

固液混合MPMを用いた地盤構造物のマルチステージ浸透破壊解析

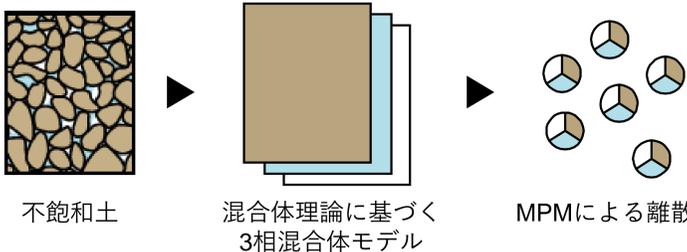
山口裕矢*, 飛驒野荘真**, 高瀬慎介***, 森口周二*, 金子賢治***, 寺田賢二郎*

*東北大学災害科学国際研究所 **東北大学大学院工学研究科 ***八戸工業大学土木建築工学科

はじめに

本研究では、降雨による間隙水の浸透によって地盤が崩壊する一連の現象の表現を目的とした多孔質体理論に基づく土骨格-水-空気三相混合MPM(Material Point Method)を提案する。MPMを適用することで、既存の混合体モデルを用いながら、メッシュ法では限界のある大変形の表現が可能となることが期待される。準静的な間隙水の浸透から地盤崩壊に至るまでの時空間的に幅広いスケールの現象を表現するために、変形の程度によって陽解法と陰解法の適切な解法を使い分ける。また、MPMの計算アルゴリズムに特有の積分誤差や非圧縮性に起因する数値不安定性への対策手法を導入する。検証例題として間隙水の浸透に伴う斜面破壊実験を対象として提案手法を適用し、その妥当性を検証する。

解析手法

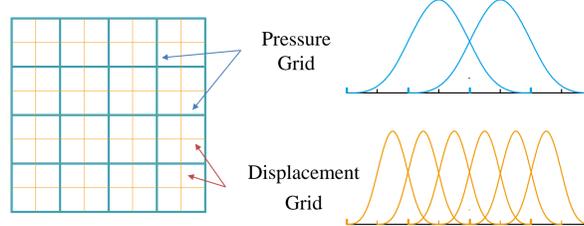
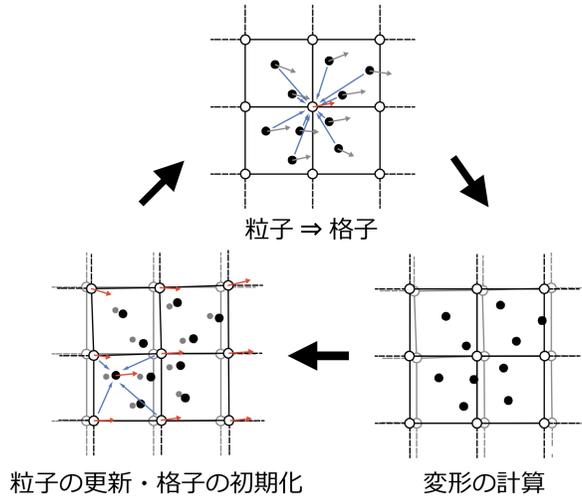


$$\rho a^s = \nabla \cdot (\sigma' - s^w p^w \mathbf{I}) + \rho b \quad (1)$$

$$\mathbf{v}^{ws} = \frac{k^{ws}}{\rho^{wR} g} \left\{ -\nabla p^w + \rho^{wR} (\mathbf{b} - \mathbf{a}^s) \right\} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\theta s^w \rho^{wR}}{K^w} - \theta \rho^{wR} c \right) \dot{p}^w + s^w \rho^{wR} \nabla \cdot \mathbf{v}^s + \nabla \cdot (\theta s^w \rho^{wR} \mathbf{v}^{ws}) = 0 \quad (3)$$

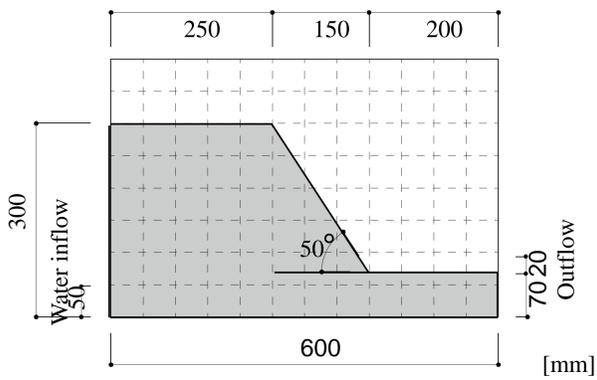
- 土粒子について非圧縮性、水粒子について疑似圧縮性、空気圧は無視できることを仮定
- ダルシー則による相互作用力
- van Genuchten 式による不飽和状態の水分特性
- 土骨格の弾性応答の表現にHencky 超弾性モデルを、塑性降伏基準にDrucker-Prager モデルを採用



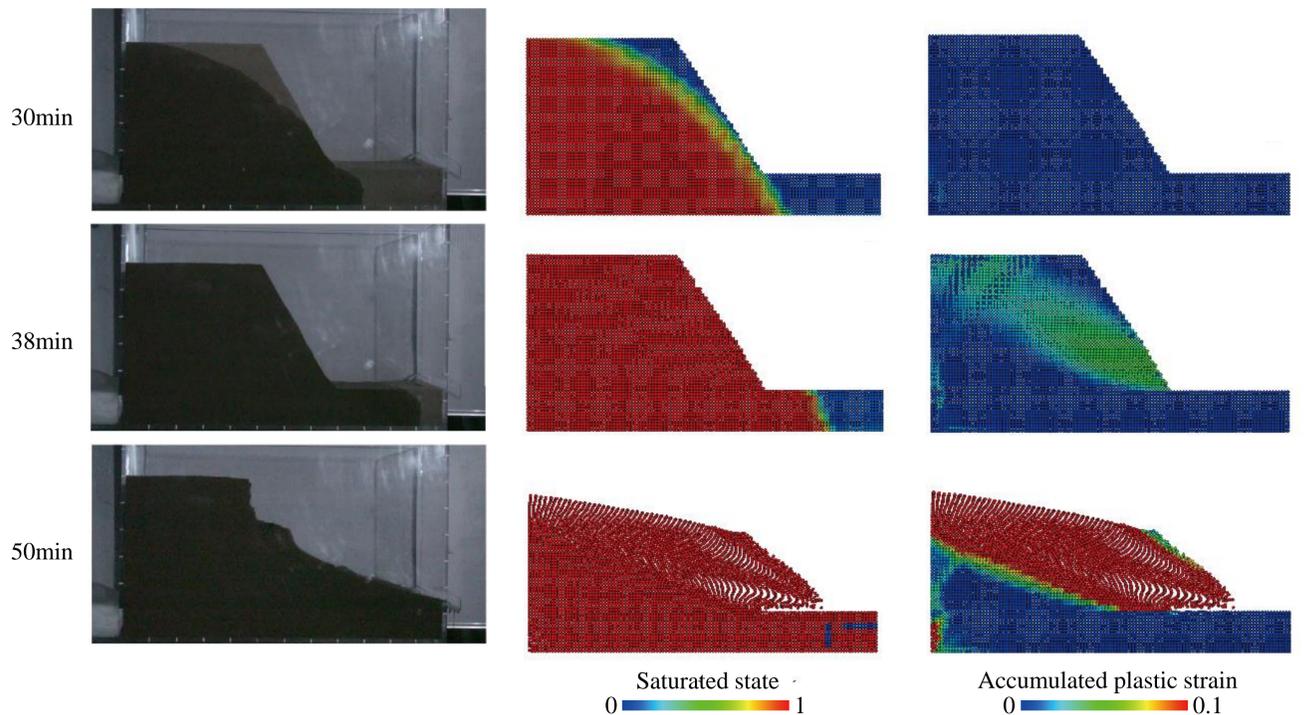
- 固相の位置を表す一層の物質粒子を用い、液相の支配方程式は固相の位置を参照する相対運動の形式で記述
- 残差の収束状況に応じて時間増分を変更し、陽解法・陰解法を併用
- 陽解法の適用の際は、固相加速度、液相相対速度について前進差分を適用し、式(3)は各物質点において計算
- 陰解法の適用の際は、式(2)を式(3)に代入することで液相相対速度の自由度を削除し、固相加速度及び水圧をNewmark-β法により離散化

- MPMの数値誤差を抑制するために、空間の連続性が高いB-spline基底関数を適用
- 空間の連続性を保ちながら、液相の疑似圧縮性に起因する数値不安定性を抑制可能なサブグリッド要素

模型実験の再現解析



Parameter	Value
Intrinsic density of soil [g/cm ³]	2.7
Intrinsic density of water [g/cm ³]	1.0
Initial porosity	0.5
Saturated permeability [m/sec]	4.21 × 10 ⁻⁵
Young's modulus [MPa]	3.0
Poisson ratio	0.3
Cohesion [kPa]	0
Internal friction angle [deg]	40
Bulk modulus of water [GPa]	2.19
Minimum degree of saturation	0
Maximum degree of saturation	1
α in van Genuchten	0.28
n in van Genuchten	12.898
m in van Genuchten	0.922
ξ in van Genuchten	0.5
η in van Genuchten	0.5
Initial degree of saturation	0.1
Grid length [m]	0.01
Particle number / Cell	4
Time increment [sec]	5.0 × 10 ⁻⁶ ~3.2



川砂の斜面モデルに対し、斜面背面の底面から50mm高さに浸水口を設定しており、浸水口の圧力水頭は貯水部分の水量によって調整する。開始から1分程度で水頭を620mmまで上昇させ、その後は水頭一定の条件としている。解析モデルの境界条件については、固相は底面をノンスリップ条件、他の面をスリップ条件とし、液相は斜面表面を浸出条件、他の面を非排水条件とする。初期応力は流入をゼロとした条件の下で準静的解析によって与え、初期飽和度は全体で均一とする。30minの飽和度分布は実験結果と解析結果で概ね一致しており、高い精度で現象を表現できていることが分かる。また、浸潤線が斜面最上部に到達した際に大きな変形が生じており、サクシジョンの低下に伴う強度低下が表現されていることが確認できる。

おわりに

本研究では間隙水の浸透による地盤材料のマルチステージ破壊解析を目的とし、多孔質体理論に基づく混合体の支配方程式を基礎式としたMPMを提案し、実験の再現解析を通して検証を行なった。崩壊後の表現性能にはいくつかの課題が残されているが、従来手法では表現が困難であった長時間スケールの浸透解析からサクシジョンの低下による斜面崩壊が発生する一連の挙動を現実的な計算コストで表現可能であることが確認され、本手法の有効性が示された。