

# 屈折率マッチング法による止水矢板周りのパイピング現象の観察

パイピング 屈折率マッチング法 地盤流動 内部侵食

名城大学大学院 正会員 ○夏目 将嗣  
 名城大学 国際会員 小高 猛司  
 名城大学 岡本 隆明

## 1. はじめに

2022年5月に愛知県豊田市の取水施設である明治用水頭首工でパイピング現象による大規模な漏水が発生し、大修繕工事に発展している。河川堤防においても、高透水性基礎地盤に起因するパイピング現象をトリガーとする堤防損壊の危険性が指摘されている<sup>1)</sup>。パイピング現象とは、地盤と構造物、あるいは地盤内の地層境界等の透水性のギャップが大きい部分で発生する水みちが連通した、あるいは連通しつつある状況を言うが、地盤内の間隙流体を高精度に捉えることは難しいことから、パイピング現象の発生前後の地盤ならびに間隙流体の挙動の詳細は明らかではない。そのため、パイピング現象において、発生した水みち内の大きな流速の流体が周辺地盤を内部侵食し、さらに水みちが拡大・進展していく状況を、地盤、流体双方から実験的に示すことは重要である。本報では、基礎的な止水矢板周りの2次元パイピング実験に地盤材料と間隙流体を透明化させることができる屈折率マッチング法を適用し、間隙流体の可視化及び地盤の代表粒子の追跡によって、パイピング現象における地盤の内部侵食の状況を観察する。

## 2. 屈折率マッチング法の概要

屈折率マッチング法とは、対象物の屈折率と対象物を流れる流体の屈折率を近づけることで、直接見ることのできない内部の断面を可視光のもとで観察可能とする手法である。光は、屈折率の変化しない均一な物体内を進む場合直進を続けるため、地盤材料と間隙流体の屈折率を近づけることで光は2つの物体を通っても屈折することなく直進する。この原理を用いて地盤材料と間隙流体を透明化させることで土中を流れる間隙流体の可視化を行う。

本研究では、屈折率マッチング法を用いるために地盤材料に石英ガラス（以下、石英と記す）、間隙流体にヨウ化ナトリウム溶液を用いる。石英とヨウ化ナトリウム溶液の物性値を表1に示す。石英固有の屈折率は1.458であり、ヨウ化ナトリウム溶液は、濃度によって屈折率を変化させることができるため石英の屈折率と等しい値になるように調整を行う。ヨウ化ナトリウム溶液の屈折率を1.458にするために精製水にヨウ化ナトリウムを混ぜて濃度を調整していく。屈折率が1.458になる時のヨウ化ナトリウム溶液の質量パーセント濃度は54.1%であった。ヨウ化ナトリウム溶液は、溶液を作製してから時間が経過すると黄色く変色してしまうため、実験では変色した溶液を無色に戻すために、少量のチオ硫酸ナトリウムを混ぜる処理をしたヨウ化ナトリウム溶液を使用した。石英とヨウ化ナトリウム溶液の屈折率を1.458に合わせ透明化させた様子を写真1に示す。アクリル槽内に約50mmの高さに土を張り、アクリル側面と上部から見た様子になるが、写真で示すような透過度となっており、アクリル槽の下の文字を見ることができるようになる。しかし、石英の粒子には気泡が付着しており、石英に溶液を浸透させても気泡が干渉し、透明度が低くなってしまふ。そこで、気泡の影響を小さくするために石英に対し脱気処理を行った。脱気処理を行った石英に溶液を浸透させた様子を写真2に示す。脱気処理を行っていないものと比較すると、土槽内の気泡が少なくなっており、透明度を上昇させることができる。

## 3. 2次元パイピング実験の概要

止水矢板周辺で発生すると考えられるパイピング現象を観察するために2次元模型実験を行った。模型実験装置の諸元を図1に示す。止

表1 石英とヨウ化ナトリウム溶液の物性値

材料	屈折率	比重
石英	1.458	2.2
ヨウ化ナトリウム溶液 (質量パーセント濃度54.1%)	1.458	1.98
水	1.333	1.0

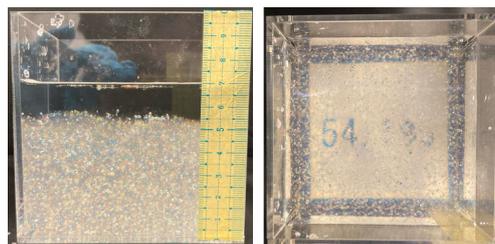


写真1 屈折率マッチング法による透過度

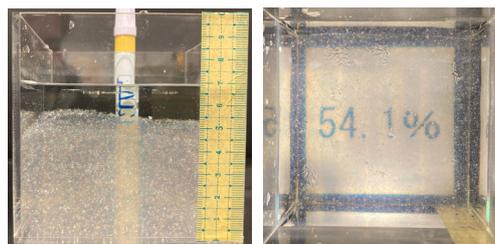


写真2 脱気処理を行った石英の透過度

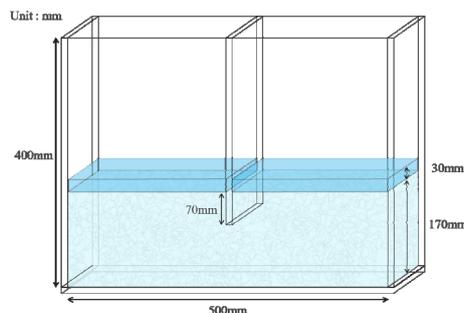


図1 模型実験装置の諸元

水矢板の右を上流側，左を下流側とし，止水矢板の根入れ深さは 70mm に設定し実験を行った。地盤は飽和度を高めるために，ヨウ化ナトリウム溶液をあらかじめ入れた土層に，粒子表面から極力脱気処理をした石英を溶液中に滴下させながら作製した。この時の地盤の間隙比は 0.7 となっている。実験手順は，上下流とも水位を地表面から高さ 30mm の位置で保った状態から上流側のみ溶液の水位を上昇させ，止水矢板周辺の挙動を観察した。また，地盤内の粒子の動きを視覚的に明らかにするために止水矢板周辺に油性の塗料で着色した石英の粒子を奥行き方向にも満遍なく配置して実験を行った。

#### 4. 実験結果

模型実験による水位上昇に伴うパイピング現象の経時変化を写真 3 に示す。上流側水位の上昇に伴い下流側の

止水矢板周辺にある青色の粒子が徐々に地表面に向かって押し流されている。地盤は透明化されているため，地盤が奥行き方向に均一に変状していることがわかる。さらに水位が上昇すると上流側の止水矢板周辺にあった赤色の粒子が止水矢板に沿って下流側へ流動しはじめる。上流側と下流側の水位差が 55mm になったとき矢板に沿った水みちが連通し，地盤流動よりも相対的に大きな速さで流体が流れたし，止水矢板周辺の地盤を一気に侵食した。水位上昇初期では，上流側に配置された赤色の粒子の移動は見られず，下流側の止水矢板周辺に配置した青色の粒子のみが水面に向かって移動していることから，まずは有効応力が小さい止水矢板の左側に沿って水みちが発生するとともに，近傍地盤の流動化も促進したと考えられる。その後，水位上昇の伴い，上流側の止水矢板に沿った砂粒子の流動が活発化し，上流側地盤が矢板下端部を通過して下流部へ移動することが促進され，上流側の地表面が矢板下端に到達した途端に，下流側で形成していた水みちが上流側まで一気に連通し，激しいパイピング現象が発生した。

#### 5. 画像解析と結果

実験で取得した動画に対し，画像処理ソフトウェア ImageJ を用いて画像解析を行った。着色した粒子を一つ選び 0.07s ごとに粒子の位置をプロットする。水位上昇により止水矢板周辺で特定の粒子が動き始めた点から下流側で粒子の動きが止まった地点まで座標をプロットすることで，パイピングが発生した際の粒子の軌跡を特定する。また，粒子を追跡する際に着色された粒子とその他の粒子を判別しやすくするために，コントラストの調整処理を行った動画を用い画像解析を行った。画像解析から得られた粒子の軌跡を写真 4 に示す。石英とヨウ化ナトリウム溶液の比重が比較的近いことから，写真 4 (a) で示す青色の粒子が動き始めた水みち発生初期では，着色した粒子は地盤内に存在しているためこの粒子の速度は，地盤の変状速度を表す。一方，写真 4 (c) で示す赤色の粒子のように，止水矢板周辺で水みちが連通し，赤色に着色した粒子が単一で動いている際の速度は，水みち内の流体の代表速度を表していると考えられる。

#### 6. まとめ

本研究グループでは，地盤の崩壊現象における間隙流体の影響を明らかにするために，屈折率マッチング法の適用を試みている。本報では，2次元止水矢板周りのパイピング実験を通して，その適用性を検証した。まず，地盤材料として用いる石英と間隙流体として用いるヨウ化ナトリウム溶液の屈折率を合わせることで地盤を透明化させることができることを示した。2次元模型実験では，透明化した地盤に着色した粒子を配置しパイピング現象を引き起こすことで，水みちに進展に伴い，特徴的な土粒子の軌跡を追跡することにより，地盤流動速度と水みち内の流体の流速を計測できることを示した。本報では，地盤流動も水みちの流速も計測結果の一例のみを示しているが，3次元的な空間内の複数の粒子の挙動を画像解析することにより，より精度の高いデータの構築を目指す。また石英の粒子と流体の比重は一致していないために，水みち内の流れはあくまで水みちで押し流される単一粒子の速さであるため，流体自身の速さの計測も試みる予定である。

参考文献：1)小高ら：高透水性基礎地盤上の河川堤防の浸透破壊に対する効果的な基盤排水工の検討，地盤工学ジャーナル，17(3)，2022。

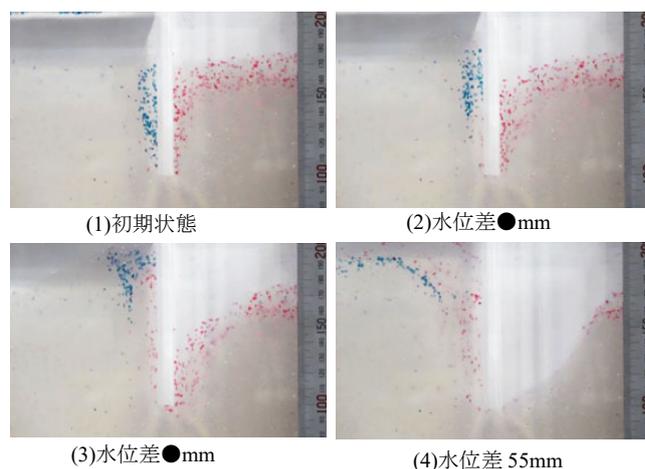


写真3 パイピング現象の経時変化

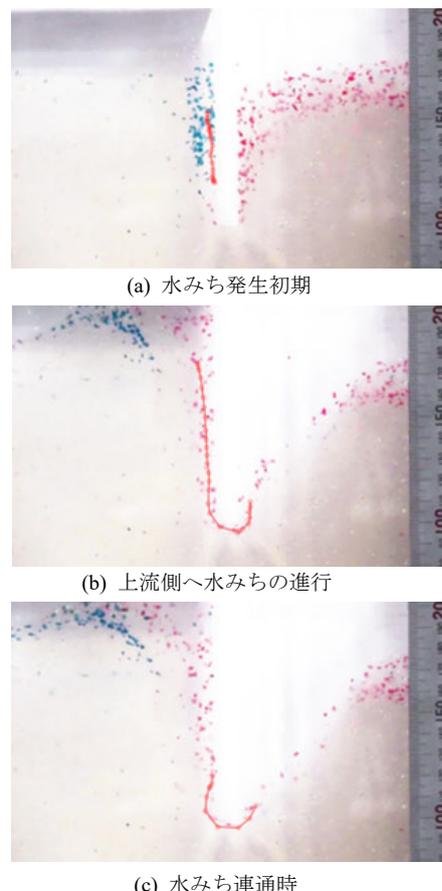


写真4 画像解析による粒子の軌跡