

非ダルシー流解析モデルにおける係数モデルの比較と混合試料への適用 Comparison of coefficient models in non-Darcy flow model and its application to mixed porous media

○泉 智揮*・黒田翔汰**・山下尚之*
○Tomoki IZUMI, Shota KURODA, Naoyuki YAMASHITA

1. はじめに

粒径の大きな砂や礫中の高動水勾配下における水分移動は、ダルシー則に従わない非ダルシー流になることが指摘されている[1]. このような非ダルシー流に対して、著者らは、フォルヒハイマー則に基づく数値解析モデルを構築し、その妥当性を検証してきた[2-4]. しかしながら、解析モデルの精度向上のためには、フォルヒハイマー則における係数のモデル化が重要であることが指摘された. そこで、本研究では、単一試料および混合試料を用いた浸透実験を行い、それらの結果をもとに、解析モデルにおける係数のモデル化について、既往モデルと比較し、検討するとともに、解析モデルの混合試料に対する適用可能性についても検討する.

2. 解析モデル

非ダルシー流の支配方程式は、非圧縮を仮定した連続式と、ナビエ・ストークス式に抵抗則としてフォルヒハイマー則を付加した運動方程式である.

$$\frac{D\rho_w}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{C_r}{n_w} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_w} \nabla P + \nu_E \nabla^2 \mathbf{u} - a\mathbf{u} - b\mathbf{u}|\mathbf{u}| + \mathbf{g} \quad (2)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 t は時間、 C_r は慣性係数、 n_w は間隙率、 \mathbf{u} は平均流速ベクトル、 P は圧力、 ν_E は有効動粘性係数（水の動粘性係数 ν_w / 間隙率 n_w ）、 a, b はフォルヒハイマー則の係数、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトルである.

支配方程式の離散化には MPS (Moving Particle Simulation) 法[5]を用いる. MPS 法は、解析領域内に多数の粒子を配置し、粒子間相互作用モデルを用いて、勾配、発散、ラプラスアンといった微分演算子をモデル化し、微

分方程式を離散化する手法である.

支配方程式の境界条件には、圧力に関しては、壁面において圧力勾配ゼロのノイマン境界、自由水面において 0 Pa のディリクレ境界とする. また、流速に関しては、壁面において流速 0 m/s のディリクレ境界、流入部において流速を与えるディリクレ境界とする.

3. 浸透実験

表 1 に示す試料 1~4 (試料 1: 砂利 (大), 試料 2: 砂利 (小), 試料 3: ガラスビーズ (大), 試料 4: ガラスビーズ (小)) に対して、図 1 に示すような装置を用いて浸透実験を行う. 浸透実験では、流入側の水位を最大 6 段階 (最小動水勾配(1)~最大動水勾配(6)) に変化させ、流速 u_{obs} と動水勾配 J の関係を調べる. 流速と動水勾配はそれぞれ以下の式で求める.

$$u_{obs} = \frac{Q}{hB} \quad (3), \quad J = \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (4)$$

ここで、 Q は浸透流量 (m^3/s) で、 B は堤体幅、 L は流下方向の試料長さである. h_1 は流出部の水深、 h_2 は流入部の水深である.

表 1: 試料と物性値

	試料 1	試料 2	試料 3	試料 4
間隙率 n_w (%)	48.0	43.0	42.0	37.0
中央粒径 d_{50} (m)	1.4×10^{-2}	8.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
透水係数 k (m/s)	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-2}	1.4×10^{-2}	4.1×10^{-3}

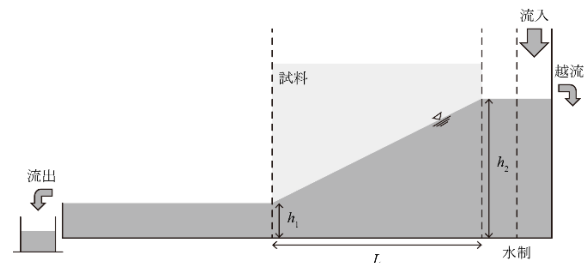


図 1: 浸透実験の概要

* 愛媛大学大学院農学研究科, Graduate School of Agriculture, Ehime University

** 愛媛大学農学部, Faculty of Agriculture, Ehime University

キーワード: 非ダルシー流, 数値解析, 粒子法

4. 解析条件

本解析では、MPS法の解像度（粒子径）を0.01 mとする。図2に、解析領域の初期状態の1例を示す。解析領域の右側は計算のための助走区間であり、浸透実験の動水勾配を再現するために、水位の段階ごとに流入高さを設定する。解析の時間ステップは、 1.0×10^{-3} から 1.0×10^{-4} 秒に設定し、定常状態まで計算する。

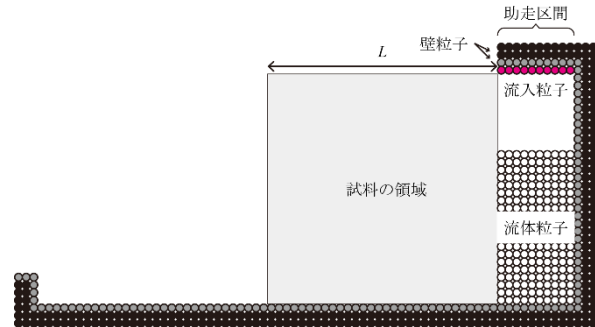


図2：解析領域の初期状態の1例

係数モデルの検討では、単一試料（試料1～試料4）の実験結果に対して、表3に示すModel 1～Model 4を用いて解析結果を比較する。

混合試料への適用可能性の検討では、成層化した土壌として上層を試料4、下層を試料3としたものを2層(A)とし、上層を試料3、下層を試料4としたものを2層(B)とする。また、混合層とし、試料3と試料4を7対3、3対7、5対5の割合で混合したものをそれぞれ混合層(A)、(B)、(C)とする。フォルヒハイマー則の係数は、浸透実験をもとにフィッティングにより求めた値を用いる。

5. 係数モデルの比較結果

表3に、各勾配における試料末端部の流速の実測値と解析値の誤差（=実測値－解析値）および絶対誤差の平均を示す。表3より、同じ係数モデルでも試料によって誤差にばらつきがあることがわかる。したがって、試料ごとにフォルヒハイマーの係数の検討が必要であると考えられる。

6. 混合試料への適用結果

表3より、全体として勾配が大きいほど誤差が大きくなる傾向があるが、フィッティングしたフォルヒハイマー則の係数を用いて比較的実測値に近い解析結果を得られることがわかる。したがって、混合試料への適用可能性は高いと考えられる。

7. まとめ

本研究では、フォルヒハイマー則の係数モデルについて検討するとともに、混合試料への適用可能性を検討した。その結果、試料ごとに係数モデルの検討が必要であること、また、混合試料への適用可能性が高いことが示された。

表2：フォルヒハイマー則の係数モデル

Model 1	泉・水田モデル[4]
Model 2	Akbari and Namin モデル[6]
Model 3	Ergun モデル[7]
Model 4	Sidiropoulou モデル[7]

表3：流速の解析値と実測値との誤差(m/s)

	勾配						絶対誤差の平均	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)		
試料1	Model 1	0.0197	0.0212	0.0190	0.0061	0.0082	-	0.0148
	Model 2	-0.0274	-0.0390	-0.0287	-0.0442	-0.0993	-	0.0477
	Model 3	-0.0274	-0.0580	-0.0390	-0.0546	-0.0979	-	0.0554
	Model 4	-0.0194	-0.0426	-0.0301	-0.0422	-0.0891	-	0.0447
試料2	Model 1	0.0184	0.0190	0.0227	0.0273	0.0282	-	0.0231
	Model 2	-0.0079	-0.0150	-0.0085	-0.0112	-0.0070	-	0.0099
	Model 3	-0.0274	-0.0268	-0.0311	-0.0213	-0.0437	-	0.0301
	Model 4	-0.0246	-0.0254	-0.0145	-0.0121	-0.0478	-	0.0249
試料3	Model 1	0.0082	0.0094	0.0101	0.0104	0.0098	0.0092	0.0095
	Model 2	-0.0047	-0.0068	-0.0141	-0.0196	-0.0255	-0.0249	0.0159
	Model 3	-0.0504	-0.0378	-0.0424	-0.0532	-0.0552	-0.0375	0.0461
	Model 4	-0.0504	-0.0068	-0.0424	-0.0532	-0.0552	-0.0169	0.0375
試料4	Model 1	0.0047	0.0057	0.0036	0.0055	0.0052	-	0.0050
	Model 2	0.0056	0.0061	0.0073	0.0072	0.0070	-	0.0066
	Model 3	-0.0038	-0.0076	-0.0012	-0.0154	-0.0204	-	0.0119
	Model 4	-0.0018	-0.0068	-0.0088	-0.0104	-0.0128	-	0.0081
2層(A)	0.0043	0.0000	0.0007	-0.0020	-0.0042	-0.0058	-	0.0028
2層(B)	-0.0027	-0.0033	-0.0056	-0.0056	-0.0061	-	-	0.0046
混合層(A)	-0.0019	-0.0072	-0.0036	-0.0060	-0.0067	-	-	0.0051
混合層(B)	-0.0026	-0.0027	-0.0049	-0.0058	-0.0057	-	-	0.0043
混合層(C)	0.0011	0.0002	0.0013	-0.0001	-0.0013	-	-	0.0024

謝辞

本研究はJSPS 科研費 17K15346 を受けた。

引用文献

- [1] Bear, J.(1972): *Dynamics of Fluid in Porous Media*, Elsevier, pp.176-184. [2] 泉 智揮(2016), 日本雨水資源化システム学会第24回研究発表会講演要旨集, pp.8-12. [3] 泉 智揮・水田純也(2017), 平成29年度農業農村工学会大会講演会, pp.666-667. [4] 泉 智揮・水田純也(2017), 第72回農業農村工学会中国四国支部講演会, pp.97-99. [5] 越塚誠一・柴田和也・室谷浩平(2014): 粒子法入門, 丸善出版, 220p. [6] Akbari, H. and Namin, M.M. (2013), *Coastal Engineering*, 74, pp.59-73. [7] Sidiropoulou, M.G., et al. (2007), *Hydrological Processes*, 21, pp.534-554.