

## 屈折率マッチング手法を応用した土骨格内部の浸透流の直接観察 Direct observation of seepage flow inside the soil matrix by using the method of refractive index matching scanning

○宇井智章\*・福元 豊\*・大塚 悟\*

Tomoaki Ui, Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka

### 1. はじめに

土構造物が被害を受ける要因の一つとして内部侵食が挙げられる。内部侵食は直接的に観察することが困難であり、土の侵食や流亡を扱うための基礎的な知見がまだまだ十分ではない。そのため、通常は見えない内部侵食が発生・進行する様子を詳しく観察できる方法の研究開発が必要である。

本研究では、屈折率マッチング手法（RIMS；Refractive Index Matching Scanning）と呼ばれる実験手法で、アクリル球を土粒子、蛍光粒子を浮遊させたシリコンオイルを間隙流体と仮定し、レーザー断面での間隙流体の流れを観察した。取得した撮影画像に対してPIV（Particle Image Velocimetry）に基づく画像解析を行うことで、間隙流速の大きさを直接取得する方法の検討を行った。

### 2. 屈折率マッチング手法の概要

屈折率マッチング手法とは、対象物の屈折率と対象物を浸す液体の屈折率を近づけることで、直接見えない内部の断面を可視光のもとで観察可能とする実験手法であり、内部の観察が可能となる。この手法は、屈折率マッチング手法の他に「液浸法」もしくは「浸液透光法」とも呼ばれる。ソーダガラス球、アクリル球とシリコンオイルの組み合わせ以外では、溶解石英ガラス粒子と流動パラフィンの組み合わせなども存在する。

アクリル球とソーダガラス球の屈折率マッチングの比較を行った結果<sup>1)</sup>、アクリル球とシリコンオイルの組み合わせが最も透明度が高くなる結果となった。

### 3. 模型実験

#### (1) 実験装置

図-1では本研究で使用した侵食コントロール装置（内寸：縦 60mm，横 150mm，高さ 60mm）を示している。実験装置は一定流量ポンプ，侵食コントロール装置，循環用タンク，PIVレーザー，高速度カメラの五つの部分により構成され，流量ポンプ，侵食コントロール装置，循環用タンクはチューブ（内径：6.4mm）によって接続されている。侵食コントロール装置内には，土粒子と見立てたアクリル球を充填した。循環用タンクにシリコンオイルを貯水し，流量ポンプの回転数を変更することにより，流量を調節することができる。

#### (2) 実験方法

侵食コントロール装置内に土粒子と見立てたアクリル球を入れ，シリコンオイルを流入した。アクリル球（比重：1.2，屈折率：1.49，直径：8mm）とシリコンオイル（KF56A）（屈折率：1.50）を使用し，ポンプの流量（ml/min）は325.6（100rpm），605.7（200rpm），870.9（300rpm），1126.7（400rpm）と変更しながら実験を行った。PIVレーザーを侵食コントロール装置の上部に設置し，間隙流体を観察する断面は撮影する側面から奥行き方向に約5mm，15mmの断面の二か所とし，ロングパスフィルター越しに高速度カメラを用いて流体の観察を行った。

\*長岡技術科学大学大学院 環境社会基盤工学専攻 Nagaoka University of Technology

屈折率マッチング，浸透流，画像解析

#### 4. 実験結果

ここでは、流量 1126.7ml/min (400rpm) で図-2の赤枠で示した領域(縦 25mm, 横 25mm)を観測した結果を示す。取得した画像を基に PIV 解析を行った結果、図-3のような間隙流速のベクトル図を得ることができた。

また、解析で得られた間隙流速ベクトルの大きさを頻度分布で表すと、図-4, 図-5のようなグラフが得られた。この分布は回転数を変更しても同様の特徴を持った分布が得られたことがわかる。実験で得られた速度の平均値と最大値の比が 7~8 であり、既往の研究の頻度分布<sup>2)</sup>と本実験から得られた頻度分布を比較すると、最頻値が平均値よりも小さい値でみられるという点で共通していることがわかった。また、図-5のグラフを既往の研究と比較すると、図が左右対称でピーク値が 0 付近となっている点で類似しており、流体が y 軸の正負方向に均等に流れているため、左右対称のグラフが得られたと考える。さらに、成分別の流速について着目すると、鉛直成分の平均値が 0.72mm/s であり、水平成分の平均値が 1.20mm/s となった。それらの比が約 1.7 であり、既往の研究<sup>2)</sup>の数値の約 2.0 とおおよそ同様の値となった。

今回の実験で使用した装置や材料の数値を基に流量 1126.7ml/min における多孔質層のレイノルズ数を算出したところ 0.153 であるため、それより小さな流量の条件でもレイノルズ数は 1 より小さくなり、今回の実験は層流の条件であることがわかる。

#### 5. まとめ

以上の検討の結果、本研究ではレーザー断面での間隙流速の大きさを直接取得することができた。今後は流量を変更させて層流から乱流に変化させた場合についても検討する。また、今回のアクリル球の粒径はすべて均一であったが、粒径を分布させその場合における流体の変化も観察する予定である。さらに、今回の実験条件を模した格子ボルツマン法による数値解析結果<sup>3)</sup>との比較についても現在検討中である。

#### 参考文献

- 1) 宇井智章, 清野 颯, 福元 豊, 大塚 悟: 屈折率マッピング手法による地盤中の間隙流速の直接計測, 第 35 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, 2017.
- 2) Remi Beguin, Pierre Philippe and Yves-Henri Faure: Pore-Scale Flow Measurements at the Interface between a Sandy Layer and a Model Porous Medium: Application to Statistical Modeling of Contact Erosion, Journal of Hydraulic Engineering, 139(1): 1-11, 2013.
- 3) 福元 豊, 宇井智章, 清野 颯, 大塚 悟: 土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その 2: 模型実験と数値解析の比較, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.

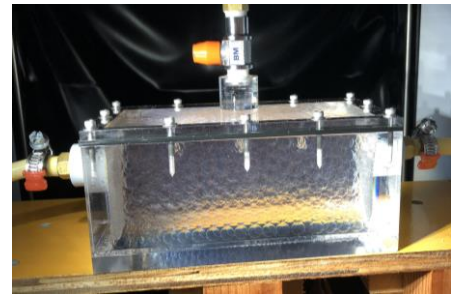


図-1 侵食コントロール装置  
Erosion Control apparatus

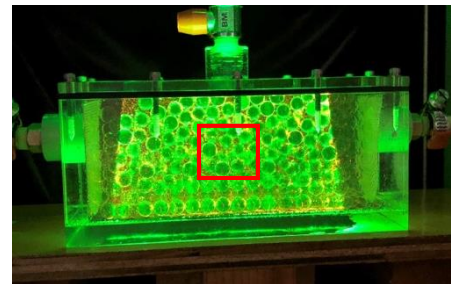


図-2 レーザー断面の様子  
Laser Cross Section

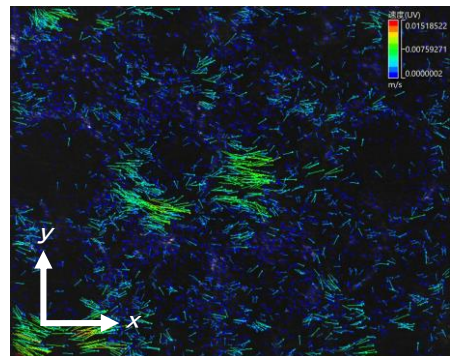


図-3 画像解析で得られた  
間隙流速のベクトル図  
Vector Diagram of Pore  
Velocity by Image Analysis

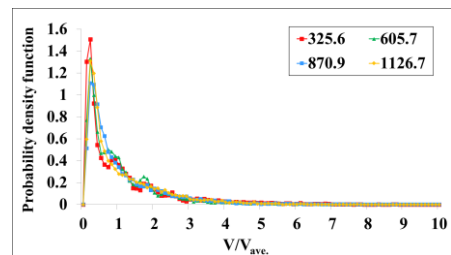


図-4 間隙流速の頻度分布  
Frequency Distribution of  
Pore Velocity

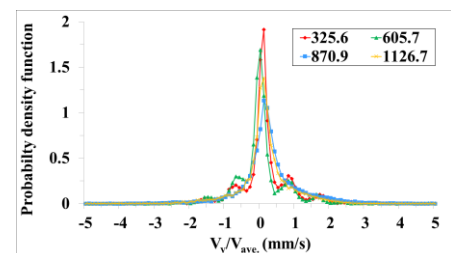


図-5 y 軸方向の頻度分布  
Frequency Distribution of y  
direction Pore Velocity