

非ダルシー流の発生を伴う土層浸透実験

Experimental study on non-Darcy flow in soil

○泉 智揮*・下鶴瀬桂太*

○Tomoki IZUMI, Keita SHIMOUSE

1. はじめに

一般に、土壌や岩石などの多孔質体における水の流動にはダルシー則が適用される。しかしながら、河川の粗大な砂利底における地下水流れや、山腹斜面内部の粗礫部を流下する局所的な速い流れについては、ダルシー則から逸脱する可能性が指摘されている[1][2]。

本研究では、まず、透水性の異なる試料を対象に堤体の浸透試験を実施し、ダルシー則の適用限界について調べるとともに、既往の非ダルシー流に関する提案式と比較し、実験結果にもとづいた実験式を構築する。次に、斜面土層を用いた降雨浸透実験を実施し、土層中の非ダルシー流の発生状況について調べる。

2. 非ダルシー流の運動方程式

多孔質体中の非ダルシー流に対する代表的な運動方程式として、Forchheimer の式と Izbash の式が挙げられる[3]。

$$J = \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| = au_F + bu_F^2 \quad (1)$$

$$J = \left| \frac{\partial h}{\partial x} \right| = Mu_1^n \quad (2)$$

ここに、 J ：動水勾配の絶対値、 h ：水頭、 x ：位置、 u_F ：Forchheimer による流速、 u_1 ：Izbash による流速、 a, b, M, n ：係数である。係数 a, b, M, n について、これまでに理論的考察および多数の実験により検討が行われている(例えば, Sidiropoulou *et al.*, 2007; Soni *et al.*, 1978)。

3. 堤体の浸透実験

まず、透水性の異なる 5 種類の試料を図 1 のように充填した土層を作製し、流入側の水位を変化させたときの流出量を測定し、動水勾配 J と流速 u の関係を調べる。実験に用いた試料の物性値を表 1 にまとめる。

実験結果を図 2 に示す。結果から、流速をもとに計算されたレイノルズ数について見ると、0.35~11 の範囲で、ダルシー流から非ダルシー流に遷移することが示唆される。この範囲は、Bear (1972) によって指摘されている範囲と整合する。次に、図 2 から、非ダルシー流の運動方程式に含まれる係数 a, b 、および M, n を推定する。Forchheimer の式と Izbash の式について、各試料の実験結果に対して回帰分析を行い、両式の精度を決定係数で比較すると、Forchheimer の式の方が Izbash の式よりもわずかながら精度が高かった。そこで、 a, b について、粒径および間隙率をパラメーターとして一般化すると、それぞれ以下のようになる。

$$a = 365.863D^{-3.698}\phi^{25.39} \quad (3)$$

$$b = 6.99 \times 10^{-16.1132} D^{-2.66} \phi^{-24} (1-\phi)^{-1.6019} \quad (4)$$

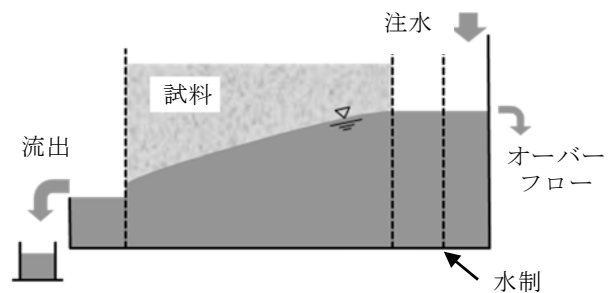


図 1：堤体の浸透実験の模式図

表 1：対象試料の物性値

	標準砂	ガラスビーズ (小)	砂	ガラスビーズ (大)	砂利
間隙率 (%)	30.7	27.0	28.0	35.0	42.7
中央粒径 (m)	2.0×10^{-4}	2.0×10^{-4}	5.4×10^{-4}	2.0×10^{-3}	1.75×10^{-2}
透水係数 (m/s)	1.47×10^{-4}	1.83×10^{-4}	3.23×10^{-4}	4.26×10^{-2}	2.38×10^{-1}

* 愛媛大学農学部, Faculty of Agriculture, Ehime University
キーワード：非ダルシー流, 浸透実験

ここに、 D ：粒径， ϕ ：間隙率である。

4. 降雨浸透実験

堤体の浸透実験で用いた試料のうち、標準砂、砂、ガラスビーズ（大）、砂利を、それぞれ、図3のような土層に均一に充填し、斜面勾配 1/10 および 1/5 の場合において降雨強度 95mm/h の雨を一定時間与え、土層からの流出量を測定する。

図4に、実験結果の一例として、砂利土層におけるレイノルズ数と1時間当りの流出量の経時変化を示す。また、表2に、本実験結果から算出した2ケースの斜面勾配に対する各試料の最大レイノルズ数を示す。3節で示したように、ダルシー流から非ダルシー流に遷移する範囲が0.35~11であることを考慮すると、対象試料の中でも粒径が大きいガラスビーズ（大）土層と砂利土層において、浸透流がダルシー則から逸脱し、非ダルシー流になった可能性が示唆される。このことについては、斜面の非ダルシー流に関する既往研究がほとんどなく、一般化するためには、今後データを蓄積する必要がある。

5. まとめ

堤体の浸透実験により、ダルシー流から非ダルシー流に遷移するのは、レイノルズ数が0.35~11の範囲であることを確認するとともに、本実験についての非ダルシー流に関する実験式を構築した。また、降雨浸透実験により、粒径が2.0mm以上の土壌では非ダルシー流が発生する可能性が示唆された。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 26850154 を受けた。

引用文献

[1] Yamada, H., Nakamura, F., Watanabe, Y., Murakami, M. and Nogami, T. (2005): Measuring hydraulic permeability in a streambed using the packer test. *Hydrol. Process*, 19, pp.2507-2524. [2] 熊沢至朗・平松晋也 (2001): 斜面土層内の大径礫（転石）が雨水の挙動や斜面の安定性に及ぼす影響に関する実験的研究, 砂防学会誌, 54 (3), pp.4-13. [3] 吉岡真弓・登坂博行 (2010): 高透水性多孔質体中の非ダルシー流れに関する考察, 地下水学会誌, 52 (3), pp.275-284. [4] Soni, J.P., Islam, N. and Basak, P. (1978): An experimental evaluation of non-Darcian flow in porous media. *J. Hydrol.*, 38, pp.231-241. [5] Bear, J. (1972): Dynamics of Fluid in Porous Media. *Elsevier*, pp.176-182.

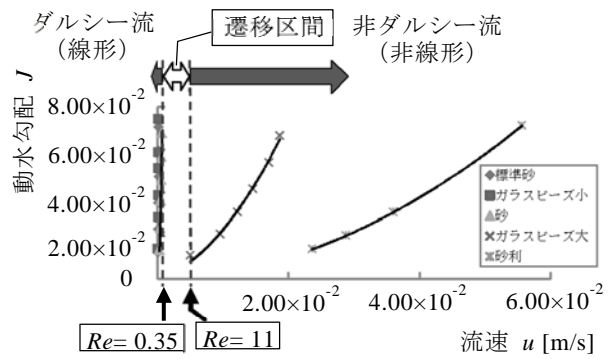


図2：動水勾配と流速の関係

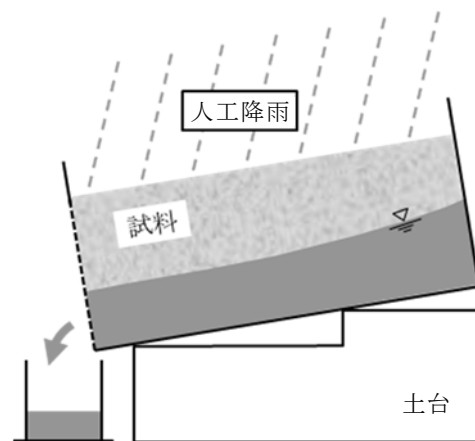


図3：降雨浸透実験の模式図

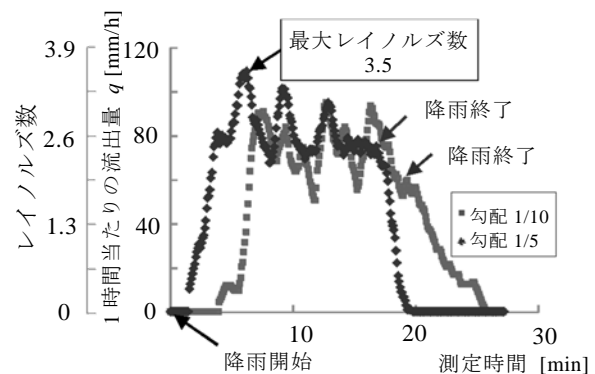


図4：砂利土層からの流出量の経時変化

表2：各試料の最大レイノルズ数

斜面勾配	最大レイノルズ数	
	1/10	1/5
標準砂	0.018	0.019
砂	0.047	0.056
ガラスビーズ（大）	0.43	0.39
砂利	3.1	3.5