

間隙ネットワークを用いた混合多孔質媒体の透水性のモデル化 Modeling of Permeability of Porous Media with Mixed Wettabilities Using Pore-Network

○竹内 潤一郎*・住居 航**・藤原 正幸*

TAKEUCHI Junichiro, SUMII Wataru, and FUJIHARA Masayuki

1. はじめに

多孔質媒体の水理特性(水分保持特性と透水係数)は、疎水性粒子が混入することで大きく変化することが知られている^[1,2]。筆者らは、ミクロの視点から疎水性粒子を含む混合多孔質媒体の水理特性を再現するために、毛管束モデルや間隙ネットワークを用いてきた^[3,4]。パーコレーション理論に基づいた解析からは、疎水性粒子の混合割合と浸透の関係を明らかにした^[5]。これまでは生成が容易な立方格子型のネットワークを用いていたが、浸透現象はネットワークの次数(分合流点において接続する毛管の数)に影響を受けることが知られている^[6]。そこで、ここではより実際のネットワークに近い3次元 Delaunay 分割から生成されるネットワークを用いて、混合多孔質媒体の透水性に関する数値実験を行う。

2. 間隙ネットワークモデル

2-1 間隙ネットワークの作成

Al-Raoush ら^[7]が示しているように、粒子の中心座標を用いて Delaunay 分割を行い、隣接する四面体の内部の点をつなげることで間隙ネットワークを作成する。粒子の中心座標を求めるために、DEM(個別要素法)を用いて球形粒子の充填を行う。ここでは、単一粒径の粒子を用いて、矩形領域に対して自由落下による粒子充填とした。図1に粒子充填とそれに対応する間隙ネットワークを示す。

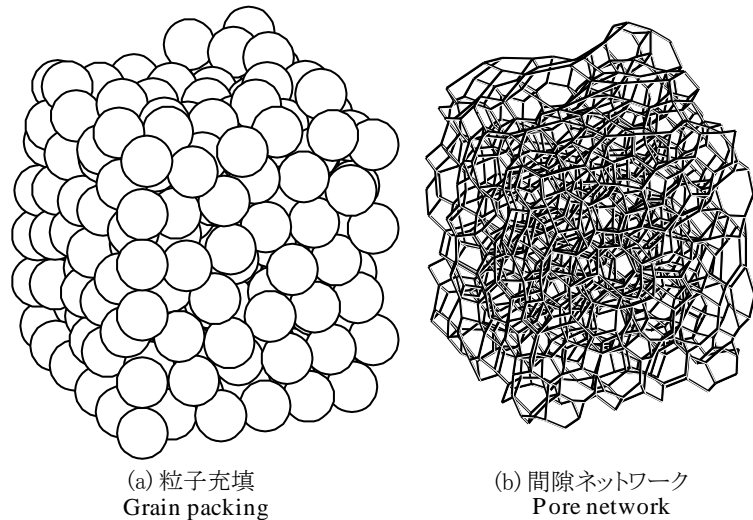


図1 多孔質媒体モデル / Porous medium model

Delaunay 分割の特徴から、各毛管は3つの粒子から構成されることになるため、含まれる疎水性粒子の数に応じて4種類の毛管が存在する。

2-2 間隙ネットワーク流れ

作成された間隙ネットワークに対して、上端と下端の分合流点をそれぞれ自由流入・流出点とし、適当な圧力水頭を課し管水路ネットワーク流れの計算を行う。管水路ネットワーク流れは、Kirchhoff の法則に基づいた Hardy Cross 法がよく用いられるが、対象としているような大規模な管水路ネットワークの場合、定式化が非常に煩雑になる。そのため、ここでは毛管内の流量を未知変数とし、分合流点における質量保存を制約条件とした、系内の総損失動力の最小化問題として定式化を行う変分原理に基づいた方法^[4]を採用する。この最小化問題は Lagrange の未定乗数法を用いて求解を行う。多孔質媒体の透水係数は、計算された総流量と多孔質媒体の断面積を用いて、Darcy 則に基づいて算出される。

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

**京都大学農学部 Faculty of Agriculture, Kyoto University

キーワード: 管水路流れ, 浸透流, 間隙構造

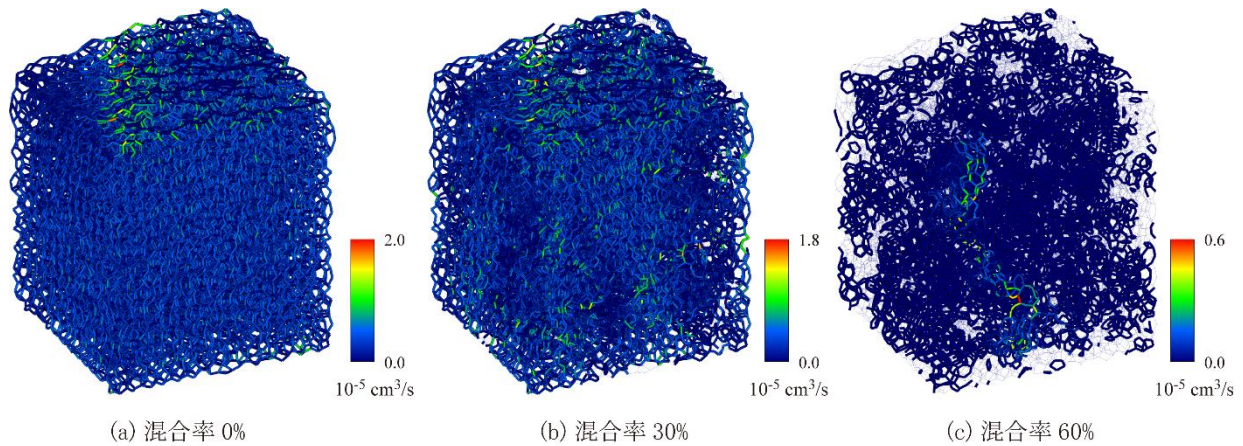


図2 様々な混合率における流量分布
Flow rate distribution at various mixture rates

3. 数値実験

粒径 0.2 mm の親水性と疎水性粒子からなる混合多孔質媒体を対象とし、流入・流出点の圧力水頭が 0 cmH₂O で水が重力浸透する状態を想定する。毛管を構成する粒子に含まれる疎水性粒子の数に応じて毛管の通水断面積が変わるものとし、ここでは、疎水性粒子が 2 つ以上含まれる毛管の通水断面積を 0 (数値計算上は十分小さい正の数) とし、1 つ以下の場合には満水状態で流れるものと仮定する。また、毛管断面は円形とし、すべての毛管の半径は等しく、0.035 mm とする。これは、粒径 0.2 mm のガラスビーズの透水係数 (1.93×10^{-2} cm/s) をおよそ再現する値である。

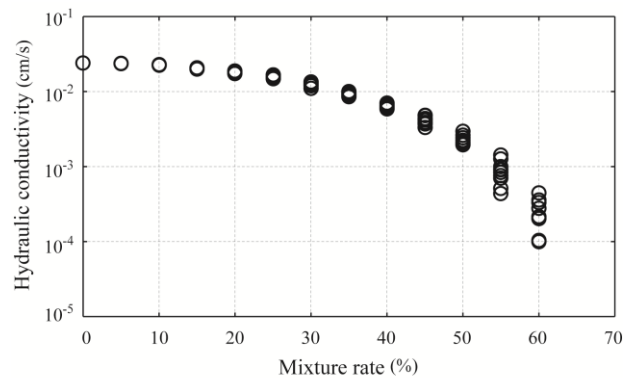


図3 混合率と透水係数の関係
Mixture rates vs. hydraulic conductivity

ここでは、4,135 個の粒子を一辺 3 mm の矩形領域に充填したときの間隙ネットワークを用いる。間隙率は約 0.36 となった。図 2 に混合率を変化させたときの流量分布を示す。また、図 3 には混合率と透水係数の関係を示す。ここでは、各混合率において疎水性粒子の位置をランダムに変化させたものを 10 回試行している。混合率 65% 以上では、ネットワーク流れは計算不能であった。これはネットワークの上端と下端の間に連結しているサブネットワークが存在していないことが原因と考えられる。

図 2 からは、混合率が 0% のときはほぼ均一に間隙内を水が流れているのに対して、混合率が増加するにつれ水みちが形成されることが分かる。特に(c)では、疎水性粒子の数が 1 つ以下の通水可能な毛管はおよそ 37% 存在するのに対して、実際に通水している (流量が 6.0×10^{-8} cm³/s, 最大流量の 1/100) のは 4% となっており、透水性に与える疎水性粒子の影響の大きさを示唆している。なお、いずれの混合率でも、Reynolds 数は最大でも 0.4 以下であり流れは層流であった。図 3 からは、混合率が 30% 程度までは透水性はあまり変化しないが、40% を越えると急激に小さくなることが分かる。また、混合率 40% における通水可能な毛管はおよそ 65% で、通水している毛管はおよそ 45% であった。

参考文献

- [1] Ustohal et al., 1998, J. Contam. Hydrol., 33, 5-37. [2] 安中, 2006, 土壌の物理性, 102, 79-86. [3] 竹内ら, 2013, 平成 25 年度 JSIDRE 応用水理研究部会講演集, 120-125. [4] 井尻ら, 2012, 平成 24 年度 JSIDRE 応用水理研究部会講演集, 92-93. [5] 竹内ら, 2013, JRCSA 第 21 回研究発表会講演要旨集, 11-12. [6] Hunt and Ewing, 2009, Percolation Theory for Flow in Porous Media, Lect. Notes Phys., Springer, 319. [7] Al-Raoush et al., 2003, SSSAJ, 67, 1687-1700.