

透明砂を使った浸透流速の3方向成分の計測

環境防災研究室 ○関口 泰徳

主査 福元 豊

副査 大塚悟, 杉本光隆, 池田隆明

1. はじめに

土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。しかし、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、土粒子の侵食や流亡と浸透流という地盤工学と流体力学の相互作用を扱うための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。今年度は透明砂を使った浸透流の観察を2成分計測りだけでなく、複数のカメラを用いてステレオ撮影を行い、断面を通り抜ける方向に作用する奥行き方向の流れを含めた3成分で計測し、2成分計測と同様の観察が可能であるか検証し、奥行き成分の流れの特徴について観察した。

2. 模型実験

(1) 透明砂

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、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。実験で使用する材料の選定を行った結果、アクリル球とシリコンオイルの組み合わせを用いた。

(2) 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60mm、横150mm、高さ60mm）（図-1）、循環用タンク、PIVレーザー、シャイニングフラグアダプターを装着した高速度カメラ2台、光学フィルター、侵食コントロール装置の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、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、一定流量ポンプの回転数（rpm）を制御することにより、装置内の流量を調節することができる仕組みになっている。

(3) 実験条件

侵食コントロール装置内に、土粒子と見立てたアクリル球（直径9.5mm:300個、8.0mm:450個）を充填する。結果の比較で用いるポンプの流量は103.9ml/min ($Re=1.819$)、608.9ml/min ($Re=10.66$)、1224.8ml/min ($Re=21.45$)である。PIVレーザーを侵食コントロール装置の上部から照射し、ロングパスフィルター越しに2台の高速度カメラでステレオ撮影（図-1）を行い、浸透流の観察を行った。撮影断面については容器手前から2cm、3cm、4cmで撮影を行った結果、

2cmの断面を観察することにした。ステレオ撮影はカメラ2台と撮影範囲に設けた基準点となす角が90度となるように配置（図-1）し、角度をつけることで生じるレーザーシート面のピントのずれをシャイニングフラグアダプターで補正した。撮影範囲と解析範囲については既往の研究²⁾において影響がないことがわかっているため、容器全体を撮影し、容器中心位置の40mm×40mmの範囲内について流速解析を行った。同様の条件でカメラを1台に切り替えて2成分計測も行った。得られた撮影画像の1つを（図-2）に示す。

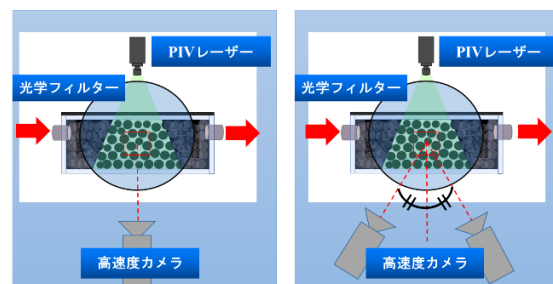


図-1 これまでの撮影方法(左)とステレオ撮影(右)

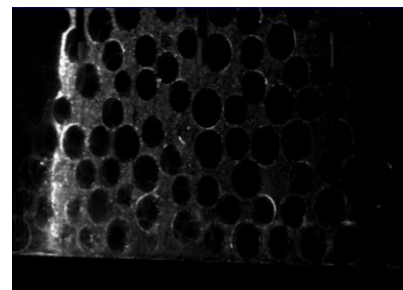


図-2 撮影画像(CAMERA 1: 右側配置)

3. 実験結果と考察

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PIV解析を行った結果、3成分計測のベクトル図（図-3）を得ることができた。カラーバーの範囲についてはX方向成分の流速の平均値の10倍を最大値とした。ベクトル図については、3成分で構成されたベクトルを出力しているため、X成分の最大値を超えるベクトルが描画されている。撮影断面に対して左右の移動をX成分、上下の移動をY成分、撮影断面に入り出りする移動をZ成分とする。X成分とY成分において、3成分計測が2成分計測と同様の結果を得られるか確認するために、2成分計測と3成分計測のX方向への平均流速について比較を行った。（表-1）。

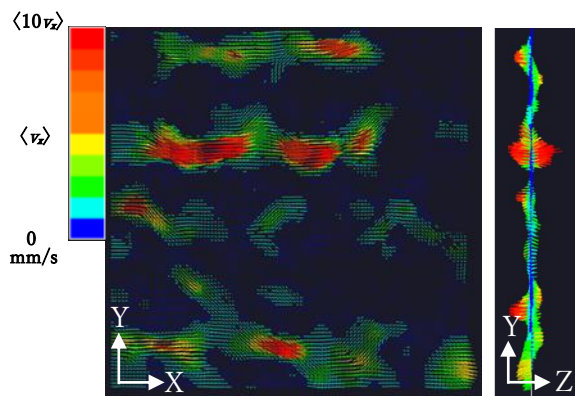


図-3 三成分計測による浸透流のベクトル分布

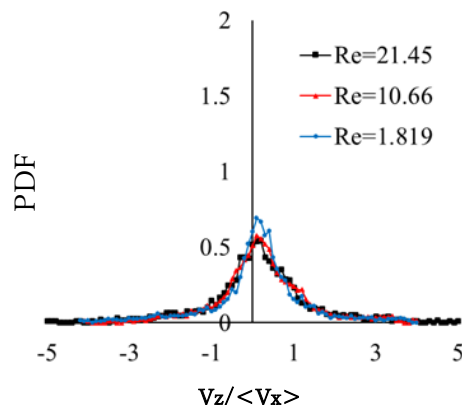


図-4 Z成分の流速頻度分布

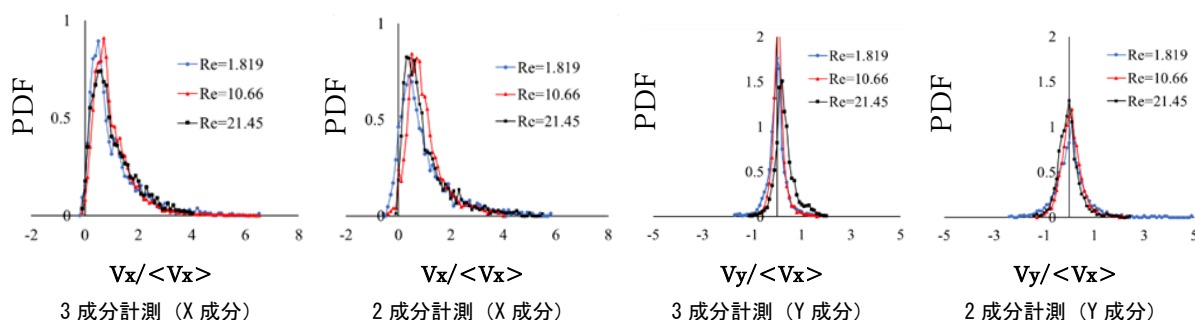


図-5 3成分計測と2成分計測による流速頻度分布の比較

理論値はアクリル球による流速の減衰を考慮していないため、実際の流速は理論値に比べて非常に小さくなるのが既往の研究²⁾により確認できている。

表-1より2成分計測と3成分計測でX方向の平均流速 $\langle V_x \rangle$ の値は非常に近くなっていた。解析範囲が同様である場合、3成分計測を行っても2成分計測と同様の平均流速が得られることがわかった。次に流速の頻度分布について比較した。

表-1 X方向平均流速 (mm/s)

流量 (ml/min)	V_x (理論値)	3D: $\langle V_x \rangle$ (40mm)	2D: $\langle V_x \rangle$ (40mm)
103.9	1.009	0.026	0.025
608.9	5.914	0.555	0.579
1224.8	11.896	1.425	1.450

流速頻度分布については、縦軸がX方向の平均流速 $\langle V_x \rangle$ を正規化した値、横軸が各成分の流速の頻度を示している。X成分とY成分の流速頻度分布については、ピーク値や最大流速が同様の挙動を示していた。2成分計測における既往の研究²⁾と比較しても、同様の挙動がみられたことから本実験における3成分計測の結果は妥当性が高いと考えられる。

3成分計測の結果について妥当性を確認することができたため、本実験によって新たに得ることができたZ成分のデータを確認して、奥行き方向の流れの特徴

の把握を行った。Z成分の流速頻度分布はピーク値が0でX方向の平均値とZ方向の最大値の比が4程度であった、Y成分については最大値の比が2程度でとがった分布を示すのに対し、Z成分では裾が広い分布を示していた。このことから、断面を出入りする流れは、断面を上下に移動する流れに比べて、速い流れが多くなると考えられる。

4. 結論と今後の展望

3成分計測と2成分計測で同様な平均流速が得られたこと、流速の頻度分布が同様の挙動を示したことから本実験における3成分計測結果の妥当性は高いといえる。また新たに得られた撮影断面を出入りするZ成分の流速について頻度分布を得ることができた。

浸透流のステレオ撮影については既往の研究が少ないため、今後は実験回数を重ね結果の妥当性をさらに強めていく必要がある。

6. 参考文献

- 1) 関口泰徳, 塩原祐希, 福元豊, 大塚悟: 屈折率マッチング技術を用いた浸透流の直接観察: 土粒子配置を変えた検討, 第54回地盤工学研究発表会, 2020.
- 2) 平田壮, 関口泰徳, 福元豊, 大塚悟: 屈折率マッチング技術を利用した浸透流速の計測における撮影領域の影響, 第38回土木学会関東支部新潟会 2020
- 3) 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.