

# 透明地盤実験による多孔質体流れの屈曲度の計測

長岡技術科学大学 ○ 渡邊 尚幸

山本 七輝

福元 豊

大塚 悟

## 1. はじめに

地盤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。直接観測することが困難な土中で起こる現象を可視化するために、屈折率マッチング手法 (RIMS, Refractive Index Matching Scanning) と呼ばれる実験手法を用いて、アクリル球を用いた透明地盤実験を行った。今回の実験では地盤を想定した多孔質体内の間隙流体の水理的な屈曲度(Tortuosity)に着目した。任意断面を撮影できる装置を開発し、PIV (Particle Image Velocimetry) に基づく画像解析を行うことで、実験的に多孔質体流れの屈曲度を直接計測する方法について検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験手法

RIMS 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、内部を可視化させる方法である。この手法に適したアクリル球とシリコンオイルの組み合わせを用いて実験を行った。

実験装置は、一定流量ポンプ、侵食コントロール装置 (内寸: 縦 60 mm, 横 150 mm, 高さ 60 mm), 循環用タンク, PIV レーザー, 高速度カメラ, 光学フィルターの 6 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によって接続されている。侵食コントロール装置内にはアクリル球を充填する。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 (rpm) を制御することにより、流量を調節することができる仕組みになっている。

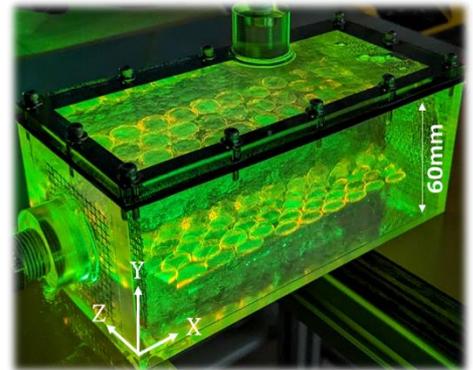


図-1 実験装置

### 2.2 実験方法

アクリル球 (直径 9.5mm×392 個, 8.0mm×531 個) 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。ポンプからの一定流量は 110.2ml/min, 589.5ml/min, 1188.7ml/min で実験を実施した。図-1 のように PIV レーザーを侵食コントロール装置の横から照射し、光学フィルター越しに高速度カメラを用いて浸透流の観察を行った。その後、取得した撮影画像に対して PIV を用いて間隙流速の大きさを取得した。

## 3. 実験結果

縦 40mm, 横 40mm の領域について計測した結果を示す。取得した画像を基に、侵食コントロール装置の下から 25mm から 35mm の範囲を 1mm 間隔で撮影し、PIV 解析を行った。今回の実験で得られる屈曲度の概念図を図-2 に、取得した断面のベクトル図を図-3 に示した。

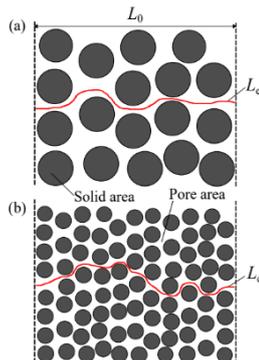


図-2 屈曲度の概念図

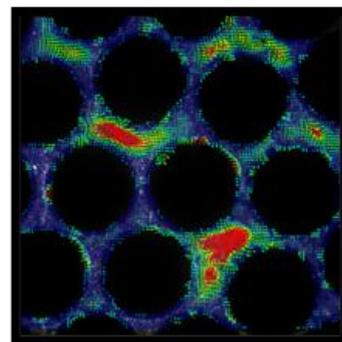


図-3 X-Z 断面 (X 方向) の流速のベクトル図

$\tau_h$ は水理的屈曲度を示しており、多孔質体流れの屈曲度の指標を表すのに用いられる。 $\tau_h = \Sigma v / \Sigma v_x$ で表される。ここで、 $v$ : 浸透流速の大きさ、 $v_x$ : X方向の浸透流速である。

図-4 に解析によって得られた間隙の流速を確率密度関数として頻度分布図を表した。横軸は X 方向の流速  $v_x$  を X 方向の流速の平均値  $\langle v_x \rangle$  で正規化した値で、縦軸はその頻度を表している。既往の研究において流入方向である X 方向における浸透流速の頻度分布は 0~1 の間に頻度のピークを持ち、ピーク中心とした非対称なグラフとなることが知られている<sup>2)</sup>。図-4 は 0 付近でピークを持つ非対称なグラフになっていることが分かり、既往の研究と同様の傾向が得られた。この結果から、今回の実験は妥当であるといえる。この図からは撮影する断面が変化しても同じ流入流量であれば同様な頻度分布を示していることがわかった。

図-5 に各流入流量の条件におけるレイノルズ数  $Re$  の分布を示した。多孔質体流れが層流から乱流に移り始めて、 $\tau_h$ が減少し始める  $Re=1$  付近を調べた。一般に、 $\tau_h$ が大きいほど  $Re$  が小さくなる傾向にある<sup>3)</sup>。今回の実験で得られた結果として流入流量 589.5ml/min 付近を境界として層流と乱流に分かれていることがわかる。

図-6 に各断面における屈曲度の分布を示した。図-5 と照らし合わせると断面によって差はあるが  $\tau_h$  が大きいほど  $Re$  は小さくなる傾向が得られた。図-6 からは、 $\tau_h$  は 1.1~1.3 の間で分布しており、どの断面においても屈曲度の傾向には大きな変化は見られないことがわかった。しかし、流速が大きいケースほど  $\tau_h$  の値は小さくなっていることが分かる。これは流速が小さいケースに比べて X 成分の正の方向に流れようとする力が強くなり、X 方向、Z 方向ともに屈曲しにくくなっているからであると考えられる。

#### 4. まとめ

本実験では透明地盤実験により、多孔質体流れの屈曲度の計測を行った。今後の研究では X-Y 方向からの撮影を行い、3次元モデルの構築や複数の粒度分布においての実験を行う予定である。また、本研究では「高橋産業経済研究財団研究助成」、「前田記念工学振興財団研究助成」の支援を受けた。

#### 参考文献

- 1) 山本七輝, 大下倭駆, 福元 豊, 大塚 悟: 水理的屈曲度に着目した透明砂による異粒径の境界部の観察, 地盤工学研究発表会発表要旨集, Vol.58, [13-4-1-02], 2023.
- 2) Aminpour, M., Galindo-Torres, S. A., Scheuermann, A., & Li, L. (2018). Pore-scale behavior of Darcy flow in static and dynamic porous media. *Physical Review Applied*, 9(6), 064025.
- 3) Jinlong Fu, Hywel R. Thomas, Chenfeng Li: Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation, *Earth-Science Reviews* 212(2021) 103439.

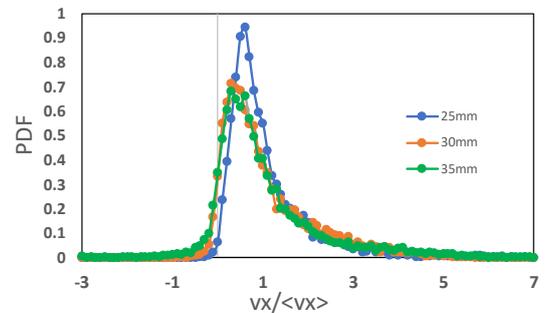


図-4 X方向における浸透流速の頻度分布

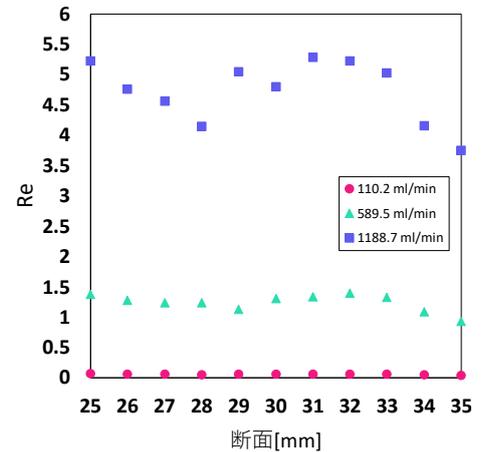


図-5 各断面におけるレイノルズ数

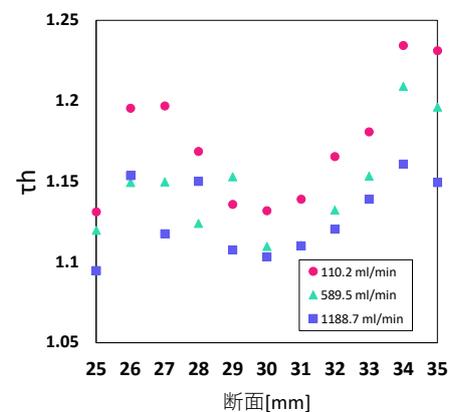


図-6 各断面における屈曲度