

## 止水矢板周りのパイピング現象における地盤侵食過程と流れの観察

### Observation of erosion process and flow during piping phenomenon around a sheet pile

夏目将嗣<sup>1</sup>, 岡本隆明<sup>2</sup>, 小高猛司<sup>2</sup>, 李圭太<sup>3</sup>,

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科
- 3 日本工営・コンサルティング事業統括本部/名城大学特任教授

#### 概 要

近年、河川堤防や河川構造物において地盤と構造物、あるいは地盤内の地層境界等の透水性のギャップにより発生するパイピング現象が懸念されており、発生した水みち内における流速の大きな流体が周辺地盤を侵食し、水みちがさらに拡大・進展していく過程を地盤、流体双方から実験的に示すことが重要である。そこで本論文では、屈折率マッチング法により透明化させた地盤を用いた2次元止水矢板浸透破壊実験によって上流側と下流側の水位差によって止水矢板周辺に発生するパイピング現象における地盤内部の侵食過程とその際の流体の挙動の観察を行った。また、2次元浸透流解析を行うことで、実験において観察された現象を解析的に明らかにすることを試みた。その結果、上下流の水位差によって地盤がボイリングに至る過程において、下流側矢板近傍に高い鉛直動水勾配が集中し水みちの発生および地盤変状を起こした後、その地盤変状を起点として水みちが下流側から上流側へと連通し、激しいパイピング現象に至ることを明らかにした。

キーワード：パイピング、矢板、2次元模型実験、屈折率マッチング法

#### 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、この際の水みちの発生から拡大・進展、さらに水みちが連通することによって生じるパイピング現象に至るまでの過程において、地盤ならびに流体の挙動の詳細は明らかでない。そこで、止水矢板と地盤材料との境界に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次元止水矢板浸透破壊実験を行う。止水矢板周辺における浸透破壊についてはこれまで様々な知見が得られている<sup>例えば 2)~5)</sup>。しかし、浸透破壊のパイピング現象における流体を高精度に捉え、流体の挙動を詳細に示したものは少ない。そこで本論文では、屈折率マッチング法を用い、地盤を透明化させることで模型の壁面に影響を受けない地盤内部の侵食過程における流体の挙動を正確に捉え、パイピング現象における、発生した水みちにおいて流速の大きな流体が地盤を内部侵食し、さらに水

みちが拡大・進展していくプロセスを地盤・流体双方から実験的に示す。加えて浸透流解析を行い、実験から明らかになった地盤の変状及び流体の挙動を解析的に明らかにする。

#### 2. 2次元止水矢板浸透破壊実験

##### 2.1 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、本来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によって異なる2つの物質を通っても屈折することなく直進することができる。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地盤内を流れる流体の可視化を行う。

本論文では、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。石英のもつ固有の屈折率は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。精製水にヨウ化ナトリウムを混ぜ

て濃度調整を行うが、ヨウ化ナトリウム溶液の屈折率が 1.458 になる時の質量パーセント濃度は 54.1% であり、この時のヨウ化ナトリウム溶液の比重は 1.67 であった。また、ヨウ化ナトリウム溶液は、空気中に放置するとヨウ素が遊離し褐色に変化してしまうため、少量のチオ硫酸ナトリウムを混ぜることで無色に戻す処理を行った溶液を使用して実験を行った。屈折率を 1.458 に調整したヨウ化ナトリウム溶液と石英を使用し、横 100mm、高さ 100mm、幅 100mm のアクリル槽内に溶液を張り、石英を水中落下させ、高さ 50mm になるように土層を作製した様子を写真 1 に示す。写真 1(b) は、アクリル槽を上面から観察したものであり、屈折率マッチング法を用い、土層を透明化させることでアクリル槽の下に記載した文字が認識できるほどの透明度になることがわかる。石英の粒子の周りには多くの気泡が付着しており、気泡は、地盤材料および間隙流体と屈折率が異なるため、土層を作製した際に写真 1 で示すように気泡が存在する部分の透明度が下がってしまう。特に写真 1(a) のようにアクリル槽を側面から見た際に奥行方向に気泡が多く重なっている領域は著しく透明度が落ちるため、地盤内部の様子を観察することは難しくなる。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。写真 2 には、脱気処理を行った石英を使用し、作製した土槽の様子を示しており、脱気処理を行わなかつ

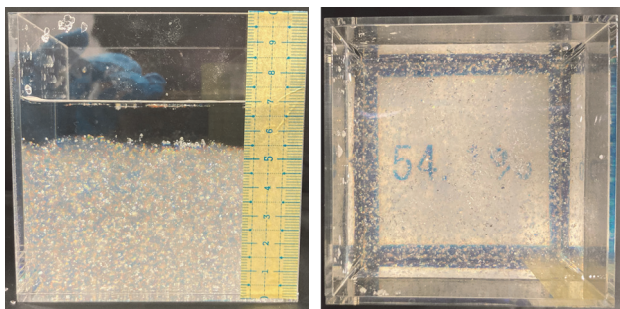
たものと比較すると気泡の影響が小さくなり、透明度を上昇させることができることがわかる。

## 2.2 実験概要

前述の手法で地盤を作製し、止水矢板周辺で発生す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。図 1 に模型実験装置の諸元、表 2 に模型地盤の諸元を示す。模型地盤の飽和度を高めるために、あらかじめヨウ化ナトリウム溶液を張ったアクリル水槽に、粒子表面から極力脱気処理を行った石英を少量ずつ液中落下させて模型地盤を作製した。この時の止水矢板の根入れ深さは 70mm、地盤の間隙率は 0.7 となっている。止水矢板の右側を上流、左側を下流とし、上下流とも水位を地表面から 30mm の位置で保った状態から下流側の水位を一定に保ったまま、上流側の水位のみを 20 秒間で 25mm の割合で上昇させ、ボイリングが発生してから地盤の変状が停止するまで観察を行った。また、地盤内の粒子の挙動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粒子を図 1(b) と (c) に示すように縦横 10mm 間隔で配置した。2 次元模型実験では、アクリル水槽の壁面の影響を大きく受けるため、アクリル表面からだけでは実際の現象を正確に観察することが難しいことから、着色した粒子はアクリ

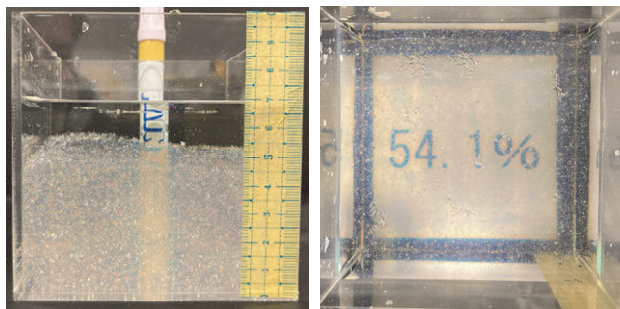
表 1 石英とヨウ化ナトリウム溶液の物性値

地盤材料	屈折率	比重
石英	1.458	2.2
ヨウ化ナトリウム溶液	1.458 (質量パーセント濃度 54.1%)	1.67
水	1.333	1.0



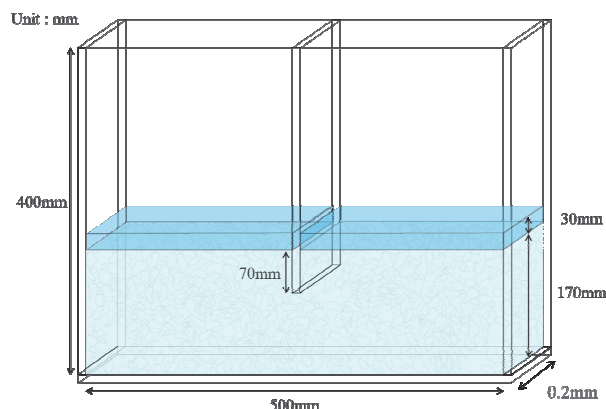
(a) 側面 (b) 上面

写真 1 屈折率マッチング法による透明地盤



(a) 側面 (b) 上面

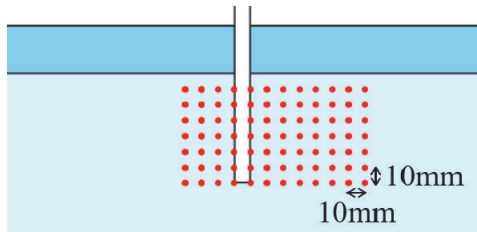
写真 2 脱気処理を行った石英を使用した透明地盤



(a) 全体図



(b) 粒子配置図\_上面



(c) 粒子配置図\_側面

図 1 模型実験装置の諸元

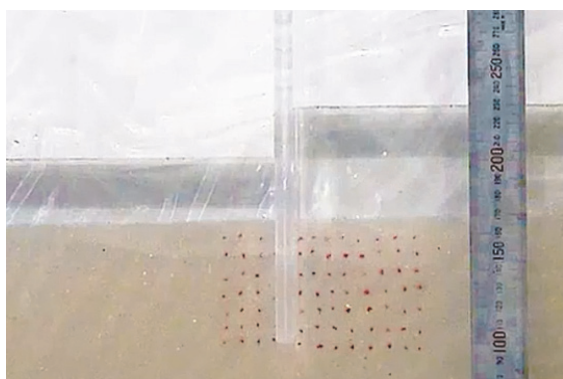
表 2 地盤の諸元

地盤材料	間隙率	透水係数(m/s)
石英(0.75mm~2.0mm)	0.7	$1.39 \times 10^{-3}$

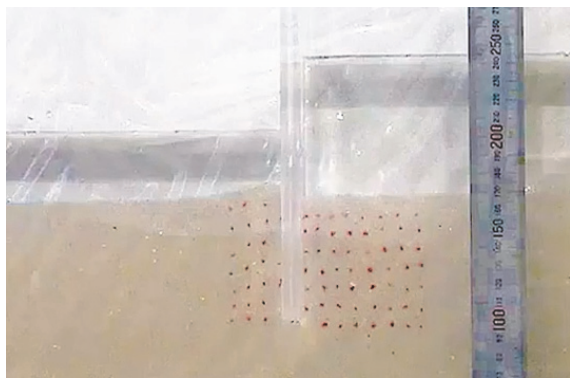
ル水槽の奥行き中心部に配置することにより、壁面による影響が極力少ない状態で観察を行った。

### 2.3 模型地盤の変状の進展過程

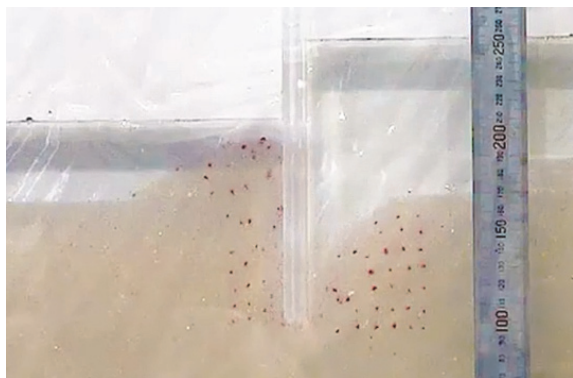
写真3に模型地盤の変状の進展を示す。上流側と下流側の水位差によって、下流側の地盤が徐々に隆起し、地表面に向かって押し流されていく。一方で、上流側の地盤材料では、吸出しによって地表面が低下していき、止水矢板の下端に到達すると一気に下流側への流動が発生する。この地盤侵食現象において、下流側矢板下部の粒子が鉛直上向きに動き始める過程をPhase1、上流側矢板下端に配置した粒子が下流側へ流れはじめ、下流側の矢板によって鉛直上向きに移動する過程をPhase2、上流側の地表面が矢板下端に達し、激しいパイピング現象が発生する前後の過程をPhase3とする。Phase1と2の模式図を図2に示す。



(a) 水位差 30mm：下流側矢板近傍における粒子移動開始

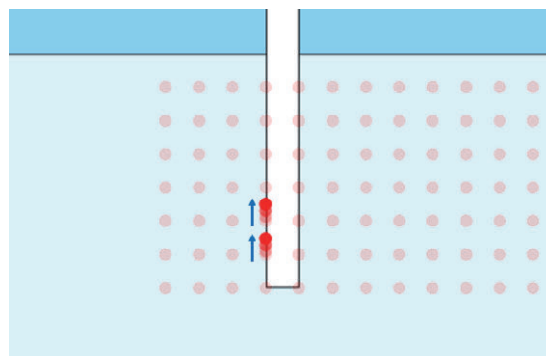


(b) 水位差 40mm：矢板下端における粒子移動

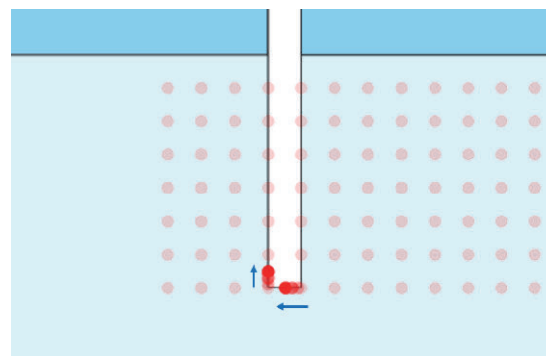


(c) 水位差 55mm：パイピング現象発生

写真3 模型地盤の変状の進展



(a) Phase1：水位差 30mm



(b) Phase2：水位差 40mm

図2 Phase1と2の模式図

### 3. 画像解析による流れの計測

模型実験によって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 1/60s ごとに粒子の位置をプロットすることで水位上昇による止水矢板周辺の水みちの発生から拡大・進展およびボイリング発生までの各 Phase における粒子の軌跡とその粒子の移動速度を特定する。画像解析から得られた各 Phase における粒子の軌跡と代表流速を写真4および図3、各 Phase から得られた粒子の代表流速を表3に示す。

Phase1 では、地表面から約 50mm、60mm の位置に配置した下流側矢板近傍の粒子から鉛直上向きに微量に動きだし、地盤の変状が発生し始めている。その後、矢板下部の粒子が上向きに上昇するに伴い、下流側における周辺の地盤も水面へと押し上げられている。また、この時、着色粒子は、矢板に沿って鉛直上向きに移動しており、水平方向にはほとんど移動していないことが粒子の軌跡からわかる。Phase2 では、上流側矢板下端に配置された粒子が下流側へ流された後、Phase1 と同様に止水矢板に沿って下流側を鉛直上向きに移動している。地表面から深さ約 70mm の止水矢板下端に配置した2つの粒子が止水矢板下端を移動する際に、他の粒子よりも相対的に大きな速度で下流側へ流されている。これは、Phase1 の微量な地盤変状によって止水矢板周辺に水みちが形成され、その後の水位上昇によって下流側で形成された水みちが止水矢板に沿って上流側へ向かって拡大したためと考えられる。図3に示す着色粒子の移動速度を表すグラフでも、Phase2 では、

Phase1 よりも大きな流速が矢板周辺で計測されており、特に追跡した粒子が止水矢板の真下を移動している 0.1s から 0.5s の間に粒子の移動速度が大きくなっていることがわかる。その後も水位を上昇させ続けることで Phase1, Phase2 で発生、拡大した水みちがさらに進展していき、上流側の粒子の流動が活発化していく。Phase3 では、上下流の水位差が 55mm になり、上流側の地表面が矢板下端に到達すると下流側で発生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する。上流側と下流側の水位差によって下流側矢板周辺の地盤内の間隙水圧が上昇し、有効応力が低下することで不安定になった地盤材料に対し、大きな流速が作用することで、下流側の地盤材料の隆起・流動・盤膨れが促進され、それに伴い上流側の地盤材料が止水矢板を潜り込むようにして下流側へと流動していく。写真 4(c)に示すように、Phase3において、上流側下部の止水矢板から水平に 30mm ほど離れた粒子を追跡すると、止水矢板の周囲をこれまでになく、大きな速度で流れていくことがわかる。また、図 3 の粒子移動の速度を示すグラフでは、追跡している粒子が上流側から止水矢板に近づくにつれて徐々に移動速度が速くなっており、追跡開始から約 1 秒前後において粒子が止水矢板の真下を流れているときに、止水矢板下端に大きな流速が集中していることがわかる。今回の模型実験では、着色した石英粒子の軌跡を追っているために、流体そのものの流れを追っているわけではないが、追跡した粒子の速度は後述するダルシー流速を大きく上回り、かつ、各 Phase における水位上昇に伴う地盤の変状によって大きく変化していることから、おおよその流体の流れが求められていると考えている。

模型実験から得られた動水勾配と地盤の透水係数から得られる止水矢板周辺での地盤内流体のダルシー流速は 0.051(cm/s) であり、表 3 に示す流体の流速とは大きく異なる。矢板周辺での水みちの発生により、地盤内の間隙を流れるダルシー流速よりも大きな流速が発生し始めることで、水みちの拡大・進展が促進されていくと考えられる。

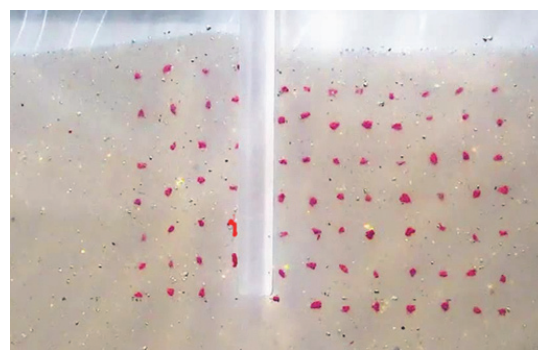
以上のように、屈折率マッチング法を用いて地盤を透明化させ、特定の粒子を追跡することで、地盤を内部侵食する際の流体の挙動とおおよその速度が画像解析から明らかになった。

## 4. 2次元浸透流解析

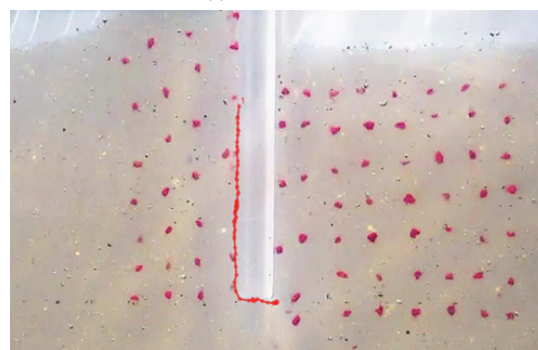
### 4.1 解析概要

本論文の模型実験の結果を浸透流解析でシミュレーションを行い、模型実験得られた止水矢板周辺における地盤変状と流体の挙動を数値解析の観点から検討する。

本論文では、上下流の水位差による止水矢板周辺で発生するパイピングおよびボイリング現象における、動水勾配、流速ベクトルを正確に把握するため、飽和—不飽和浸透流解析コード UNSAF (Unsaturated-Saturated Analysis program by Finite element method) を用いた。



(a) Phase1



(b) Phase2



(c) Phase3

写真 4 各 Phase における着色粒子の速度

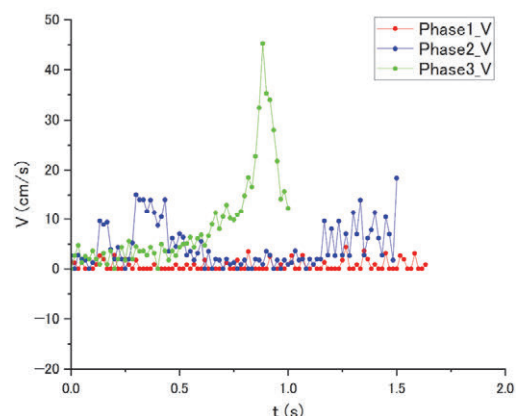


図 3 各 Phase における流速

表 3 各 Phase における平均流速、最大流速

実験値	平均流速[cm/s]	最大流速[cm/s]
Phase1	0.66	4.37
Phase2	4.54	18.36
Phase3	8.78	45.28

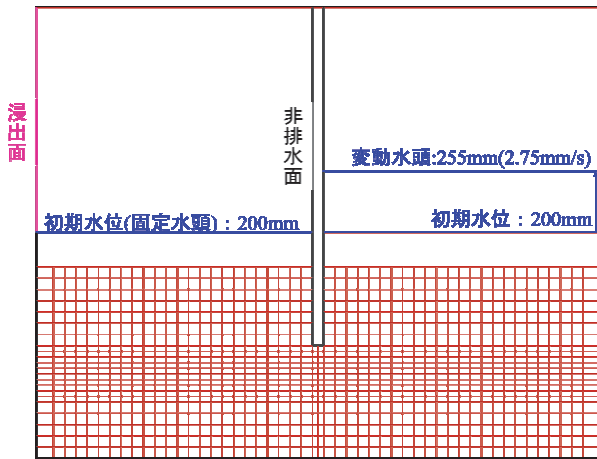


図4 浸透流解析の境界条件

解析モデルの境界条件を図4に示す。初期段階では上下流に水頭200mmを与え、その後、上流側の水位を20sで55mm上昇するように水頭を与えた。また解析領域における透水係数は模型実験の実験値を使用し、計算時間は30秒間とした。

#### 4.2 解析結果

浸透流解析から得られた鉛直動水勾配の分布を図5、流速ベクトルを図6に示す。図5で示す鉛直動水勾配の分布図では、以下の式で示す Terzaghi による限界動水勾配 ( $i_c = 0.196$ ) を超える領域を黄色で示している。

$$i_c = (G_s - 1) / (1 + e) = ((\rho_s / \rho_r) - 1) / (1 + e) \quad (1)$$

ここで、 $i_c$  : 限界動水勾配,  $G_s$  : 水に対する土の比重,  $e$  : 間隙比,  $\rho_s$  : 土粒子の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $\rho_r$  : ヨウ化ナトリウム溶液の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )である。

図6の鉛直動水勾配の分布図では、上流側の水位を上昇させてから10s、水位差が27.5mmになった時に地表面から60mmの下流側矢板の下部において限界動水勾配を超える鉛直動水勾配が発生しはじめ、その後も、上流側の水位上昇に伴い、初めに限界動水勾配を超えた点を中心に限界動水勾配を上回る領域が広がっていることがわかる。図5で示す流速ベクトル図では、水位上昇に伴い上流側では、鉛直下向きに、下流側においては、鉛直上向きの流速ベクトルが大きくなっていく。また、どの水位差の時でも止水

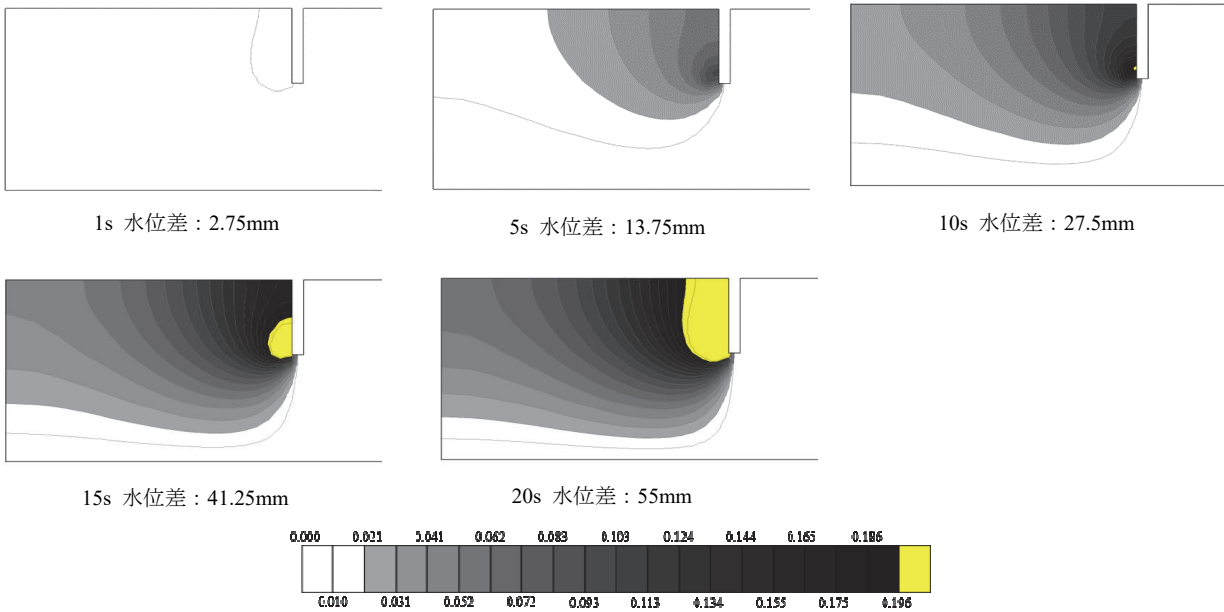
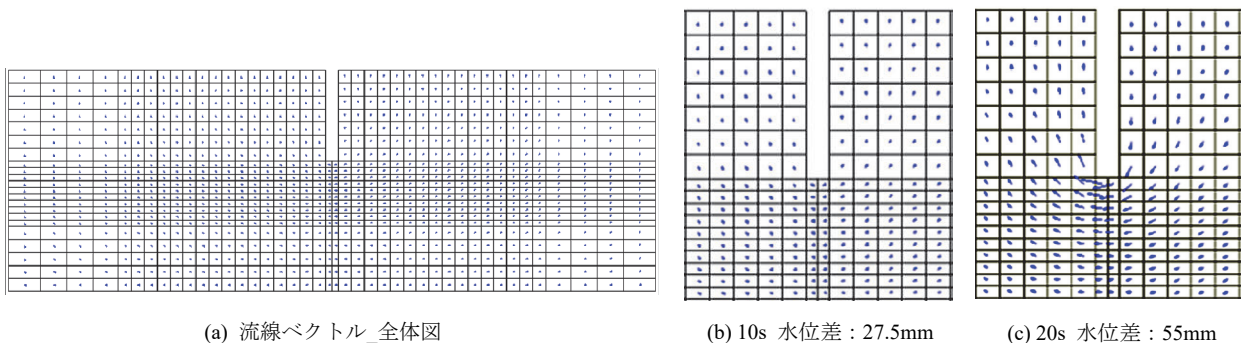


図5 鉛直動水勾配分布



(a) 流线ベクトル\_全体図

(b) 10s 水位差: 27.5mm

(c) 20s 水位差: 55mm

図6 流线ベクトル

矢板の下端部へ近づくと流速ベクトルが大きくなっていることから、上流側の水位上昇によって止水矢板の下端部には、常に周囲の領域と比べて相対的に大きな流速で流体が流れていることを示している。

これら解析結果と先述の模型実験結果を対比して考察する。模型実験において、Phase I では、上下流の水位差が 30mm に達したとき、地表面から約 50, 60mm の位置に配置した下流側矢板近傍の粒子が鉛直上向きに動きはじめる現象が確認された。一方、本節の浸透流解析においては、上流側の水位を上昇させて水位差が 27.5mm になった時に地表面から 60mm の下流側矢板近傍での鉛直動水勾配が限界動水勾配を超えた。したがって両者の一致度は極めて高く、上下流の水位差によって下流側矢板端部周辺における鉛直動水勾配が限界動水勾配を超えた領域において、模型地盤のわずかな変状に伴い水みちが発生したと考えられる。また、浸透流解析による流速ベクトルが示すように、矢板の下端部には、周辺領域と比べ相対的に大きな流速が集中していることから、下流側矢板の下部において鉛直動水勾配が限界動水勾配を超えることによって形成された水みちが、矢板下端部に作用する大きな流速による流体の内部侵食によって、水みちがさらに拡大・進展していくと考えられる。

以上より、模型実験における上流側の水位上昇による水みちの発生、拡大・進展、そして矢板上流側で徐々に発生する吸い出しによる上流側の地表面低下が最終的に矢板下端に到達した途端に、下流側で形成され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するまでの地盤変状と流体の挙動について、浸透流解析からも裏付けることができた。

## 5. 結論

本論文では、屈折率マッチング法を用いた 2 次元浸透破壊模型実験および 2 次元浸透流解析を通して、上下流の水位差によって止水矢板近傍における水みちの発生、拡大、進展、そして下流側の水みちが上流側まで連通することによる激しいパイピング現象の発生における地盤変状と流体の挙動の観察を行った。

模型実験においては、屈折率マッチング法を用いることで地盤を透明化させ、アクリル壁面の影響が少ない模型中央部における地盤内部の侵食を観察できることを示した。また、ImageJ による画像解析では、着色粒子の追跡を行うことで、上下流の水位差によって発生する地盤の変状及び内部侵食と水みちの形成からパイピング発生までの過程における流体の挙動を実験的に捉えることが可能であると示した。2 次元浸透流解析からは、上下流の水位差によって下流側の矢板下部に限界動水勾配を超える鉛直動水勾配が発生し、不安定になった地盤に対し周辺の領域よりも相対的に流速の大きな流体が作用していることが示され、これは模型実験及び画像解析から得られた水みちの発生、拡大・進展、パイピング発生による地盤侵食現象と解

析結果が整合していることを示した。

本論文では、石英の粒子を追跡しているため、流体の挙動とは厳密には一致しない可能性があるが、流体と比重の等しい微粒のトレーサーを使用するなどして、さらに精度よくパイピング現象における流れの可視化を行うことも今後実施する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 小高猛司, 李圭太, 中村宏樹, 山下隼史: 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), 433-449, 2022.
- 2) Asaoka, A. and Kodaka, T.: Seepage failure experiments and their analyses of loose and medium dense sands, Soils and Foundations, 32(2), 117-129, 1992.
- 3) 小高猛司, 浅岡顕: 砂質地盤の浸透過程での気泡の発生・発達現象, 土木学会論文集, 487, 129-138, 1994.
- 4) 小高猛司, 高稲敏浩, 浅岡顕: 矢板に支持された飽和砂質地盤の浸透破壊および掘削安定解析, 土木学会論文集 No.596, III -43, 143-152, 1998.
- 5) 矢上英里香, 松田達也, 三浦均也, 内藤直人, 藤井湧大: 矢板周りの浸透破壊を対象とした模型実験における地盤材料がブレ破壊からポスト破壊現象へ及ぼす影響, 第 32 回中部地盤工学シンポジウム, 1-4, 2020.