

MPM を浅水流方程式に応用した手法の土石流流動解析への適用例

鉄道総合技術研究所 正会員 ○阿部 慶太
 鉄道総合技術研究所 フェロー会員 舘山 勝
 東京大学 正会員 小長井一男

1. 概要

数多くの危険渓流を有しながら山間・山麓部にまで居住地が広がるわが国において、土石流による災害は、近年頻発する大地震、集中豪雨による災害の中でも対策急務な課題の一つである。一方で、膨大な数の危険渓流に対して、砂防堰堤などのハード対策を講ずることは、経済的にも時間的にも近年の社会的情勢を鑑みれば無理難題であることは明らかである。2000年に施行した「土砂災害防止法」は、これらの事情を鑑み、開発規制や事前避難といったソフト対策を重視したものである。しかしながら、これらのソフト対策を有効なものとするためには多くの私権に係る開発規制区域の高精度の線引きが必要になる¹⁾。本報は、高精度な土石流危険区域の指定に向け、筆者らが提案する土石流流動解析手法の適用例について示すものである。

2. MPMの浅水流方程式への応用

土石流流動を解析対象とする上で、①土石流が有する土質的特性、水流の特性両者の特性を明確に表現可能な解析モデル、②工学的ニーズと計算負荷の大きさを考慮した土石流が広がる数キロオーダーの大規模領域の扱いに対応可能な解析手法が求められる。①に関しては、近年発展著しい粒子法の一種の MPM²⁾を用いることで可能になる。この手法の大きな特徴は、粒子法の一様でありながら Mohr-Coulomb モデルのような土質的特性の表現に必要な弾塑性構成則を適用可能なレベルにまで達していることである。したがって、弾塑性構成則で土質的特性を明確に表現しつつ、粒子の挙動により水流の特性も表現可能になる。②に関しては、とくに水流の流動解析で用いられている浅水流方程式を適用することで可能になる。土石流といえども、深さ方向の平均値が平面二次元でどのように分布しているかが分かれば、流れ場の本質的なところは工学的ニーズの下で捉えられる。そして、浅水流方程式によれば、直接解析を行うのに比べ大きな計算負荷を必要とせず解析が可能となる。以上を踏まえ、筆者らは、MPM を浅水流方程式に応用した手法を提案している。この手法によれば、ヤング係数、内部摩擦角など土質的特性を支配するパラメータに基づく明確な弾塑性構成則を用いつつ、数キロオーダーの大規模領域におよぶ土石流流動を大きな計算負荷なく捉えることができるため、土石流のような複雑な応力ひずみ関係を有しつつ広範囲に流動する現象の解析に適していると考えられる。なお、詳細については文献 3) を参照されたい。

3. 土石流のモデル化

上述した解析手法によれば、すべり面上の土砂を図-1 に示すような柱要素の集合としてモデル化できる。

さらに、柱要素間の力を、土質的特性を表す弾塑性構成則により、柱要素底面の力を土石流の流動体としての挙動を表すモデルにより表現することで、土質的特性・水流の特性の両面を有したモデルとして表現できる。本検討では、弾塑性構成則として弾完全塑性の Drucker-Prager モデルを使用し、柱要素底面の力は既往の研究を参照し Voellmy モデル⁴⁾を採用した。解析に用いたパラメータを表-1 に、図-2 に土石流土砂の初期位置を本検討で用

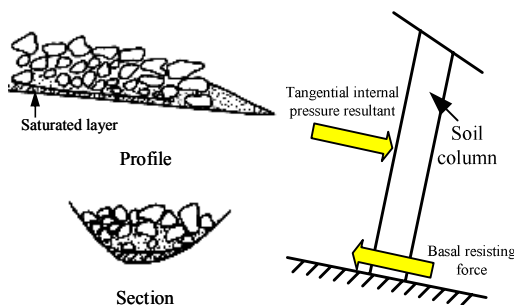


図-1 土砂の柱要素としてのモデル化

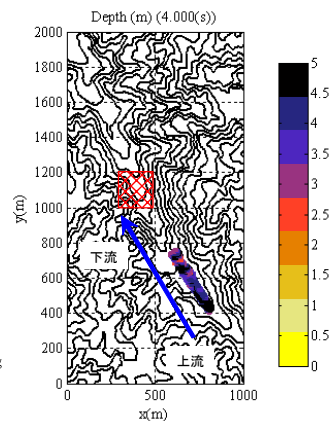


図-2 土砂の初期位置(4秒後)

キーワード 土石流, 流動解析, MPM, 浅水流方程式, Voellmy モデル

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (財) 鉄道総研 基礎・土構造 TEL 042-573-7261

いた標高データにより作成したコンターとともに平面図で示す。なお、土砂の初期形状は、深さ一律 5m の、387m×30m×5m の直方体とした。表-1 中の速度依存パラメータ ξ は、Voellmy モデルで用いられるダイラタント流体に基づき土石流の流体的な挙動を表現した加速度の単位を有するパラメータであり、既往の研究より 500~1000m/s² とすることで一連の土石流流動を表現できることが確認されている。以上の点と土石流の多様な形態に対しひと通り検討することを考え、本検討では 500, 700, 1000m/s² として解析を行った。

表-1 解析に用いたパラメータ

底面摩擦係数	0.10
内部摩擦角	30deg
粘着力	0kPa
土石流密度	1589kg/m ³
ヤング係数	2000kPa
ポアソン比	0.3
ダイレイタンシー角	0.0deg
速度依存パラメータ	500, 700, 1000m/s ²

4. 流動解析による検討結果

図-3に土石流流動の様子の解析結果の一例を示す。さらに、図-2中の赤枠で網掛けした箇所の土石流水深、流体力および流速の最大値の時刻歴を図-4に示す。土石流流体力は、土砂とすべり面との相互作用力であることを考慮し、図-1に示す柱要素底面に働く力（単位長さあたり）を示している。なお、本解析手法は陽解法の時刻歴計算であり、解析ステップによっては数値解析上の誤差が生じるのでその誤差により生じた異常値を除外して示している。本解析手法によれば、図-4に示すように弾塑性構成則、流体モデルに応じた流体力、流速を水深とともに定量的に表現できる。

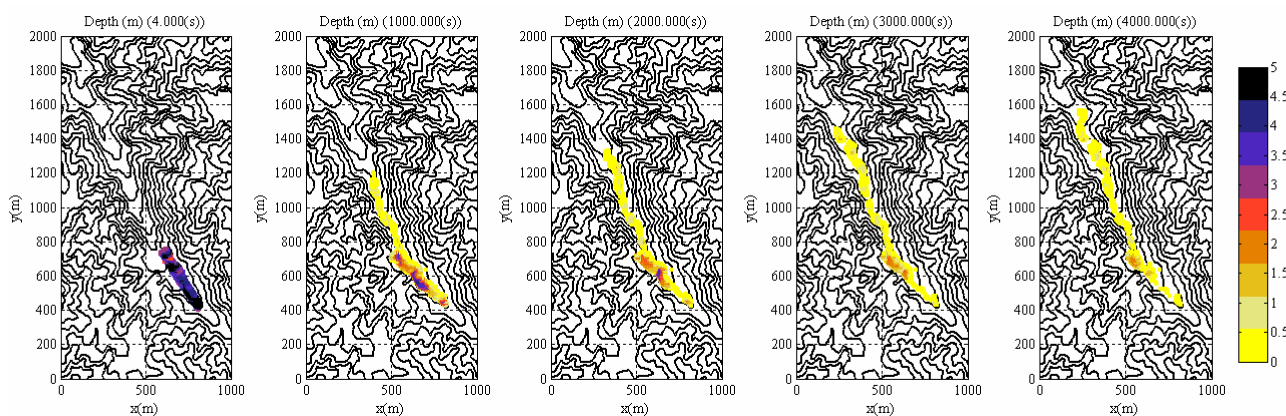
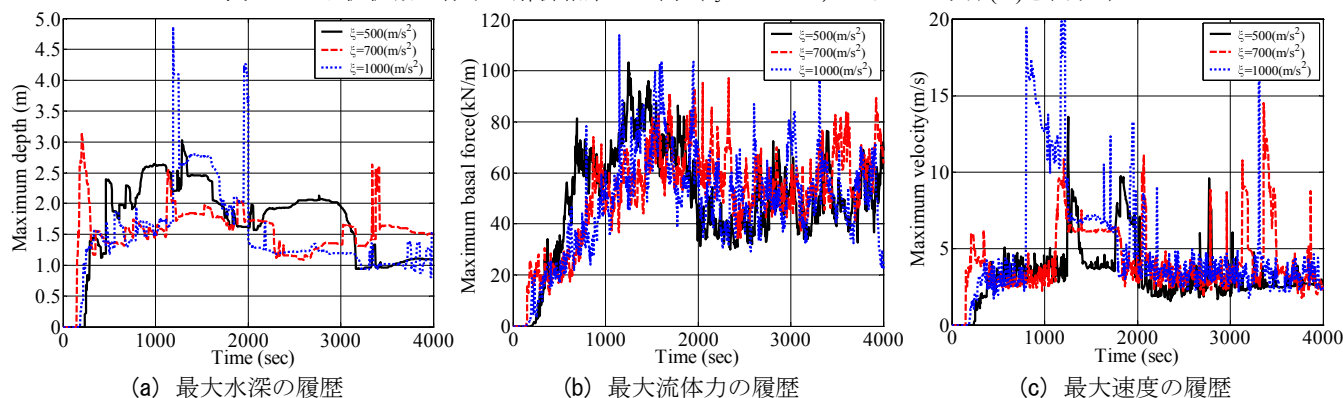
図-3 土石流流動の様子の解析結果の一例 ($\xi=700\text{m/s}^2$, カラーは水深(m)を表す。)

図-4 最大水深、最大流体力、最大速度の履歴

5. まとめ

本検討で用いた解析手法によれば、ヤング係数、内部摩擦角など土質パラメータを用いて大規模領域での流動解析を行うことができ、さらには、それらに応じた流体力、流速を定量的に算定できることが分かった。

参考文献

- 1) 高橋保: 土石流の機構と対策, 近未来社, 2004.
- 2) Sulsky, D., Zhou, S.J. and Schreyer, H. L. : Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, *Computer Physics Communications*, Vol. 87, pp. 236-252, 1995.
- 3) 阿部慶太, JOHANSSON Jörgen, 小長井一男: MPM を応用した高速長距離土砂流動の運動範囲予測のための数値解析手法, 土木学会論文集 C, Vol.63 No.1. pp.93-109, 2007.1.
- 4) Hung, O. : A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 610-623, 1995.