

摩擦斜面上にある乾燥砂の流動解析

東京大学大学院 学生会員 ○阿部 慶太

東京大学大学院 ヨハンソン ヨルゲン

東京大学大学院 正会員 小長井 一男

1. はじめに

表層崩壊、土石流のような斜面崩壊は、前兆現象が不明確で確認が困難であり滑りを止めることは容易でなく崩壊後は長距離を流下し被害を拡大する。よって、その被害低減に向け土砂の挙動解明および到達距離予測の対策が重要である。本研究では、土砂流動解析ツールの構築に向け、土砂流動等地盤の大変形にも対応できるMPM¹⁾に、摩擦斜面上の物体の挙動を解析するための解析的工夫を適用し、構成則としてDrucker-Pragarモデルを用いた乾燥砂の流動解析を行いその適用性を検討する。

2. MPMの概要

MPMでは陽解法の時刻暦計算を行う。物体は質量をもった微小な要素に分けられ、これらの要素は質量をもった粒子（Material point）の集合で表される。物体の情報（ラグランジュ変数）は個別の粒子により空間に固定された要素（オイラー要素）上を自由に移動する。粒子により運ばれたラグランジュ変数（位置、質量、ひずみなどの物質情報）は一定時間刻み毎に粒子の存在する要素に投影され、さらに内挿関数を通して要素の節点に集約される。そして、この節点に対し運動方程式を解き次ステップでの節点での速度増分を求める。この時点で、要素は粒子を載せながら変形しラグランジュ変数も更新される。変形した要素は次ステップに備え、移動した粒子を残して再び元の位置に戻される。図-1にMPMの解析フローを示す。

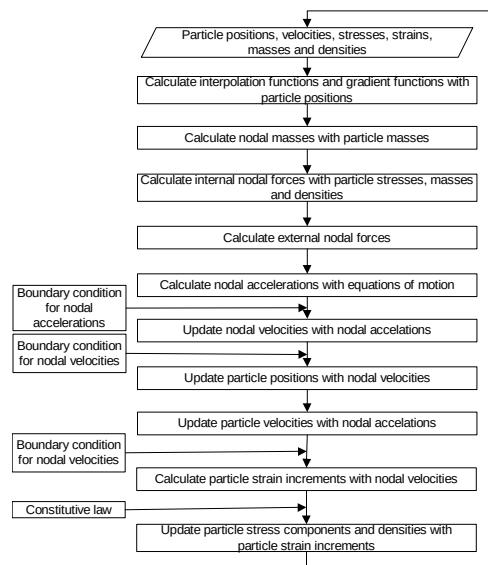


図-1 MPMの解析フロー

3. 摩擦斜面上の物体の挙動を解析するための解析的工夫

はじめに、節点での境界特性に対する解析的工夫を考える。接線方向に関しては、相対速度がある場合は動摩擦係数 μ をもつクーロン摩擦力が働き、相対速度がない場合は物体に作用している力と同じ大きさの力が摩擦力として生じるものとする。すなわち、次式により節点 i の加速度 $\mathbf{a}_i^k$ を更新する。

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{n}_i^b \times (\mathbf{a}_i^k \times \mathbf{n}_i^b) \right]_{\text{update}} &= \left[\mathbf{n}_i^b \times (\mathbf{a}_i^k \times \mathbf{n}_i^b) \right] \\ &\quad - \text{sign} \left\{ \mathbf{l}, \mathbf{n}_i^b \times (\mathbf{v}_i^k \times \mathbf{n}_i^b) \right\} \mu' \left| \mathbf{a}_i^k \cdot \mathbf{n}_i^b \right| \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mu' = \begin{cases} \mu & \text{at } \mathbf{v}_i^k \neq 0 \\ \left[\left| \mathbf{n}_i^b \times (\mathbf{a}_i^k \times \mathbf{n}_i^b) \right| \right] / \left(\mathbf{a}_i^k \cdot \mathbf{n}_i^b \right) & \text{at } \mathbf{v}_i^k = 0 \end{cases}$$

法線方向に関しては、反発力を表現するため境界面上にある節点 i の加速度 $\mathbf{a}_i^k$ および次ステップ $k+1$ での速度 $\mathbf{v}_i^{k+1}$ の法線成分を0にする。次に、斜面を幾何学的に表すためのオイラー矩形要素の形状を考える。全体座標系において、斜面内で用いられる

表-1 流動実験のパラメータ

斜面の傾斜角	31.4 (deg)
底面摩擦角	29 ± 1.4 (deg)
内部摩擦角	40 ± 1.0 (deg)
密度	1600 (kg/m ³)

表-2 流動解析のパラメータ

斜面の傾斜角	30 (deg)
底面摩擦角	28 (deg)
ヤング係数	2.0 × 10 ⁶ (Pa)
ポアソン比	0.30
密度	1600 kg/m ³
内部摩擦角	40 (deg)
ダイレイタンシー角	0 (deg)
粘着力	10 (Pa)
塑性勾配	0.0 (Pa)
複合硬化パラメータ	0.8

キーワード 流動解析, MPM, 境界特性

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4丁目6番1号 東京大学生産技術研究所 TEL 03-5452-6098(内線 57250)

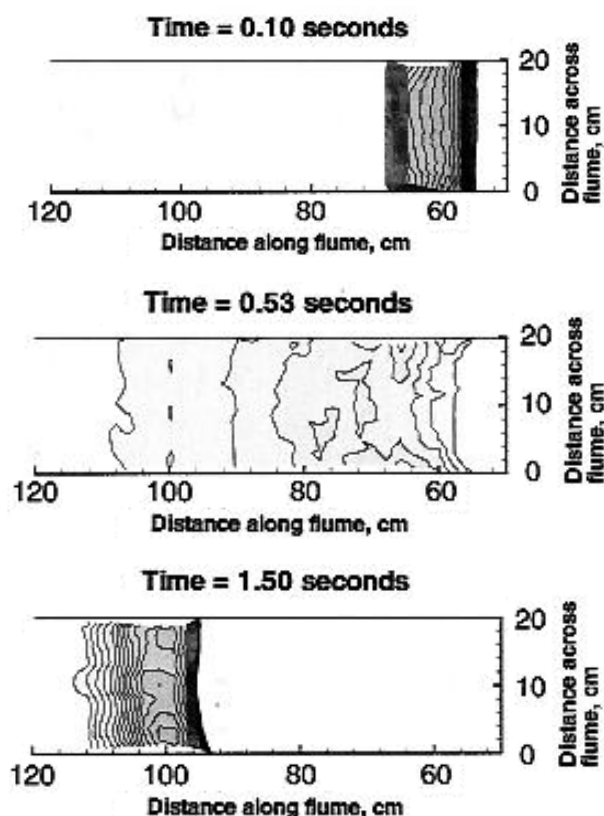


図-2 実験結果
(コンターの間隔は1mm)

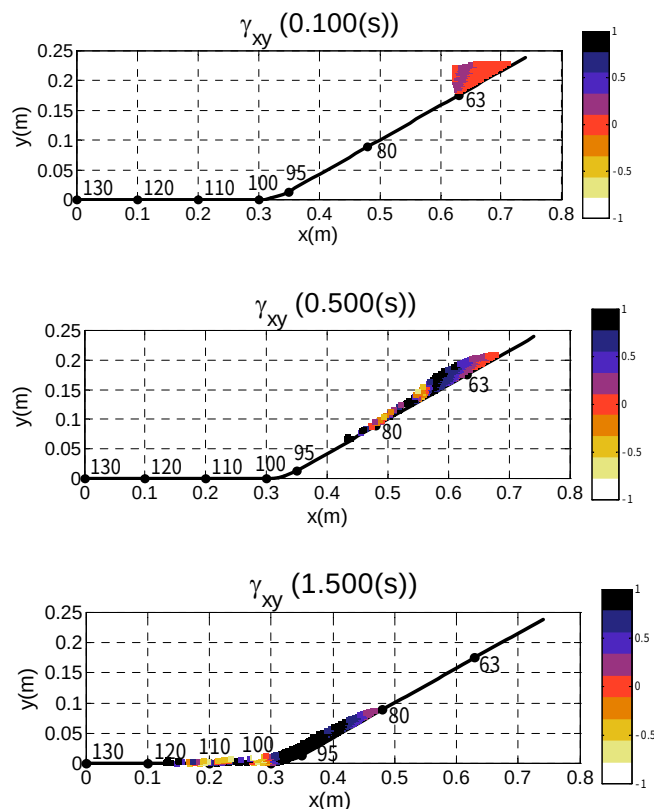


図-3 解析結果
(カラーはせん断ひずみ分布, 斜面に沿った数字は実験結果の横軸の長さ(cm)を表す.)

傾きをもったオイラー矩形要素に対し写像関数を用いることで、正規化座標系で正方形に表すことができる。この座標系で内挿関数等を求めることで斜面上での物体の挙動を解析することができる。

4. 乾燥砂の流動解析

解析する対象としてDenlingerら²⁾により行われた乾燥砂の流動実験を扱う。斜面上部の門を引き上げて乾燥砂塊を一定の摩擦係数をもつ斜面へ流下させる。表-1に実験パラメータ、表-2に解析に用いたパラメータを示す。粒子数は334、要素のサイズは0.1m×0.1m、アルゴリズムとしてエネルギー保存に対して良い精度をもつUSAVG³⁾を用いた。解析結果および実験結果を図-2、3に示す。挙動の全体的な傾向および砂先端の到達位置に対しては概ね実験を再現している。しかし、上部の砂の位置等実験と一致しない所もある。原因として、流動過程で空気等を巻き込み砂全体としての圧縮性等が変化することが考えられ、空気を含んだ混合体としてモデル化する必要がある。水を含んだ土砂に対する解析に向けても混合体に関するモデル化が今後の課題である。

5. まとめ

土砂流動解析ツールの構築に向けて、大変形解析にも対応できるMPMを用いて摩擦斜面上での乾燥砂の流動解析を行いその適用性を検討した。その結果、乾燥砂の流動解析は既往の実験に対して全体的な傾向を再現した。空気、水等を含んだ混合体のモデル化および解析や3次元での解析手法の開発が今後の課題である。

参考文献

- 1) Sulsky, D., S. J., Zhou, and H. L., Schreyer: Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, *Computer Physics Communications*, 87, 236-252, 1995.
- 2) R. P., Denlinger and R. M., Iverson: Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain. 2. Numerical predictions and experimental tests, *Journal of Geophysical Research*, vol.106,no.B1,pp. 553-566, 2001.
- 3) J. A., Narin: Material Point Method Calculations with Explicit Cracks, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol.4,no.6,pp. 649-663, 2003.