

## 火山地域の大規模土砂移動による被害範囲の推定手法の検討

京都大学大学院農学研究科 ○古谷智彦 中谷加奈 小杉賢一朗  
 京都大学防災研究所 長谷川祐治  
 立命館大学理工学部 里深好文  
 政策大学院大学 水山高久

### 1. 研究背景

火山地域で発生する土砂災害では、土砂の中に火山堆積物等の比較的粒径の細かい土砂（以降、細粒土砂と呼ぶ）が多く含まれる。多くの細粒土砂が土石流の構成材料に含まれることで流れに及ぼす影響は十分に解明されておらず、従来検討されてきた石礫型土石流とは異なる挙動で流動する可能性がある。このため、石礫型土石流を対象として提案された数値計算モデルを用いて火山地域で発生する土石流の挙動を解析した場合、流動・堆積過程を適切に表現して妥当な影響範囲を検討できるのか、確認する必要がある。

既往研究から、土石流は移動床上の平衡濃度が降伏応力とせん断応力のつり合いから求まる (Takahashi<sup>1)</sup>) が、細粒土砂が多く含まれる土石流では、平衡濃度が計算値より大きいことが示されてきた。このような場合に、平衡濃度式に与える間隙流体密度を  $1.0\text{g/cm}^3$  より大きくして、細粒土砂が間隙流体に取り込まれた影響を評価する方法が提案されている (長谷川ら<sup>2)</sup>, 鳴ら<sup>3)</sup>)。しかし、これらは定性的な検討で、定量的に間隙流体密度を推定する手法は提案されていない。

本研究では、細粒土砂が多く含まれる流れにおいて、間隙流体の密度がどのような値を取るのかを把握し、細粒土砂の含有率や水理条件から定量的な推定手法を提案することを目的として、水理実験を実施した。

### 2. 実験条件

実験に用いた水路は、図-1に示す、幅10cm、長さ5mの変勾配の矩形断面水路である。水路上流端には定水頭タンクが設置され、パイプのバルブを調節することで供給する水の流量を変化させた。水路の上流にホッパーを2つ設置し、細粒土砂、粗粒土砂をそれぞれのホッパーから定常的に供給した。供給する土砂量と水の量から土砂濃度（輸送濃度）を求めた。水路

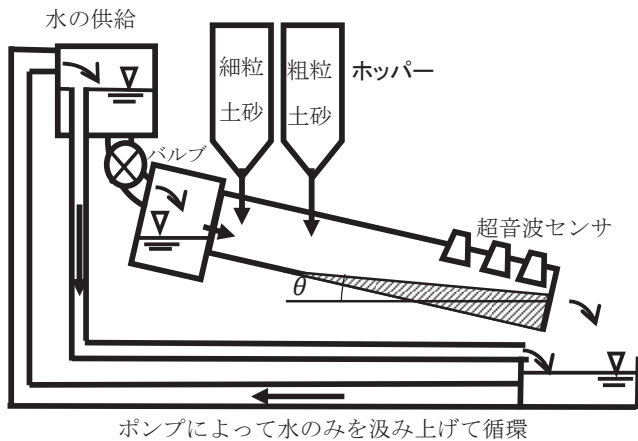


図-1 実験水路概略図

の末端部には、超音波センサを等間隔に3つ設置した。水路の下流端には土砂止めを設置して土砂を堆積させ、そのときの土砂の高さを超音波センサ（計測間隔0.02sec）で計測して、平衡状態と推定される堆砂勾配 ( $\theta$ ) を算出した。

実験結果から得られた土砂濃度と河床勾配の関係および、高橋の平衡濃度式<sup>1)</sup>を用いて、それぞれのケースにおける間隙流体の密度を算出した。

本実験で用いる土砂は、細粒土砂として「5~7号硅砂のいずれか」を、粗粒土砂として「2号硅砂」を設定し、それぞれのホッパーから供給した。それぞれの平均粒径は、2号硅砂が2.81mm、5号硅砂が0.51mm、6号硅砂が0.29mm、7号硅砂が0.13mmであり、以降の結果の考察では、各硅砂の平均粒径を代表値として用いる。また、硅砂の内部摩擦角( $\phi$ )は37度、砂粒子の密度( $\sigma$ )は $2.6\text{g/cm}^3$ だった。

実験状況を水路側面から1台のカメラで撮影した。水路下端付近ではハイスピードカメラで撮影し、実験中の流動深を読みとった。

### 3. 実験結果・考察

土石流、掃流状集合流動（土砂流）の平衡濃度式は(1)、(2)から求めた<sup>1)</sup>。

$$1.8^\circ \leq \theta < \theta_x$$

$$C = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \right\}^2 \cdots (1)$$

$$\theta_x \leq \theta$$

$$C = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \cdots (2)$$

C: 平衡土砂濃度  $\phi$ : 土砂の内部摩擦角  $\theta$ : 勾配

$\sigma$ : 砂粒子密度( $\text{g/cm}^3$ )  $\rho$ : 間隙流体の密度( $\text{g/cm}^3$ )

$\theta_x$ : 式(1)と式(2)の値が等しくなる勾配

高橋の平衡濃度式は、土石流と土砂流の境界を  $\tan \theta = 0.138$  で固定せずに、間隙流体密度を変えた場合にも二つの式の値が等しくなる勾配を境界とした。

流れに細粒土砂が含まれるケースでは、供給した土砂濃度が  $\rho = 1.0$  のときの平衡濃度より大きくなる傾向が示される。この変化が、間隙流体の密度増加に伴う土砂輸送能力の上昇によるものと仮定し、以下の手法で各ケースの間隙流体密度を評価した。

全土砂濃度（輸送濃度）を以下のように定義する。

$$C_t = C_d + C_f \cdots (3)$$

$C_t$ : 輸送濃度,  $C_d$ : 粗粒土砂の濃度

$C_f$ : 細粒土砂の濃度

また、細粒土砂を間隙流体に取り込まれなかった成分と（固相として挙動）、取り込まれた成分（液相として挙動）に分ける。

$$C_f = C_f' + C_f'' \dots (4)$$

$$c = C_d + C_f' \dots (5)$$

$$\rho_m = \frac{(1 - C_t) \rho_w + C_f'' \cdot \sigma}{(1 - C_t) + C_f''} \dots (6)$$

$C_f'$ : 取り込まれていない細粒土砂の割合

$C_f''$ : 取り込まれた細粒土砂の割合

$c$ : 固相として挙動する土砂の濃度

$\rho_m$ : 細粒土砂を取り込んだ間隙流体の密度(g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_w$ : 水の密度(g/cm<sup>3</sup>)

各ケースにおいて、 $C_f''$ を0から徐々に大きくすると、平衡濃度  $C$ は $\rho=1.0$ のときより増加し、式(5)の土砂濃度  $c$ は減少する。この2つの式から得られる土砂濃度の値が等しくなるときの $\rho_m$ をそのケースにおける間隙流体の密度とした。各ケースの勾配と土砂濃度  $c$ の関係を図-2に示す。図中に、平衡濃度式中の $\rho$ の値を1.0~1.3まで変化させたときの、勾配と平衡濃度の関係も示す。

図-2では、細粒土砂が5号硅砂のように比較的粒径が大きいと、土砂濃度の変化が $\rho=1.0$ の平衡濃度式に似た傾向を示す。一方で、6号硅砂を含む流れは概ね $\rho=1.1$ 、7号硅砂では $\rho=1.2$ の平衡濃度式に近い。従って、細粒土砂の粒径が小さいほど間隙流体に取り込まれる土砂の量が増えると考えられる。また、間隙流体に細粒土砂の全てが取り込まれるのではなく、何らかの要因で取り込まれやすさが変化すると推測される。

そこで、長谷川ら<sup>2)</sup>の研究を参考に、細粒土砂の沈降速度と流れの摩擦速度の比( $u_* / w_0$ )を導入し、間隙流体への土粒子の取り込まれやすさを評価する。 $u_* / w_0$ を横軸にとり、細粒土砂が間隙流体に取り込まれた割合を整理した(図-3)。結果より、長谷川らと同様に、両者には比例関係が確認できた。一方で、 $u_* / w_0$ に対する $C_f'' / C_f'$ の増加率が、既往研究と比較して非常に大きい点は異なり、割合が100%を超えるケース(粗粒土砂の一部も間隙流体に取り込まれたと推測される)もあった。従って、 $u_* / w_0$ から細粒土砂が取り込まれる傾向はある程度把握できるが、他の条件下でも同様に細粒土砂の挙動を評価できるのか、という疑問が残る。

そこで、細粒土砂と流れの挙動に関するパラメータとして、河床に存在する土粒子の流れやすさの指標として用いられる無次元掃流力 $\tau_*$ を新たに導入する。

$$\tau_* = \frac{\rho_w h \sin \theta}{(\sigma - \rho_w) d} \dots (7)$$

$\tau_*$ : 無次元掃流力  $h$ : 流動深(cm)

$\theta$ : 河床勾配  $d$ : 細粒土砂の粒径(cm)

$\rho_m$ を直接的に評価するため、 $\tau_*$ に細粒土砂の割合 $C_f$ を乗じた値を横軸にとると、 $\rho_m$ がよく表現された(図-4)。ただし、 $\rho_m$ の増加に寄与できる土砂量は物理的に上限があるため、ある程度 $\rho_m$ が大きい領域では、線形近似式に比べて傾きが小さくなると推測される。

#### 4. おわりに

本手法で実際の土石流の $\rho_m$ を評価する場合、細粒土砂と粗粒土砂の境界や $\rho_m$ の上限値の設定方法には課

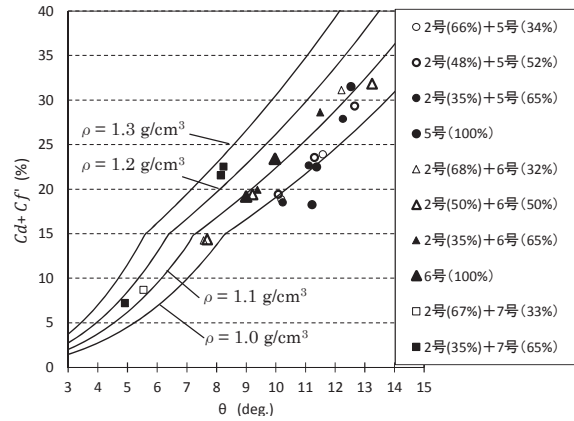


図-2 勾配と土砂濃度( $C_d + C_f'$ )の関係

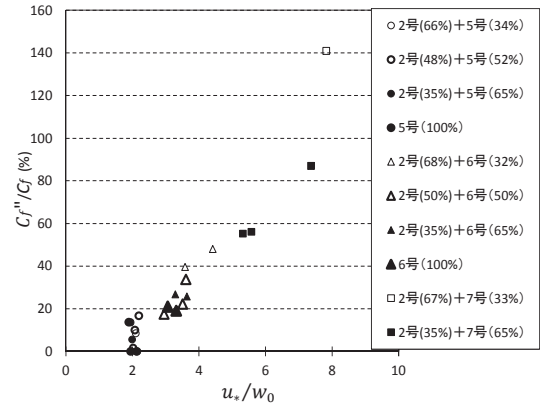


図-3 細粒土砂が間隙流体に取り込まれる割合

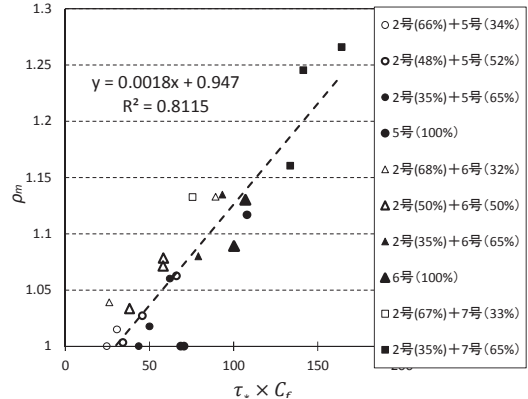


図-4  $\rho_m$ と $\tau_* \times C_f$ の関係

題が残るため、今後さらなる研究によって、これらの検討の妥当性を検証する必要があると考えられる。

#### 謝辞

本研究は、平成27年度河川砂防技術研究開発、及びJSPS 科研費15K16312の助成を受けたものです。また、本研究は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの実験施設を利用しました。ここに記して感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Takahashi T.(1991) : Debris flow, Balkema, 1-165
- 2) 長谷川ら(2013) : 細粒土砂が土石流の平衡濃度に及ぼす影響に関する実験, 砂防学会研究発表会概要集, B, 118-119
- 3) 嶋ら(2013) : 細粒土砂を含む土石流平衡濃度の算出方法, 砂防学会研究発表会概要集, A, 118-119