

透明土を用いた異なる粒径の境界部における浸透流の微視的観察

環境防災研究室 修士2年 大下俊駆
 指導教員 福元 豊
 大塚 悟

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。そこで透明土を用いて、浸透流の観察を試みた。今年度より用いた新たな装置、手法で鉛直レーザー断面、水平レーザー断面の撮影を行った。特に、粒径が異なる地盤の浸透流を観察するため、透明土を用いて異なる粒径の境界部を再現し観察した。また、層境界部の面に対して水平方向と鉛直上向き方向に流れる浸透流の観察及び解析を行い、その特性を把握することを目的とした。

2. 実験概要

(1) 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、の主に5つの部分により構成されている。侵食コントロール装置は水平方向装置と鉛直上向き方向装置を用いてアクリル球（下層部径 12.7 mm×165 個、上層部径 6.35 mm×1000 個）を充填し、循環用タンクにシリコンオイル（動粘度 $1.5 \times 10^{-5} m^2/s$ 、密度 $995 kg/m^3$ ）を貯水し、流量ポンプの回転数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。一定流量は $103.9 \sim 1224.8 ml/min$ の間で層流状態から乱流への遷移域 ($Re=1.0$ 以上) 前後まで4段階の流量で計測をした。装置内の流れに対して PIV レーザーを照射し、高速度カメラで直接観察を実施し、浸透流の2成分計測を行った。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取得した。図-1 に水平方向装置における撮影画像とベクトル図を示す。また、撮影断面について鉛直レーザー断面では上層部、境界部、下層部、水平レーザー断面で装置内寸の底から 20~40mm 地点を 5mm 刻みで撮影した。図-2 に本実験におけるそれぞれの実験装置と各撮影範囲について示す。

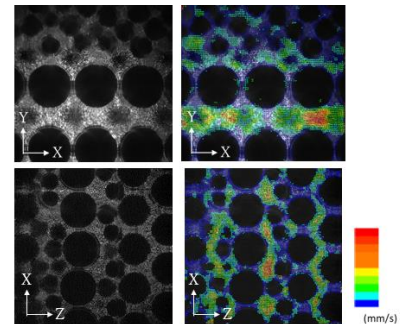


図-1 撮影画像とベクトル図

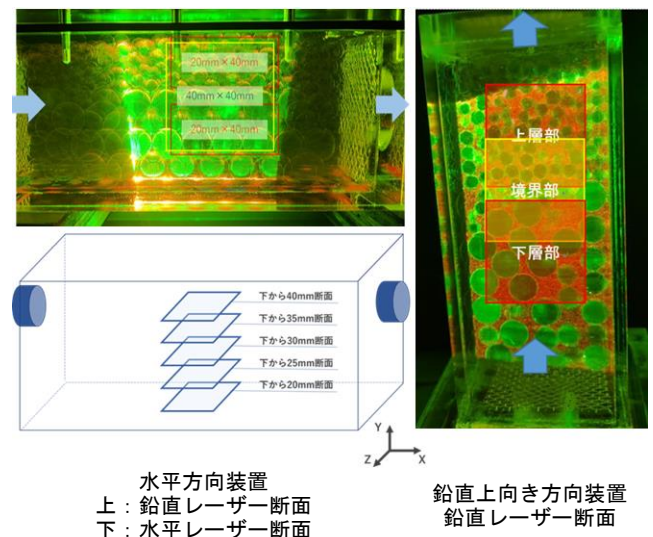


図-2 実験装置と撮影断面

3. 実験結果と考察

(1) 観察断面による流速の比較

水平方向浸透流の撮影画像に対して PIV 解析を行い、取得したベクトル図より得られた境界部の平均流速を、鉛直レーザー断面について表-1、水平レーザー断面について表-2 示す。また、平均流速 $\langle V_x \rangle$ で正規化した平均流速 $\langle V_y \rangle$ 、 $\langle V_z \rangle$ についても示す。

表-1 水平方向浸透流鉛直レーザー断面の平均流速

撮影範囲	実測値		$\langle V_x \rangle$ で正規化	
	$\langle V_x \rangle$	$\langle V_y \rangle$	$\langle V_x \rangle$	$\langle V_y \rangle$
上層部-小	0.975	0.460	1	0.472
境界部	1.290	0.479	1	0.371
下層部-大	1.517	0.481	1	0.317

表-2 水平方向浸透流水平レーザー断面の平均流速

撮影範囲	実測値		<V _x >で正規化	
	<V _x >	<V _z >	<V _x >	<V _z >
底から40mm	0.918	0.373	1	0.406
底から35mm	1.076	0.505	1	0.469
底から30mm	1.506	0.518	1	0.344
底から25mm	1.923	0.674	1	0.350
底から20mm	3.283	0.591	1	0.180

$$T = \frac{\sum v}{\sum v_x} \quad (式 1)$$

v : 浸透流速, v_x : X方向の浸透流速

ここで、図-3 に水平方向浸透流水平レーザー断面、図-4 に鉛直上向き浸透流鉛直レーザー断面の T と Re との関係を示す。

正規化した<V_z>では境界部である底から 35 mm地点で大きくなり、これは境界部で粒子が噛み合った配置になるため z 方向に流れやすくなったと考える。また、境界部における実測値を比較すると底から 35mm 地点の<V_z>が<V_y>より大きい結果となったが、一般的には透水係数は鉛直(Y)方向より水平(Z)方向で大きくなるため妥当性のある結果が得られた。

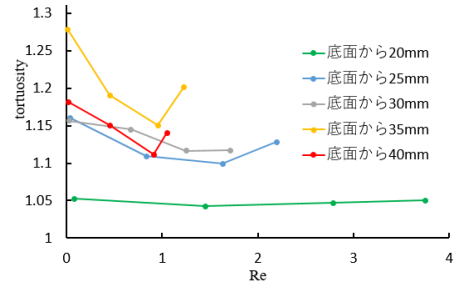


図-3 水平方向浸透流水平レーザー断面 T と Re の相関図

(2) 浸透流の方向による流速の比較

鉛直上向き方向浸透流境界部の平均流速を表-3 に示す。また、<V_x>で正規化した<V_y>について示す。

表-3 鉛直上向き方向浸透流の平均流速

撮影範囲	実測値		<V _x >で正規化	
	<V _x >	<V _y >	<V _x >	<V _y >
上層部-小	3.064	0.943	1	0.308
境界部	3.810	1.370	1	0.360
下層部-大	6.131	1.630	1	0.266

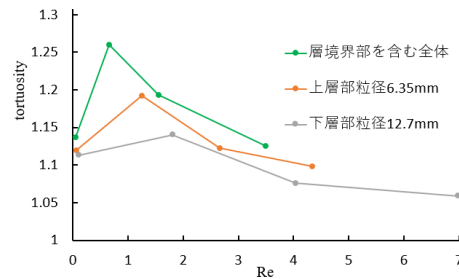


図-4 鉛直上向き浸透流鉛直レーザー断面 T と Re の相関図

表-1, 表-3 を比較すると鉛直上向き方向浸透流では水平方向浸透流と異なり境界部で正規化した<V_y>が最大値となった。これは、層に対して鉛直方向に浸透流が流れており、上層部の小粒径と下層部の大粒径が交わる境界部を境に間隙が急激に小さくなっているため、浸透流が堰き止められ流入方向に垂直な向きに流れ易くなったためと考える。

水平方向浸透流では Re が 0~1 前後の範囲で Re の増加に伴い T が減少する傾向が示された。また、間隙率の大きい下層部に近づく程 T が小さくなった。これより理論上と同様の特徴は見られるが、底から 35mm 地点の境界部において T が最大になっていることより間隙率に依存する傾向は層境界部では見られないことがわかった。また、浸透流の方向に関わらず Re が 1~2 で一時的に T が大きくなる傾向がみられた。これは Re が 1~2 の遷移域付近で新たな浸透流の経路が形成されたことが原因で、理論上はみられない実現象の特徴であるとわかった。

(3) Hydraulic tortuosity(水理屈曲度)について

Hydraulic tortuosity (以下 T) は浸透流の屈曲度を表す理論的な指標で値が大きい程屈曲した流れであると示している。理論上は流量の増加に伴い T は減少し、間隙率が大きい程 T は小さくなる傾向があるとされている²⁾。本実験で T は (式 1) で表される。

4. まとめ

異粒径地盤の境界部に流れる浸透流に対する透水係数や粒子の配置等の影響等を把握し、明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 大下倭駆, 平田壮, 福元豊, 大塚悟: 透明砂による間隙中の浸透流の異なる断面からの観察, 第 57 回地盤工学研究発表会, [20-10-3-7], 2022
- 2) Jinlong Fu, Hywel R.T, Chenfeng Li(2021). Tortuosity of porous media : Image analysis and physical simulation. Earth-Science Review 212(2021) 103439