



京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

一般共同研究

2024GC-04

RIM-PTV 法を用いた微視的手法による 堤防の内部浸食メカニズムの解明と対 策に関する研究

Study on the mechanism of the
internal erosion within embankment
and its prevention measures using
RIM-PTV and microscopic method

令和 8 年 3 月

March, 2026

研究代表者 岡本 隆明

Coordinator Takaaki Okamoto

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大規模な漏水が発生した。地盤と構造物における透水性のギャップが大きい部分で生じる水みちが拡大・進展することで発生するパイピング現象によるものであった。堤防やダムなど大量の水に接する土木工事の現場では、水位差や地盤の状況を確認することでパイピング現象が起きないように注意が必要とされている。パイピング現象による堤防決壊は土中を流れる流体が大きく影響していると考えられる。しかしながら、地盤内間隙流体は可視化できないので高精度に捉えることは難しく、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。

江藤ら(1996)¹⁾は水流の可視化計測を行うため、水とトレーサーの比重整合、透明体と水の屈折率整合を行った。岡本ら(2020)²⁾やMatsumotoら(2025)³⁾は吸水ポリマーを用いた屈折率マッチング(RIM)とPIV計測を組み合わせたRIM-PIV法を行い、粗度層内部の流れを計測した。

本研究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た。間隙流体の可視化及び地盤の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.実験方法

2.1 RIM法について

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実際の土と似た形状をしている石英ガラス、間隙流体にヨウ化ナトリウム溶液を用いる。石英の屈折率は1.458である。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江藤らの結果をもとに調整を行った。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た。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。

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図2.1に示す。図2.1はアクリル槽内に約50mmの高さに間隙流体を張り、アクリル側面と上部から見た様子である。透過度が高くなり、上方からアクリル槽の下の文字を見ることができるようになった。

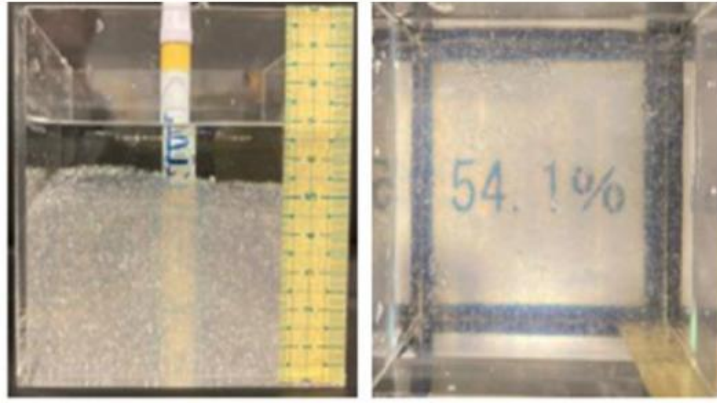


図 2.1 ヨウ化ナトリウム液と石英で作製した地盤

2.2 止水矢板周辺のパイピング実験

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(夏目ら(2025)⁴⁾). 模型実験装置を図 2.2 に示す. 止水矢板の右を上流側とし, 左を下流側とする. 止水矢板の根入れ深さは 70mm に設定し実験を行った. 下流側の水位を地表面から 30mm で保ち, 上流側の水位を 20 秒で 55mm の割合で上昇させて止水矢板周辺の挙動を観察した.

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上方から石英を溶液中に滴下させながら作製した. パイピング発生時の土粒子の挙動を観察するために着色した石英粒子を地盤内に均等に配置した. 実験の地盤諸元を表 2.1 に示す.

表 2.1 地盤諸元

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

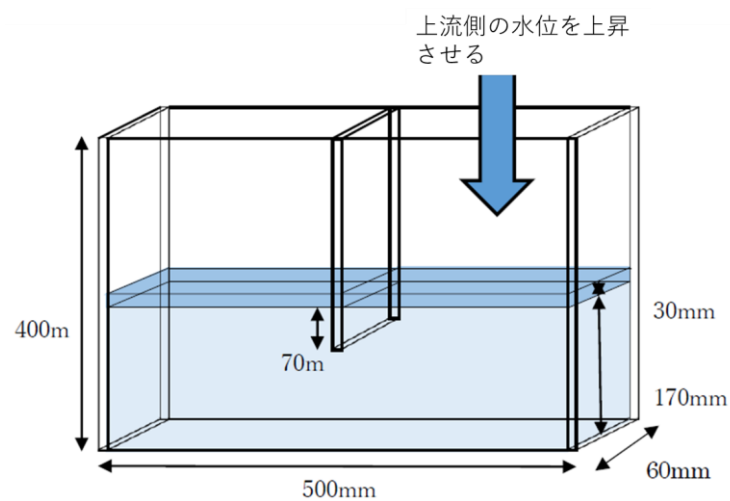


図 2.2 止水矢板を用いた模型実験

3.実験結果

3.1 RIM 法によるパイピング発生時の粒子の追跡

まず土槽内の横断方向位置による土粒子の挙動の違いについて調べるために 2 次元模型の中央部に赤色の粒子, 手前壁面部に青色の粒子 10mm 間隔で配置して実験した(図 3. 1). パイピング現象発生時の土粒子の挙動を図 3. 2 に示す. 上流側の水位が上昇すると上流側の止水矢板周辺にあった粒子が止水矢板に沿って下流側へ動きはじめる. 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, 止水矢板周辺の地盤を一気に侵食した.

図 3. 2 から中央の赤色粒子の方が動きだしもはやく, 移動した距離が大きいことがわかる. これより, 壁面の青色粒子は壁面からの摩擦力を受けるため中央の赤色粒子よりも移動する距離が小さくなると考えられる. 地盤変形は模型壁面の影響を大きく受けるため, RIM 法を用いて壁面から離れた位置の粒子の挙動を計測する必要があることがわかった.

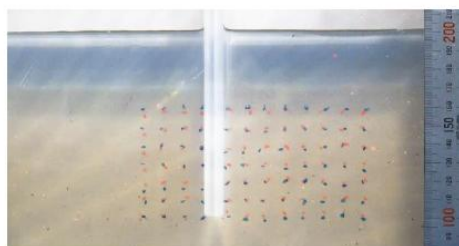


図 3.1 透明地盤に設置した着色粒子

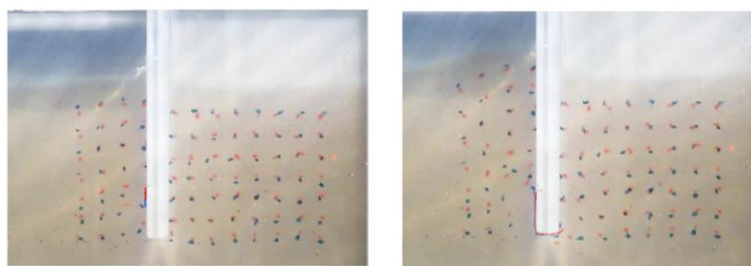


図 3.2 (a), (b)パイピングの進展過程



図 3.2 (c) パイピングの進展過程

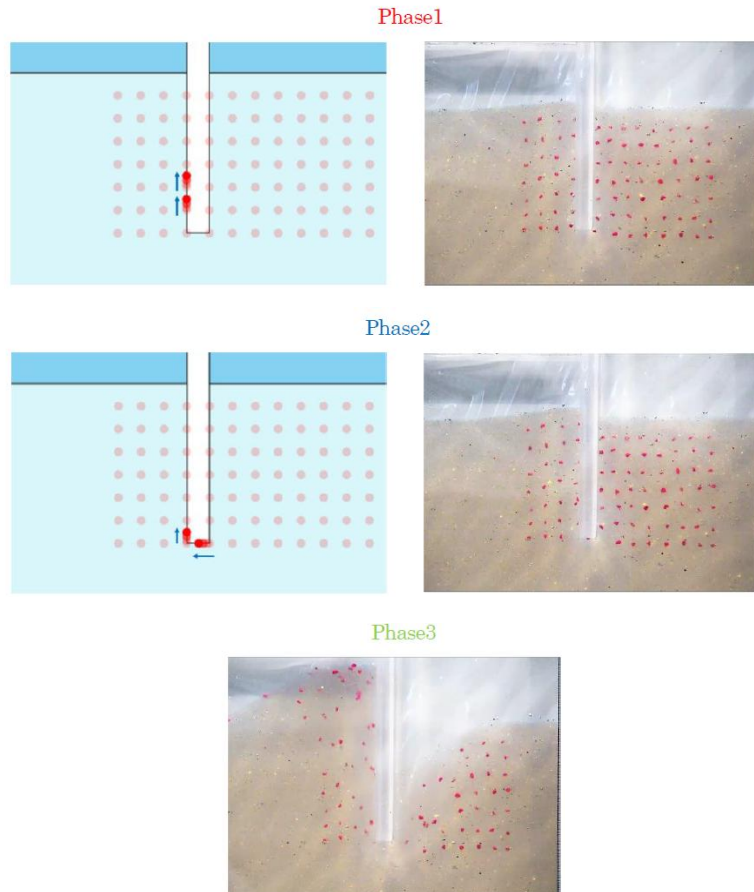


図 3.3 パイピングの進展過程における Phase 分け

3.2 パイピング現象の Phase 分けと速度変化

実験結果からパイピング現象を 3 つの Phase に分けた(図 3.3). 上流側の水位上昇によって下流側の止水矢板下部に配置した着色粒子が鉛直上向きに微小に移動し始めるところを Phase 1 とする. さらに水位が上昇することによって, 上流側の止水矢板下端に配置した粒子が下流側へ流される始めたところを Phase 2 と定義する. 上流側の地表面が矢板端部に到達し, 激しいパイピング現象が発生する前後を Phase 3 と定義とする.

止水矢板周辺に赤色に着色した石英の粒子を流れ方向の中央のみに 10mm 間隔で配置して実験を行った様子を図 3.4 に示す. 各 Phase において 1/60s 間隔で粒子の位置をプロットすることで, 粒子の軌跡を明示し, 流体の挙動を明らかにするために, 模型実験で取得した動画に対して, 画像処理ソフト ImageJ を用いて画像解析を行った.

Phase1 の 画像解析から得られた粒子の移動速度のグラフを図 3.4 に示す. Phase1 では, 上下流の水位差が 30mm になった時に下流側の地表面から約 50mm, 60mm の粒子から移動した. 地盤変化が微量なため, 粒子はほぼ一定の速度で移動している. 表 3.1 に示すように粒子の平均移動速度は, 水位差 30mm のダルシー流速の約 25 倍大きい値となった. パイピング現象における水みちの発生点

を明示することができた。

Phase2 の 画像解析から得られた粒子の移動速度のグラフと軌跡の様子を図 3.4 に示す. Phase2 では, 止水矢板の真下の粒子が下流側に流れ止水矢板に沿って鉛直上向きに移動しており, 追跡開始から約 0.1s から 0.5s で流速が大きくなっていることがわかる. このことから止水矢板の真下を通るときに流速が大きくなっていることがわかった.

Phase3 の 画像解析から得られた粒子の移動速度のグラフと軌跡の様子を図 3.4 に示す. Phase3 では上流側の地表面が矢板端部に到達し, 激しいパイピング現象が起き, 粒子が追跡開始から 1s 前後で流速が大きくなっていることがわかる. これは粒子が止水矢板の真下を通るときに流速が大きくなっている. Phase2, Phase3 では, 止水矢板端部に速い流速が集中していることを示された.

表 3.1 各 Phase の流速

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
ダルシー流速 (水位差30mm)	0.028	

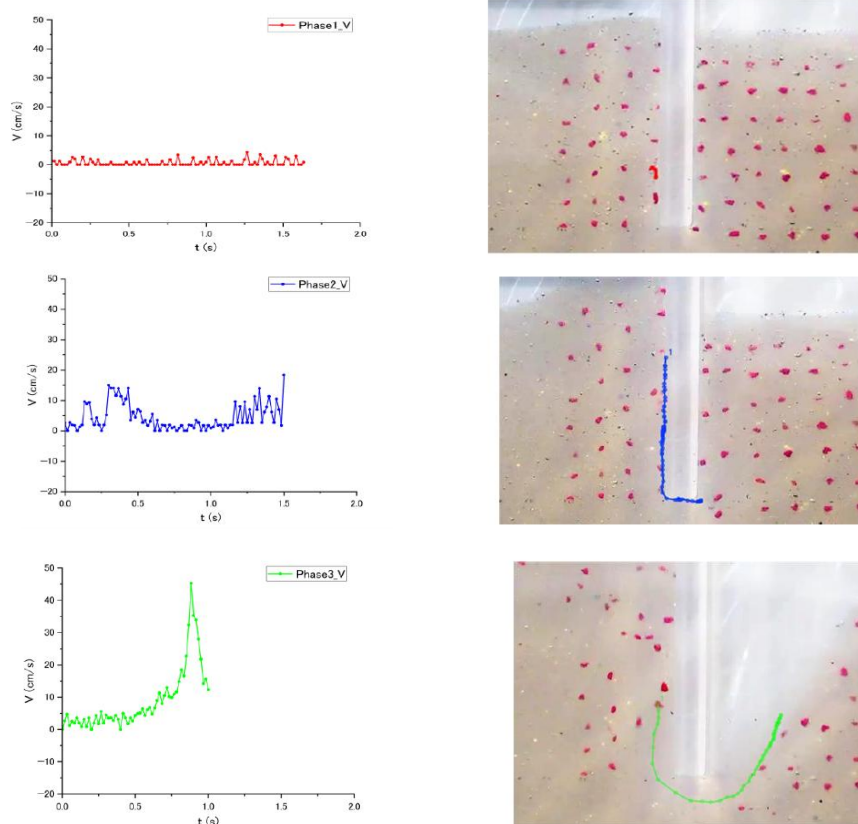


図 3.4 (a)Phase1, 2, 3 における代表粒子速度の時間変化

(b) Phase1, 2, 3 における代表粒子位置の軌跡

4. 結論

実験結果からパイピング現象を3つのPhaseに分けた。上流側の水位上昇によって下流側の止水矢板下部に配置した着色粒子が鉛直上向きに微小に移動し始めるところをPhase1, さらに水位が上昇することによって, 上流側の止水矢板下端に配置した粒子が下流側へ流される始めたところをPhase2, 上流側の地表面が矢板端部に到達し, 激しいパイピング現象が発生する前後をPhase3と定義した。

Phase1では上下流の水位差が30mmになった時に下流側の地表面から約50mm, 60mmの粒子から移動した。地盤変化が微量なため, 粒子はほぼ一定の速度で移動している。粒子の平均移動速度は, 水位差30mmのダルシー流速の約25倍大きい値となった。RIM法の結果からパイピング現象における水みちの発生点を明示することができた。またPhase1で形成された水みちに大きな流速が作用することで水みちが拡大・進展することがわかった。Phase2, Phase3では, 止水矢板端部に速い流速が集中していることを示された。

参考文献

- 1) 江藤 剛治・竹原 幸生・横山 雄一・井田 康夫 : 水流の可視化に必要な関連技術の開発 -比重整合・屈折率整合・多波長計測, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.87-106, 1996
- 2) 岡本隆明, 松本知将, 大石哲也, 山上路生, 岡崎拓海: 半球粗度まわりの乱流構造が種子捕捉過程に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B1(水工学, 通常号), Vol. 76(1), p. 118-128 2020
- 3) Matsumoto, K., Okamoto, T. and Sanjou, M.: Particle entrainment by bursting phenomena in open-channel flow over rough bed, *Environmental Fluid Mechanics* Vol.24(3), p. 287-314 2024
- 4) 夏目 将嗣, 小高 猛司, 岡本 隆明, 李 圭太: 屈折率マッチング法を用いた模型実験によるパイピング現象の解明, 地下水学会誌, Vol.67(2), p.167-181, 2025