

固体の変形と流動の遷移挙動を表現可能な構成則を用いた MPMによる土砂流動再現解析

○東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 木村 凌一
 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 飛弾野 壮真
 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 菅井 理一
 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 学生会員 潘 紹元
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 森口 周二
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 寺田 賢二郎

1. はじめに

本研究では、土砂の固体的な挙動と流体的な挙動の遷移を表現可能な構成モデルをMPMに組み込んだ解析手法について、既往の解析手法による斜面流動解析の結果との比較を通して検証する。そして、2021年2月に福島県沖で発生した地震による福島県二本松市の斜面崩壊の事例の再現解析を行い、実際の崩壊形状との比較検討を行う。

2. 解析手法:MPM

MPM(Material Point Method)は、連続体力学に基づいて、解析対象をLagrange粒子で離散化して表現し、Euler格子で運動方程式を解く手法である。空間固定されたEuler格子を用いて計算するため、MPMは計算格子が破綻せず、大変形を伴う計算にも適用可能である。また、他の粒子法と比較すると、粒子間の近傍探索を必要としないため、計算コストを抑えることができる。これらの理由から本研究ではMPMを採用することにする。

3. 構成則

3.1 固体的な挙動を表現するモデル

固体の挙動はDunatungaら¹⁾が提案したモデルを採用する。垂弾性構成則はJauman速度 $\overset{\nabla}{\sigma}$ に基づき次式で表す。

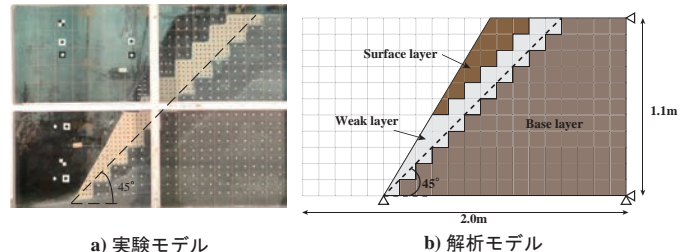
$$\overset{\nabla}{\sigma} = \dot{\sigma}_s + \sigma_s W - W \sigma_s = D : (d - d^p) \quad (1)$$

ここで、 D 、 W 、 d 、 d^p 、 σ_s はそれぞれ、弾性係数テンソル、スピントテンソル、変形速度テンソル、塑性変形速度テンソル、固体の挙動を表現する応力テンソルである。また、粒状体流れに関するレオロジー関係式²⁾から、塑性乗数 $\dot{\gamma}^p$ は次式のように表される。

$$\dot{\gamma}^p = \frac{I_0}{d} \sqrt{\frac{-P + c \mu - \mu_s}{\rho_s \mu_2 - \mu}} \quad (2)$$

ここで、 I_0 、 μ_2 は定数、 μ は有効摩擦、 d は粒径、 P は静水圧、 c は体積補正数、 ρ_s は土粒子の密度である。また μ_s は内部摩擦角の軟化を考慮して $\mu_s = \phi_r + (\phi_p - \phi_r)e^{-\eta_s \varepsilon^p}$ と定める。なお $\phi_p, \phi_r, \eta_s, \varepsilon^p$ はそれぞれ軟化前の内部摩擦角、軟化後の内部摩擦角、軟化の速度を制御する定数および累積塑性ひずみである。この塑性乗数を用いて流れ則は次式で表される。

$$d^p = \dot{\gamma}^p \frac{s}{\sqrt{J_2(s)}} \quad (3)$$



a) 実験モデル

b) 解析モデル

図-1 斜面崩壊実験³⁾の実験モデルと解析モデル

ここで、 $J_2(s)$ は偏差応力 s の第2不変量であり、偏差応力 s は、恒等テンソル I を用いて $s = \sigma_s - \text{tr}\sigma_s/3I$ である。

式(3)を式(1)に代入し、時間離散化を経て、塑性域では $\sqrt{J_2(s)}$ に関する非線形方程式を陰的に解くことで現ステップの固体応力 σ_s を更新する。

3.2 流体的な挙動を表現するモデル

流動状態の挙動は、Newton粘性流体モデルを用い、流体の応力 σ_f を次式で表す。

$$\sigma_f = \eta_f d_{\text{dev}} \quad (4)$$

ここで、 η_f は粘性係数、下付きの"dev"は偏差成分であることを表している。

3.3 遷移モデル

土の連続体としてのCauchy応力 σ を固体の応力 σ_s と流体の応力 σ_f の線形和として表す。

$$\sigma = (1 - \alpha(I))\sigma_s + \alpha(I)\sigma_f \quad (5)$$

ここで、 α はInertial number¹⁾ I の関数である。

4. 数値解析例

4.1 振動台による斜面崩壊実験との比較

篠田ら³⁾が実施した3層盛土の振動台実験との比較をし、表現性能を検討する。実験のモデルと本解析で使用したモデル及び境界条件を図-1に示す。奥行方向の格子数を1とし、平面ひずみ状態を仮定した準3次元解析を実施する。本解析では各層の材料パラメータを表-1に示す値を使用する。粒子は、奥行方向の辺を0.6m、その他の辺を0.0125mとした直方体格子中に4粒子を配置する。また、図-2に示す最大振幅400gal、振動数5Hzの加速度を体積力の水平方向成分として入力し、2秒間与える。

解析結果を図-3に示す。弱層にすべり線が形成されて弱層の頂点が引っ張られ、すべり線に沿って斜面が崩壊する

Key Words: MPM, 固体から流体への遷移, 土砂崩れ, 実地形モデル, 土砂災害, 弾塑性

〒980-8572 仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 災害科学国際研究所 4F S403-S404, TEL 022-752-2132, FAX 022-752-2133

表-1 材料パラメータ

	E (MPa)	ν	ρ_s (kg/m ³)	ϕ_p (°)	ϕ_r (°)	c (kPa)	I_0	μ_2	χ	ν_0	η_f (Pa·s)	η_s
model1(Base layer)	1.00	0.30	1890	57.3	53.4	80.143	0.279	0.75	20	0.50	1.0	100
model1(Weak layer)	5.69	0.30	1767	39.5	36.3	0.829	0.279	0.75	20	0.50	1.0	100
model1(Surface layer)	8.35	0.30	3000	0.0	28.4	30.571	0.279	0.75	20	0.50	1.0	100
model2(Base layer)	100	0.30	3000	53.4	53.4	300	0.279	0.75	20	0.50	100	100
model2(Clay layer)	4.00	0.40	2738	3.0	25.0	50.0	0.279	0.75	20	0.50	100	100

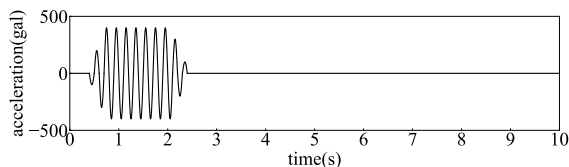


図-2 入力した sin 波

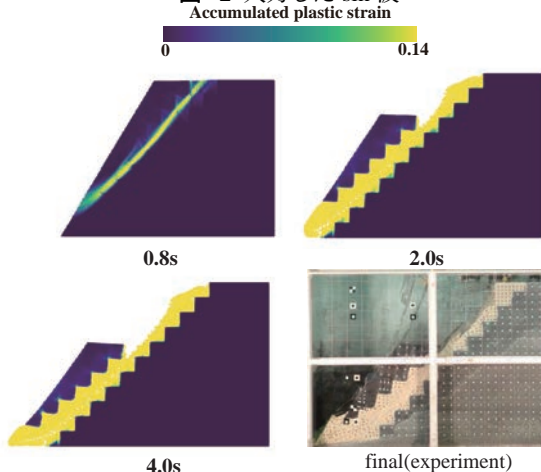


図-3 斜面崩壊実験³⁾の解析結果と実験結果の比較様子が確認できる。解析と実験結果の崩壊後の形状は概ね一致しており、本手法の良好な表現性能が確認できる。

4.2 エビスサーキットの土砂崩れの再現解析

2021年2月13日23時08分頃に発生した福島県沖の地震による、福島県二本松市のエビスサーキットの斜面崩壊の再現解析を実施した。解析モデルの形状を図-4に示す。左端の辺をスリップ境界、底辺をノンスリップ境界とする。また、奥行方向の格子数を1とし、平面ひずみ状態を仮定した準3次元解析を行う。本解析では表-1に示す材料パラメータを使用する。粒子は一辺0.5m格子中に4粒子を配置する。時間刻み幅 Δt は 1.0×10^{-4} とする。初期状態を生成するための重力は10000ステップで徐々に入力し、その後一定値とする。また、加速度は図-5に示す福島県の二本松で観測されたNS成分とEW成分の加速度を合成して作成したものを使用し、体積力の水平力成分として入力する。

解析結果を図-6に示す。切土の部分からすべり線が形成され、先に先頭部分が崩壊し、その後、斜面全体のすべり線が形成され、全体が斜面崩壊する様子を確認できる。また、全体の斜面崩壊に伴い斜面の上部には数本のすべり線が形成されている様子を確認できる。加えて、崩壊後には土砂が流動化し、先端が約230m流されている結果を得た。以上より、本手法が斜面崩壊後の土砂の流動化を表現可能

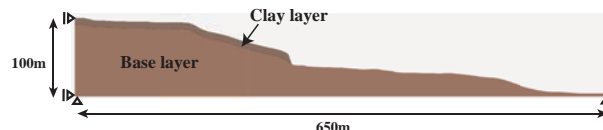


図-4 再現解析に用いたエビスサーキットのモデル

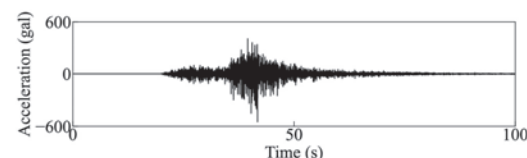


図-5 再現解析に輸入した福島県沖地震加速度波形(合成)

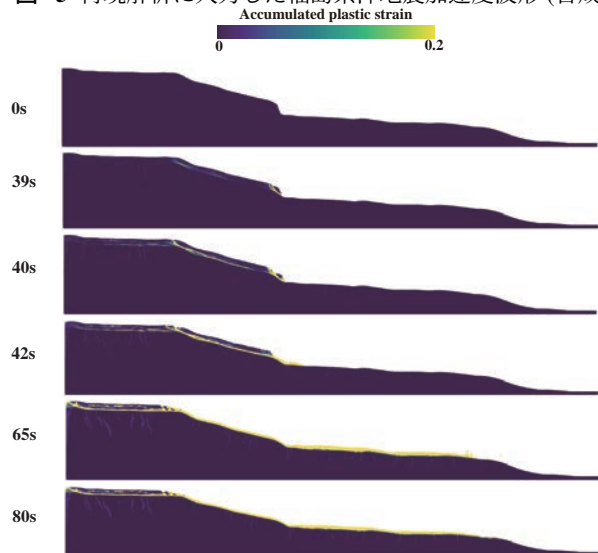


図-6 再現解析の解析結果

であり、土砂災害の一連の流れをシームレスに解析できることを確認できたといえる。

5. まとめ

土砂の固体的な挙動と流体的な挙動の遷移を表現可能な構成モデルをMPMに組み込んだ解析手法について、加速度波形を用いた外力振動によって斜面崩壊と斜面流動を一貫して表現可能であることを例証した。本研究では準3次元解析を実施したが、今後、完全3次元条件での解析を実施し、より詳細な検証を行う予定である。

参考文献

- 1) Dunatunga, S. and Kamrin, K.: Continuum modelling and simulation of granular flows through their many phases, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 779, pp. 483–513, 2015.
- 2) Jop, P., F. Y. and O, P.: A constitutive law for dense granular flows, *Nature*, Vol. 441, No. 1, pp. 727–730, 2006.
- 3) Shinoda, M., Watanabe, K., Sanagawa, T., Abe, K., Nakamura, H., Kawai, T. and Nakamura, S.: Dynamic behavior of slope models with various slope inclinations, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 1, pp. 127–142, 2015.