

土石流の堆積特性への底面摩擦の影響に関する数値解析的検討

広島大学 学生会員 ○上園 浩志
広島大学 正会員 橋本 涼太

1. 研究背景と目的

近年、主要道路上への土石流の流入により、交通網に大きな影響が生じる事例¹⁾が確認されており、土石流の堆積範囲の予測や予防策構築の重要性が高まっている。道路上における土砂の流動対策の一例として、渓流出口からつながる道路上の路面摩擦を、グルーピングや段差舗装等により意図的に高く設定し、土石流の堆積範囲を抑制する手法が考えられる。

土石流の堆積過程における路面摩擦変更の効果を詳細に把握するためには数値解析手法による検討が有効だが、堆積時に受ける底面摩擦の影響は、土砂と水で異なると考えられ、平均化した一相系の材料ではなく、固相と液相の二相を分離して扱い、かつ相互作用を考慮できる手法が望ましい。そこで、土砂と水をそれぞれ計算可能な土石流の堆積過程解析手法として MPM-VOF 法を提案し、路面摩擦の違いによる土石流の堆積特性の変化について検討した。

2. MPM-VOF 法の概要

本研究では、土の運動や変形は、粒子を用いた固体の大変形解析手法の1つである Material Point Method (MPM)²⁾で、土砂の内外の水の自由表面流れは Volume Of Fluid (VOF) 法³⁾で解析する。ここで、MPM は土一流体二相混合体として定式化、VOF 法では、土内外の水流を統一的に扱う Darcy-Brinkman 型の非圧縮粘性流体の支配方程式⁴⁾を用いた。

MPM は、粒子と格子を併用した連続体の大変形解析手法で、連続体を密度、体積、ひずみ、応力といった物理量をもつ Lagrange 粒子に分割し、粒子の質量や運動量、剛性をモデル全体を覆う有限要素メッシュに投影し運動を解く。粒子は時間ステップが進むと移動するが、格子の配置はリセットされ、要素の歪みによる計算の破綻を回避できる。本研究では陰解法である Newmark の β 法に基づく MPM を用いた。

VOF 法では各セルで液相の体積充填率を表す VOF 関数を定義し、格子上で運動方程式を解いて得られ

る流速場を用いて VOF 関数値を移流させることで、自由表面の位置の変化を表す。移流項に RCIP 法、粘性項には中心差分、VOF 関数の移流時の界面再構築には WLIC 法を使用した。

MPM と VOF 法の間では、流速や圧力、間隙率の情報を格子を介して交換し、交互に計算する弱連成方式で両手法を連成した。

3. 底面摩擦の影響に関する土砂流動解析

土石流の堆積過程における底面摩擦や透水性の影響を検証するため、図1に示すモデルで土砂の流動解析を行った。勾配 18° の水路区間を 3.0 m、その下流に勾配 13° (区間 I)、勾配 9° (区間 II)、0° と段階的に勾配を緩める氾濫台を設けた。水路最上流に設置した飽和土砂を自重で崩壊・流下させた。土砂と水路や氾濫台間ではペナルティ法で摩擦接触を考慮し、区間 I、区間 II それぞれの摩擦角を変えた複数

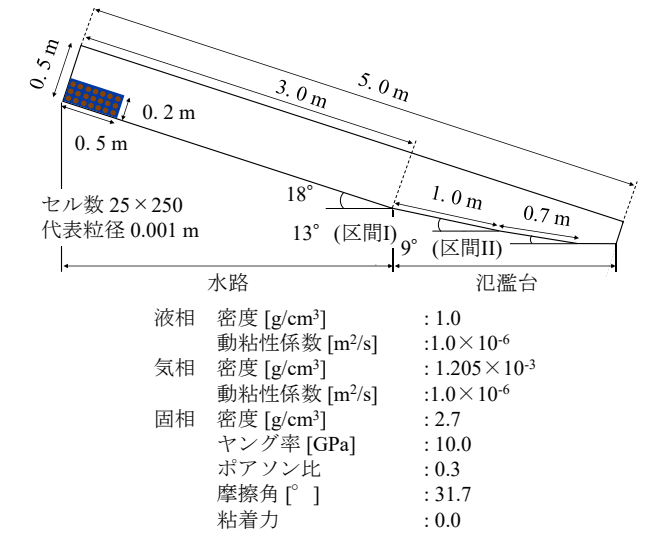


図1 水路モデル

表1 表面摩擦条件 [°]

Case	水路床	氾濫台	
		区間 I	区間 II
(a)	40	20	20
(b)	40	30	30
(c)	40	20	30

キーワード 土石流, 堆積, 路面摩擦, MPM-VOF 法
連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4 番地 1 広島大学工学部 A2-521

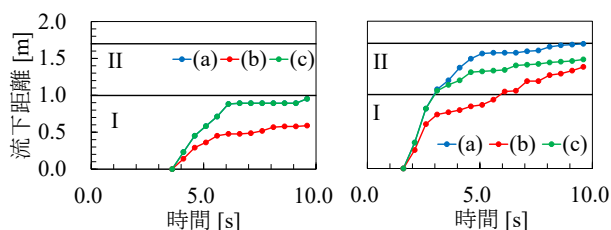


図2 氾濫台上における流下距離の時間履歴

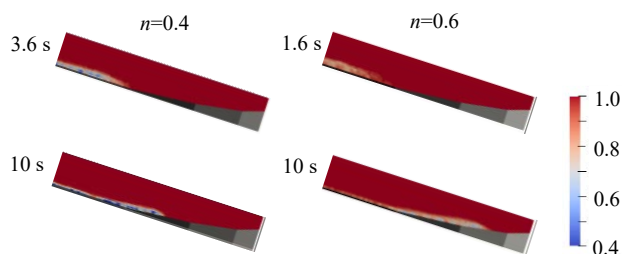


図3 氾濫台上の間隙率変化（表面摩擦(b)）

ケースを設定した。また、土砂の初期間隙率は0.4と0.6の2ケース用意し、間隙率の違いによる土砂の流動特性や路面摩擦の影響度合いの変化を検討する。なお、以降間隙率と底面摩擦の組み合わせで、計算条件をCase0.4-(a)というように記述する。

図2に初期間隙率ごとの、土砂の流下距離の時刻履歴を示す。間隙率0.4では、土砂はいずれのケースでも区間Iに堆積した。そのため、区間IIで条件の異なるCase0.4-(a)と、0.4-(c)は結果的に同条件となり一致した。Case0.4-(b)では、他の2ケースより摩擦角が大きいため、I区間到達後の土砂の移動速度は小さく、かつ最終的な移動距離も短くなった。間隙率0.6の場合、土砂の流動性が高いため全体的に間隙率0.4より流下距離が長くなった。区間Iの摩擦角が小さく区間IIの摩擦角が異なるCase0.6(a)と(c)に着目すると、いずれも区間II到達後すぐに減速し始めた。摩擦の大きい(c)の方が流下距離は短い、それよりも勾配が緩くなることの影響が大きかったと推察される。

図3に、流速変化が特に顕著に表れたCase0.4-(b)、Case0.6-(b)の氾濫台流入直前と解析終了時の間隙率変化を示す。初期間隙率0.4で底面の摩擦が大きいCase0.4-(b)では、I区間到達後に流速が低下し、先端の間隙率が小さくなっている。したがって、粒子の密度が高まり、せん断抵抗が発揮されるようになることで、流動した状態から堆積過程に遷移したと考えられる。初期間隙率0.6の場合でも同じ傾向が見られたことから、同様のメカニズムで堆積に遷移したと

推測される。ただし、最終的な流下距離は間隙率を0.4とした場合と比べて長くなった。この原因として、水路出口での流速が速かったことも考えられるが、Case0.6-(a)や(c)で区間Iでの減速がほとんど見られなかったことも鑑みると、間隙率が大きい場合、土砂と底面との設置面積が小さく、摩擦角を大きくしたことによるせん断抵抗の効果が低くなったことも考えられる。この場合、底面の勾配の方が堆積挙動に強く影響する可能性がある。

以上より、土砂の間隙率を考慮した固体と流体の相互作用解析を用いることで、底面摩擦による土石流流下距離への影響とそのメカニズムが定性的に示された。

4. 結論

道路上における土石流の堆積特性に対する路面摩擦の影響について検討することを目的として、MPM-VOF法を用いて土石流の流下堆積過程を模した土砂流動解析を行った。

氾濫台上の底面摩擦の異なる条件下における解析結果から、底面の摩擦が増加することで、土砂の移動速度が低下し、間隙が小さくなることで堆積しやすくなり、流下距離が短くなることが明らかとなった。今後は、間隙率の変化速度と底面摩擦の関係や堆積が加速する閾値について、模型実験との併用によって定量的に検討し、より詳細なメカニズムの解明を図ることで、道路上の土石流堆積を制御する技術を構築できると考えられる。

参考文献

- 1) 土田ら：平成30年7月豪雨での地域ごとの地盤災害の特徴（中国・広島その2）、地盤工学会誌，Vol. 67, No. 7, 2019.
- 2) Sulsky *et al.*: A particle method for history-dependent materials, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, No. 118, pp. 176-196, 1994.
- 3) Hirt *et al.*: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, No. 3, pp. 201-225, 1981.
- 4) Bars *et al.*: Interfacial conditions between a pure fluid and porous medium implications for binary alloy solidification, Journal of Fluid Mechanics, No. 550, pp. 149-173, 2006.