土木学会 第23回応用力学シンポジウム講演概要集（2020年5月）

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

Multi-stage seepage failure simulation of ground structures using solid-liquid coupled material point method

山口　裕矢（東北大）　飛驒野　荘真（東北大）　高瀬　慎介（八戸工大）　森口　周二（東北大）
金子　賢治（八戸工大）　寺田　賢二郎（東北大）
Yuya YAMAGUCHI, Tohoku University
Soma HIDANO, Tohoku University
Shinsuke TAKASE, Hachinohe Institute of Technology
Shuji MORIGUCHI, Tohoku University
Kenji KANEKO, Hachinohe Institute of Technology
Kenjiro TERADA, Tohoku University
FAX: 022-752-2133, E-mail: yyamaguchi@irides.tohoku.ac.jp

A multi-stage collapse process of ground structures caused by seepage flow is simulated with a coupled material point method based on the theory of porous media. The continuum of the mixture is discretized with a set of Lagrangian material points that possess the information about both the geometry and material of solid and liquid. Both explicit and implicit schemes are combined to improve the robustness and efficiency in computations. A model experiment for seepage failure is simulated to demonstrate the capability of the proposed method in dealing with the transition from the quasi-static to the dynamic state of the unsaturated soil.

1. 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．

2. 解析手法

多孔質体理論に基づき，不飽和土を土骨格-水-空気三相混合体としてモデル化する．その際，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する．また，平均応力を仮定し，土骨格を弾塑性体，間隙流体をニュートン流体とし，相互作用力はダルシー則に基づいて与える．以上より，次に示す運動方程式と質量保存式を得る．

$$\rho \boldsymbol{a}^{\mathrm{s}} = \nabla \cdot \left(\boldsymbol{\sigma}' - s^{\mathrm{w}} p^{\mathrm{w}} \boldsymbol{I} \right) + \rho \boldsymbol{b} \tag{1}$$

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

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

ここに，添字 s, w は固相，液相の物理量，上付き"・"は物質時間微分を表し，ρ は部分密度，$\boldsymbol{a}$ は加速度，$\boldsymbol{v}$ は速度，$\boldsymbol{\sigma}'$は土骨格の有効応力，p^{w}は水圧，$\boldsymbol{b}$ は物体力，θ は間隙率，s^{w}は飽和度，ρ^{wR}は水の真密度，k^{ws}は透水係数，K^{w}は水の体積弾性率，c は比水分容量，g は重力加速度である．不飽和状態の水分特性は van Genuchten 式によって与える．有効応力 $\boldsymbol{\sigma}'$ は変形勾配の乗算分解を仮定した有変形弾塑性構成則によって定めることとし，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 モデルを採用する．

MPM による空間の離散化に際しては，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される． 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 基底関数を適用する．更に，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 [1]を用いる．

時間方向の離散化について，陽解法の適用の際は Bandara ら [2]と同様に式(1)の固相加速度，式(2)の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する．陰解法の適用の際は，Uzuoka と Borja[3]と同様に式(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法により離散化する．

3. 模型実験の再現解析

提案手法の検証のために，間隙水の浸透による斜面破壊実験の再現解析を実施する．Fig. 1 に示す模式図のように，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．本研究では開始から 1 分程度で水頭を 620mmm 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．各種パラメータは Table. 1 に示す値に設定する．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．

実験結果と解析結果の比較を Fig. 2 に示す．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る傾向も表現されており，サクシ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．最終的な破壊形状については，実験では複数の滑り面が発生し，多段階に渡って崩壊が発生しているのに対し，解析ではひとつの滑り面が生じ，斜面の大部分が一度に崩壊する挙動となっている．これは，

©公益社団法人土木学会 応用力学委員会

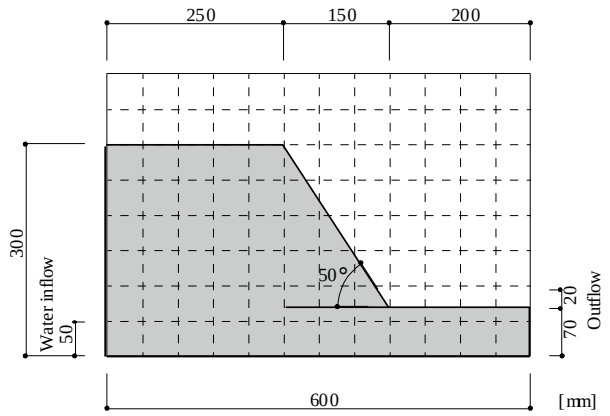

Fig. 1 Schematic view of model experiment

現状採用している弾塑性モデルの性能に起因するものと推察され，より高度なモデル化によって表現性能が向上すると考えられる．また，50min の飽和度分布が一部不自然となっているが，これは崩壊に伴う新たな表面の形成や接触の表現が不十分なためであると考えられ，境界条件の設定方法などの改善が必要である．これら幾つかの課題は残されているものの，本手法によれば，準静的な浸透過程では時間増分を最大 3.2sec と大きくとることが可能であり，大変形を伴う非線形性が強い段階では主に陽解法を用いることで計算効率の改善を図ることで一連の挙動を一定の精度で表現可能であることが示された．

4. 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，本手法の可能性が示された．

Table 1 Parameters in numerical simulation of experiment

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 [°]	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 suaturation	0.1
Grid length [m]	0.01
Particle number / Cell	4
Time increment [sec]	5.0×10^{-6}~3.2

参考文献

1) Bressan, A. and Sangalli, G.: Isogeometric discretizations of the Stokes problem: stability analysis by the macroelement technique. IMA Journal of Numerical Analysis, 33(2), 629-651, 2013
2) Bandara, S., Ferrari, A., and Laloui, L.: Modelling landslides in unsaturated slopes subjected to rainfall infiltration using material point method. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 40(9), 1358-1380, 2016
3) Uzuoka, R. and Borja, R. I.: Dynamics of unsaturated poroelastic solids at finite strain. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 36(13), 1535-1573, 2012

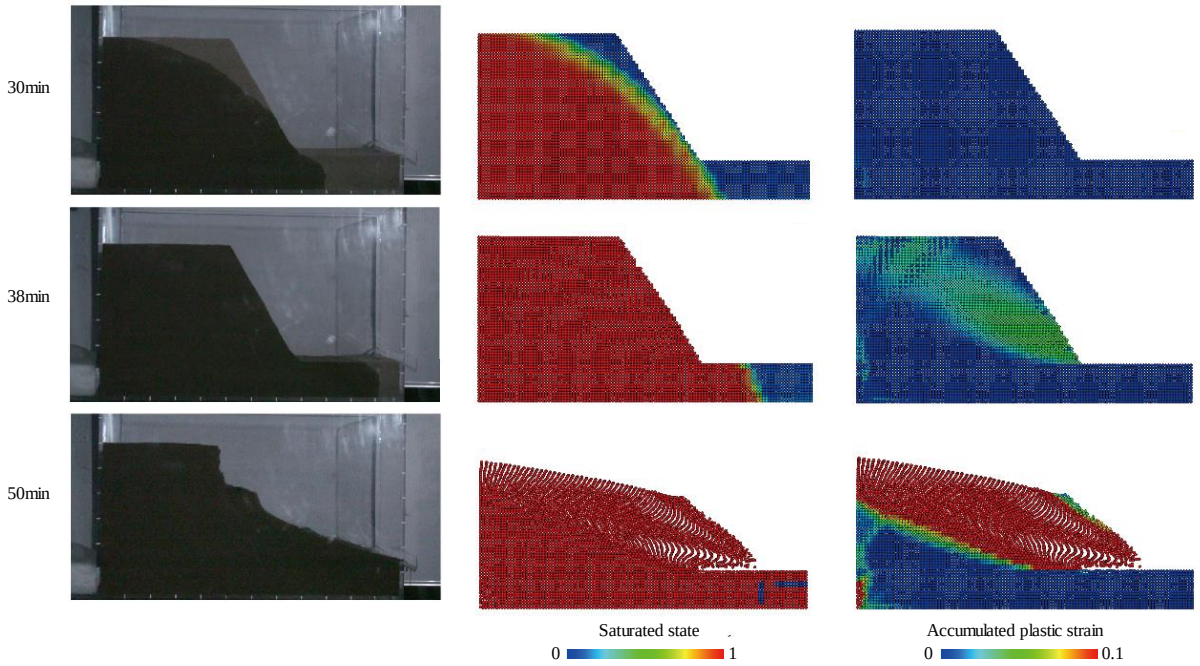

Fig. 2 Photos taken during experiment and snapshots of numerical results

©公益社団法人土木学会 応用力学委員会