

3次元格子ボルツマン法による砂質土の間隙流体シミュレーション 3D Lattice Boltzmann Simulations for Pore Fluid of Sandy Soil

○福元 豊*・阪口 秀**・村上 章*

Yutaka Fukumoto, Hide Sakaguchi, Akira Murakami

1. はじめに

砂の間隙構造の違いによる透水特性の変化を調べるために、3次元LBM（格子ボルツマン法）による解析を行った。砂質土を仮定した多孔質体モデルは、DEM（個別要素法）計算により作成した。球形粒子の粒子径分布を変えることで、空隙率は同じだが、その大きさと空間的な分布が異なる2つの試料を作成した。1GPU（nVIDIA Tesla C2075）ではメモリの制約上2000万格子程度の計算が限界であったが、その範囲でもLBMによって両試料の透水特性の違いを再現できることを示す。

2. 多孔質体モデルの作成

2種類の砂質土を仮定した多孔質体モデルの作成は、DEM計算によって行った。矩形領域において重なりが無いようにランダムに配置した粒子を重力落下させて安定状態を待った。2種類の試料の空隙率を一致させるために、重力落下時の粒子間の滑り摩擦と転がり摩擦の値を変えながらパラメトリックに計算¹⁾を行った。準備した両試料の空隙率は0.5である。case 1で用いたのは粒径 d の単粒径粒子、case 2は最大粒径 $3d$ 、最小粒径 d の粒子径分布を持つ粒子群である。安定状態に至った後、所定の高さ以上の粒子を削除し、図-1(a), (b)のような多孔質体モデルをそれぞれ作成した。

3. 間隙流体のLBMシミュレーション

LBMは、デカルト格子に配置された流体粒子の速度分布関数を陽的に時間発展させることで巨視的な流れ場を求める数値解析手法である。図-1の通り、解析領域は $200\Delta x \times 300\Delta x \times 200\Delta x$ とし、 xz 断面の一方を一定流入境界、他方を自由流出境界とした。ここで、 Δx は格子幅である。

多孔質体の占める領域は $200\Delta x \times 200\Delta x \times 200\Delta x$ であり、 y 軸方向の両側に $50\Delta x$ ごとの助走区間を設けた。多孔質体を構成する

粒子表面にはbounce-back法による滑りなし境界条件を適用した。流入速度の値は、レイノルズ数 Re の値が1よりも小さくなるように決定した。この値は多孔質体流れにおいて層流状態が保たれる値である。これらの条件の下、定常状態に至るまで計算を行った。なお、事前の検討により、解の安定性と、固体粒子の形状を立方体格子で近似する場合の解像度を考慮して、 $d = 20\Delta x$ とした。

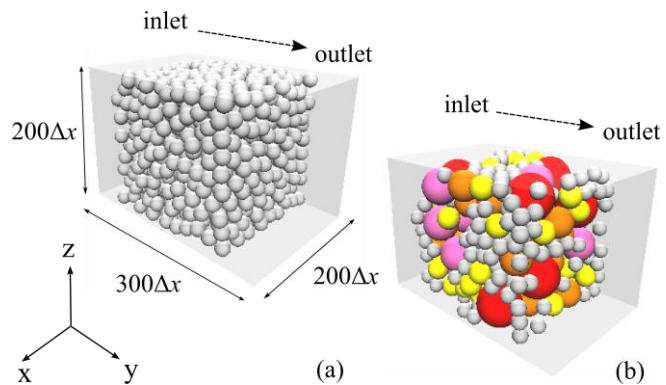


図-1 多孔質体モデル (a) case 1 (b) case 2
LBM simulation model of porous media

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

**海洋研究開発機構 Institute for Research on Earth Evolution, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

格子ボルツマン法, 浸透流, 個別要素法

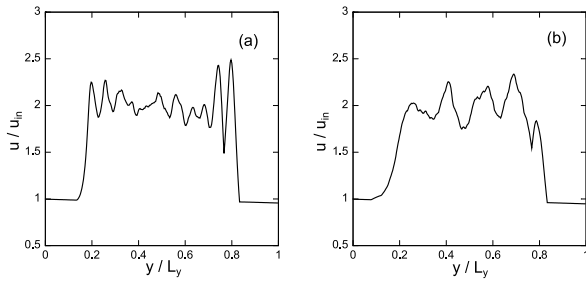


図-2 xz 断面の流速変化 (a) case 1 (b) case 2
Flow velocity distribution in xz section

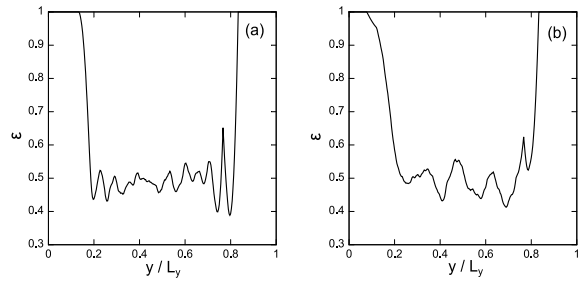


図-3 xz 断面の空隙変化 (a) case 1 (b) case 2
Porosity distribution in xz section

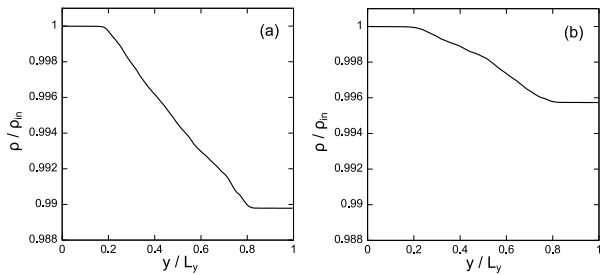


図-4 xz 断面の圧力変化 (a) case 1 (b) case 2
Pressure distribution in xz section

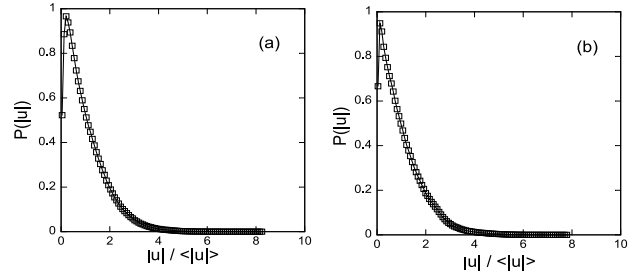


図-5 多孔質体内の流速分布 (a) case 1 (b) case 2
Flow velocity distribution in porous media

4. 透水特性の比較

図-2 は計算領域における xz 断面ごとに平均化された流速の分布を示したものである。横軸は y 方向の位置座標 y を計算領域の長さ L_y で無次元化しており、縦軸は流入速度 u_{in} を基準値として各断面の平均流速 u を無次元化している。この図より、case 1, 2 の両方で多孔質体区間において流体の通過断面積の減少による流速の増加が再現されたことがわかる。

一方、 xz 断面ごとに平均化された空隙の分布を示したのが図-3 である。縦軸の ϵ は xz 断面の面積に対する空隙の割合である。この図より、case 1 と case 2 の粒状体試料内で異なる空隙の分布が形成されていることがわかる。また、図-2 と図-3 を比較すると、流速の増加と空隙の減少が 1 対 1 に対応している。この結果は、一定流入境界による計算が定常状態に達していることを示している。

図-4 は、 y 方向の位置座標に対する圧力の値を示したものである。縦軸の圧力の値は流入口における値 ρ_m を基準値とした相対的な値である。図-4 より、両ケースとも多孔質体区間において圧力は単調に減少した。しかし、case 1 の方が case 2 よりも圧力の減少量が大きくなった。同じ空隙率でも透水特性に違いが見られた理由は、全体の空隙を構成する各々の間隙の大きさが case 2 の方が大きいことと、多孔質体区間における粒状体の総表面積が case 2 の方が小さいことである。

図-5 は、多孔質体内の流速の大きさの分布の確率密度関数 $P(|u|)$ である。横軸の流速の大きさは全体の平均値 $\langle |u| \rangle$ で正規化したものである。case 1, 2 とともに平均流速よりも小さいゼロ付近にピークを持つ分布となった。また、最大の流速の大きさは平均流速の約 8 倍となった。これらの結果は、ガラスビーズを用いた粒状体内の間隙流体の可視化実験で得られた結果²⁾と一致している。しかし、両試料の流速の大きさの分布形状に顕著な違いは見られなかった。

参考文献

- 1) Y. Fukumoto et al.: The role of rolling friction in granular packing, *Granul. Matter*, 2013.
- 2) H. Saomoto et al.: Development of LAT-PIV visualization technique for particle-fluid system, *Structural Eng. / Earthquake Eng.*, 2007