

屈折率マッチング法を用いた堤防模型浸透実験におけるパイピング現象の可視化

名城大学大学院 学生会員 ○夏目 将嗣
名城大学 正会員 小高 猛司
名城大学 正会員 岡本 隆明

1. はじめに

河川堤防の大規模な浸透すべり崩壊は、高透水性の基礎地盤に起因するパイピングによる小規模法先すべりがトリガーとなることがわかっている^{例え1)}。しかし、通常の土を使用した模型実験では、堤体の内部侵食によって発生する浸透流を正確に捉えることは難しく、パイピングから堤防崩壊に至る現象の詳細は明らかになっていない。そこで本研究では、屈折率マッチング法という手法を用いることにより、堤体および間隙流体を透明化させ、トレーサー粒子をまぜた間隙流体に対して PIV 計測を行うことで、内部侵食時の浸透流を可視化し、局所的な流速などの情報を定量的に計測することを目的とする。一連の実験には、堤体材料として石英ガラス（以下、石英と記す）を用いるが、本研究室が今まで主に堤体材料として用いてきた三河珪砂と今回用いる石英では、力学特性が異なると考えられるため、石英を用いた三軸試験ならびに堤防模型浸透実験を行い、これまで本研究室が堤体材料に使用してきた三河珪砂との力学特性と浸透実験による破壊形態の比較を行う。加えて、屈折率マッチング法を用いた浸透実験により浸透流の可視化の具体例を示す。

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、直接見ることで見え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、堤体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。この原理を用いて堤体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。屈折率マッチング法を用いるために堤体材料に石英、間隙流体にヨウ化ナトリウム溶液（屈折率：1.458）を用いる。

本報と同様の材料を用いて屈折率マッチング法を適用した予備検討や止水矢板周りの2次元パイピング実験による浸透流の可視化と矢板周りの地盤の侵食の観察実験については、別報を参照されたい²⁾。

3. 石英を用いた三軸試験

表1に石英を用いたCU試験の試験条件を示す。

図1に石英のCU試験の結果、図2にこれまで本研究室が堤体材料として用いてきた三河珪砂のCU試験の結果を示す³⁾。この三軸試験で用いた石英の粒径は、三河珪砂6号相当である。図1に示す有効応力経路から得られた石英の破壊応力比 q/p' は1.25程度であり、図2の三河珪砂のCU試験結果と比較すると、破壊応力比は同程度であることがわかる。また、粒径が近く、かつ間隙比も近い（間隙比1.06）三河珪砂6号の有効応力経路とも、塑性圧縮を伴う軟化現象を呈する点でも類似性が高い。珪砂の98%は石英であることから、力学特性の類似性は必然であるが、有効拘束圧100kPaでの石英の有効応力経路の性質がやや異なることなどの結果にやや不均一性が見られたのは、粒子形状などの影響ではないかと考えている。

表1 石英によるCU試験の試験条件

粒径(mm)	含水比(%)	間隙比	拘束圧(kPa)
0.1~0.4	10	1.0	50
			100
			150

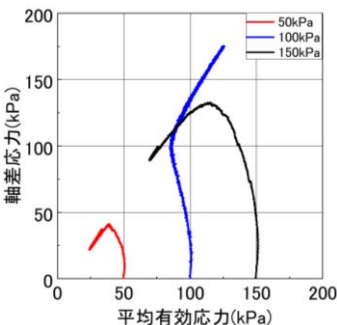


図1 石英のCU試験結果

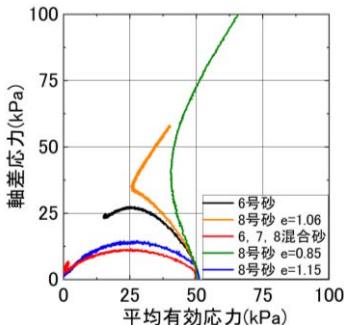


図2 三河珪砂のCU試験結果²⁾

キーワード 浸透実験, 石英, 屈折率マッチング法
連絡先 〒468-0073 愛知県名古屋市中白区塩釜口1丁目501

4. 堤体材料に石英を用いた2次元浸透模型実験

堤体材料として石英を用いた場合でも、これまで本研究室が行ってきた堤体材料に珪砂を用いた模型実験と同様な崩壊現象を再現できることを観察するために、堤体材料に石英、間隙流体に水を用いて2次元模型実験を行った。模型実験装置の諸元を図3、堤防模型実験に用いた地盤材料の諸元を表2及び表3に示す。

堤体材料に三河珪砂を用いた場合と石英を用いた場合の模型実験により得られた堤体変状の経時変化を写真1に示す。堤体材料に三河珪砂を用いた浸透模型実験では、給水槽から水を入れ、水位上昇を始めてから堤体内に浸透が進行し、約250sで川裏法先から浸透すべり破壊が生じている。その後、時間が経過するごとに川裏法先から法肩に向かって法面を徐々に削り始め、水位上昇を始めてから約1180sで堤体の変状が止まった。一方、石英を用いた浸透模型実験については、三河珪砂で浸透すべりが発生し始めた250sのときに、三河珪砂と同様に法先から浸透すべりが生じ始めている。その後も時間が経過するにつれて川裏法先から川裏法肩に向かって法面を侵食する浸透すべり破壊が進展しており、三河珪砂による実験と破壊の進展の度合いも形態もほとんど一致している。

5. 屈折率マッチング法による間隙流体の可視化

写真2に屈折率マッチング法を用いた浸透模型実験の様子を示す。基礎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槽に、粒子表面から極力脱気処理した石英を溶液中に落下させながら作製した。一方、堤体は石英をヨウ化ナトリウム溶液で湿潤状態にしてから、締め固めて作製した。このように作製した模型により、屈折率マッチング法を用いることで飽和化している基礎地盤の部分が透明化することができる。この状態から川表側の水位を上昇させることで、まだ精度は低いものの、基礎地盤から堤体法尻部に発生するパイピング現象で流れる間隙流体を可視化できることが示された。

6. まとめ

本報では、屈折率マッチング法を用いた浸透模型実験を行う際に堤体材料として使用する石英の力学特性の把握及び堤体材料に石英を用いた場合の破堤挙動の確認を行うためにCU試験と浸透模型実験を行った。その結果、三河珪砂による実験結果を再現できることが示された。

屈折率マッチング法を用いた浸透模型実験においては、パイピング現象が発生する堤体法尻部での間隙流体を可視化できることを示した。今後、堤体内部を流れる浸透流を高精度に計測できるような工夫を進める予定である。

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. 2)夏目ら：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，第58回地盤工学研究発表会，2023.3)小高ら：高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムと評価手法に関する研究，河川技術論文集，第24巻，pp.559-564,2018.

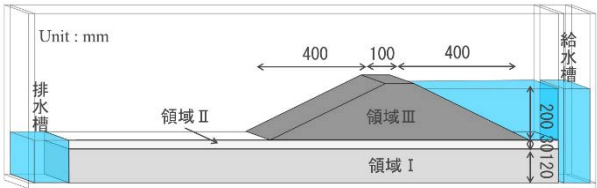


図3 模型実験装置の諸元

表2 三河珪砂を用いた堤体の諸元

領域	地盤材料	間隙比	含水比(%)	飽和透水係数 k_s (cm/s)
I	3号砂	0.95	4	2.67×10^{-3}
II	8号砂	1.06	4	3.98×10^{-5}
III	8号砂	1.06	4	3.98×10^{-5}

表3 石英を用いた堤体の諸元

領域	地盤材料	粒径(mm)	間隙比	含水比(%)	飽和透水係数 k_s (cm/s)
I	石英	0.75~2.0	0.90	10	2.56×10^{-2}
II		0.1~0.4	1.00	10	4.26×10^{-5}
III		0.1~0.4	1.00	10	4.26×10^{-5}

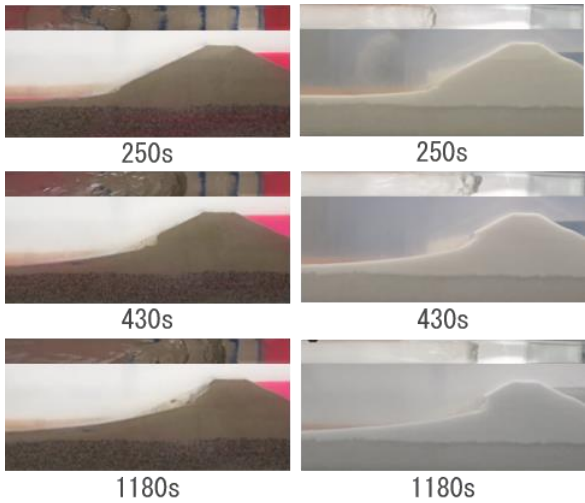


写真1 堤体変状の経時変化

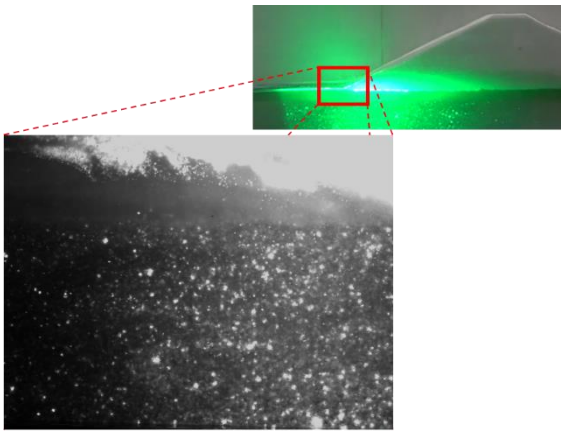


写真2 屈折率マッチング法による浸透模型実験