

## 微細土砂の液相化を考慮した数値計算は崩壊起因土石流の再現に有効か？

東京大学大学院 戸部潤一郎 ○堀田紀文  
 京都大学大学院 酒井佑一  
 (株)建設技術研究所 西口幸希  
 筑波大学生命環境系 内田太郎

### 1. はじめに

土石流被害の軽減に繋がるハザードマップの作成には数値計算が有効である。均一粒径モデルを用いた数値計算が効果をあげているが、現実の土石流の粒度分布は幅広く、例えば崩壊に起因する大規模な土石流では流下・堆積の再現性の低下が指摘されている(西口ら,2011)。微細土砂の液相化(：間隙流体の乱れと一体化)がその要因の1つであり、モデル化が進んでいる(西口ら,2017; Sakai *et al.*, 2019)。

本研究では、崩壊土塊が土石流化したとされる複数の災害事例を対象に、液相化モデルを組み込んだ再現計算を行い、モデルの適用性に関し、その効果や適用条件を明らかにする。

表-1 数値計算の対象とした土石流事例  
 \*印は2次元計算も行った事例

土石流発生事例	発生年	流出土砂量(m <sup>3</sup> )	流下距離(km)	平均勾配(°)
(a)熊本県集川*	2003年	30,500	1.6	9.5
(b)徳島県大用知	2004年	622,000	1.0	10.2
(c)宮崎県片井野川*	2005年	272,000	3.6	3.8
(d)宮崎県七瀬谷*	2005年	183,000	0.9	5.0
(e)鹿児島県松石川	2007年	19,000	0.6	8.6
(f)鹿児島県深港川*	2015年	91,000	1.1	6.8

### 2. 対象地・方法

数値計算は、崩壊が発生起因であり、発災後に現地で詳細なデータが取得された6つの災害事例(表-1)を対象とした。堆積深や流下幅などの現地データについて1次元の数値計算で比較検証を行い、液相化モデルによる再現性を検討した。発災前後の地形データが存在する4事例では2次元の再現計算も実施した。数値計算では、浅水流方程式に土石流の構成則(宮本・伊藤,2002)を導入し、浸食速度式(高橋・匡,1986; 江頭ら,1988)による感度分析も行った。差分法にはリーブ・フログ・スキームを用いた。

液相化は、大小二粒径の土石流実験から導出された式(1)における $\alpha$ として評価した(Sakai *et al.*, 2019)。

$$\alpha = 0.0167v_t/w_s - 0.0475 \quad (1)$$

ただし、 $v_t$ は乱れ速度、 $w_s$ は沈降速度を表す。式(1)は二粒径の土石流の水路実験結果に基づき定式化されている。 $\alpha$ は小粒径のうち液相化する土砂の割合を示し(0で液相化無し、1で全て液相化)、土石流の流下に伴い変化する(：液相化変動モデル)。本研究では、土石流の連続した粒度分布に対して便宜的に境界粒径 $D_c$ を定めて粒度分布を大小に二区分することで、式(1)を適用した現地再現計算を可能にした。

現状では $D_c$ を決める合理的な方法が無いため、まず1次元計算においては、幅広い $D_c$ に対して、最終堆積形状における計算値と実測値の残差の二乗平均平方根(RMS: Root Mean Square)を比較した。また、比較のために、各 $D_c$ について、小粒径に区分された土砂の全てが常に液相化する条件でも計算を実施した(：液相化最大固定モデル)。

2次元計算では、逆解析の結果として得られた条件を中心に、発災前後の地形データの差分から得られる土石流の浸食・堆積状況と流下範囲内における計算結果と比較した。

### 3. 結果

1次元計算では、液相化を考慮することで全ての事例において再現性が向上した。図-1に結果の例を示す。 $D_c$ が最小値に設定されている各図の左端が、従来の一粒径モデル(液相化の考慮されていない均一粒径モデル)に相当するが、残差のRMSは大きい。また、液相化モデルに関して、図-1Aのように液

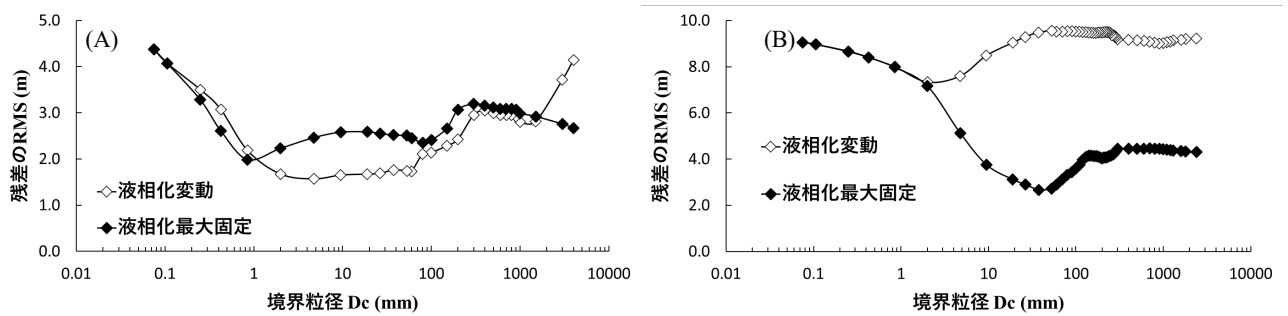


図-1 1次元計算による逆解析の結果の例 (A: 事例 f, B: 事例 c)  
事例 f では液相化変動モデルでの再現性が高く, 事例 c では液相化最大固定モデルの再現性が高い。

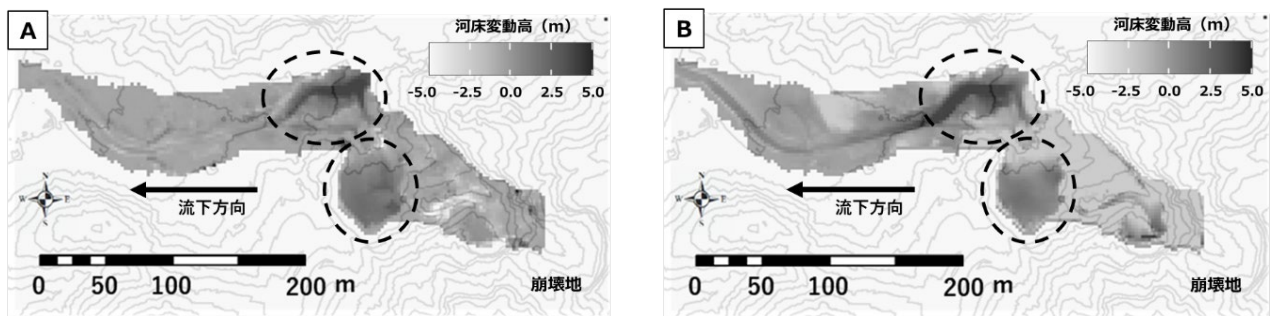


図-2 2次元計算の結果の例 (A: 現地データ, B: 数値計算) : 事例 f (変動液相化モデル,  $D_c=4.75\text{mm}$ )  
他条件と比較して, 最終堆積形状のうち点線で囲まれた部分の再現性が高かった。

相化変動モデルでの再現性が高い場合 (事例 a, f) と, 図-1B のように液相化固定モデルの再現性が高い場合 (事例 b, c, e) が存在した。事例 d では, 変動液相化モデルでも流下中の  $\alpha$  が常に 1 に近い値を取ったため, 両者の再現性に差異が見られなかった。

2次元計算では, 1次元計算での再現性が高かった計算条件 (液相化変動または最大固定下での  $D_c$  の値) で, 実測値をよく再現した (図-2)。また, 1次元計算で再現性の低い条件下では, 土石流による浸食・堆積域の空間分布が実態と大きく乖離することが明確となり, 液相化の適切な評価で土石流の数値計算の再現性が向上するという 1次元計算の結果を補強する結果が得られた。特に, 液相化の評価 (液相化変動または最大固定) での再現性の良・不良が明確になった。1次元計算で残差の RMS に差異がなかった事例 d においては, 堆積域の分布に違いが見られ, 液相化最大固定時の再現性が高かった。

#### 4. 考察とまとめ

液相化変動モデルでは, 微細土砂が土石流間隙の乱流に取り込まれる形でモデル化されている (式 1)。それに対して, 図-1 に合わせて示した液相化最大固定モデルでは, 土石流の流況や流動特性の変化が液相化に影響せず, 間隙流体密度の上昇を考慮した土塊の滑動モデルに近いと考えられる。両者は異なる現象を想定しており, 事例 a, f と事例 b, c, e (, d) との間で見られた再現計算結果の差異は, それぞれ, 崩壊土塊が土石流化して「流動」した事例 (: 液相化変動モデルの適用により再現性が向上) と, 崩壊土塊が「滑動」した事例 (: 間隙流体密度が一定値上昇) と位置付けられる可能性がある。崩壊土塊が滑動を経て土石流化するような状況も想定できるが, 本研究で対象とした 6 事例においては, 両者に対応するモデルでの再現性の向上は排他的で, 崩壊が流動化したケースと滑動に近い状況で堆積したケースに分かれていた。今後, 現地での土砂の流下・堆積状況と合わせてさらに詳細な検討が必要になるが, 崩壊起因の土石流において微細土砂の液相化の影響を考慮する際には, 流下形態/プロセスに対応して適切な数値計算を実施することが重要であると言えよう。

参考文献: 江頭ら(1988), 第 32 回水理講演会論文集, 485-490; 宮本・伊藤(2002), 砂防学会誌 55, 24-35; 西口ら(2011), 砂防学会誌 64, 11-20; 西口ら(2017), 平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集, 482-483; Sakai *et al.* (2019), Journal of Hydraulic Engineering 45, 06019004; 高橋・匡(1986), 京都大学防災研究所年報 29, B-2, 343-359