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¹⁾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、 ρ_{α} 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。

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

ここで、 v_{α} 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.

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

ここに, \pmb{a}_{α} は加速度, $\pmb{\sigma}_{\alpha}$ は平均 Cauchy 応力, \pmb{b}_{α} は物体力, $\hat{\pmb{p}}_{\alpha}$ 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 Liakopoulos²⁾ 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。

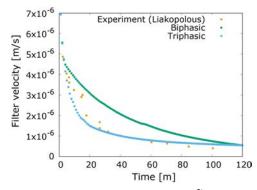


図-1 浸透流出に関する実験結果 (Liakopoulos²⁾) と Biphasic (土・水) 解析結果と Triphasic (土・水・空気) 解析結果の比較

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³⁾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 ⁴⁾ 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

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.

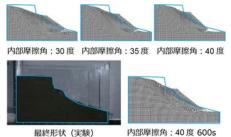


図-2 内部摩擦角による影響の比較(上部3斜面)と内部摩擦角40 度とした 600s での崩壊形状の比較(下部)

4.3 浸透から崩壊までの解析

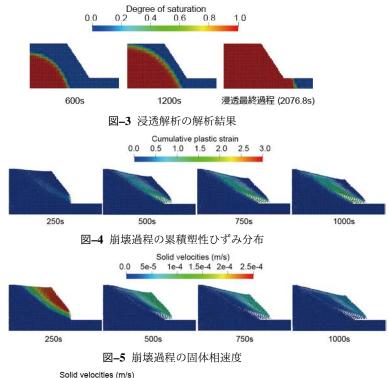
内部摩擦角を 40 度とし,山口らの研究 3) を用いて浸透過 程の解析を行った結果を図-3に示す.この結果を用いて崩 壊の解析を行った結果を示す(累積塑性ひずみ分布は図-4, 固体相速度は図-5). 図-4 から 500s 付近ですべり面がはっ きりと表れ,以降より明確になっていることがわかる.ま た、図-5から250s以降の崩壊の進行は緩慢であることがわ かる. しかし, 徐々にではあるが崩壊が進行しているため完 全に止まるまで解析を行うことは困難である. そこで, 固 体相速度から最終形状の概形を予想できると考える. 1000s での固体相速度について図-6に改めて示す.この図の領域 1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.



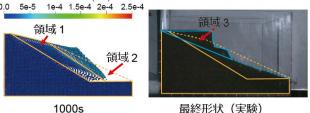


図-6 予想される実験、解析結果の最終形状の比較

参考文献

- 1) 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.
- 2) A., L.: Transient flow through unsaturated porous media., PhD thesis, University of California at Berkeley, 1964.
- 3) 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.
- 4) 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.