

河川模型実験における浸透流の可視化と河川流の非接触型流速計測

水文気象工学研究室

柴田 堅太

1. 背景

浸透流を含む河川模型実験では河川と浸透流を同時に相似させる手法が確立されておらず、模型実験は浸透流相似まで考慮していない。その結果、模型実験の浸透流は実物と異なり、地盤中の間隙水圧、動水勾配、浸透流速などを模型実験から実物へと縮尺を以って拡大することができない。一方、これらは構造物の安定性評価、地盤のパイピング評価を大きく左右する要素である。河川流と浸透流を同時に計算できる数値モデルを用いて模型スケールと実物スケールの数値実験を行い、流れの相似性を確認・検討する手法が考えられる。VOFモデルにDarcy-Forchheimer抵抗項を導入して浸透流と河川流を同時に計算する既発表の数値モデル¹⁾が国総研の模型実験で検証されているが、模型実験では浸透流を計測せず間隙水圧を複数箇所測定するのみで、浸透流に対する検証が不十分であった。数値モデルは実物大の問題を直接扱える利点を有するものの、流れ場を高精度に計算できなければ、相似性検討の前提条件が崩れる。本研究の目的は浸透流を含む河川模型実験を実施して、浸透流の可視化と河川流の非接触型流速計測(PIV)を行い、河川構造物の下を流れる浸透流場を明らかにする一方、前出の数値モデルの検証に使われる高精度計測データをも提供することである。

2. 研究方法

本研究では、図1の長岡技術科学大学にある大型アクリル水路(10m×0.6m×0.37m)を使って浸透流が流れていく様子を観察した。水路途中に堰があり、堰落差4cm、水たたき長さ17cm、止水矢板を上流側に10cm、下流側に5cmとして設置した。地盤材には透水係数0.726cm/sの東北砂砂5号を敷き詰め、地盤材流出防止のために穴の開いたコンパネを敷いた。

浸透流可視化には地盤へアルミパイプを差し込んでインクを注入し、流れてきたインクの流脈を撮影して確認した。その流脈と図2に示す数値モデルの計算結果を



図1 実験で使用したアクリル水路(矢印が水の流れる方向)

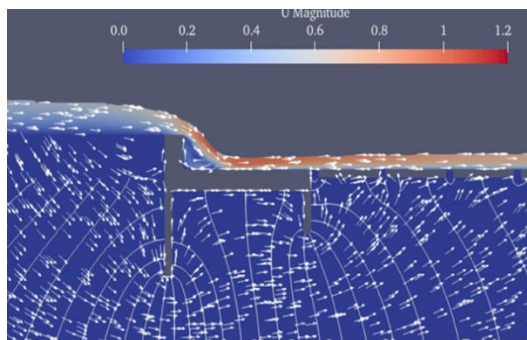


図2 数値モデルでの計算結果

比較した。アルミパイプは2種類あり、1か所に穴を開けたものと、2cm毎に穴を6か所開けたものである。

非接触型流速計測では、同様の水路でPIV²⁾を行った。本研究では、PIV解析に使うトレーサーとしてアルミ粉末を使用した。

3. 結果と考察

まず、流線、流脈、流跡³⁾を説明する。ある瞬間の流速ベクトルを線で結んだものを流線、ある一点から通過した流体が描いた線を流脈、ある粒子が時間と共に動き通った跡が流跡である。非定常流では三者は異なるが、定常流では一致する。浸透流は流れが遅く上下流側の水頭差で駆動されるので、定常流で考えても問題ない。今後、計算結果の流速ベクトルから読み取れる流線と実験で観察される流脈を同様に扱う。

図2にある数値モデルの計算結果と、実験で観察した流脈を図3、図4、図5に示す。図3は、複数穴の開いたパイプを用いて実験した際の写真である。数値計算と比較すると、止水矢板より深い地点にある流脈3本が計算結果と同じ動きをしているのが読み取れる。止水矢板2枚に囲まれた場所の流脈を獲得することも試みたが、インクが潰れてしまったため図2と同じ結果を得ることができなかった。図4は二枚の止水矢板を迂回して流れる1本のW型流脈を獲得しようとして、一か所穴の開いたパイプを用いて実験したものであるが、矢板に囲まれたwの上に凸な部分でインクが途切れてしまい、w型流脈を確認することができなかった。この原因として、模型実験では構造物と地盤の間に隙間ができやすく浸透流は抵抗の小さい所を選んで流れるため、隙間がある上方向に流れていったと考えられる。一方で、数値実験では地盤は均一に隙間なく敷き詰められた理想状態で計算している。そのため模型実験の結果と数値モデルの結果は、隙間のできやすい構造物周辺では異なってくると考えられた。図5の実験は構造物と地盤の間に隙間が出来ないように留意して準備を行い、一か所穴の開いたパイプ

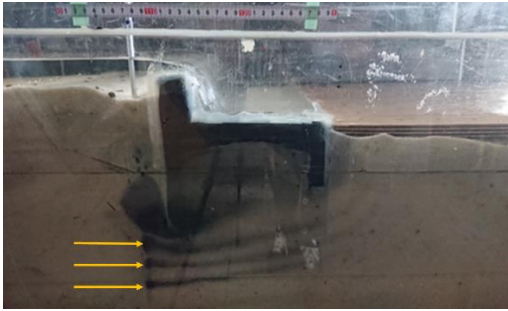


図3 実験で獲得した流脈(複数穴の開いたパイプの場合)



図4 流脈が途切れる写真(一か所穴の開いたパイプの場合)



図5 インクが一色に染まり流脈が得られないケース



図6 矢板内側にインクを注入して得られた部分的な流脈

を用いて止水矢板内側の W 型流脈を獲得しようと再実験して得られた写真である。ここでは、W 型の輪郭が得られたが、中が一色に染まり個々の流脈は得られなかった。図 2 から上流側矢板先端で流れが収縮して右上後方へ広がる様子を読み取れるが、この特徴によって矢板先端の流脈は分かれることなく右上後方と広がっていったのである。止水矢板内側の流脈を獲得するためには、浸透流路が密集する場所を避けてインクを注入することが有効であると考えた。そこで、図 6 のようなビニル管を止水矢板内側に差し込んでシリンダーでインクを注入する方法で流脈を観察した。図 6 に示す通り、図 4 の矢印で書いた水叩き下をアーチ状で通過する流脈を確認することができた。これは W 型流脈の上に凸な部分である。今回の研究で止水矢板を迂回して通過する W 型の流脈を獲得することはできなかったが、インクの注入方法を

改善して部分的に再現することはできた。

次に、非接触型流速計測の結果を述べる。解析ソフトを用いて流速を測定した結果、水路の流量が 0.67L/s の時における平均流速は、5.40cm/s であった。これは流量と通水面積から得られた平均流速 5.44cm/s とほぼ一致している。PIV を用いて計測を行う利点として、非接触で流れの空間分布を瞬時に計測できることにある。今回は単純な一様流を PIV で計測していたが、複雑な流れ構造を有する跳水や渦を巻いているような複雑な流れに対して PIV はその力を発揮する。さらにこの実験のように水深が浅いと、接触型流速計は流れ自体を影響してしまうため、精度の高い流速は計測できない。しかし、PIV にはその心配は少ない。

4. 結論

- 1) 構造物下の深いところを流れる浸透流の流脈は計算結果と良好に一致する。複数穴からのインク投入で同時に 3 本の流脈を得ることもできた。このエリアは実験と計算の条件が近いためである。
- 2) 二枚の止水矢板を迂回して通過する W 型流線は、その真ん中の形は緩いアーチ型をしているが、実験での再現は困難で止水矢板に囲まれた場所の中間部で切れることが多い。水叩き直下に隙間ができやすく流れは抵抗の小さいルートを選び、隙間に向かった上方向に流れるためである。
- 3) 上流側止水矢板をビニル管で迂回して止水矢板内側からインク注入する方法で、W 型流線のアーチ型の部分を再現することができた。二枚の止水矢板を迂回する W 型の流脈を一本の流脈で再現することはできなかったが、流脈を分解して W 型流脈の真ん中の上に凸な部分を観察できた。
- 4) 入念に実験して得られた流脈は数値モデルの浸透流結果を検証できたが、実際の現場はむしろ W 型流線でない状況が多く、それを想定してパイピングなど評価する必要があると考える。
- 5) PIV による非接触型流速測定を行い、流れを干渉されずに流速を測定することができた。ただし、本研究は浸透流に主眼を置いているため、流速場の実験と計算の比較はしなかった。

参考文献

- 1) 楊宏選, 福元豊, 細山田得三, 大塚悟: 水・地盤連成解析手法による落差工周辺の河床構造物の安定性評価, 土木学会論文集B1 (水工学), 第74巻, 5号, I_655-I_660, 2018
- 2) 石間 経章: Particle Image Velocimetry (PIV)の基礎, (日本燃焼学会誌, 第 61 巻, 197 号, 2019.
- 3) ものづくりウェブ 流体力学の基礎を学ぶ 流線, 流跡線, 流脈