

マルチスケール浸透破壊現象の解明に基づく鋼矢板を用いた対策効果の評価

豊橋技術科学大学 ○松田達也*
豊橋技術科学大学 内藤直人*

浸透 透明砂 間隙流れ構造
鋼矢板 根入れ長 地盤安定性

研究の目的

地盤内の浸透現象は、豪雨時の斜面崩壊、河川堤防のパイピング破壊、護岸背面地盤の陥没等の多様な地盤災害や鋼矢板で構築したピットの崩壊などを引き起こす現象である。例えば、河川堤防の現行の設計・評価では、浸透破壊の生起判定は G/W (G :被覆土層の重量、 W :被覆土層基底面に作用する揚圧力) や局所動水勾配 i を指標として行われることが多い。このため、浸透に伴う地盤の進行的な変状過程は十分に考慮されていない。また、河川堤防などの浸透破壊対策として、鋼矢板を地盤内に挿入して遮水性を高める工法が用いられており、矢板の根入れ長は少なくとも透水層厚の 90%以上必要とされているが、その理由は局所動水勾配の低下という結果論にとどまり、間隙流れ構造の観点からは未解明である。

本研究では水と屈折率が等価な材料（以下、透明砂と称する。）を用いた間隙水の流速直接計測に基づく一次元浸透実験、矢板周りの浸透実験、および浸透流解析を実施し、矢板根入れ長が浸透流構造と地盤安定性に及ぼす影響を明らかにし、根入れ長決定の根拠を提示することを目的とした。

研究の内容

本研究では、上記の目的を達成するため、以下に示す研究課題に取り組んだ：

① 透明砂の形状・物性の把握

地盤工学分野で用いられる Transparent Soil の中でも、これまでに実験実績がない水と屈折率が等価な材料を用いて実験を実施した。このため、透明砂の粒子形状の評価、最小・最大密度試験、安息角試験、透水試験を実施し、可視化実験に適用するための基礎物性を整理した。

② 一次元浸透における間隙流れの高精度計測

間隙流れを定量的に評価するため、高速度カメラと PIV (Particle Image Velocimetry) 解析を用いて一次元浸透流を計測し、高精度計測を実現するための解析手法の妥当性を検証した。そのうえで、動水勾配と間隙流速の関係を明らかにし、間隙流れ構造を評価した。

③ 矢板周りの浸透流構造の評価と地盤安定性に関する考察

矢板周りの浸透実験と浸透流解析を実施し、矢板の根

入れ長に応じた間隙流れ構造を定量的に評価した。矢板の根入れ率の違いが局所流速、総流量、地盤安定性に及ぼす影響を検討した。

研究の成果、新知見

① 透明砂の形状・物性の把握

本研究で用いる透明砂は、NOK 株式会社が開発した新素材「MEXFLON®」であり、屈折率 1.333 と水の屈折率に等価で光学特性を備えているため、水を用いた間隙流れの可視化に適している。比重は 2.06 であり、粒子形状は円柱形と楕円形の 2 種類ある。円柱形は 100 個平均値として、直径は 2.89 mm、高さは 3.17 mm であった。楕円形は 50 個平均値として、直行する 3 軸の長軸： $a=4.30$ mm、中間軸： $b=3.32$ mm、短軸： $c=2.79$ mm となり、丸みの強い塊状の特性を有していることがわかった。

最小・最大密度試験、安息角試験、透水試験を実施した結果を表 1 に示す。各種物性試験の結果、いずれも地盤を模擬した浸透を可視化するための実験に適用可能な材料であることを確認した。

表 1 透明砂の形状別における物性値

	円柱形	楕円形
最小密度 (g/cm ³)	1.281	1.299
最大密度 (g/cm ³)	1.356	1.383
安息角 (deg.)	35.23	32.10
透水係数 (m/s)	4.01×10^{-3}	4.07×10^{-3}

② 一次元浸透における間隙流れの高精度計測

一次元浸透装置を用いて、鉛直上向き浸透流を観測し、PIV 解析により間隙流れの高精度計測を行って、間隙流れ構造を評価した。内径 46 mm の透明アクリルパイプにフィルターを設置し、その上に透明砂を層厚 50 mm となるように堆積させた。実験時は、供試体内へ流入する水の流れ場と、供試体内の観測領域での間隙内の浸透流場を高速度カメラで撮影した。

PIV 解析により求めた速度ベクトルを空間・時間的に平均化し、管路内の平均流速、透明砂内の平均間隙流速と動水勾配の関係を調べた (図 1)。一次元上向き浸透流の可視化と PIV 解析により、動水勾配の上昇に伴って断面平

均流速および平均間隙流速は増加するものの、間隙流速については流速の増加は線形ではなく、高勾配域では流路の再配分を示唆する非線形挙動が確認された。PIV 解析法の比較では、直接相互相関法よりも再帰的相関法の方が流速ベクトルのバラつきが少なく、高精度計測に有効であった。

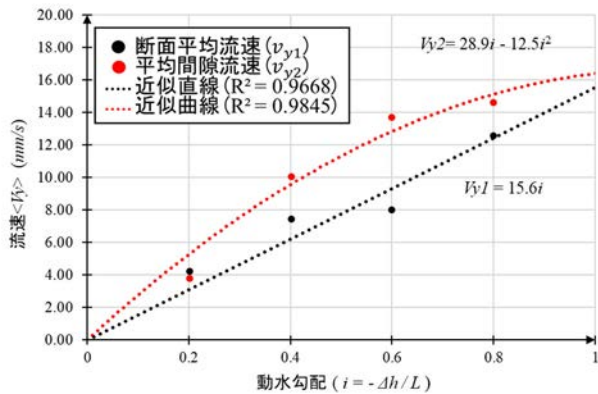


図1 平均流速および平均間隙流速と動水勾配の関係

③ 矢板周りの浸透流構造の評価と地盤安定性に関する考察

矢板周りの浸透流を視覚的に観察するため、浸透実験ならびに有限要素法による浸透流解析を実施し、間隙流れ構造の評価と地盤安定性に関する考察を行った。

浸透実験では、地盤を幅 150 mm、層厚 40 mm に堆積させ、地盤高に対して矢板の根入れ長を比率（以下、根入れ率）で設定した。実験中は上流側へ注水を行い、矢板の根入れ率に応じて上流側の側壁に排水孔を設け、下流側の側壁は高さを固定とすることで、上下流における水位差を一定に保持した。図2に代表ケースとして、矢板の根入れ率 80%、動水勾配 $i=0.5$ の条件における矢板下端近傍での浸透流速分布を示す。水を用いた矢板周りの間隙流れの可視化に初めて成功した。画像解析結果より、上流側（左側）において矢板下を通過するために流れが集中し、局所的に流速が大きくなった。一方、下流側（右側）では流れの集中が解放され、流線のような流れの筋が形成された。詳細に間隙流れを考察すると、一様に上方向に流れるのではなく、間隙構造の流れやすい方向に選択的な浸透をしていることが明らかになった。矢板下端を經由して下流側に流出した間隙流速を調べると、空間平均値として、約 15.0 mm/s であることがわかった。今後はレーザー照射断面を奥行き方向に一定間隔でずらしながら、間隙流速の空間平均を明らかにしたい。

浸透実験をもとに解析条件を設定した浸透流解析を実施した。矢板の根入れ率を 20%、40%、60%、80%、90%

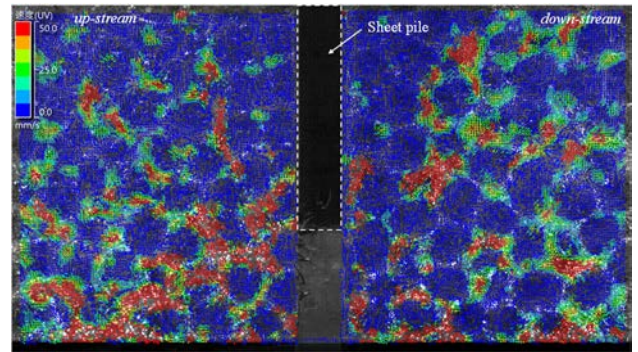


図2 矢板の根入れ率 80%、動水勾配 $i=0.5$ の条件における矢板周りの間隙流速ベクトル（実験）

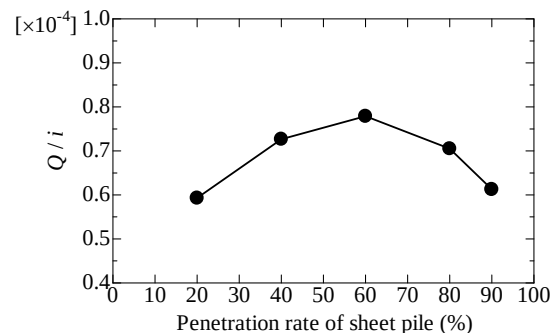


図3 矢板の根入れ率に応じた総流量と動水勾配の比（解析）

と設定した。本解析の根入れ率 80%で動水勾配 $i=0.5$ における矢板下の水平方向の浸透流速は約 4.0 mm/s であった。この浸透流速は断面平均流速であり、間隙率 n ($=0.33$ 程度) で除した実流速を求めると、約 12.1 mm/s となり、概ね透明砂を用いた浸透実験結果と整合する値となった。以上より、矢板の根入れ深さの決定に資する基礎的な実験・解析基盤を構築した。

そのうえで、下流側の基礎地盤表面における総流量 Q を調べたところ、根入れ率 60%の総流量がピークとなり、根入れ率が増加すると総流量が低下することがわかった（図3）。これは、浅い根入れでは遮水効果が小さいが、根入れ率が中程度では流れの集中が強まり、さらに深くなると浸透経路延長が卓越して総流量が減少するためと考える。一方、矢板の根入れ率の増加は浸透経路の延長による局所的な動水勾配および透水力の低減を通じて地盤の安定性を向上させ、浸透破壊の抑制に寄与することを明らかにした。

謝辞

本研究における数多くの実験および数値解析には、豊橋技術科学大学地盤力学研究室の学生・卒業生による多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。