

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04270

研究課題名（和文）浸透流を含む河川水理模型実験の相似性を満たす実行可能対策の提案

研究課題名（英文）Proposal of feasible measures to satisfy the similarity of river hydraulic model experiments including seepage flow

研究代表者

楊 宏選（YANG, Hongxuan）

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：00324004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：河川流と浸透流を同時に相似させる理論的な相似条件を導出し、模型実験と浸透流可視化実験で検証された数値モデルで浸透流を含む河川流の水理模型実験に実現可能な相似の要件および対策を検討した。

層流であれば、透水係数が相似すれば圧力が相似し、透水係数が厳密に相似しなくとも圧力の相似性は大きく崩れないことが分かった。乱流の場合、相似条件が厳しく、模型の透水係数が実物の透水係数に流速縮尺に従う他に、 $FL_{\text{模型}} = FL_{\text{実物}}$ という条件をも満たす必要もあるが、数値解析が高Re数の場合にFL数だけを合わせれば、圧力相似性が概ね得られることを示した。なお、FはForchheimer係数、Lは代表長さである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

浸透流の試験は地盤専門の方が行う場合が多い。一方、河川の流れの相似は水工学専門の方が考えることである。河川構造物の場合、地盤中の浸透流が流れとして無視出来ても圧力の連続的伝播という意味で無視できず、河川流と同時に扱う必要があり、河川流の相似と矛盾しない相似が求められる。浸透流速が小さいだけに、浸透流を含む模型実験において浸透流が相似せず圧力相似の喪失は浸透流を扱わない水工学専門家が見落としがちであり、対策もないのが現状である。浸透流を含む河川の模型実験に、浸透流にも相似性を持たせることができれば、学術的に意味があるだけでなく、模型実験がより実物に近い現象になり、河川防災に重要な社会貢献となる。

研究成果の概要（英文）：Theoretical similarity conditions to simultaneously satisfy similarities of river flow and seepage flow were derived, and feasible similarity requirements and countermeasures for hydraulic model experiments of river flow including seepage flow were examined using numerical models verified by model experiments and seepage flow visualization experiments.

For laminar seepage flow, it was found that if the permeability is similar, the pressure is similar, and even if the permeability is not strictly similar, the pressure similarity is not significantly broken. In the case of turbulent seepage flow, the similarity condition is strict. The permeability of the model follows the permeability of the real object on the flow velocity scale, and it is also necessary to satisfy the condition that $FL_{\text{model}} = FL_{\text{real object}}$. F is the Forchheimer coefficient and L is the representative length.

研究分野：水工学

キーワード：河川構造物 浸透流 フルード相似 不安定 パイピング

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

数値計算が発達している現在でも、河川において水理模型実験による現象の解明・検討が多く行われ、絶大な信頼を置かれている。河川の模型実験はフルード相似則に基づいて行われるが、河川構造物にまつわる移動床・固定床模型実験は、多くの場合、浸透流・洗堀を含むことになっている。浸透流の存在によって地盤中圧力が連続的に変化するものの、透水係数（抵抗）によってその減衰パターンが異なる。しかし、浸透流を含んだ河川流の模型実験は浸透流の相似まで考えていないのが現状である。これは構造物底面の受ける揚力、地盤中動水勾配が模型実験で得られないことを意味し、構造物の安定性評価、地盤のパイピング評価などに影響を及ぼす。浸透流を含む河川の水理模型実験に実スケールに相似できる実験手法を導入することが重要である。

2. 研究の目的

本研究は、理論的に河川流に合わせた浸透流の相似則を検討し、数値計算と模型実験を以て検証することで、浸透流を含む河川流の水理模型実験に実現可能な相似の要件および対策を提案することを、目的とする。河川流または浸透流の単体の相似しか扱われてこなかったが、それらが共存する現象は実態に合い、その統合体の相似性を検討・維持することは、真の水理模型実験につながる。

3. 研究の方法

(1) 河川流と浸透流を同時に相似させる理論的な相似条件の導出である。自由水面を扱う VOF モデルに、浸透流の抵抗を運動方程式に取り入れた河川流と浸透流を同時に計算する数値モデルの基礎方程式を無次元化して、相似に必要な条件を導き出す手法を用いる。

(2) 浸透流の可視化実験で浸透流場のデータを得て、数値モデルの検証に提供する。既往の国総研の模型実験は河川流のデータは豊富であったが、浸透流のデータは数箇所の間隙圧力のみであり、場としてのデータがなく、数値モデルは模型実験である程度検証できたものの、浸透流部分の検証が不十分であった。

(3) 理論的相似条件を用いた数値モデルによる模型スケールと実物スケールの相似性の検証。実験による相似性の検証は予算からして現実的ではなく、可視化実験で検証された数値モデルで数値実験を行い、必要な相似条件と現実的な相似対策を検討した。

4. 研究成果

(1) 国総研の既往実験データ（複数箇所の間隙圧力、複数箇所の河川流流速、河川流の水面形）に加えて、可視化実験で浸透流の流脈・流線を得た。これらのデータを使って数値実験の V&V を行ったが、数値実験は室内実験と同じ結果になることは可能である一方、室内実験は必ずしも想定通りの設定で行われるとは限らないことが判明した。つまり可視化実験で得られた流線にばらつきがあり、構造物下部の透水材は想定状態で敷き詰められていないケースが多い（図 1 の (c) の流脈は得難く、(a) (b) のようになりがち）。現場も設計通り透水材が敷き詰められない状況が十分あり得ると考えられる。

(2) 模型実験と実物の相似性に必要条件を層流（ダルシー流）と乱流に分けて導出し、河川流を含む数値実験（ダルシー流）と河川流を含まない数値解析（非ダルシー流）に分けて相似性の実現可能性を検討した。

① 層流であれば、透水係数が相似すれば圧力が相似し、透水係数が厳密に相似しなくとも圧力の相似性は大きく崩れないことが分かった。

② 乱流の場合、相似条件が厳しく、模型の透水係数が実物の透水係数に流速縮尺に従う他に、 $FL_{\text{模型}} = FL_{\text{実物}}$ という条件をも満たす必要もある。なお、 F は Forchheimer 係数、 L は代表長さである。即ち、模型のサイズが実物の $1/N$ であれば、透水係数 K を実物の \sqrt{N} に、Forchheimer 係数 F を実物の N 倍に、同時に満たすことが要求され、非現実である。しかし、 Re 数が 10 になると層流項の寄与が 10% 程度しかないことを利用して、数値解析が高 Re 数の場合に FL 数だけを合わせれば、圧力相似性が概ね得られることを示した。

(3) 国総研の大粒径透水試験の再吟味をも行った。透水係数は動水勾配によって変わっていた（図 2。世の中、動水勾配によって透水係数が変わると思う人も多い）が、粒径に基づく Re 数が 50~3500 であり、透水試験を乱流と考えて再計算すれば動水勾配にほぼ依存しない透水係数 K と F ($-\Delta h/\Delta x = au_F + bu_F^2$, $k = 1/a$, $F = 2gb$) が得られた（図 3）。 F はばらつきが小さく、乱流であればばらつきの大きい透水係数 K を無視して良い（層流項の寄与は僅か）。

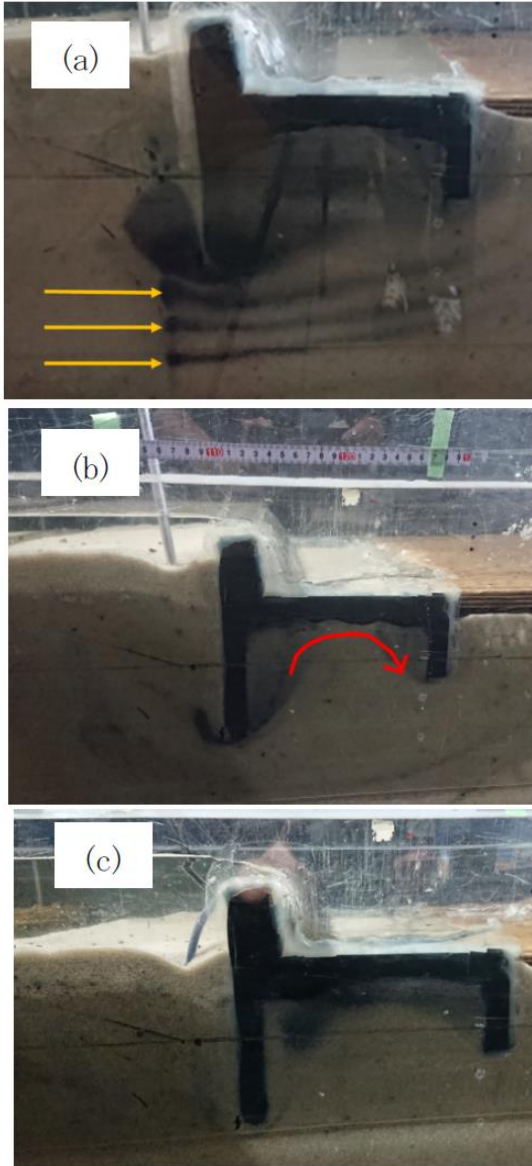


図1 浸透流可視化の写真

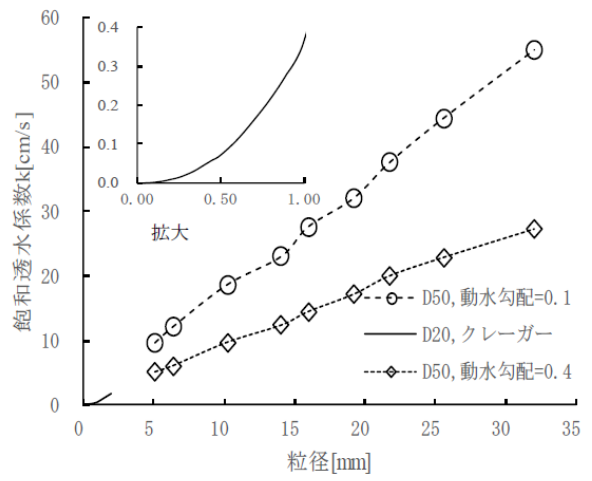


図2 透水係数と粒径の関係(国総研)

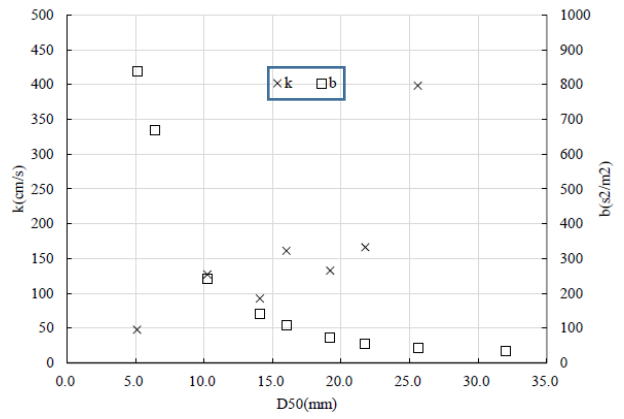


図3 透水係数 k とフォルヒハイマー係数 b と粒径の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 田代陸、楊宏選、熊倉俊郎、陸旻皎、細山田得三	4. 巻 1
2. 論文標題 浸透流を含む河川の実験と実物スケールの相似性の検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 長岡技術科学大学修士論文	6. 最初と最後の頁 1, 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 柴田堅太、楊宏選、熊倉俊郎、陸旻皎、細山田得三	4. 巻 1
2. 論文標題 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	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 長岡技術科学大学修士論文	6. 最初と最後の頁 1, 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田代陸、楊宏選、熊倉俊郎、陸旻皎
2. 発表標題 模型スケールと実物スケールの数値計算による浸透を含む河川模型実験の相似性の検討
3. 学会等名 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田堅太、楊宏選、熊倉俊郎、陸旻皎
2. 発表標題 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
3. 学会等名 土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 楊 宏選、柴田堅太、田代 陸、熊倉俊郎、細山田得三、陸 旻皎
2. 発表標題 河川構造物周りの河川流・浸透流同時解析モデルの検証と妥当性確認
3. 学会等名 第 26 回 (2023 年度) 応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	細山田 得三 (HOSOYAMADA Tokuzo) (70262475)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------