

生産土砂の粒度が粗い流域を対象とした河床変動計算における土砂の相変化の特徴

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
 関東地方整備局河川部河川計画課 赤澤史顕 富士川砂防事務所 野坂隆幸

1. はじめに

既往の研究では、土石流中で細粒土砂が液相化し流下すると考えられてきた。水路実験を用いた研究でも、液相化しない条件と比較して、液相化した条件では通過土砂量が増加することが確認され、実験で液相化の評価手法に関する研究^{1), 2), 3), 4)}も進められている。近年、これらの知見に基づき、土砂の液相化の影響を考慮した数値計算モデルを用いて、表層崩壊や深層崩壊等に起因する土石流^{5) 6) 7) 8) 9) 10)}、崩壊が同時多発した災害^{11) 12)}など様々な現象に対して再現性が確認されてきた。

一方、春木川における4台風による大規模な土砂流出現象に対しては、土砂の液相化を考慮していない数値計算モデルでも再現が可能であった¹³⁾。春木川に土砂の液相化を考慮した計算モデルを用いると、流出土砂量を過大評価することが懸念されるが、液相化を考慮していない計算で再現できる土砂移動現象に対して、液相化を考慮した計算を行った事例はほとんど見られない。仮に春木川の土砂流出現象に対して土砂の液相化を考慮しても再現できるのであれば、液相化を考慮した計算モデルは一定程度幅広い現象に適用できるといえるが、液相化を考慮したモデルで春木川の現象が再現されなければ、現象によって計算モデルを変更する必要があるといえる。

そこで本研究では、春木川で発生した2011年から2012年の大規模な土砂流出現象に対して、土砂の液相化を考慮したモデルを適用し、液相化を考慮したモデルの適用範囲について考察した。

2. 計算プログラム

本検討では、春木川を対象としたモデル⁸⁾を改良し、土砂の液相化を考慮した。液相化するか否かの判定は、摩擦速度 u_* と沈降速度 w_0 の比で表現可能であることが知られており^{1) 3) 4)}、本検討では係数 α_{PS} を用いた下式で評価した。

$$(土砂が液相化する条件) \quad u_* \geq \alpha_{PS} w_{0di} \quad (式1)$$

砂礫移動層の層厚は、土石流から掃流砂の濃度が0.24 (=0.4 C^*)となる値とした。液相化は砂礫移動層内で生じるものとし、液相化した土砂の最大濃度(液相化した土砂の量と砂礫移動層内の水量で決まる値)を0.45とした。また、土砂の流下形態を土石流から掃流砂による土砂濃度で判定し、0.012未満で掃流砂、0.012以上で掃流状集合流動または土石流とし、掃流砂では液相化しないものとした。

土石流と掃流状集合流動では侵食速度を液相化しない土砂の平均粒度で評価して、侵食の場合は交換層、堆積の場合は流砂の粒度分布を乗じることで各粒径階の侵食堆積速度とした。掃流砂では、流砂と交換層の粒度分布を合成した粒度分布に対する各粒径階の移動限界と流れ濃度を比較することで各粒径階の侵食堆積速度を評価した。

水流層の流砂には浮遊砂理論を適用した。浮上量を芦田・道上式で評価し、沈降量を砂礫移動層と水流層の境界における水流層の流砂濃度 C_a ×集団沈降を考慮した沈降速度 w_0 とした。沈降量算定のための C_a はLane-Kalinskeの濃度分布を介して水流層の流砂の平均濃度から算定した。この際、拡散係数を水深 h で評価した。

3. 一次元河床変動計算による再現計算

3.1 計算条件

富士川水系の春木川(図-1)で発生した2011年から2012年の4台風による流出土砂量66万 m^3 の大規模土砂流出を対象とした。計算区間は春木川と支川8の合流点(大春木沢の下端で勾配10°)から早川合流点までの4.7km区間とした。春木川本川への供給土砂の8割は大春木沢からの生産土砂で、生産土砂の平均粒度が41.7mm、河床堆積土砂の平均粒度が72.8mmである(図-2)。

計算は既往検討¹³⁾を基本とした液相化を考慮しないcase1、液相化を考慮して $\alpha_{PS}=4$ としたcase2と $\alpha_{PS}=2$ としたcase3を実施した。大春木沢流末(河床勾配10°)で液相化を考慮しない平衡濃度は0.210、液相化を考慮した場合は $\alpha_{PS}=4$ で d_6 (=1.425mm)まで液相化し平衡濃度は0.335、 $\alpha_{PS}=2$ で d_7 (=3.375mm)ま

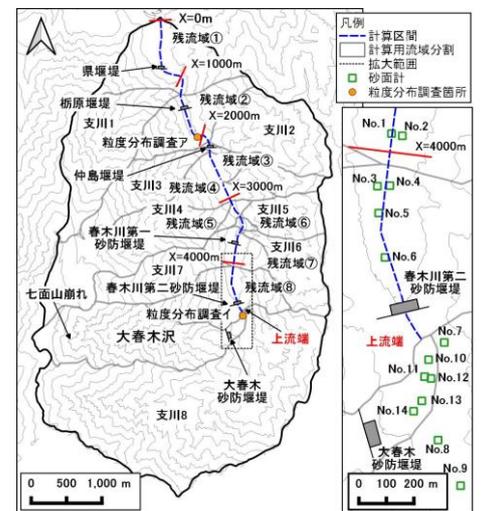


図-1 春木川流域の平面図

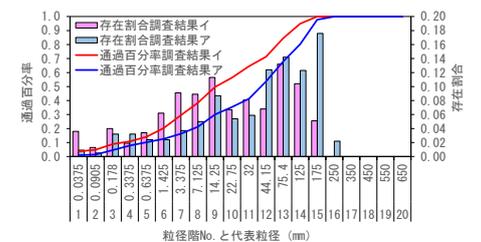


図-2 粒度分布調査結果

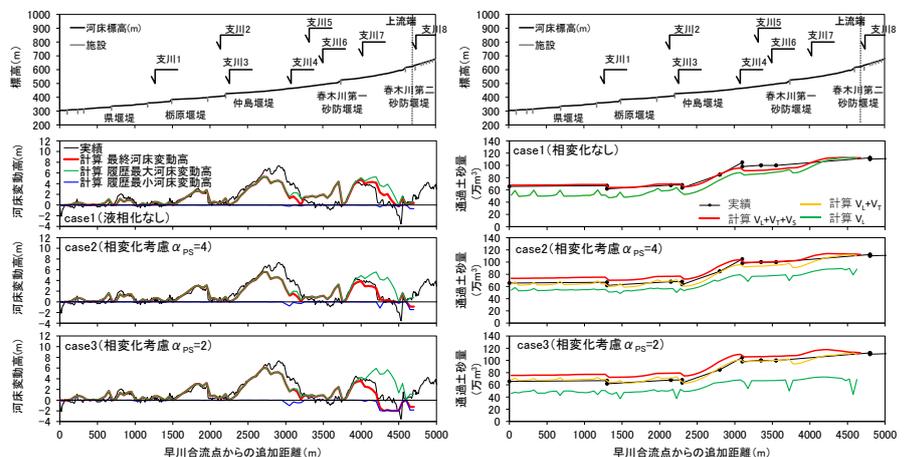


図-3 河床変動高と通過土砂量の計算結果

で液相化し平衡濃度を C^* (=0.6) に近い値として 0.590 とした。大春木沢と支川 8 のそれぞれの供給波形を加算した水・土砂供給波形を上流端の供給条件とした。

3.2 計算結果

河床変動高と通過土砂量の計算結果を図-3 に示す。全てのケースで河床変動高の実績が再現された。 $x = 3,200 \text{ m}$ の上流側で case1、case2、case3 の順に最終河床変動高が高く、履歴最大河床変動高が低い。ただし、case3 では上流端の直下で河床侵食を過大評価した。図-3 の右図で、 V_S が水流層の土砂、 V_T が砂礫移動層で液相化した土砂、 V_L が砂礫移動層で固相の土砂の通過土砂量である。また、全てのケースで通過土砂量の実績が再現された。全通過土砂量は case1、case2、case3 で微増し、その中で水流層の流砂の割合は小さく、液相化の条件に伴い V_T と V_L でトレードオフの関係が確認された。

4. 評価モデルの特徴

土砂濃度が 0.012 以上で土石流・土砂流と判定された時間帯には、常に液相化する結果となった。場所、時間によらず液相化する粒径階の変化は小さかった (表-1)。 $\alpha_{PS}=2$ 、 $\alpha_{PS}=1$ で大春木沢からの供給土砂より計算領域で液相化する粒径階が大きくなるのは、支川 7 等の支川合流に伴う流量の増加により、数式 1 を満たす粒径階が増加したためである。

図-4 に $\alpha_{PS}=4$ とした計算における下流端計算点と仲島堰堤の直上計算点の時系列データを整理した。下流端の計算点では液相化した時間帯に水流層の流砂が減少する傾向を示した。これは、①液相化しない時間帯は土石流から掃流砂の流砂は堆積傾向で、河床から浮上できる細粒土砂が供給されている。②液相化して平衡濃度が上昇し流れは河床から土砂を取り込もうとするが、移動限界¹⁴⁾となる水深が大きく侵食は発生しない。つまり流砂が通過する状況となる。③液相化していない粒径の土砂の堆積はなく、水流層の流砂は浮上量 > 沈降量となり、交換層が粗粒化する。④交換層から d_{10} (23 mm) 以下の土砂が非常に少なくなり、水流層の流砂が減少する。⑤液相化が終了すると①の状況に戻り水流層の流砂が増加する。これに対して仲島堰堤上流の計算点では、液相化した時間帯も間欠的ではあるが堆積が生じ交換層に細粒土砂が供給され続けるため、液相化が終了するタイミングにおける不連続な水流層の流砂量波形が確認されない。このような現象は、水流層の流砂に浮遊砂理論と同様の河床と土砂交換する計算フレームを用いたことが原因の 1 つとなっている可能性がある。

表-1 液相化した粒径

| 液相化条件 | 下流域 | 上流域 | 大春木沢の供給土砂 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| $\alpha_{PS}=5$ | d5(0.638mm) | d6(1.425mm) | d6(1.425mm) |
| $\alpha_{PS}=4$ | d6(1.425mm) | d6(1.425mm) | d6(1.425mm) |
| $\alpha_{PS}=3$ | d7(3.375mm) | d7(3.375mm) | d7(3.375mm) |
| $\alpha_{PS}=2$ | d8(7.1mm) | d8(7.1mm) | d7(3.375mm) |
| $\alpha_{PS}=1$ | d11(32mm) | d12(44mm) | d7(3.375mm) |

5. おわりに

本研究では、春木川の大規模土砂流出現象を対象に液相化を考慮したモデルの適用範囲について考察した。それにより、液相化を考慮したモデルを生産土砂の粒径が粗い流域に適用しても、流砂量を過大評価せず再現性が得られることを示した。また、モデルの特徴を示したうえで、水流層の流砂の計算フレームに課題があることを示した。

参考文献 1) 日名ら (2018) : 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.207-212, 2) Hotta et al., (2012) : Journal of mountain science, Vol.10, No.2, p. 233-238 3) 中谷ら (2018) : 砂防学会誌, Vol.70, No.6, p.3-11, 4) Sakai et al. (2019) : Journal of Hydraulic Engineering, Vol.45, No.5, 06019004, 5) 中谷ら (2014) : 第7回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.85-90, 6) 江頭ら (2016) : 砂防学会誌, Vol.68, No.5, p.38-42, 7) 長谷川ら (2019) : 土木学会論文集 B1, Vol.75, No.1, p.324-331, 8) Uchida et al. (2020) : Canadian Geotechnical Journal, Vol.58, No.1, p.23-34, 9) 西口ら (2011) : 砂防学会誌, Vol.64, No.3, p.11-20, 10) 戸部ら (2020) : 2020年度砂防学会研究発表会概要集, p.21-22, 11) 内田ら (2018) : 第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, p.91-96, 12) 山崎ら (2018) : 土木学会論文集 B1, Vol.74, No.4, p.324-I_331, 13) 丹羽ら (2020) : 砂防学会誌, Vol.73, No.1, p.3-14, 14) 高橋 (1977) : 京大防災研究所年報, 第20号 B-2, p.405-435

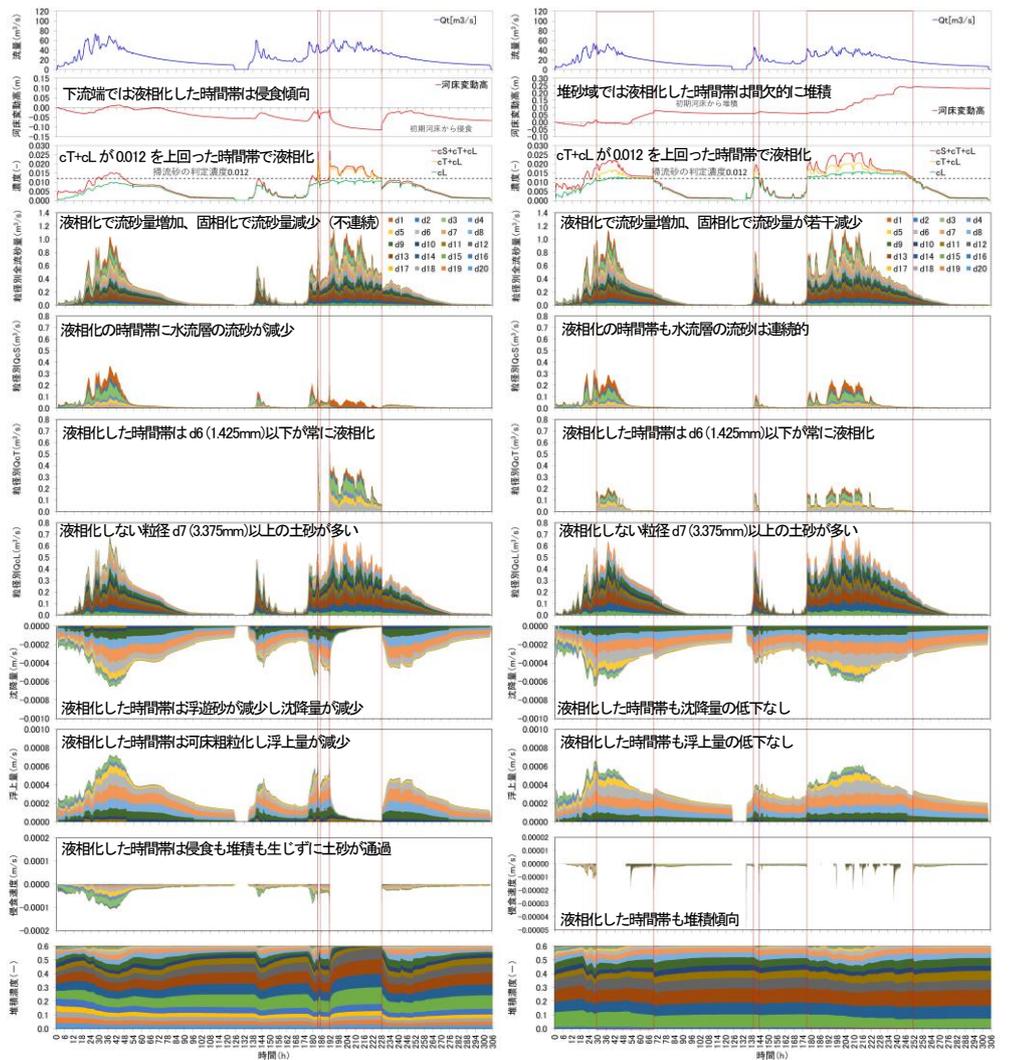


図-4 粒径別流砂量・浮上量と沈降量・侵食堆積速度・交換層の粒度分布 (左図: 下流端計算点 右図: 仲島堰堤直上の計算点)