

ミクロな情報に基づいた多孔質体流れの屈曲度の実験的評価

環境防災研究室 山本 七輝

主査 福元 豊

副査 大塚 悟 池田 隆明

1. はじめに

浸透流などの多孔質体中の流れは幅広い研究分野で扱われ、土木工学の分野では土、岩石、コンクリート、アスファルトなどが構造物を構築している多孔質材料である。このような建設材料の経年劣化はその内部の流体移動と密接な関係があるため、多孔質体中の流体挙動を詳細に理解することが工学的に重要である。そこで、透明砂を用いて本来観察できない多孔質体流れを可視化し、粒子画像流速測定法 (PIV) によって画像解析を行うことで流速を測定した。本実験では多孔質体流れの屈曲度を表す水理屈曲度 T_h と、多孔質体構造の屈曲度を表す幾何屈曲度 T_g に着目し、実験的に粒子の分布条件や流量が多孔質体流れへ及ぼす影響を検討した。

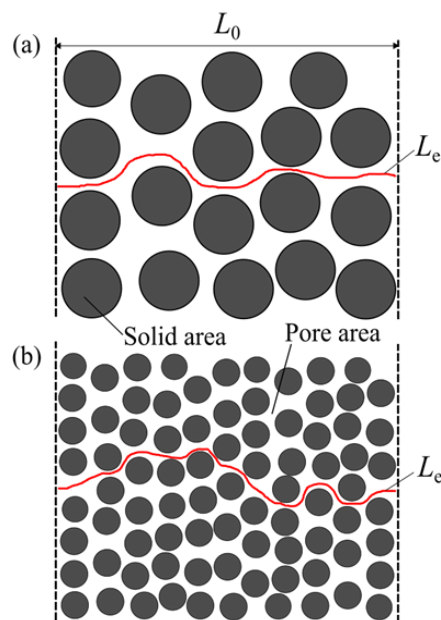


図-1 屈曲度 T の概念図

2. 屈曲度

本研究では、多孔質体の特徴を示す屈曲度 T という指標に着目した。 T は粒状体の組成に依存する本質的な性質であり、岩石や土壌などの多孔質体の輸送特性を予測するための重要なパラメータとして広く使用されている。図-1に T の概念図を示した。 T は、多孔質領域の長さ L_0 に対する実際に多孔質体中を物質が移動する経路の長さ L_e の比として式 (1) で定義されている。

$$T = \frac{L_e}{L_0} \geq 1 \quad (1)$$

一般的に、 T は浸透流の複雑さを示す幾何学的な量または流れの特性として理解されており、 T が透水係数 k に大きな影響を与えることが知られている。例えば、多孔質体中の流体の透過性を表

す Kozeny-Carman の式は、 T を考慮すると式 (2) で与えられる。

$$\kappa = \frac{\phi^3}{cT^2S^2(1-\phi^2)} \quad (2)$$

ここで、 κ は固有浸透率、 c は Kozeny 定数、 ϕ は多孔質体の間隙率、 S は多孔質体の単位質量当たりの表面積の比に等しい比表面積である。

また、固有浸透率 κ を用いて透水係数 k は式 (3) で表される。

$$k = \frac{\kappa \rho g}{\mu} \quad (3)$$

ここで、 ρ は流体の密度 [kg/m^3]、 g は重力加速度 [m/s^2]、 μ は流体の動粘度 [m^2/s]である。

また、 T には複数の指標が存在しており、本研究

では多孔質体流れの特性を表す水理屈曲度 T_h と多孔質体の構造を表す幾何屈曲度 T_g について着目し、考察を行った。

水理屈曲度 T_h は式 (4) で定義される。

$$T_h = \frac{\sum \|v\|}{\sum v_x} \quad (4)$$

ここで、 v は多孔質体中の流速の大きさ [m/s], v_x は x 方向の流速 [m/s]であり、 T_h の値が大きいくほど屈曲した流れであることを示している。また、数値解析上の既往研究からレイノルズ数 Re が増加するほど T_h は減少し¹⁾、充填率が大きくなるほど T_h の値も大きくなる関係²⁾があることが知られている。

また、幾何屈曲度 T_g を表す式は複数存在しており表-1に示した。水理屈曲度 T_h と同様に幾何屈曲度 T_g の値が大きいくほど屈曲した構造であることを示している。

3. 実験の概要

3.1 実験方法

透明砂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、本来観察することはできない内部の観察を可能とする手法である。本実験では屈折率の近いアクリル球とシリコンオイルを土粒子と間隙流体とみなして実験を行った。図-2に示すように、実験装置は一定流量ポンプ、アクリル装置(内寸:縦60mm,横150mm,高さ60mm)、循環用タンク、PIVレーザー、高速カメラ、光学フィルターによって構成されている。アクリル装置内にアクリル球を充填し、循環用タンク内にはトレーサー粒子の入ったシリコンオイルを貯水し、一定流量ポンプの回転数を制御することによってアクリル装置内の流量を調節する仕組みとなっている。

3.2 実験条件

本実験では図-3のような2ケースの粒子配置において実験を行った。図-3(a)は直径9.5mmの

表-1 多孔質体の幾何屈曲度 T_g

No.	式
1	$T_g = 1 + \frac{(\pi - 2)\sqrt{1 - \phi}}{\sqrt{2\pi\sqrt{3}}}$
2	$T_g = \frac{\begin{bmatrix} 6\sqrt{3q^2 + 12q + 8} \\ -(3q^2 + 12q + 4)\arcsin \frac{2}{\sqrt{3}(q + 2)} \\ -6(q + 2)^2 \arctan \frac{-2}{\sqrt{3q^2 + 12q + 8}} \end{bmatrix}}{8\sqrt{3}(q + 2)}$; $q = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{\sqrt{3}\pi}{1 - \phi}} - 2$
3	$T_g = \frac{3 - \phi}{2}$

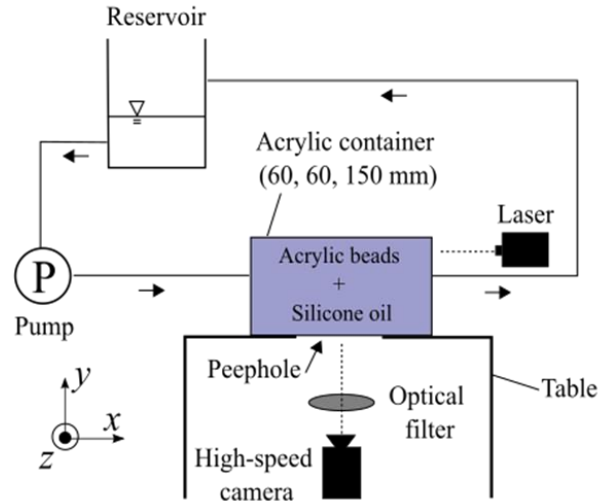


図-2 実験装置

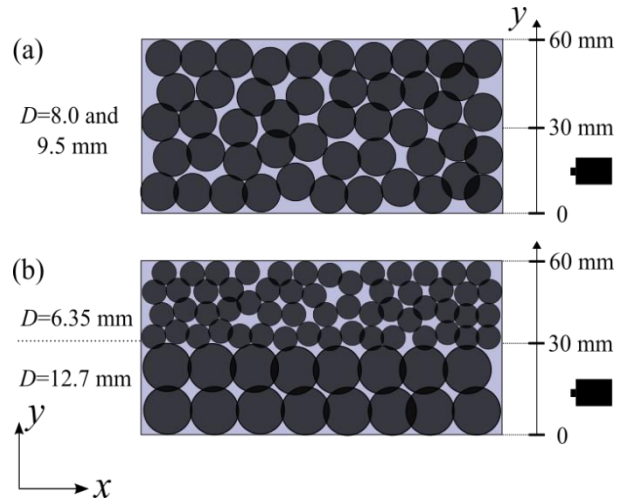


図-3 粒子配置 (a)一層 (b)二層

アクリル球 392 個と直径 8mm のアクリル球 531 個を充填した一層構造である。規則的な粒子配置にならないように大きさの近い粒子を混ぜ合わせている。図-3 (b) は装置の下部に直径 12.7 mm のアクリル球を 159 個、上部に直径 6.35 mm のアクリル球を 1111 個充填した二層構造である。ポンプの流量 (ml/min) は、110.2, 589.5, 1188.7 の 3 通りについて実験を行った。110.2, 589.5 ml/min のときは層流, 1188.7ml/min のときは層流と乱流の遷移域といった流れになっている。図-4 に示すように、アクリル装置に PIV レーザーを照射し、光学フィルターを取り付けた高速度カメラによって x - z 断面の撮影を行った。流れを観察する断面は $y = 25 \text{ mm} \sim 35 \text{ mm}$ 間を最小 0.5 mm 間隔で観察した。その後、撮影画像に対して PIV に基づく画像解析を行い流速を取得した。図-5 に一層構造の $y = 25 \text{ mm}$ 断面における粒子配置と、解析により取得した流速のコンター図を示した。

4. 実験結果

図-6 に流入流量が 110.2 ml/min のときの、流速の頻度分布を表す確率密度関数を示した。図-6 (a) が x 方向、図-6 (b) が z 方向の結果である。横軸は x 方向の流速 v_x と z 方向の流速 v_z を x 方向の流速の平均値 \bar{v}_x で正規化した値で、縦軸はその頻度を表している。多孔質層の流速の頻度分布は既往の研究³⁾から、 x 成分の流速は v_x / \bar{v}_x が 0~1 の間で頻度のピークを持ち、 z 成分の流速は v_z / \bar{v}_x が 0 付近に頻度のピークを持つ分布になっていることが分かっている。本研究でも同様の頻度分布の概形が得られた。

図-7 に T_h と x 方向の平均流速 \bar{v}_x の関係を示した。図-7 (a) が一層構造、図-7 (b) が二層構造の結果である。一層構造では \bar{v}_x が大きくなると T_h が直線的に減少しており、二層構造では \bar{v}_x が等しくても T_h の値が異なる点が複数存在していることが分かる。つまり、多孔質体流れは多孔質体の構造に大きな影響を受けると考えられる。また、

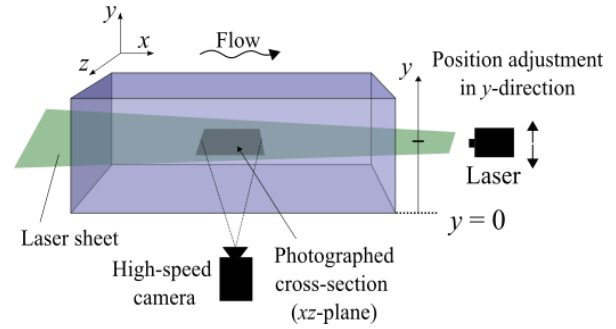


図-4 撮影断面

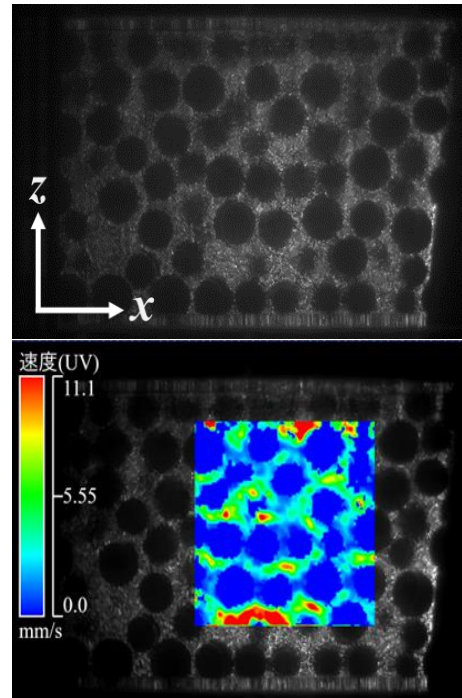


図-5 $y = 25 \text{ mm}$ 断面 (一層構造)

上: 粒子配置 下: コンター図

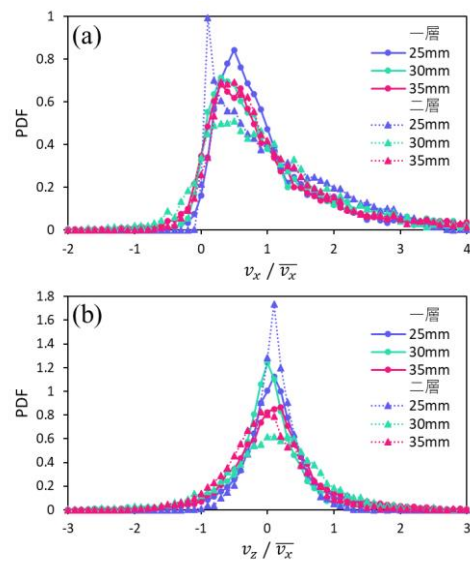


図-6 流速の頻度分布 (a) x 方向 (b) z 方向

どちらの構造も流入流量が大きくなるとグラフの形状が変わらずに右肩下がりに移動していることが分かる. このことから, Re と T_h の関係について既往研究¹⁾と同様の傾向が得られた.

図-8に各 x - z 断面における T_h と充填率の関係を示した. 図-8 (a) が一層構造, 図-8 (b) が二層構造のときの結果である. 図-8 から一層構造の断面では T_h の値は充填率の増減に従っており, 充填率と T_h の関係について既往研究²⁾と同様の傾向が得られた. しかし, 二層構造のとき $y = 31\text{mm}$ 付近で充填率が減少しているにも関わらず T_h が増加する結果が得られ, 特に 1188.7 ml/min の結果が顕著であった. これは $y = 31\text{ mm}$ 付近が二層構造の境界部であることと, 流れが層流と乱流の遷移域であったため起きた現象であると考えられる.

5. まとめ

本実験では水理屈曲度 T_h と幾何屈曲度 T_g に着目し, 粒子配置が一層構造と二層構造のときの多孔質体流れの観察を実施した. 一層構造では数値解析を中心とした既往研究^{1) 2)}と同様の関係を実験から確認することができた. しかし, 二層構造の層境界部では充填率が減少しているにも関わらず T_h が増加する結果が得られ, 数値解析を中心とした既往研究²⁾と異なる傾向が得られた. そのため, T_h と T_g の値には充填率だけではなく粒子配置や Re 等の他のパラメータが影響している可能性があることが判明した.

参考文献

- 1) M. Aminpour, S. A. Galindo-Torres, A. Scheuermann, L. Li : Pore-Scale Behavior of Darcy Flow in Static and Dynamic Porous Media, Phys. Rev. Applied 9, 064025, June 2018.
- 2) Jinlong Fu, Hywel R. Thomas, Chenfeng Li : Tortuosity of porous media: Image analysis and physical simulation, Earth-Science Reviews 212 (2021) 103439.

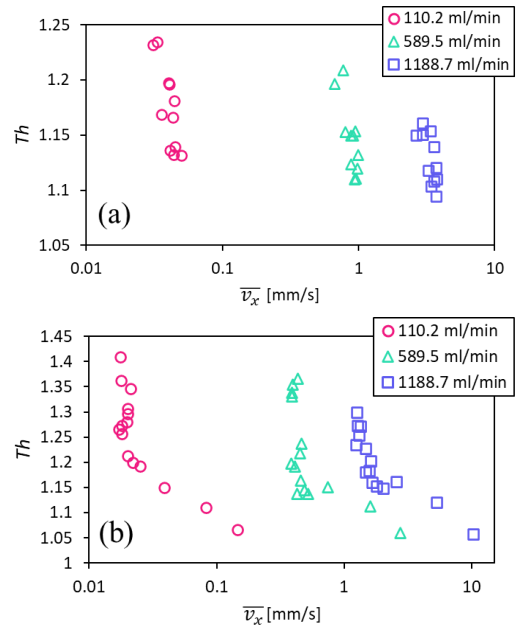


図-7 T_h と \bar{v}_x の関係 (a)一層 (b)二層

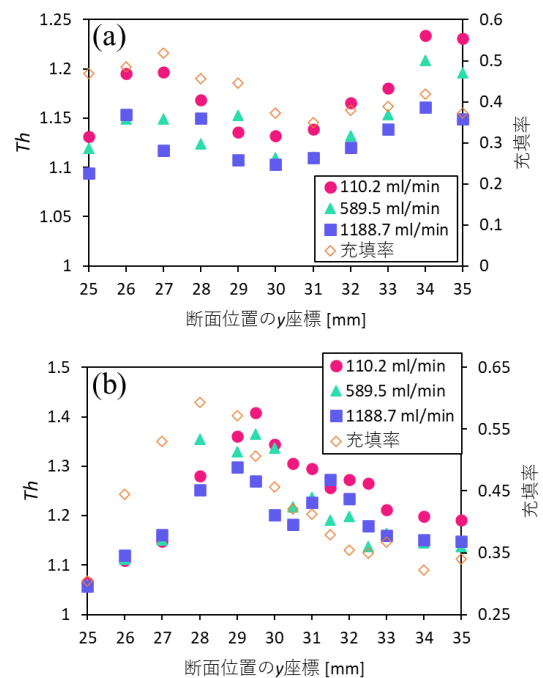


図-8 各断面の T_h と充填率 (a)一層 (b)二層

- 3) 山本七輝, 大下倭駆, 福元 豊, 大塚 悟 : 水理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.