

生産土砂の粒径が大規模な土砂生産時の流出土砂量に及ぼす影響に関する数値計算

国土防災技術株式会社 ○ 丹羽諭 筑波大学 内田太郎 立命館大学 里深好文 新潟大学 権田豊
株式会社建設技術研究所 西口幸希 国際航業株式会社 久保毅

1. はじめに

近年、豪雨による大規模な土砂生産時に大量の土砂が山地河道を流下する現象に対して研究が進められ、流砂の一部が固相から液相に振る舞いが変化する、いわゆるフェーズシフト・液相化に関する研究が数多く行われている。水路実験を用いた検討では、堆砂勾配と供給条件の関係から、土石流や掃流状集合流動区間におけるフェーズシフトした流砂の割合や割合を規定する水理条件を確認する事例^{1), 2)}や、内部応力との比較からフェーズシフトする割合が考察される事例³⁾がある。一方、実現象の再現計算を行った事例^{例えば4)}では、幅広い粒度分布を対象に再現性が高いフェーズシフトの条件が流域ごとに逆算されている。これらの事例から、豪雨時の山地河川では、細粒土砂が掃流力と沈降速度の比 u_* / w_0 に影響され、フェーズシフトしている可能性が考えられる。しかしながら、水理条件や供給土砂の粒度分布条件のあらゆる組み合わせに応じて、フェーズシフトの有無やその割合を再現計算なしに決定する技術は確立されているとは言い難い。

本検討では、山地流域の典型的な土砂生産現象の1つである大規模崩壊地からの土砂生産現象を対象に、供給土砂の粒度分布とフェーズシフトする条件が結果に及ぼす影響を把握し、山地河川の土砂動態解析におけるフェーズシフトの評価の可否および評価方法の課題整理を目的とした。

2. 計算プログラム

本検討には、高橋の石礫型の土石流を対象としたモデルを基本として、河床せん断力と平衡濃度を連続的に取り扱った鈴木らのモデル⁵⁾を用いた。レジーム則による流れ幅の取り扱い、混合粒径条件における土石流から掃流砂による流砂の取り扱い、浮遊砂理論による流砂の取り扱い、河床の移動限界に対する取り扱い、河床のモデル化については、既往検討^{6), 7)}に示した方法で評価し、フェーズシフトについては、今までの検討事例^{例えば4)}を参考に次式で評価した。

$$(\text{フェーズシフトする条件}) \quad u_* \geq \alpha w_0$$

u_* は摩擦速度、 w_0 は沈降速度、 α は係数である。日名ら²⁾が実施した水路実験によると、0.3mm以上の粒径で2~4の値が取られ、大規模崩壊を含め数値計算で設定された値は1~21と幅広い。また、入力条件としてフェーズシフトを考慮する対象粒径最大値を設定できる仕様とした。

3. 一次元河床変動計算による再現計算

3.1 対象とする土砂流出現象

検討対象流域は、富士川水系の春木川流域(図-1)である。春木川は集水面積が20.9km²、河床勾配が流末で約2°、大春木沢末端で約10°であり、本川の多くの区間が掃流状集合流動で流下する勾配である。本研究では、2011年の台風6号、台風12号、台風15号、2012年の台風4号によって発生した流出土砂量66万m³の大規模土砂流出を対象とした。山地河道への供給土砂の8割は大春木沢の七面山崩れからの生産土砂で、大春木沢の堆積土砂の粒度分布(図-2の黒線)を供給した。春木川は七面山崩れから断続的に土砂流出があり、大春木沢の堆積土砂(生産土砂)の平均粒径が41.7mm、春木川本川の堆積土砂の粒度分布の平均粒径72.8mmで、生産土砂と河床材料の粒度の差は小さいことが流域の特徴として挙げられる。

3.2 計算条件

計算条件は丹羽ら(2020)を基本として、供給土砂の粒度分布とフェーズシフトする条件を変化させた。供給土砂の粒度分布には、調査結果の粒度分布(粒度分布大)、に加えて、一般に山地斜面の土壌化した土層の粒径は細かい⁸⁾ことから、新規崩壊による生産土砂をイメージした調査結果の1オーダー小さい値(粒度分布小)の2

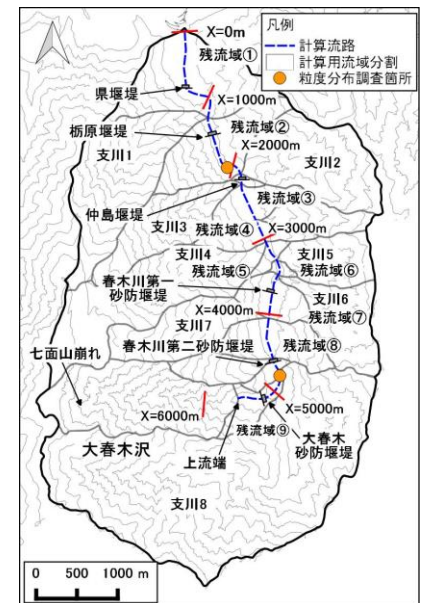


図-1 対象流域

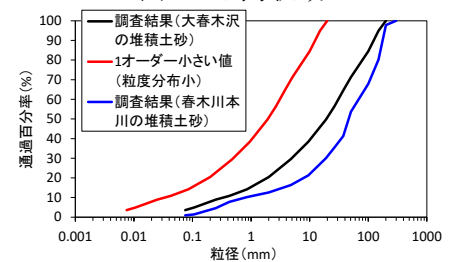


図-2 供給土砂の粒度分布

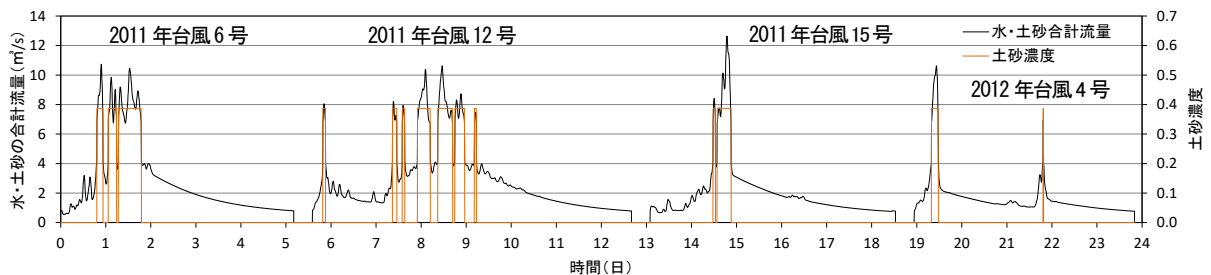


図-3 大春木沢崩壊地からの供給条件

パターンを設定した。なお、河床の粒度分布には全ケース共通で調査結果を設定した。また、フェーズシフトする条件として、フェーズシフトの対象粒径最大値と u_*'/w_0 を変化させた。供給濃度には $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ の条件で上流端の河床勾配による平衡濃度 0.387 を設定した (図-3)。フェーズシフトを考慮した場合、フェーズシフトした土砂が間隙流体の上昇に寄与し平衡濃度が上昇するが、ここではフェーズシフトする条件の影響を直接的に確認することを目的に、供給条件は全ケースで共通とした。

3.3 計算結果

図-4 に通過土砂量の計算結果を示す。粒度分布大を設定したケース 1 からケース 4 は、 $x = 4000\text{ m}$ より下流側で一定の再現性を示した。これは、比較的粒径が粗い (約 80% が 2 mm 以上) 土砂が大規模崩壊地から流出する現象は、生産土砂量が大きい場合であっても、フェーズシフトを考慮しなくても再現可能であることを示している。 $x \geq 4000\text{ m}$ の再現性については、供給濃度とした平衡濃度の設定と合せて考察する必要がある。また、ケース 1 に対して、フェーズシフトを考慮したケース 2、3、4 は $x=4000\text{ m}$ より下流側で通過土砂量が減少した。これは、フェーズシフトにより、細粒分がより運ばれやすくなり河床が粗粒化するとともに、本モデルは侵食速度式の分母を各粒径階の粒径で評価しているため大粒径ほど侵食速度が減少するため、フェーズシフトの考慮によりいったん堆積した土砂の粗粒化する速度が増加し、河床が移動限界となるタイミングが早まったことによる。

粒度分布大のケース 1 と比較して粒度分布小のケース 5 は早川への流出土砂量が 130 万 m^3 に増加し、フェーズシフトの設定による影響 (ケース 1 に対するケース 2~4) と比較して、供給土砂の粒度分布の影響が非常に大きいことを示した。これは、生産土砂の粒度分布を設定することの重要性が高いことを示している。さらに、フェーズシフトする条件を変更したケース (ケース 6~8) では、トータルの通過土砂量の変化は、乱流状に流下する土砂と層流状に移動する土砂の間でトレードオフが生じる結果となり、比較的小さかった。ケース 6 とケース 8 の結果から、フェーズシフトする対象粒径の最大値は、全計算区間に対して、乱流状で流下する土砂の割合を増加させ、層流状で流下する土砂の割合を低下させた。それに対して、ケース 7 とケース 8 の結果から、フェーズシフトする u_*'/w_0 が小さい場合、急勾配な範囲に対して乱流状で流下する土砂の割合が増加した。ケース 5~8 は共通して、供給した土砂のほとんどを流下させていることから、本検討結果では、移動可能な土砂量で通過土砂の総量が決まっており、その中でパラメータに応じた層流状の流砂と乱流状の流砂の割合となっている。

4. おわりに

本研究では、既往の崩壊地からの大規模土砂流出が生じた春木川流域を対象として、供給土砂の粒度分布とフェーズシフトする条件による影響を確認した。その結果、フェーズシフトを考慮したモデルは供給土砂が粗い条件の場合にも適用性があること、供給土砂の粒度分布の影響が大きいことを示した。また、粒径が細かい場合、フェーズシフトする粒径最大値とフェーズシフトする u_*'/w_0 で効果が異なることを示した。間隙流体密度やフェーズシフトで対象とする粒径の最大値を設定については、層流状の流砂による間隙スケールとフェーズシフトする粒径の関係が液相化に寄与する可能性¹⁾ について考慮する等、土砂水理学のアプローチも合せて検討することで、モデルの汎用性向上が期待される。

参考文献 1) 中谷ら (2018) : 砂防学会誌, Vol.70, No.6, p.3-11, 2) 日名ら (2018) : 第 9 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, Vol.70, No.6, p.3-11, 3) Sakai et al. (2019) : Journal of Hydraulic Engineering, Vol.45, No.5, 06019004, 4) 内田ら (2018) : 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集, p.445-446, 5) 鈴木ら (2013) : 砂防学会誌, Vol.66, No.2, p.21-30, 6) 丹羽ら (2018) : 砂防学会誌, Vol.70, No.6, p.34-45, 7) 丹羽ら (2020) : 砂防学会誌, Vol.73, No.1, p.3-14, 8) 筑後川右岸流域 河川・砂防復旧技術検討委員会 (2017)

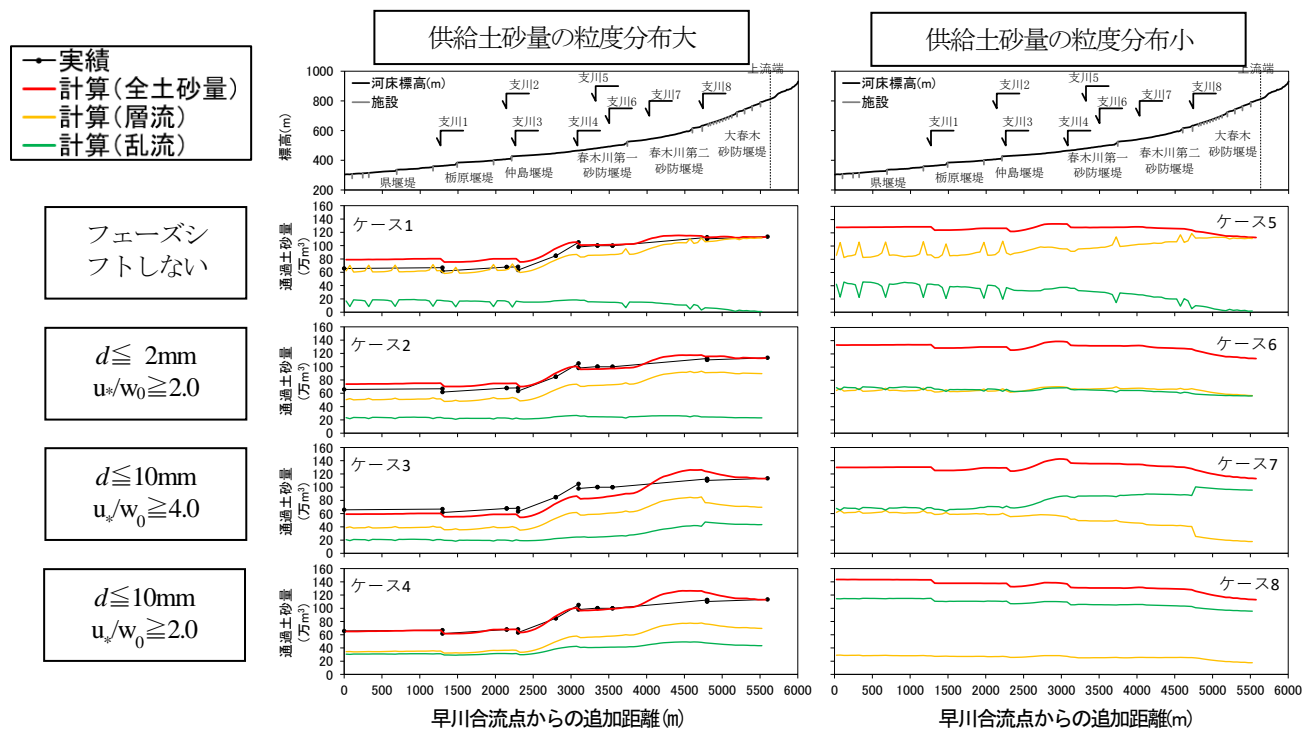


図-4 通過土砂量の計算結果