については、更なる検討が必要であると考えられる。

参考文献：

[1] 江頭進治, 芦田和男, 佐々木浩, 1988, 水理講演会論文集 32, 485-490.
 [2] 宮本邦明, 伊藤隆郭, 2002, 砂防学会誌 55 (2), 24-35.
 [3] 田澤直也, 堀田紀文, 酒井佑一, 2019, 2019年度砂防学会研究発表会概要集, 155-156.
 [4] 鈴木拓郎, 堀田紀文, 宮本邦明, 2009, 砂防学会誌 62 (3), 14-22.
 [5] 経隆悠, 堀田紀文, 鈴木拓郎, 石川怜志, 2015, 砂防学会誌 68 (1), 3-12.
 [6] Hotta, N., 2011, 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment, 319-330.