# 固液混合 MPM による地盤の浸透破壊解析

○東北大学工学部建築・社会環境工学科	学生会員	飛彈野 壮真
東北大学 災害科学国際研究所	正会員(個人)	山口 裕矢
八戸工業大学 土木建築工学科	正会員(個人)	金子 賢治
八戸工業大学 土木建築工学科	正会員(個人)	高瀬 慎介
東北大学 災害科学国際研究所	正会員(個人)	森口 周二
東北大学 災害科学国際研究所	正会員(個人)	寺田 賢二郎

## 1. 研究背景と目的

雨が多く山地が地形の多くを占める我が国は,斜面が雨 の浸透で崩れやすくなり,斜面災害が発生しやすい環境に ある.このような斜面災害を予測するためには,浸透・破 壊・流動を一貫してモデル化する必要があるが,そのために は土の間隙内に含まれる水,空気も考慮した不飽和土の力 学特性を加味したうえで,固体と流体を統一的に扱う必要 がある.

以上から,不飽和土の力学特性の変化を考慮した斜面の 浸透崩壊から土砂流動までの一連の現象の再現に適用しう る手法として表現性能が期待される混合体 MPM に着目し, その表現性能を検証することを目的とする.

## 2. 支配方程式

以下では混合体モデルに基づく各種保存式の概要を記す. 詳細なモデル化は文献<sup>1)</sup>を参照されたい.混合体の密度は 次式のように各相の密度(部分密度)の総和で表される.

$$\rho = \rho_{\rm s} + \rho_{\rm w} + \rho_{\rm a} \tag{1}$$

ここで、 $ho_{\alpha}$ は部分密度、添え字 s,w,a は各々土骨格、水、空気の物理量を示す. 各相の質量保存式は次式で表される.

$$\frac{D^{\alpha}\rho_{\alpha}}{Dt} + \rho_{\alpha} \nabla \cdot \boldsymbol{v}_{\alpha} = 0, \quad \alpha = s, w, a$$
<sup>(2)</sup>

ここで、 $v_{\alpha}$  は各相の速度であり、 $\frac{D^{\alpha}}{Dt}$  は各相を参照した物質時間微分である.

次に,各相の運動方程式は次式である.

$$\rho \boldsymbol{a}_{\alpha} = \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\alpha} - \rho_{\alpha} \boldsymbol{b}_{\alpha} - \hat{\boldsymbol{p}}_{\alpha}, \quad \alpha = s, w, a$$
(3)

ここに,  $a_{\alpha}$  は加速度,  $\sigma_{\alpha}$  は平均 Cauchy 応力,  $b_{\alpha}$  は物体力,  $\hat{p}_{\alpha}$  は相間の相互作用力である.

#### 3. 浸透流出解析の検証

#### 3.1 検証の概要

本研究で用いる手法による浸透解析結果の検証のため,ベ ンチマークとしてよく知られる Liakopoulos<sup>2)</sup>が行った実験 との比較を行った.実験は,不浸透性の円筒形容器を飽和 土で満たし,底面と天面を透水条件とすることで,一次元の 流れと変形を引き起こすものである.この時の底面から流 出する水の流速を測ったデータとの比較を行った.

#### 3.2 浸透流出解析結果の検証

図-1 に実験,解析結果である底面の液相流速の時刻歴を 示す.図から,3 相解析の結果が,2 相解析と比較すると実 験結果に近いことから,空気を考慮することでより実現象に 近い解析ができると言える.経過時間が30分に満たない領 域では3 相解析でも実験結果との差が見受けられるが,そ れ以降の領域では特によく一致していることがわかる.た だし,2 相解析でも,流出する水の速度のオーダーには大き な差はなく,徐々に速度が小さくなる傾向は表現できている ことから,計算コストを考慮し,以降の解析は2 相で行う.



図-1 浸透流出に関する実験結果(Liakopoulos<sup>2</sup>)と Biphasic(土・水)解析結果と Triphasic(土・水・空気)解析結果の比較

#### 4. 再現解析

#### **4.1** 浸透解析の概要

実験では概ね斜面全体が飽和した段階で崩壊が発生して いるため,計算コストを考慮し,MPMを用いた浸透に関す る山口ら<sup>3)</sup>の研究を用いて,浸透過程の解析を行った.

### 4.2 内部摩擦角による影響

まず,既往研究により飽和度の上昇によって有効な粘着 力は減少するが,内部摩擦角は変化が小さいことが示され ている<sup>4)</sup>ため,飽和させた斜面について,内部摩擦角を 30 度,35度,40度と設定し,崩壊の解析を行うことで,適し た内部摩擦角を定める.

図-2 上部は,解析開始から 180s 後の斜面形状である.また,水色の線は実験の最終斜面形状である.図より内部摩擦角が大きいほど崩壊が進みにくいとがわかる.それに伴い,上部に崩れずに残留する箇所が多い.しかし,崩壊が進行

Key Words: MPM,不飽和土,浸透崩壞,斜面崩壞

〒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

すれば,内部摩擦角 30 度の斜面同様到達範囲が大きくなる と予想できる.そこで,内部摩擦角 40 度の斜面で 600s ま で解析を行った.結果は図-2 下部に示す.図から,180s で の形状と比べて斜面が崩れていることがわかるので,十分 な時間が経過すれば実験の斜面により近づくと考えられる.

したがって,以降の解析では上部に残っている箇所がより 多いため,十分な時間が経過すれば実験の崩壊形状に最も 近づくと考えられる内部摩擦角 40 度を用いることとする.





### 4.3 浸透から崩壊までの解析

内部摩擦角を 40 度とし、山口らの研究<sup>3)</sup>を用いて浸透過 程の解析を行った結果を図-3に示す.この結果を用いて崩 壊の解析を行った結果を示す(累積塑性ひずみ分布は図-4, 固体相速度は図-5). 図-4 から 500s 付近ですべり面がはっ きりと表れ、以降より明確になっていることがわかる. ま た、図-5から250s以降の崩壊の進行は緩慢であることがわ かる.しかし,徐々にではあるが崩壊が進行しているため完 全に止まるまで解析を行うことは困難である. そこで, 固 体相速度から最終形状の概形を予想できると考える. 1000s での固体相速度について図-6に改めて示す.この図の領域 1はこのままの形状を保つと考えるられ特に速度が小さい 領域,領域2は領域1の斜面外側の斜面崩壊が進行し形成 されると考えられる領域である.これらの領域の外縁(破 線)が解析での斜面の最終形状と考えられる.これを実験 の最終形状に重ねたものを図-6の右側に示す.実験につい ても,領域3として示す角ばった不安定な領域(水色の実 線で囲った領域)が存在し、崩壊が続くことが予想できる. また、領域3が崩れると、水色の破線上に堆積していくと 考えられるため,予想した解析斜面での最終形状(橙色の破 線)に近づくと考えられる.

### 5. 結論

不飽和土の複雑な力学特性の変化を考慮した斜面の浸透 崩壊から土砂流動までの一連の現象再現への適用が期待さ れる混合体 MPM に着目し,表現性能を検証した.

浸透流出解析による検証は2相でも十分な浸透を表現で き、3相であれば30分以降は実現象との差がないほどの精 度があった.

対象とした実験の形状を表現するには内部摩擦角が大き い必要があることがわかり,内部摩擦角 40 度の斜面を用い て浸透から崩壊までの解析を行った.実験,解析ともに崩 壊が止まるまでには長い時間が必要であり,固体相速度か ら予想される最終形状は実験で得られるであろう最終形状 に近いものと考えられることを確認した.



#### 参考文献

- 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*, Vol. 40, No. 9, pp. 1358–1380, 2016.
- A., L.: Transient flow through unsaturated porous media., PhD thesis, University of California at Berkeley, 1964.
- 山口裕矢,高瀬慎介,森口周二,寺田賢二郎: 地盤流動化の数 値解析を目的とした MPM の提案と適用性の検討,計算工学 講演会論文集 Proceedings of the Conference on Computational Engineering and Science, Vol. 24, p. 3p, may 2019.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A.: The shear strength of unsaturated soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 313–321, 1978.