

地盤中のミクロな流れ場の実験的把握と浸透流解析の Validation

Experimental understanding of microscopic flow field in soil and validation of seepage flow analysis

長岡技術科学大学 准教授 福元 豊

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究の目的は、豪雨時の堤防破堤につながる内部侵食が発生・進行する様子を詳しく観察できる方法を開発することである。屈折率マッチング技術に基づく模型実験手法のさらなる高度化とともに、模型実験と同一条件での再現解析を実現し、微視的な情報に基づいて結果を比較することにより、数値解析モデルの妥当性確認 (Validation) を目指した。その結果、模型実験では、異なる粒径を持つ土粒子の層境界部における浸透流の直接的な観察方法を新たに構築した。これにより、3次元的な土粒子構造と間隙流速を同時に構築するための連続したスライス画像を得ることができた。また、多孔質体の輸送特性を表す指標の1つである水理的屈曲度と幾何的屈曲度に着目した分析の結果、層境界部とその他の領域ではレイノルズ数と水理的屈曲度の関係に違いが見られることがわかった。一方、再現解析については十分に進捗しなかったため、今回得られた模型実験結果に基づいて、引き続き取り組む予定である。

研究予算は、PMMA ビーズ、シリコンオイル、蛍光トレーサー粒子などの消耗品に使用した。研究に必要な装置として、水平向き浸透流観察装置を複数作製した。最終項に示した文献は、研究期間内に得られた成果である。これらの研究成果は、貴財団の助成金交付により、得られたものである。各文献の謝辞にその旨を記載した。この場を借りて深く御礼申し上げる。なお、本研究は、大学院生2名の協力のもとに実施した。

(実験調査によって得られた新しい知見)

● 屈折率マッチング技術に基づく模型実験

屈折率マッチング技術とは、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 (PMMA ビーズ) 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。実験装置は一定流量ポンプ、浸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、光学フィルターによって構成される。浸食コントロー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で、浸食コントロール装置内の流量を調節する仕組みである。

本実験では図-1 のような2ケースの粒子配置において実験を行った。図-1 (a) は直径 9.5mm のアクリル球 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-1 (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．図-2 に示すように，浸食コントロール装置に 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-3 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．

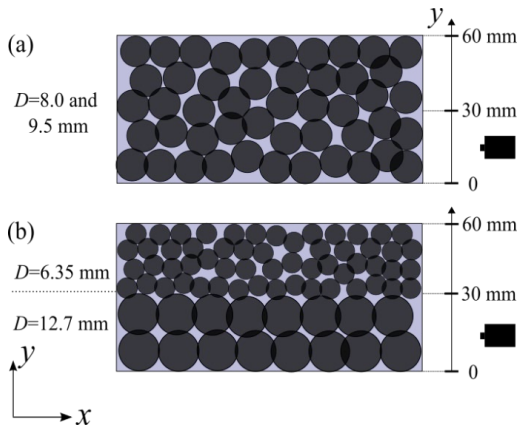


図-1 粒子配置 (a)一層 (b)二層

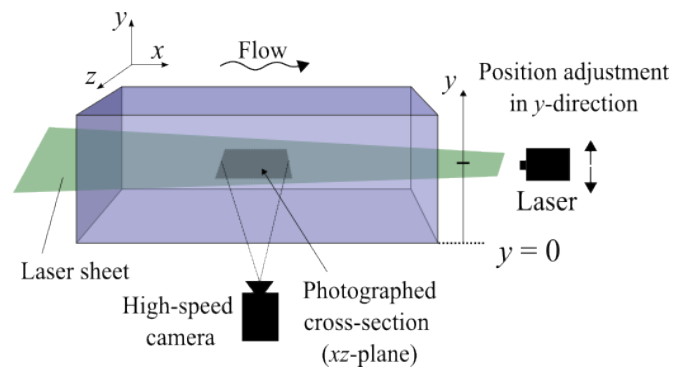


図-2 実験装置の概図

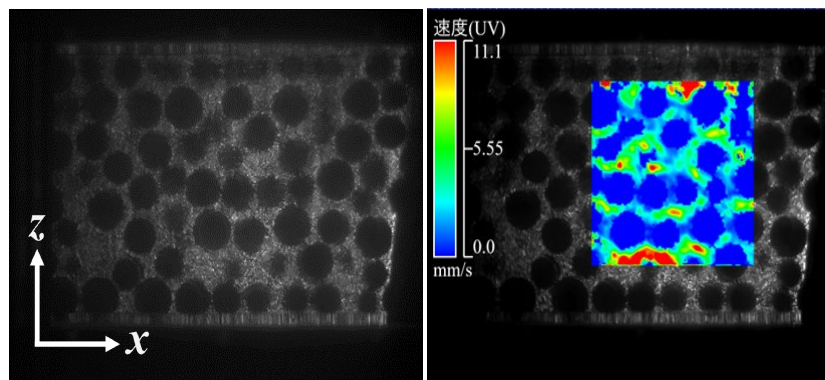


図-3 $y = 25 \text{ mm}$ 断面（一層構造）左：粒子配置 右：コンター図

● 土粒子間隙中の流れのミクロな視点での分析

本研究では多孔質体流れの屈曲度を示す水理屈曲度 T_h に着目した． T_h を表す式は複数存在するが，今回は式(1)を用いた．

$$T_h = \frac{\sum \|\mathbf{v}\|}{\sum v_x} \quad (1)$$

ここで， $\|\mathbf{v}\|$ は x - z 断面における流速の大きさ， v_x は x 方向の流速である． T_h は値が大きいほど流れの屈曲度が大きいことを示している．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，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 $0 \sim 1$ 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-4 に T_h と x 方向の平均流速 \bar{v}_x の関係を示した．図-4 (a) が一層構造，図-4 (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，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-5 に各 x - z 断面における T_h と充填率の関係を示した．図-5 (a) が一層構造，図-5 (b) が二層構造のときの結果である．図-5 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かかわらず 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．

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かかわらず 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わかった．

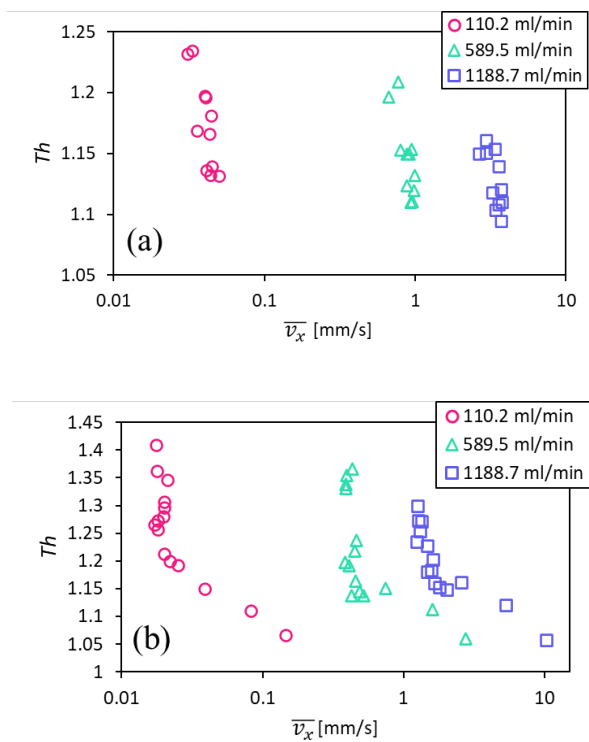


図-4 T_h と \bar{v}_x の関係 (a)一層 (b)二層

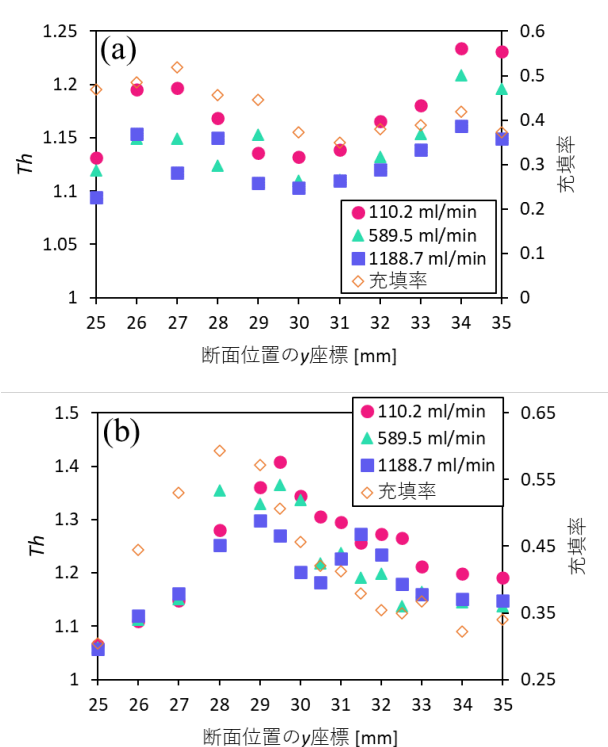


図-5 各断面の T_h と充填率 (a)一層 (b)二層

(発 表 論 文)

1. 渡邊 尚幸, 山本七輝, 福元 豊, 大塚 悟: 透明地盤実験による多孔質体流れの屈曲度の計測, 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, Vol.41, [III-209], 2023.
2. 渡邊 尚幸, 山本七輝, 福元 豊, 大塚 悟: 屈曲度に着目した粒状多孔質体中の流れの可視化計測, 地盤工学研究発表会発表要旨集, Vol.59, 2024. (発表予定)