

MPS-DF 法における摩擦力方向モデルの改良による高濃度土石流の流動性評価

(国研)森林研究・整備機構森林総合研究所: ○鈴木 拓郎, 経隆 悠

1. 背景及び目的

崩壊土砂が流動化して長距離を流動する場合があります、そのような現象のモデル化が必要である。Iverson et al. (2010)は、大型水路を用いて飽和土砂の流動化現象（以下、高濃度土石流とする）を対象とした多くの実験を実施した。その結果、特に透水性の低い材料において過剰間隙水圧が生じ、高濃度土石流の流動性を増大させるとし、その機構に基づいた計算モデルD-Clawを提案している。一方で、Taylor-Noonan et al. (2022) は、室内実験により、透水性の高い材料では過剰間隙水圧が発生しなくても、高い流動性を示すことが報告されている。

高濃度土石流において過剰間隙水圧がなくとも高い流動性を示す機構を考えるうえで重要なのは、D-Clawなどの浅水流方程式の枠組みである。Depth-Averagedの枠組みでは、局所的な非定常性を考慮できない。特に着目したいのは、先端部におけるクーロン摩擦の方向である。Depth-Averagedの枠組みでは、河床から表面に向けて流速が速くなる分布を仮定しており、クーロン摩擦は流下方向と逆向きに作用させている。しかし、先端部においては流速の速い表層の土砂が下層の土砂を追い越したのちに河床に落下して巻き込まれる。このとき、局所的に速度勾配が反転する箇所が生じ、接触摩擦を介した運動量再配分プロセスにおいて、クーロン摩擦は必ずしも流下方向とは逆向きにならない(図-1)。そこで、本研究では、局所速度勾配の向きに応じてクーロン摩擦の方向を作用させる方法をMPS-DF (Suzuki and Hotta, 2016)に適用する。そして、Iverson et al. (2010)の透水性の高い材料を用いた実験を対象として再現計算を実施し、その適用性を検証する。

2. 検討対象と計算モデル

Iverson et al. (2010)による大型水路を用いた高濃度土石流実験を対象とする。勾配31度で約70mの長さの直線水路と緩勾配の流出・堆積部からなり、粒子法においては粒子径0.025m(図-2)。水路上流端に平均粒径約8mmの概ね水で飽和土砂を10m³設置して流下させる実験である。この実験は、透水性の高い材料(SG: Sand and Gravel)と透水性の低い材料(SGM: Sand, Gravel and Mud)で実施されているが、透水性の高い材料のみを対象とした。

MPS-DFは、江頭らの構成則をMPS法に適用したものであり、クーロン摩擦による降伏応力項と粒子の非弾性

衝突と間隙流体の乱れの項からなる動的応力に分けられる。浅水流方程式に基づいた計算方法では、一般的にクーロン摩擦力が流速と逆向きに作用させる。一方で、図-1の考え方によると、クーロン摩擦力は局所速度勾配と逆向きに作用すると考えられる。そこで本研究では、クーロン摩擦力を常に流速と逆向きに与える方法Aとクーロン摩擦力を速度勾配と逆向きに与える方法Bの両方で計算した。

摩擦力 = 垂直応力 × 摩擦角 (速度には依存しない)

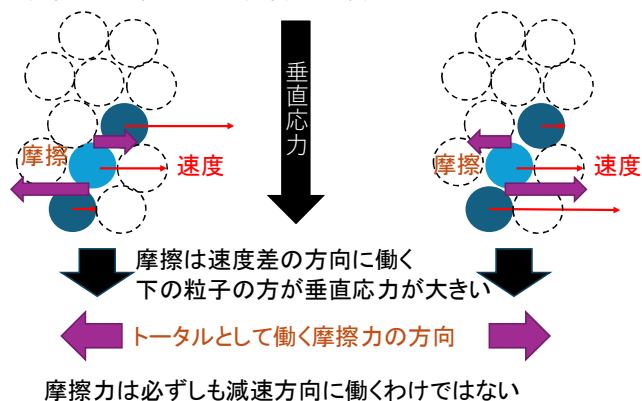


図-1 歪み速度方向とクーロン摩擦方向の概念図

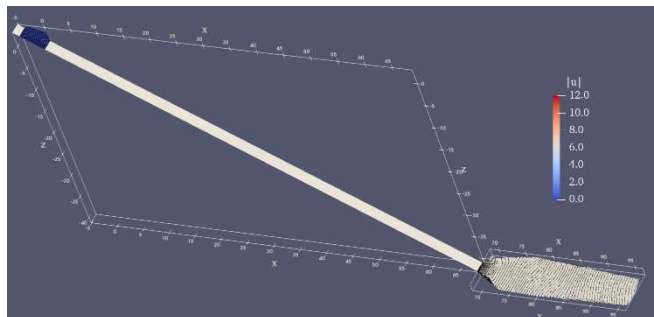


図-2 大型水路

3. 結果と考察

図-3に緩勾配の堆積部における最終堆積結果を等高線図により示している。MPS-DFの計算粒子の大きさが0.025mであることから、最も小さい等高線を0.02mを細線で示し、それ以上は視認性向上のため、0.1m毎の等高線を示している。実験では、2回の実験とも概ね12.5m地点まで先端部が達している。一方で、MPS-DFの計算結果はクーロン摩擦力を常に流下方向と逆向きに作用させる方法Aは直線水路出口における勾配変化点で急激に堆積してしまい、先端部は2m程度までしか達していない。一方、局所速度勾配と逆方向にクーロン摩擦応

力を作用させる方法Bは実験結果と同等に約12.5m付近まで先端部が達している。

このような大きな違いが生じたのは、先端部におけるクーロン摩擦力の方向の評価の違いが大きく影響していると考えられる。図-4には、3秒経過後の先端部付近（直線水路内の約24m地点付近）の流速分布を示している。河床付近の流速が大きくばらついており、局所的な速度勾配の反転が多く生じうることを示している。なお、後続流では河床から表面に向かって流速が速くなる分布を概ね示していた。

このような先端部のプロセスにおいて常に流速と逆向きにクーロン摩擦をあたえると、減速方向に過剰な応力が発生し、方法Aでは流下距離が大幅に短くなったと考えられる。一方、方法Bではそれを改善し、局所速度勾配と逆向きにクーロン摩擦力を作用させることで実験結果と同等の流動性を再現できたと考えられる。

4. 結論

本研究では、土石流先端部における局所速度勾配の反転時におけるクーロン摩擦力の作用方法を考慮したMPS-DFに基づいた計算方法を提案した。透水性の大きい材料を対象とした実験の再現計算を実施し、流動距離

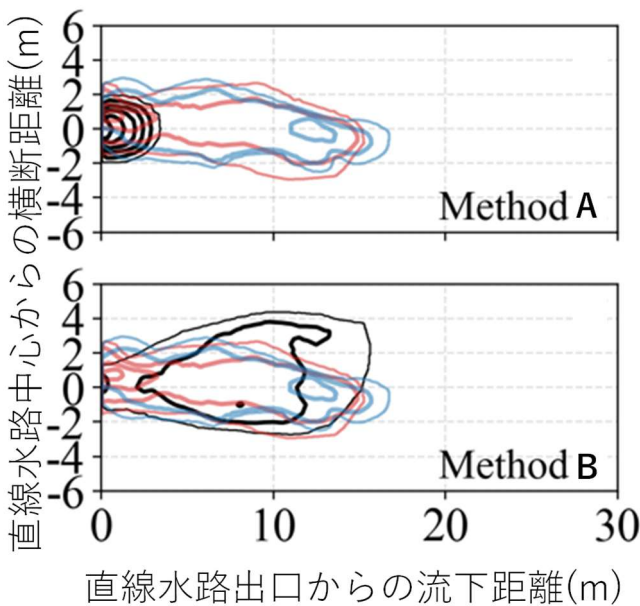


図-3 堆積部における最終堆積深の等高線図。細い等高線は0.02mのみ、太い等高線は0.1m毎に引いている。黒線は計算結果であり、赤・青線はIverson et al. (2010)による2回の実験結果である。

を良好に再現した。一方で、Iverson et al. (2010)による実験では、透水性の低い材料では流動距離が2倍程度になっており、そのような場合は過剰間隙水圧の影響を考慮する必要があると考えられる。

5. 謝辞

本研究は、本研究はJSPS 科研費 JP23K03511 の助成を受けたものです。ここに記して感謝申し上げます。

6. 引用文献

Egashira, S., Miyamoto, K., & Itoh, T. (1997). Constitutive equations of debris flow and their applicability. In C. L. Chen (Ed.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment (Proceedings of the First International Conference)* (pp. 340–349). ASCE.

Iverson, R. M., Logan, M., LaHusen, R. G., & Berti, M. (2010). The perfect debris flow? Aggregated results from 28 large-scale experiments. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115, F03005. <https://doi.org/10.1029/2009JF001514>

Suzuki, T., & Hotta, N. (2016). Development of modified particles method for simulation of debris flow using constitutive equations. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(4), 165–173. <https://doi.org/10.13101/ijece.9.165>

Taylor-Noonan, A. M., Bowman, E. T., McArdeell, B. W., Kaitna, R., McElwaine, J. N., & Take, W. A. (2022). Influence of pore fluid on grain-scale interactions and mobility of granular flows of differing volume. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127, e2022JF006622. <https://doi.org/10.1029/2022JF006622>

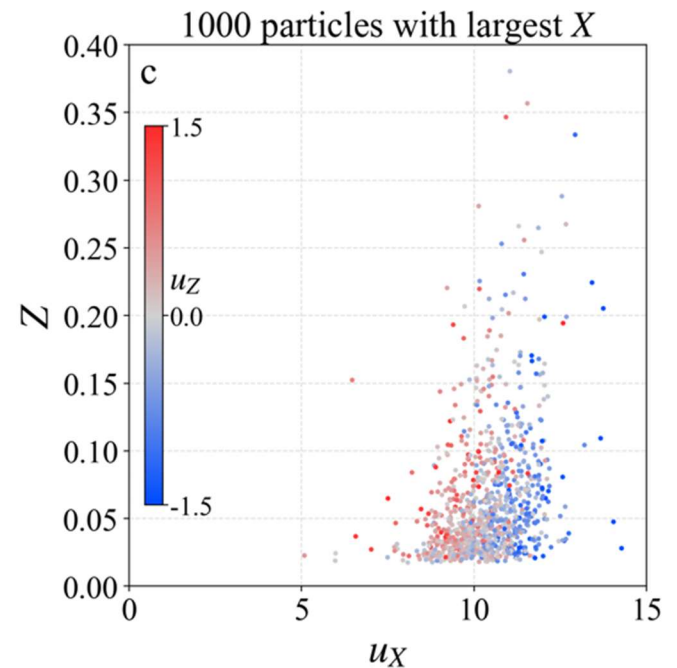


図-4 3秒経過時点での方法Bの先端部付近の流速分布。横軸に水路流下方向の流速、縦軸に流下方向と垂直な方向軸をとり、垂直方向の流速で色分けしている。