

豪雨時の山地中小河川の土砂動態計算

国土技術政策総合研究所 内田太郎 松本直樹 桜井 亘
株式会社 建設技術研究所 中村直登 西口幸希 日名純也 村上正人
立命館大学 里深好文

1. はじめに

2017年7月の九州北部豪雨では、記録的な豪雨により多数の山腹崩壊、土石流が発生し、赤谷川など筑後川右岸の山地流域において、大量の土砂が氾濫し谷底平野等の保全対象に甚大な被害を及ぼした。このような災害を軽減するためには、土砂動態の実態を解明するとともに、山地から谷底平野・扇状地に流出する土砂量を予測する評価手法の確立が重要となると考えられる。これまでも多くの豪雨時の土砂動態に関するモデルが開発され、再現計算が行われてきた¹⁾。

一方、近年、土石流や掃流状集合流動の砂礫移動層中であっても、細粒土砂は間隙流体と一体として流下するいわゆるフェーズシフトした状態になることが水路実験などにより確認され²⁾、土石流の数値計算にとり入れられてきた³⁾。しかし、これまでの細粒土砂のフェーズシフトを考慮した数値計算の多くは主として土石流領域に焦点を絞ったものが多く、山地から谷底平野・扇状地に流出する土砂量への影響を検討したものは限られている。

そこで、本研究では、九州北部豪雨時の赤谷川流域の土砂動態の再現計算を試み、細粒土砂のフェーズシフトに着目し、下流への流出土砂量に及ぼす影響を検討した。特に、①フェーズシフトする粒径の条件、②フェーズシフトした細粒土砂の上限の濃度に着目した。なお、本研究は速報的に検討中の計算結果をとりまとめたものである。

2. 解析方法

本研究では、石礫型の土石流から、掃流状集合流動、掃流砂・浮遊砂に土砂移動形態が遷移する過程を対象とした内田ら (2016)⁴⁾の1次元河床変動計算モデルを用いた(図1)。同モデルでは、時空間的な流砂の粒度分布の変化を表現できるよう、全領域、混合粒径で算出することとし、河床には交換層を設けた。また、流砂の移動形態は粒径によって異なると考え、層流状態で流下する粗粒土砂と乱流に取り込まれて流下する細粒土砂に2区分してモデル化した。

同モデルでは、西口ら³⁾の手法に従い、限界(上限)粒径以下の粒径の土砂については、全てフェーズシフトすると仮定した。ただし、内田ら⁵⁾と同様に砂礫移動層中の間隙流体の土砂濃度が上限値を超える場合は、限界粒径以下の土砂であっても、粗粒土砂として扱った。限界粒径については研究例が限られているが、ここでは浮遊砂の浮遊限界に関する考えに従い、摩擦速度と沈降速度の関係から、フェーズシフトの限界粒径を算出することによりモデル化した。すなわち、摩擦速度/沈降速度の比を α とし、 α がある閾値(α_0)を超える条件で、フェーズシフトが生じると仮定した。この沈降速度と摩擦速度の比により、ある程度、細粒土砂のフェーズシフトが表現できることは水路実験等により確認されている⁶⁾。

また、土砂濃度が高くなると、粒子は互いに干渉しあい、沈降速度が低下することが指摘されてきている。ここでは、この粒子間の干渉の影響を考慮するために、Rubeyの式により算出を行った沈降速度を高橋・里深(2002)⁷⁾の提案式(式1)を用いて補正した。

$$\omega(c) = (1-c)^\beta \omega_0 \quad \text{式1}$$

ここで、 ω は沈降速度、 ω_0 は清水中の沈降速度、 c は土砂濃度、 β は定数であり、室内実験⁸⁾の結果に基づき $\beta=4$ とした。

3. 解析条件

3.1 解析対象

本研究では、赤谷川流域を赤谷川本川、乙石川、小河内川の3つの河道でモデル化した。その上で、モデル化した河道に流入する支川のうち、流域面積が 0.1km^2 以上の流域の下流端は水・土砂の供給点を設けた。また、面積が 0.1km^2 以下の流域であっても、流出土砂量が多い流域の下流端には水・土砂の供給点を設けた。これらの支川流域以外の領域は残流域とし、残流域は水・土砂を均等に供給した。河道は、国土交通省九州地方整備局により実施された航空レーザー測量結果に基づき、顕著な侵食・堆積が生じた区間を河道として設定し、川幅を算出した。本稿では、乙石川の計算結果について示す。

3.2 水・土砂供給条件

ここでは、流域内及び流域周辺の地上雨量計のデータから

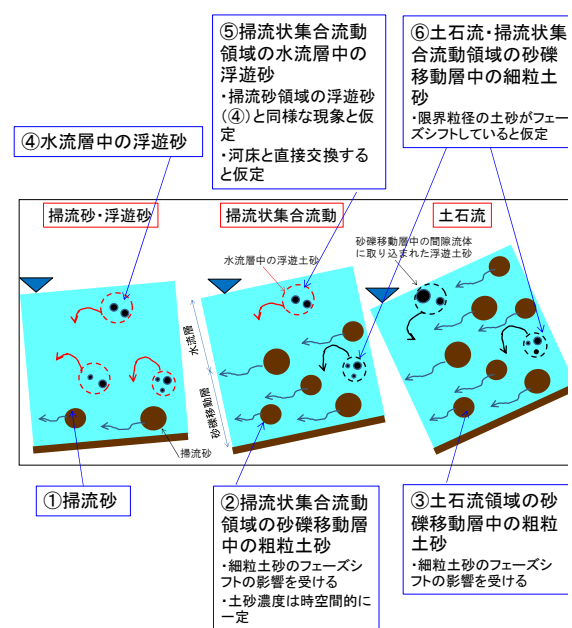


図1 用いたモデルのイメージ

流域平均雨量を算出した。すなわち、本検討では、降雨の空間分布は考慮していない。その上で、タンクモデルを用いて、各流域からの流量を算出した。タンクモデルのパラメータは全国 164 流域のデータを用いて同定されたパラメータ⁹⁾のうち、赤谷川と同様な地質の流域で同定されたパラメータの平均的な値を用いた。その結果、赤谷川下流域でのピーク流量は「筑後川右岸流域 川・砂防復旧技術検討委員会」で示した値と概ね一致した。

各支川流域から流出した土砂量を計算区間に供給することとし、流出土砂量は九州地方整備局により実施された 2 時期の航空レーザー測量結果の差分から算出された土砂量とした。また、顕著な溪岸侵食が見られる区間においては、2 時期のレーザー測量結果の差分から求まる土砂量を供給した。土砂供給のタイミングは、周辺住民へのヒアリング結果を基に、土砂流出が卓越したと考えられる時間帯に供給した。なお、本稿で結果を示す乙石川では、7 月 5 日の 17 時から 1 時に土砂流出が集中した可能性が考えられたため、これに従った。土砂供給期間中は土砂量は一定とした。粒度分布は現地の調査結果に基づき決定した。

3.3 計算ケース

本稿では、「はじめに」に示した①の目的に従い、まず、 α_c を 1~3 で変化させた計算を行った。その上で、 α_c を固定した上で、間隙流体の密度の上限値を 1.2 から 1.74 で変化させた計算を行った。

4. 結果

図 2 中央に航空レーザー測量結果の差分から算出した乙石川の各点の通過土砂量（実績値）と α_c を 1~3 で変化させた場合の計算値を示す。図より、 α_c を小さくして、より粗い径までフェーズシフトすると仮定すると、通過土砂量が大きくなるのがわかる。また、上流域では、通過土砂量は計算値の方がやや多いが、下流域では α_c を 2 ないしは 3 とした場合、通過土砂量は実績値を大きく下回った。このことは、細粒土砂のフェーズシフトを考慮したとしても、フェーズシフトの条件次第では、通過土砂量の評価が過小となる可能性を示していると考えられる。一方で、 α_c を 1 とすると通過土砂量は計算値が実績を上回った。ここで、粗礫の衝突・摩擦によるエネルギー損失があると考ええると、 $\alpha_c=1$ は極端すぎる設定であると考えられるが、フェーズシフトが起こりやすいと仮定すると現象はある程度再現できる可能性が考えられた。

次に、図 2 下に $\alpha_c=1$ は固定した上で、間隙流体の上限の密度を変化させた計算結果について示す。なお、この計算において上流の侵食域において、実績の侵食深=初期の侵食可能深としている。このとき、上限の密度を小さくすると、通過土砂量は小さくなった。上限の間隙流体の密度を 1.3 とすると、通過土砂量は計算結果の値が実績に比べてやや小さいものの、比較的計算結果と実績が良い一致を見せた。

5. まとめと今後の課題

以上の結果から、1 次元河床変動計算により、細粒土砂のフェーズシフトを考慮することにより、流域内で大量な土砂生産が生じるような豪雨時の山地からの流出土砂量のある程度再現できることを確認した。今後は、川幅のとり

方、土砂供給のタイミング、粒度分布などの影響についても検討を続けていく予定である。

参考文献

- 1) 例えば、栢木ら (2007) 砂防学会誌 59 (5)、15-22 /
- 2) 例えば、Hotta et al. (2013) Journal of Mountain Science, 10(2), 233-233 /
- 3) 例えば、西口ら (2011) 砂防学会誌, 64(3), 11-20 /
- 4) 内田ら (2016) 砂防学会概要集 A、34-35 /
- 5) 内田ら (2014) 土木技術資料, 56(9), 22-25 /
- 6) 例えば、中谷ら (2018) 砂防学会誌, 70(6), 3-11 /
- 7) 高橋・里々 (2002) 砂防学会誌, 55(3), 33-42 /
- 8) 内田ら (2017) 砂防学会概要集、104-105 /
- 9) 内田ら (2016) 地形, 37(4), 579-595

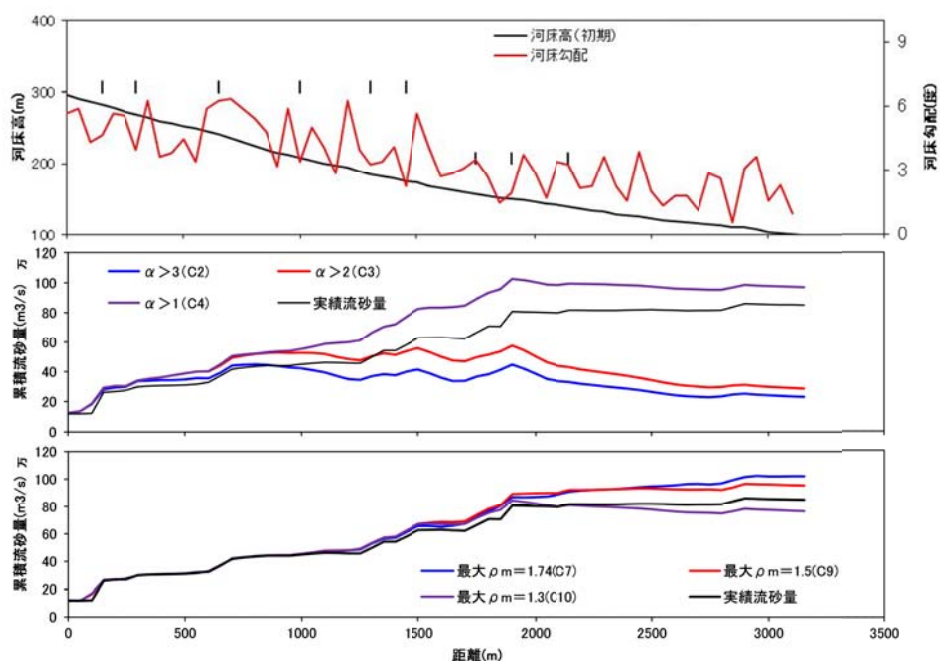


図2 乙石川における通過土砂量の実績値と計算結果の比較（右端が乙石川と赤谷川合流点）：上図の黒縦線は支川の合流を示す。