

屈折率マッチング技術を用いた地盤内部における浸透流速の3方向成分計測の高度化

長岡技術科学大学大学院 修士2年 平田 壮

主査 福元 豊

副査 大塚 悟, 池田隆明

1. はじめに

浸透や侵食は土木構造物に被害を与える要因の一つであるが、土中で起きる現象のため直接観察することが困難である。また、土粒子と浸透流の相互作用のため、地盤工学と流体力学を使う必要があり基礎的な知見が乏しく、未だに解明されていない点が多い。地盤内部を観察するための手法として、MRIやX線CTを用いる例が多数ある。これらは、大変有用な実験手法ではあるが、容易に実験を行うことが難しい。また、短い時間間隔での撮影に向いておらず、浸透流速や土粒子の移動速度を求めることに不向きである。そこで、本研究では屈折率マッチング技術を用いて直接観察ができない内部の浸透流を可視化させる手法を確立させ、簡易的な模型実験を通して特性を把握することを目的としている。これまでは、カメラ1台によって浸透流を平面的に捉える2方向成分の計測を行ってきた。同様の事例¹⁾は地盤工学分野だけに留まらず数多く存在する。しかし、3次元のデータとして観察する研究例はほとんど無いため、研究の余地が残されている。そこで今年度は特に、カメラ2台によるステレオ撮影^{2) 3)}や、複数断面を組み合わせることによって、浸透流を立体的に捉える手法についての検討を進めた。

2. 模型実験

(1) 屈折率マッチング技術

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、通常は見ることのできない内部を可視化させる実験方法である。本研究では固体材料にアクリル球、液体材料にシリコンオイルを用いた。

(2) 実験方法

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2台、光学フィルターの6つの部分により構成されている。侵食コントロール装置内にはアクリル球(平均粒径8.61mm; 径9.5mm×390個, 径8.0mm×564個)を充填し、循環用タンクにシリコンオイ

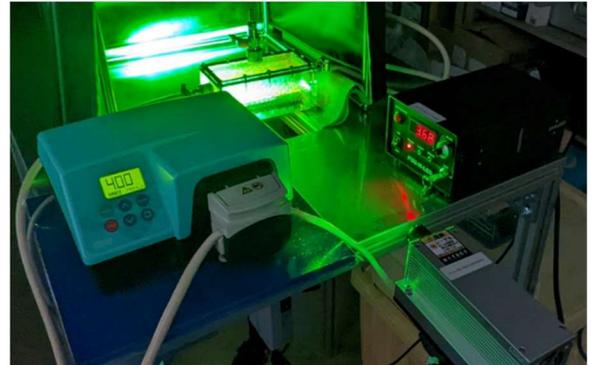


図-1 水平レーザー断面の撮影の様子

ル(動粘度 $1.5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, 密度 $995 \text{kg}/\text{m}^3$)を貯水し、一定流量ポンプの回転数を制御することにより、装置内の流量を調節する仕組みとなっている。一定流量は $103.9 \sim 1224.8 \text{ml}/\text{min}$ (多孔質体の粒子レイノルズ数で算出した結果、 $Re=1.065 \sim 12.56$)の間で層流状態から乱流状態まで3パターンでの計測をした。装置内の流れに対して、PIVレーザーを侵食コントロール装置に照射し、光学フィルター越しに高速度カメラで撮影を行い、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に基づく画像解析を行うことで、間隙流速の大きさをベクトルとして取得した。

本実験での撮影条件としては、水平方向浸透流を観察する侵食コントロール装置に対して、①容器手前から2cm, 3cmの鉛直なレーザー断面に対して、カメラ2台のステレオ撮影による3方向成分計測、②容器手前から2cm, 3cmの鉛直なレーザー断面に対してカメラ1台による2方向成分計測、③容器下面から2cm, 2.5cm, 3cmの鉛直なレーザー断面に対してカメラ1台による2方向成分計測を実施した。(図-1)また、今回新たに鉛直上向き浸透流を観察する実験装置について、検討および計測も実施した。

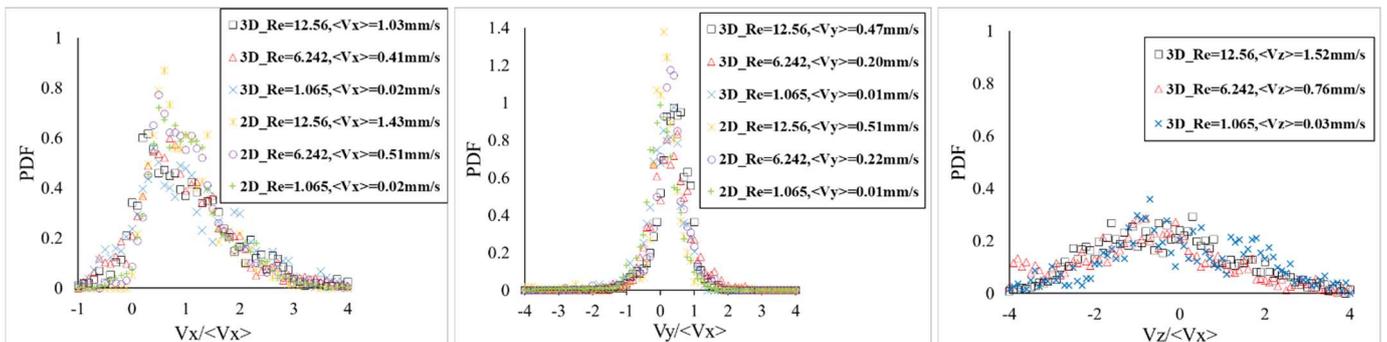


図-2 各方向成分の頻度分布 (左: X方向成分, 中心: Y方向成分, 右: Z方向成分)

3. 実験結果と考察

まず、鉛直なレーザー断面を3方向成分計測および2方向成分計測を実施した結果を図-2に示す。ここでは、紙面の都合上、3cm断面の結果を用いる。図から、X方向成分の頻度分布に関しては、いずれも0.5~1付近にピーク値をとり、正方向に緩やかで最大流速が平均流速 $\langle V_x \rangle$ の3~4倍程度、負の方向には急になっておりマイナスの成分が少し計測されるという結果となっている。また、Y方向成分の頻度分布と3方向成分計測の結果算出したZ方向成分の頻度分布に関しては、ともに0付近をピーク値とした左右対称な形状をとっていることが分かる。しかし、Y方向の浸透流速の成分が $\langle V_x \rangle$ の1~2倍程度となっているのに対して、Z方向の浸透流速は $\langle V_x \rangle$ の3~4倍程度の値をとっていることが分かる。ともに浸透流の流入方向に垂直な成分だが、浸透流速の頻度分布の形状に違いが出ている。また、図-2中に記載した $\langle V_y \rangle$ と $\langle V_z \rangle$ を比較しても、 $\langle V_z \rangle$ の方がいずれの流量においても3倍程度大きい値が得られていることが分かった。これは、重力の影響や上から蓋で抑え込んでいる影響により、粒子同士の接触点水平方向に比べ鉛直方向の方が多くなっているため、水平方向が流れやすくなっていると思われる。また、一般的に異方透水性として、水平方向の透水係数の方が、鉛直方向に比べて大きくなるということが知られている。これらの理由から今回の結果においてもZ方向とY方向の流速や頻度分布に違いが生じたと考えられる。

また、装置の改良を実施し容器下面から2方向成分計測でX-Z断面を観察した。この実験で3成分計測のレーザー断面を出入りする成分、すなわちZ方向成分の浸透流速の妥当性の確認や浸透流の頻度分布の違いを検証した。ここでも、3cm断面の結果を図-3に示す。これまでの鉛直向きのレーザー断面と同様な傾向を持った頻度分布が得られたことが分かる。X方向成分の頻度分布は0~1をピーク値に取る不規則な分布となっておりその形状は図-2で示した頻度分布と類似している。Z方向成分の頻度分布については、0を中心とした左右対称な形状となっていることは共通しているが、ピーク値の高さや横の広さが異なっている。平均流速と比べると、X-Z断面で計測したZ方向の浸透流速より、X-Y断面で計測した際の断面を出入りするZ方向の浸透流速の方が、2~4倍程度大きく出ていることが分かった。ただ、これまでの結果から得られたY方向の浸透流速 $\langle V_y \rangle$ と同流量で比較すると、図-4に示した $\langle V_z \rangle$ の方が1.5倍程大きくっており、このことから、いずれにしても異方透水により水平方向の方が流れやすくなっており、異方透水について確認ができた。

加えて、今回複数の断面からの情報を得ることができたため、データ整理の方法として図-4に示すように複数のデータを成分ごとに組み合わせて1つの立体領域内の浸透流の様子を疑似的に再現することを検討した。実際に領域内の浸透流の様子を把握するためには、3方向から複数断面撮影したデータを用いるべきだが、今回は簡易的に2つの方向から計測した計5種のデータを用いて成分ごとに整理した。ここでは結果を割愛するが、将来的には断面の数を増やし、より多くの情報から立体領域内の浸透流の様子を再現することを目指す。

4. まとめ

昨年度より検討している浸透流の3方向成分計測に関して、カメラ2台を用いたステレオ撮影を用いて浸透流を3方向の成分として直接観察することができた。加えて、複数方向から連続したレーザー断面を撮影し、その情報を組み合わせることで疑似的に立体領域内の浸透流を把握することができた。また、浸透流速の異方性として、水平方向よりも鉛直方向の浸透流速の方が大きくなるということが分かった。

今後の展望としては、3方向から連続した10断面程度ずつを撮影し、粒子配置までを含めた立体的な浸透流のデータを取得、数値解析の結果との比較にも使用できる制度の高いデータを構築する。また、現在の条件において確認できた異方透水性に関して、アクリル球の粒子分布や配置、流量を変化させた場合についても検討する。さらに、検討段階で終わってしまった鉛直方向の浸透流計測装置の改良を進めて解析に回せるデータを得ることも進めていく。

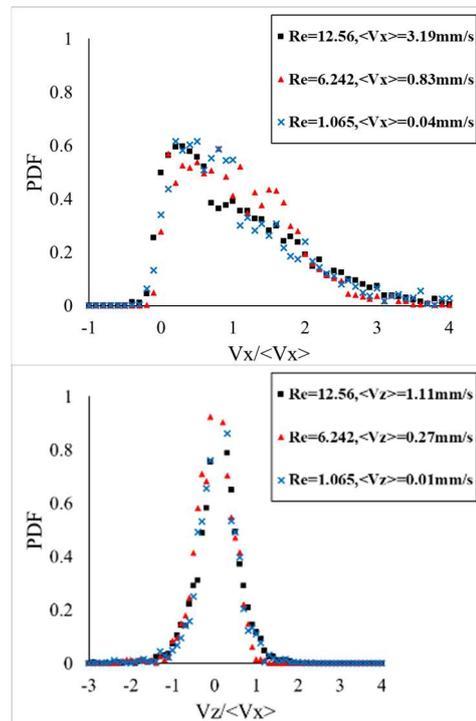


図-3 頻度分布（上：X方向成分，下：Z方向成分）

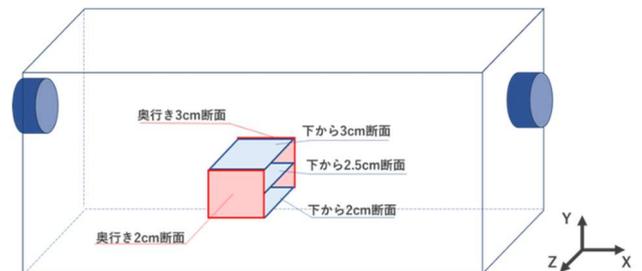


図-4 立体領域の再現の概要図

参考文献

- 1) Zeng, F., Guo, Z., Wang, L., Gao, Y., & Liu, Z.: Experimental investigation on macro-mesoscopic characteristics of seepage flow in transparent porous media, Applied Ocean Research 105, 102424, 2020.
- 2) 平田壮, 関口泰徳, 福元豊, 大塚悟: 透明砂を使った土粒子の間隙における浸透流速の3方向成分の計測, 地盤工学研究発表会発表要旨集, Vol.56, オンライン開催, 2021.
- 3) 平田壮, 大下倭駆, 福元豊, 大塚悟: 屈折率マッチング技術とステレオ撮影を併用した浸透流速の3方向成分の計測, 農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, Vol.78, [1-03], オンライン開催, 2021.