

DEM-LBM 連成計算を用いた浸透破壊の解析

Numerical analysis of seepage failure by DEM-LBM coupled scheme

○岡田 紘明*・福元 豊**・藤澤和謙*・村上 章*

Hiroaki Okada, Yutaka Fukumoto, Kazunori Fujisawa, Akira Murakami

1. はじめに

不連続体の数値解析手法である個別要素法(DEM)と流体の計算手法である格子ボルツマン法(LBM)を連成計算させることで、浸透流に起因する地盤の侵食や破壊現象をシミュレートすることが可能になる。本研究では浸透破壊、ボーリングに焦点を当て、様々な動水勾配のもとで2次元シミュレーションを試みた。固体粒子の挙動を観察し、Terzaghiの限界動水勾配式に基づく限界動水勾配とシミュレーション値の比較を行い、2次元シミュレーションの妥当性について検討した。

2. 2次元シミュレーション

砂質土を想定して、3種類の粒径(0.100mm, 0.200mm, 0.300mm)をもつ約1,800個の粒子をDEMにより空中落下法で敷き詰めた。図1はシミュレーションモデルを示し、全粒子の自重は0.756g、間隙比 $e=0.215$ となった。固体粒子間の計算には個別要素ボンドモデル²⁾を用い、粒子間ボンドと転がり摩擦を導入することで粘着力と内部摩擦角を表現した。流体計算には格子BGKモデル³⁾を用い、速度モデルは2次元9速度モデルを用いた。固液境界面の扱いとして、複雑な境界面も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Nobel and Torzynski's model⁴⁾を適用した。壁面境界はBounce-back法⁵⁾を用いてNon-slip条件とする。Terzaghiの限界動水勾配式と比較するため、壁面と粒子の摩擦はないものとした。以上の条件で、 x 軸方向に密度勾配を与えることで重力とは逆向きの方向に浸透流を発生させ、様々な動水勾配のもとでシミュレーションを行った。

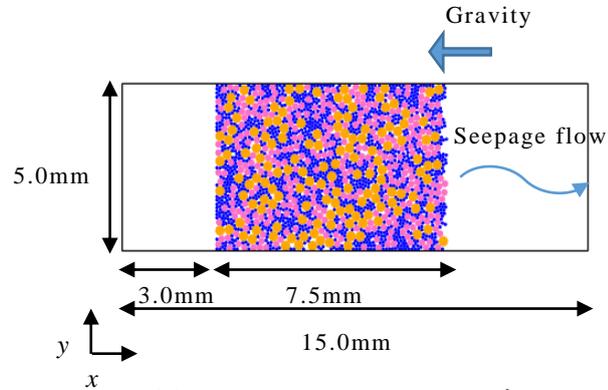


図1 シミュレーションモデル
Simulation model

固液境界面の扱いとして、複雑な境界面も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Nobel and Torzynski's model⁴⁾を適用した。壁面境界はBounce-back法⁵⁾を用いてNon-slip条件とする。Terzaghiの限界動水勾配式と比較するため、壁面と粒子の摩擦はないものとした。以上の条件で、 x 軸方向に密度勾配を与えることで重力とは逆向きの方向に浸透流を発生させ、様々な動水勾配のもとでシミュレーションを行った。

3. 解析結果

図2に F_x^{hydro}/W_p と動水勾配 i の関係を示す。ここで、 F_x^{hydro} は固体粒子に作用する流体力の x 成分の大きさの総和、 W_p は浮力を考慮した固体粒子の重量の総和を表す。に対応する i の値がシミュレーションより得られる限界動水勾配 i_c となり、 $i=1.233$ のとき $F_x^{hydro}/W_p=0.999$ となった。Terzaghiの限界動水勾配式に基づく限界動水勾配 i_c^{theory} の値(理論値)は1.234であり、 i_c と i_c^{theory} の値はほぼ一致した。

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

**長岡技術科学大学工学研究科, **Department of Civil and Environmental Engineering, Nagaoka University of Technology, 数値解析

図 3 に粒子間の接触力の大きさを線の太さで描画した応力鎖を示す。動水勾配が増加するにつれて粒子間応力が減ることが確認でき、限界動水勾配時には粒子間応力がゼロに近い値となる。

図 4 に限界動水勾配より大きいときの、固体粒子の挙動を示す。固体粒子は、ひとつの集合体となって浮き上がっているだけで、ボイリングは表現されていない。これは本シミュレーションが 2 次元であり固体粒子が円形であるため、間隙比が一般の砂質土と比べて小さく、結果として透水性が低いことが原因として考えられる。Creager による透水係数の推定法⁵⁾では本モデルの透水係数は 10^{-3} のオーダーであるとされるのに対し、シミュレーションで求めた透水係数は $k=8.35 \times 10^{-4}$ cm/s と透水性が良くない。このことが影響したのか確かめるため、十分な間隙をもち透水性が良くなるよう固体粒子を作為的に敷き詰めたモデルでシミュレーションを行ったところ、図 5 に示す通り限界動水勾配時に浸透破壊現象が確認された。

4. おわりに

ボイリングに焦点を当て、DEM-LBM の連成計算による浸透破壊のシミュレーションを行った。シミュレーションより得られた限界動水勾配の値と Terzaghi の限界動勾配式に基づく限界動水勾配の理論値がほぼ一致し、限界動水勾配時には粒子間応力がゼロに近い値になることが確認された。今後はより実際の現象に近いシミュレーションを目指し、3次元への応用も含め検討したい。

参考文献 1) 藤名瑞耀, 福元 豊, 村上 章: 粒子-流体連成の直接数値計算モデルを用いた Hole Erosion Test の 2 次元シミュレーション, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.71(2), pp.567-578, 2015. 2) 福元豊, 阪口 秀, 村上 章: 地盤の破壊基準を表現するためのシンプルな DEM モデル, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 67(1), pp.105-112, 2011. 3) Qian, Y. H., d'Humières, D., & Lallemand, P.: Lattice BGK models for Navier-Stokes equation, EPL (Europhysics Letters), 17(6), pp479, 1992. 4) Noble, D. R., & Torczynski, J. R.: A lattice-Boltzmann method for partially saturated computational cells, International Journal of Modern Physics C, Vol.271, pp1189-1201, 1998. 5) Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol. III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp.645~649, 1945.

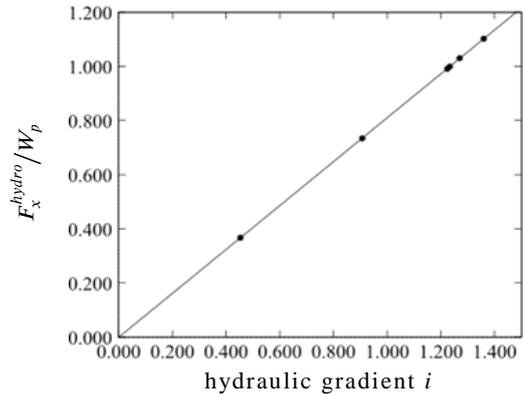
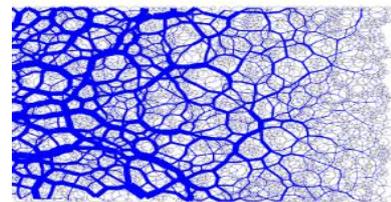
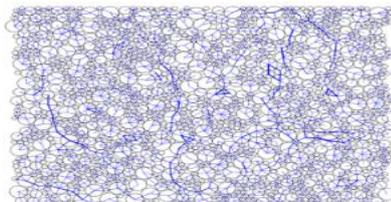


図 2 F_x^{hydro}/W_p と動水勾配 i の関係
The relationships between F_x^{hydro}/W_p and i



限界動水勾配より小さい時



限界動水勾配時

図 3 粒子間の接触力を描画した応力鎖
Stress chain drawing contact forces

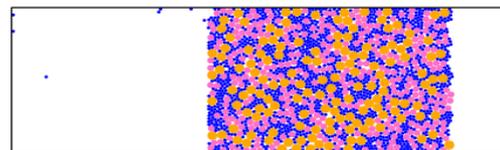


図 4 限界動水勾配後の固体粒子の挙動
The behavior of solid particles over i_c

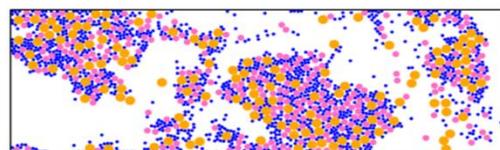


図 5 パッキング変更したときの固体粒子の挙動
The behavior of solid particles in another packing