

京都大学大学院農学研究科 ○中谷加奈
広島大学大学院総合科学研究科 長谷川 祐治
立命館大学理工学部 里深好文

1.はじめに

近年は土砂災害が頻発傾向にあり、平成30年7月豪雨では西日本の各地で被害が発生した。兵庫県神戸市篠原台で発生した土石流は、住宅地内の道路を移動して土砂の一部は土砂災害警戒区域外まで到達した¹⁾。谷出口から延びる道路の勾配が急だったことが要因の一つに挙げられる。一方で、渓流の河床堆積物の構成材料は2mm以下の粘土～砂の構成比が約70%を占めたことから、細粒土砂が液相化したことで流動性が高くなり、土砂が広範囲に移動したことも推測される。

細粒土砂が土石流の液相に取り込まれる影響を評価する方法として、土石流シミュレーションで液相密度 ρ を大きく設定する方法が提案・適用されている^{例えば2)}。筆者らは、粒径が大きく異なる2種類の土砂として粗粒土砂と細粒土砂を用いた水理実験から、細粒土砂の濃度と τ_* （無次元掃流力）あるいは u^*/w_0 （ u^* ：摩擦速度、 w_0 ：沈降速度）を指標として液相密度 ρ の値の推定手法を提案^{3), 4)}してきた。液相化する細粒土砂の割合は τ_* や u^*/w_0 が大きくなるほど増加することを示した。本研究では、液相密度 ρ の値を時間・空間的に追跡する手法を提案した。

2.計算手法

高橋モデル⁵⁾を用いた汎用土石流シミュレータKANAKO⁶⁾の計算手法を基とする。2種類の粒径の土砂を対象として、粗粒土砂と細粒土砂の粒径を d_d 、 d_f 、土砂濃度を C_d 、 C_f とする。土砂濃度 $C = C_d + C_f$ である。

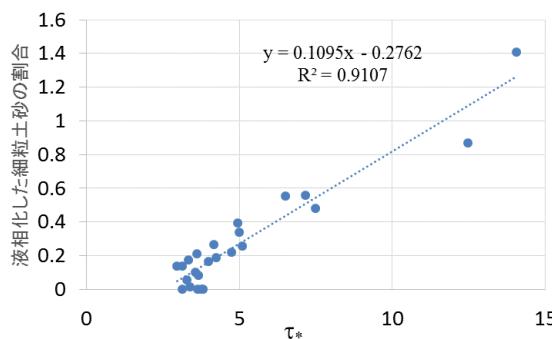


図1 τ_* と細粒土砂が液相化する割合

次式で示す無次元掃流力 τ_* を液相化の指標とする。

$$\tau_* = \frac{\rho_w h \sin \theta}{(\sigma - \rho_w) d_f} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w ：水の密度、 h ：流動深、 θ ：勾配、 σ ：砂礫の密度、 d_f ：細粒土砂の粒径である。

既往検討³⁾の実験結果から、 τ_* と細粒土砂が液相化する割合は図1のように示される。なお、図中で液相化した割合が1.4を示すプロットは、細粒だけでなく粗粒の土砂も液相化したと推測される。図1中に示した近似直線を、液相化する細粒土砂の割合 R を求める推定式として採用した。液相化は細粒土砂のみで発生すると仮定して、 $0 \leq R \leq 1$ とした。

$$R = 0.1095\tau_* - 0.2762 \quad (2)$$

細粒土砂の液相化を考慮した液相密度 ρ は、次式で示される。

$$\rho = \frac{(1 - C)\rho_w + C_f \cdot R \cdot \sigma}{(1 - C) + C_f \cdot R} \quad (3)$$

計算で用いる土石流中の土砂濃度 C_{solid} や平均粒径 d_m は、固相として挙動する土砂のみを対象として、次式で示される。

$$C_{solid} = C_d + C_f(1 - R) \quad (4)$$

$$d_m = (d_d \cdot C_d + d_f \cdot C_f(1 - R)) / (C_d + C_f(1 - R)) \quad (5)$$

侵食堆積の計算には、勾配に応じて使い分けられる土石流(6)、土砂流(7)の平衡濃度式 C_∞ を用いる。

$$\theta_x \leq \theta$$

$$C_\infty = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (6)$$

$$1.8 \leq \theta \leq \theta_x$$

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \quad (7)$$

ここに、 ϕ ：土砂の内部摩擦角、 θ_x ：設定した ρ で式(6)と(7)が一致する勾配($\rho=1.0 \text{ g/cm}^3$ で $\theta_x=7.81 \text{ deg.}$)である。平衡濃度式は流下形態が異なる境界で不連続な値を示すことが指摘されるため、既往検討^{3), 7)}の手法と同様に θ_x により調整した。

3.適用例

2章に示した計算手法で一次元土石流シミュレーションを実施した。2005年に土石流が発生した広島

県宮島の白糸川を対象として、既往検討⁸⁾で計算した谷部のみを用いた。図2に縦断図を示す。計算点数61点、計算点間隔20m、川幅15m、移動可能土砂0.7mを均一厚さで設定した。

上流から三角形状のハイドログラフを供給して、侵食により土石流が発生・発達するシナリオを想定した。ピーク流量を100 m³/sとして、開始時0 m³/sからの増加と、ピーク後の減少に要する時間をそれぞれ100秒として、継続時間を200秒とした。その他の計算に用いたパラメータを表1に示す。

表1 計算パラメータ

パラメータ	数値
計算時間(s)	600
計算の時間間隔(s)	0.01
砂礫の密度(g/cm ³)	2.65
流体の密度(g/cm ³)	1.0
河床の容積濃度	0.65
砂の内部摩擦角(deg)	35
侵食速度係数	0.0007
堆積速度係数	0.05
マニングの粗度係数(s/m ^{1/3})	0.03

表2 計算ケース

Case	細粒土砂 d_f (mm)	流体密度 ρ (g/cm ³)
1	30	2.の計算手法で設定
2	3	
3	一粒径 (粒径 0.29 m)	一律設定 1.0
4		一律設定 1.2
5	一粒径 (粒径 0.27 m)	一律設定 1.0
6		一律設定 1.2

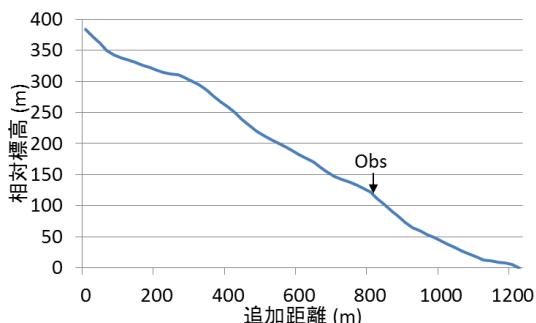


図2 白糸川の縦断図

粗粒土砂は既往検討で用いた0.55mを採用した。細粒土砂は表2に示す二種類のCase1、2として、河床堆積物中の粗粒と細粒の割合は1:1とした。液相化の影響による堆積物中の割合の時間・空間的な変化も考えられるが、本検討では変化しない。

比較のため液相密度 ρ を一律で設定するCase3–6を実施し、Case1、2の粗粒と細粒の平均粒径を用いる一粒径とした。液相化を考慮しないCase3、5の

$\rho=1.0\text{ g/cm}^3$ 、並びに液相化を考慮するCase4、6の $\rho=1.2\text{ g/cm}^3$ である。図2の800m地点のObsの総流量(水+土砂)、流砂量(固相のみ)の結果を図3に示す。Obsまでは侵食が、Obsより下流は堆積が卓越するため、この地点で考察した。

結果からCase3と比較して1や4、Case5と比較して6では総流量や流砂量のピーク値が大きくなるが、Case2は5よりも小さい。Case1は4よりピーク発生が早く、ピーク後の減衰も早く、240秒以降では流砂量は殆どない。Case2は6よりピーク発生が僅かに遅いが、ピーク後の減衰が緩やかで、200秒以降では総流量、流砂量ともCase6より大きい。Case4と1のピーク値は、流砂量は1.5倍だが総流量は1.1倍で差が小さくなる。Case6と2では流砂量2.3倍、総流量1.7倍で同様の傾向を示す。Case1ではピーク発生前にObs上流側で ρ が最大1.6 g/cm³、平均1.1 g/cm³で、Case2では最大1.3 g/cm³、平均1.2 g/cm³であり、液相化した土砂が多いことを示す。

今後も土石流事例や実験との比較検証、細粒の粒径の設定方法や二次元領域も検討するが、最近は ρ が大きいほど液相化が減少する検討も示されるため⁹⁾、異なる推定式の導入や提案も合わせて検討する。

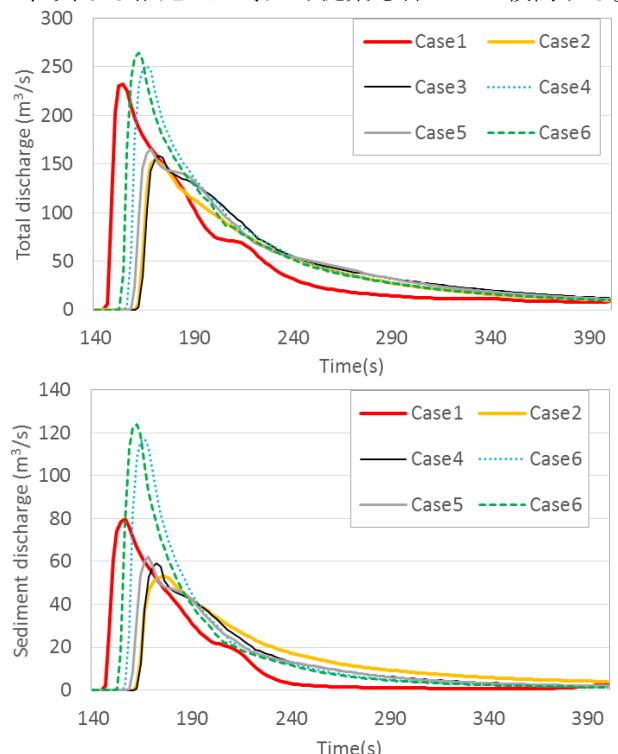


図3 Obsでの総流量(水+土砂)と流砂量(固相のみ)

参考文献 1)里深ら：砂防学会誌, 71(4), 2018, 2)西口ら：砂防学会誌 64(3), 2011, 3)中谷ら：砂防学会誌 70(6), 2018, 4)古谷ら：平成28年度砂防学会概要原稿集B, 2016, 5)Takahashi T.: Balkema, 1991, 6) 中谷ら:砂防学会誌 61(2), 2008, 7)鈴木ら：砂防学会誌 66(2), 2013, 8) 中谷ら：歴史都市防災論文集, 9) 長谷川ら：第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 2018