

# RIMSによる土骨格内部の浸透流の直接計測

環境防災研究室 修士2年 宇井智章  
主査 大塚 悟  
副査 豊田浩史, 宮木康幸, 福元 豊

## 1. はじめに

近年、大型台風や集中豪雨による降雨量の増加に伴い、河川堤防の破堤等自然災害が頻繁に発生している。最近では、2018年7月に西日本豪雨による大雨で破堤が発生し、浸水被害が生じた。このような土木構造物の損傷を引き起こす原因の30~50%が地盤の内部侵食によるものとされている。この内部侵食は、浸透流によって土構造物内部の土粒子が浸透流とともに徐々に流亡する現象を指す。内部侵食現象は地盤内部で発生するため被害の状況を直接的に確認することができない。また、土粒子の固相と浸透流といった液相の相互作用を扱うため、未だに解明されていない点が多い。内部侵食の発生・進行メカニズムを知る上で土粒子とその間隙の微視的なスケールでの観察が大きな足掛かりである。

そこで、本研究ではRIMS (Refractive Index Matching Scanning) 技術を用いて直接見ることができない内部の浸透流を可視化させる実験方法を確立させ、簡易的な模型実験を通して浸透流の特性を把握することを目的としている。地盤内部を観察する方法としてはMRIやX線CT等が存在するが、比較的高価であり容易に実験を行うことができない。また、レイノルズ数による流体の状態に応じた浸透流の特性を把握する研究が存在しているが、層流状態から乱流状態まで一貫して幅広い範囲で観察した研究は存在しておらず検討の余地が残されている。

以上のことより、層流状態から乱流状態まで幅広く流体の状態を変化させた場合の土骨格内部の浸透流の挙動を観察することを目的として模型実験を行った。

## 2. RIMSの概要

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、光の反射を防ぎ、通常は見ることのできない内部を可視化することができる方法である。間隙を飽和させ対象物を透明にする技術を用いて、侵食コントロール装置内の対象物を透明にするものである。液体に浸した対象物を透明にする方法では、液侵法と同じものである。実験で使用する材料の選定としてアクリル (PMMA) 球とソーダーガラス球の屈折率マッチングの比較を行った結果 (図-1)、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。よって、本実験ではアクリル球とシリコンオイルの組み合わせで実験を行うことにする。

## 3. 模型実験

### (1) 実験装置

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) (図-2)、循環用タンク、PIVレーザー、高速カメラ、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、土粒子と見立てた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。また、回転数の多いポンプや内径の大きなチューブを使用することで、より大きな流量で実験することが可能である。



図-1(a) PMMA球

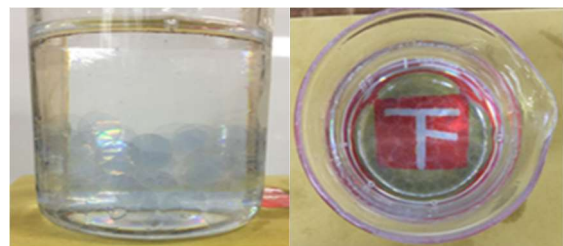


図-1(b) ソーダーガラス球

図-1 屈折率マッチングの比較

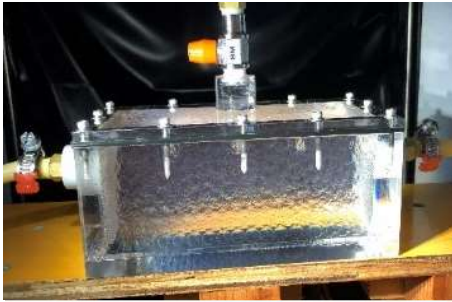


図-2 侵食コントロール装置

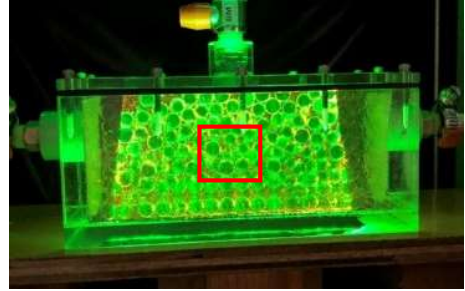


図-3 レーザー断面の様子

## (2) 実験方法

まず、侵食コントロール装置内に土粒子と見立てたアクリル (PMMA) 球 (比重: 1.2, 屈折率: 1.49, 直径: 8mm) を入れ、シリコンオイル

(KF56A) (屈折率: 1.50) で飽和させ、内部を可視化させた状態にする。ここでの間隙比は 0.685 である。次に、流体と同じ速度で流れる微粒子として薄紅色のトレーサー粒子を混入させる。このトレーサー粒子は緑色の光が当たると橙色に発光する。本実験では散布したトレーサー粒子の移動を浸透流の動きと仮定している。橙色以上の波長の光のみを通す光学フィルターを使用すると、橙色に光っている浸透流だけを映し出すことが可能になる。このように浸透流のみを映し出し、ポンプの流量 (ml/min) を 59.57 (15rpm) ~ 1091.41 ml/min (400rpm) に変更させ、PIV レーザーを侵食コントロール装置の上部から放射させ、高速度カメラを用いて浸透流を撮影する。PIV レーザーを当てる断面は、撮影する側面から奥行き方向に約 10mm としている。最後に、撮影画像を用いて PIV 解析を行い、浸透流のデータを取得する流れになっている。

## 4. 実験結果と考察

ここで、ポンプ流量 (ml/min) 59.57 ( $Re = 0.480$ ), 175.06 ml/min ( $Re = 2.063$ ), 1091.41 ml/min ( $Re = 15.118$ ) で図-3 の赤枠で示した領域 (縦 30mm, 横 30mm) を計測した結果を示す。取得した画像を基に PIV 解析を行った結果、浸透流のベクトル図を得ることができた。また、解析で得られた浸透流のベクトル図を頻度分布で表すと、図-4 のようなグラフが得られた。これは水平方向と鉛直方向をそれぞれについて、速度の頻度の分布を示したグラフで、確率密度関数としている。横軸がそれぞれの流速を水平方向流速の平均値 ( $\langle v_y \rangle$ ) で正規化した値、縦軸はその頻度を表している。実験で得られた水平方向流速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見られるという点で共通していることがわかった。また、図が左右対称でピーク値が 0 付近となっている点でも既往の研究と類似している。このように、通常の正規分布では平均値がピークになる分布が多いが、実験から得られた分布は平均値よりも小さな値でピークがある点が特徴で、偏りの

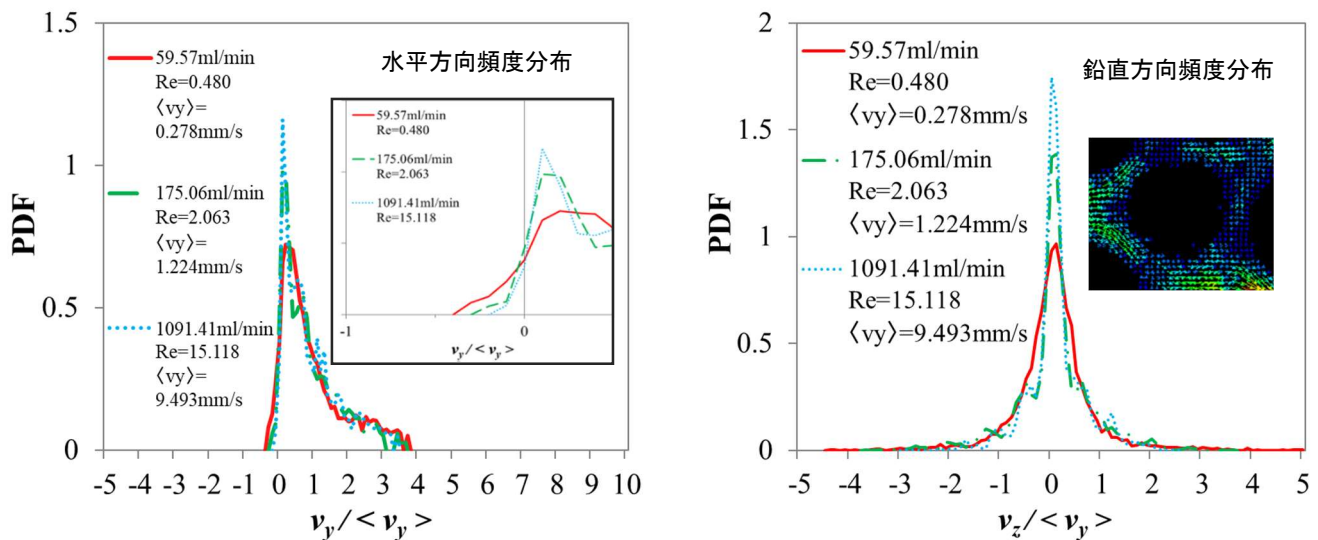


図-4 模型実験から得られた頻度分布

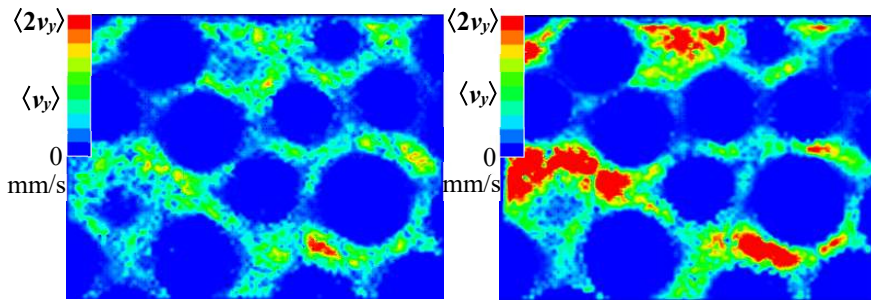


図-5 Re=2.063 の分布  
(流量 175.06 ml/min)

図-6 Re=15.118 の分布  
(流量 1091.41 ml/min)

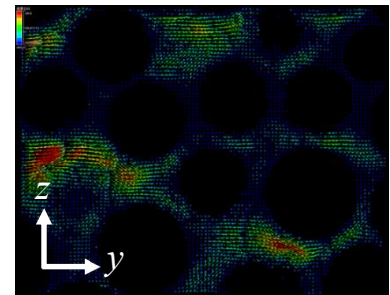


図-7 間隙の浸透流速分布

あるグラフが得られた。この分布は流量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確認できる。さらに、成分別の流速について着目すると、既往の研究<sup>2)</sup>では層流状態での鉛直成分の平均値と水平成分の平均値の比が約 2.0 であり、本研究の層流状態である流量 59.57 ml/min における水平成分と鉛直成分の比が約 2.0 とおおよそ同等の値となった。

各流量におけるグラフ形状の比較を行うと、水平方向、鉛直方向の両方において流量が多くなるにつれてピーク値が上昇している。これは、流量が大きくなるに伴い、浸透流の流速が平均流速より比較的小さな値や大きな値が多く存在することからピーク値が大きいグラフが得られたと考える。図-5、図-6 に 175.06 ml/min ( $Re=2.063$ ) と 1091.41 ml/min ( $Re=15.118$ ) の流速分布図を示す。微小領域で浸透流の流速に着目すると、175.06 ml/min ( $Re=2.063$ ) よりも 1091.41 ml/min ( $Re=15.118$ ) の方が、つまり流量が大きくなるにつれて浸透流の平均流速場（緑色）の領域が減少し、高流速場と低流速場（赤色と青色）が増加している。このことから、大きなレイノルズ数を有する流体の傾度分布はピーク値が増加する傾向にあるといえる。また、間隙中の浸透流速分布（図-7）に着目すると、流体の中央部分は流速が大きく、両端の壁付近は流速が小さいことがわかる。これはハーゲンポワイズユの流れのようになっている。

また、アクリル球の粒径が均一で数値解析と比較がしやすい条件であり、同じスケールで比較ができそうなので今回の実験で得られた結果を用いて数値解析との比較も行ってみた<sup>3)</sup>。数値解析では格子ボルツマン法を用いて層流状態での結果を用いている。ピーク値や最大値など定量的には正確に一致はしていないが比較を行うと同様の特徴を持った分布が得られそうだということがわかった。

多孔質体の流れにおいて、 $Re \leq 1$ では層流状態、 $1 < Re < 10$ では層流乱流状態遷移域、 $10 \leq Re$ では乱流状態とされている。流量 59.57 ml/min 時ではレイノルズ数が 0.480 であり、その流量以下では層流

状態である。流量 1091.41 ml/min 時のレイノルズ数は 15.118 であり、この流量以上では乱流状態であることがわかる。これより、本実験では層流状態から乱流状態まで観察できたといえる。

## 5. まとめと今後の展望

実験結果から、多孔質体流れの層流状態から乱流状態まで ( $Re = 0.480 \sim 15.118$ ) 浸透流を観察することができた。レイノルズ数の大きさの変化に伴って、間隙中の流速の分布傾向が変化することを実験的に確認することができた。さらに、本実験の実験材料は間隙を正確に算出するために粒径が均等のアクリル球を用いており、数値解析と比較を行った結果、数値解析と検証可能なデータを本実験から得ることができた<sup>3)</sup>。

今後の展望としては、浸透流計測手法を確立することができたため、ポイリング観察実験を進展させ土粒子と浸透流の両方を観察し、レイノルズ数や流速とどのような相関があるか検証する必要がある。また、模型実験で用いる材料をオイルよりも動粘度の低い水を使ってジェルボールと水に変更して実験を行い、本結果と比較し考察する。さらに、現状では、数値解析は層流状態の条件でしか解析を行わず、乱流状態まで解析を行うためには乱流モデルを組み込む必要があり、本研究で得られた結果を参考にして今後進めていき解析と実験の両方で精度を向上させていく。

## 参考文献

- 1) 宇井智章, 清野 颯, 福元 豊, 大塚 悟: 土骨格中の浸透流の直接的観察手法の検討その 1: RIMS を用いた模型実験, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018
- 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

