

粒子-流体連成計算モデルを用いた浸透破壊後の解析 Numerical Analysis of Seepage Failure by DEM-LBM Coupling Method

○森田 健太郎*・岡田 紘明*・福元 豊**・藤澤 和謙*・村上 章*

○Kentaro Morita, Hiroaki Okada, Yutaka Fukumoto, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

1. はじめに

日本に現存するフィルダムやため池などの土構造物は、古くに築造されたものが多く、改修が必要とされている。これら土構造物は、浸透破壊や内部侵食によって崩壊することがある。土構造物に発生する被害を予測するには、浸透破壊の開始だけでなく、浸透破壊後の土の挙動を予測することが求められる。

本研究では浸透破壊後に焦点を当て、不連続体の数値解析手法である個別要素法 (DEM) と流体計算手法である格子ボルツマン法 (LBM) による粒子-流体連成計算を用いて、土と流体のミクロな挙動を同時に解いた。さらに、藤澤ら¹⁾によって提案された浸透破壊後の浸透流速と土粒子速度の予測理論と計算結果とを比較し、シミュレーションの妥当性について検証した。

2. 粒子-流体連成モデル²⁾と問題設定

粒子-流体の連成計算を実現する場合、移動する固液境界面を取り扱うとともに固体と流体の相互作用力を計算する方法が必要となる。これを求めるための境界条件として、本研究では Nobel and Torzynski's model³⁾を適用した。この方法を以下では Partially Saturated モデル (以下、PS モデル) と呼ぶ。同モデルは固体の局所占占有率に基づく重み関数 B を求めることで、格子ボルツマン方程式および衝突項は以下のように拡張される。

$$\mathbf{f}(\mathbf{x} + \mathbf{c}\delta t, t + \delta t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{\Omega}(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

$$\mathbf{\Omega}(\mathbf{x}, t) = -(\mathbf{I} - B\mathbf{I})\tau^{-1}(\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{f}^{eq}(\mathbf{x}, t)) + B\mathbf{I}\mathbf{\Lambda} \quad (2)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{f}^{eq}(\rho, \mathbf{u}^p) - \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + (1 - \tau^{-1})\{\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{f}^{eq}(\rho, \mathbf{u})\} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{f} は速度分布関数、 $\mathbf{\Omega}$ は衝突項、 \mathbf{c} は格子速度ベクトル、 \mathbf{I} は単位行列、 $\mathbf{\Lambda}$ は追加衝突項、 \mathbf{u}^p は固体粒子の速度である。同モデルにより複雑な境界面も比較的滑らかに扱うことができ、流体力のバラツキを抑えられる。

図1に解析領域と DEM 粒子の初期配置を示す。LBM

格子幅 $h = 1.0 \times 10^{-5}$ m, 土粒子は粒径 $10h$ の単一粒子径とし、解析領域は $500h \times 1500h$ であり、重力落下法により作成した。土塊の占める領域は $500h \times 350h$ である。土粒子の間隙率は $n = 0.10$ となった。壁面からの摩擦力を考慮しておらず、鉛直方向には壁面を設けていない。流体計算の境界条件として、シミュレーション範囲の上下端には密度境界条件を定め、左右は slip 条件を用いた。

藤澤らの予測理論¹⁾では、式(4)、(5)に示す土粒子と浸透水の一次元の連続式及び運動方程式を支配方程式とし、限界動水勾配より僅かに大きい圧力勾配が働くときの土粒子速度と浸透流速の理論解を求めた。

$$\frac{\partial \rho_s(1-n)}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s(1-n)v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s(1-n)v}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s(1-n)v^2}{\partial z} = -(1-n)\frac{\partial p}{\partial z} - \rho_s(1-n)g + f \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} + \frac{\partial \rho n q}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \rho n q}{\partial t} + \frac{\partial \rho n q^2}{\partial z} = -n\frac{\partial p}{\partial z} - \rho n g - f \quad (5)$$

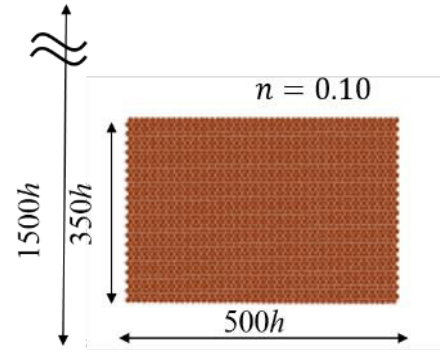


図1 シミュレーションモデル

Fig.1 Simulation Model

*京都大学 農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University

**長岡技術科学大学 工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagaoka University of Technology

キーワード: 数値解析

ここに、 $z, n, v, q, p, \rho_s, \rho, g, f$ はそれぞれ鉛直上向きの座標，間隙率，土粒子速度，浸透流速，水圧，土粒子密度，水の密度，重力加速度，土粒子と浸透水の相互作用力を表す．支配方程式の導出及び理論の詳細は藤澤ら¹⁾を参照されたい．

シミュレーションにおいて次の初期条件を想定した． $t=0$ のとき土は限界動水勾配下にあり，有効応力はゼロである．初期状態から，圧力勾配の大きさを僅かに増加させ，土粒子速度と浸透流速の時間変化を求める．ただし，格子ボルツマン方程式は密度分布関数の時間発展を解くため，圧力勾配を直接与えることができない．そのため，密度勾配を与えることで圧力勾配を表現した．

3. 解析結果と理論との比較・検討

初期条件を考慮して支配方程式を解けば，土粒子速度 $v(t, \varepsilon)$ 及び浸透流速 $q(t, \varepsilon)$ は以下の厳密解を得る．

$$v(t, \varepsilon) = g\varepsilon t - \frac{\alpha q_0 \varepsilon}{\alpha + \beta} \{1 - e^{-(\alpha + \beta)t}\} \quad (6)$$

$$q(t, \varepsilon) = g\varepsilon t + q_0 + \frac{\beta q_0 \varepsilon}{\alpha + \beta} \{1 - e^{-(\alpha + \beta)t}\} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{n^2 \rho g}{k \rho_s (1 - n)}, \quad \beta = \frac{n g}{k} \quad (8)$$

ここで ε は限界動水勾配時からの圧力勾配の増加率である．通常， α, β が大きいため， v と q の傾きは $g\varepsilon$ に速やかに漸近する． ε を変えて，式(6), (7), (8)で与えられる v と q の時間変化を図2に示す．

一方，図3にシミュレーションより得られた q と v の時間変化を示す．理論値は， $q(t, \varepsilon) = g\varepsilon t$ として求めた．また， q は v より僅かに大きな速度差を保ったまま増加し続け理論と類似する結果が得られた．

限界動水勾配を超えると，粒子間接触力の総和がほぼゼロであり，土塊には浮力を加味した重力と流体との相互作用力のみが働く．

4. おわりに

限界動水勾配後の浸透流速と土粒子速度をシミュレーションより求めた結果，藤澤らの理論¹⁾と類似する結果が得られた．以上の結果は浸透破壊が僅かな圧力勾配の増加によって急激に進行することを示唆する．ただし理論¹⁾及びシミュレーションは壁面からの力は考慮しておらず，一次元浸透破壊現象の理想的な状態をモデル化したものである．実際の現象に近づけるには壁面の摩擦則を導入した解析が必要となる．今後は乱流下での評価や周期境界条件の導入，より高いレイノルズ数においても安定的な計算が可能な Multi Relaxation Time²⁾ の導入，また3次元への応用も含め検討したい．

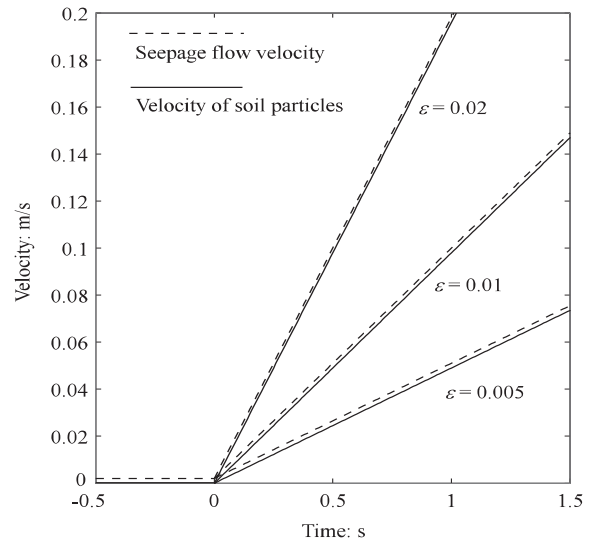


図2 浸透流速と土粒子速度の時間変化¹⁾

Fig.2 Seepage Flow and Soil Velocity

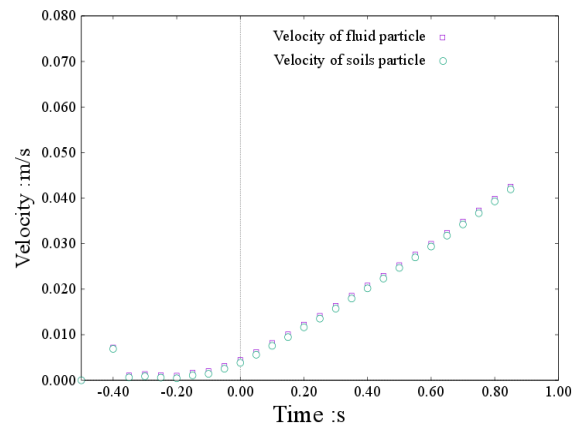


図3 連成計算による浸透流速と土粒子速度の時間変化

Fig.3 Seepage Flow and Soil Velocity by DEM-LBM Coupling Calculation

参考文献

- 1)藤澤和謙，村上章：鉛直上向きに生じる浸透破壊後の浸透流速と土粒子速度の予測理論．地盤工学ジャーナル,9(4), pp.511-520, 2014. 2) Fukumoto, Y.: Particle based multiphysics simulation for applications to design of soil structures and micromechanics of granular geomaterials, PhD thesis, Kyoto University, Japan, 2015. 3) Noble, D. and Torczynski, J.: A lattice Boltzmann method for partially saturated computational cells, *Int. J. Mod. Phys. C*, 9(8), pp.1189-1201, 1998.