

# 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

長岡技術科学大学 学生会員 ○田代 陸 正会員 楊宏選・熊倉俊郎・陸旻皎

浸透流と跳水を含む河川構造物の水理模型実験について、フルード相似則に基づく河川流の相似性を満たしつつ、浸透流にも相似性を持たせるアプローチを、模型スケールと実物スケールに対する数値実験を通して確認・検討した。得られた知見として浸透流はダルシー流の場合、透水材が単一であれば自ずと浸透流相似になるが、複数透水ゾーンが存在する場合、ゾーン間の透水係数比の維持が相似の条件である。

## 1. 背景

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、絶大な信頼が置かれている。相似則はいくつかあるが、河川の場合、重力が流れを駆動する支配的な要素なので、慣性力と重力の比を表すフルード数を合わせるフルード相似則がよく採用される。浸透流のみの模型実験においては、透水材料さえ同じものを使えばよいという説<sup>1)</sup>、幾何学的相似性のみから自動的に運動学的相似が成り立つという説がある<sup>2)</sup>。

河川の模型実験はフルード相似などに基づいて行われるものの、浸透流を含んでいるケースでは、必ずしも浸透流の相似を満たしているとは言えない。河川流の相似、浸透流の相似は個別に満たすことは可能であるが、河川構造物周りに自由水面を有する河川流・跳水、及び地盤中の複数の透水ゾーンを流れる浸透流が同時に存在するとその両方を満たす相似則がわからず、模型実験では浸透流の相似まで考慮されていないのが現状である<sup>3)4)5)</sup>。

著者らは既往の研究<sup>6)</sup>で、浸透流と河川流を同時に計算する数値モデル<sup>6)</sup>で模型実験に対する数値計算を行い模型実験に一致する結果が得られている。のちに数値モデルの支配方程式から、浸透流と河川流に相似性を同時に持たせる半理論的条件を導出した<sup>7)</sup>が、数値実験による確認はなされていない。

本研究は既報<sup>8)</sup>を発展させて、浸透流と河川流に同時に相似性を持たせるために、より現実性のある対策を、数値実験を通して検討する。浸透流の相似を模型実験と実物と比較・検証するのは技術的にも予算的にも難しいが、数値モデルは模型と実物を区別せず扱える。

## 2. 模型実験及び数値実験

### (1) 模型実験

国総研河川研究室の縮尺1/10二次元固定床水理模型実験の詳細図を図-1に示す。図中の寸法単位はmm

であるが、▽で示されるのは現地標高であり、単位はmである。堰の下には20mm相当の割栗石、護床工ブロック下流には40mm相当の玉石が設置された。堰はコンクリートの一体構造であるが、模型実験では堰本体は図-1(a)に示されるように縦断方向に7分割、横断方向に2分割された。縦断方向に7分割された各ブロックに番号①～⑦が振られた。被災時に堰本体がめくれた範囲(ブロック⑤-1と⑥-1)を中心に堰表面と裏面を対に圧力センサーが設置された。表面から順に②～⑧、裏面から順に⑩～⑯である。圧力と静圧(水深)が合致しているか確認するために堰上流部の①に圧力センサーが、落差部に負圧が発生しているか確認するために⑨に圧力センサーが設けられている。いくつかの縦断位置で水深方向に複数点の流速が計測された。模型実験の単位幅流量は $0.214\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ である。模型実験の詳細は既報<sup>9)</sup>を参照されたい。

### (2) 数値実験

図-2に固定床模型実験に対する計算領域を示す。透水係数の異なるゾーンは色別で表示し、 $k_0 \sim k_4$ は図-1の粗朶沈床、砂、割栗石、ホロースケヤーと捨て石ゾーンの透水係数で、それぞれ13.1, 0.0726, 23.4, 46.8,  $13.1\text{cm/s}$ を採用した。このうち、 $k_1$ は長岡技大で計測された値、その他は国総研実験<sup>9)</sup>で計測された値、またはその実験で得られた粒径と透水係数の関係で線型補間

された値である。模型実験は長さ28mの水路で行われるが、数値実験は模型実験全体を対象とせず堰周辺だけを計算領域として扱う。計算領域の大きさは横1270mm、縦4334mmである。格子サイズは水平方向1.3mm～5mm、鉛直方向2mm～2.5mmとした。

境界条件：紫色の河川流域の左境界は流入境界で流量を与えて水深により流速が求められる。乱流強さを5%と想定して経験式により $k$ と $\varepsilon$ が決められる。

河川流域の上境界は大気圧を指定して流速の法線勾

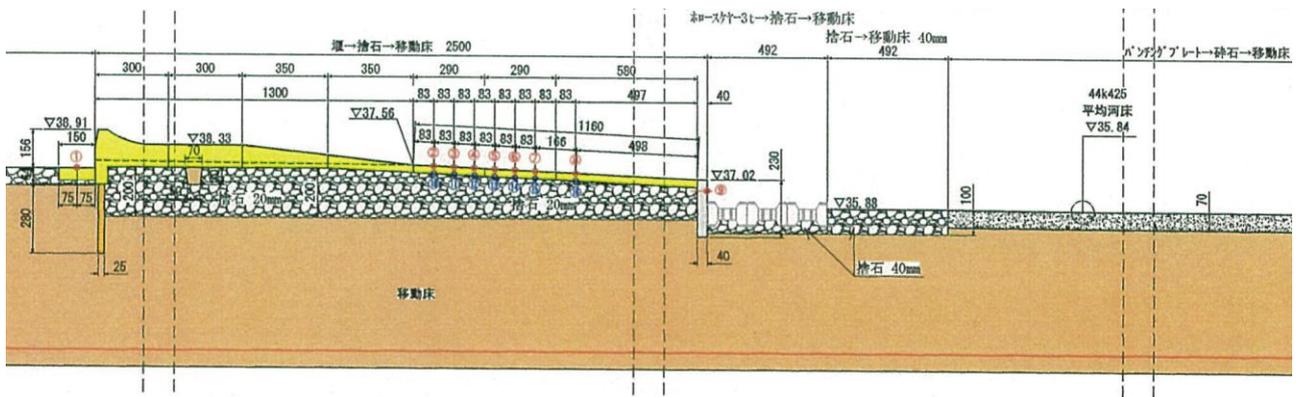


図-1 水理模型実験の床止め部分の縦断面図と平面図（単位 mm, ▽に示されたものは現地スケール (m)）

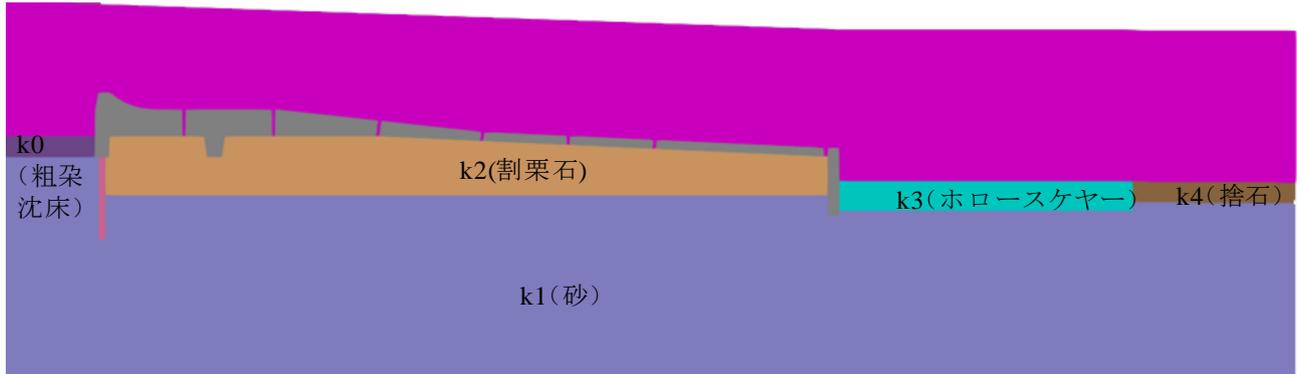


図-2 水理模型実験に対する計算領域, k0~k4は透水係数

配ゼロに基づいて流出入を許す。計算領域の右境界は流出境界で、勾配ゼロの条件を課す。地盤域の下境界と左境界は壁として扱う。

### 3. 結果と考察

図-3にいくつかの典型ケースの流速と等ポテンシャル線を示す。河川流と浸透流の速度差が大きすぎて同一図に表示するために白い矢印は流速の向きのみを、背景色は流速の大きさを示す。図-3(a)には模型実験で得られた水面形（青い線）と流速（黒い矢印）もプロットしている。

図-3(a)は模型実験に対する計算結果である。この図は模型実験の河川流を数値実験が良く再現していることを表す。増水時に堰本体が破壊されたのを再現するために堰をブロック構造にしているのが特徴である。そのために浸透流は実物から大きく変わったと考えられる。

図-3(b)は実物と形状を一致させるべく、堰のブロック構造を一体構造に変更して得られた計算結果である。河川流はほぼ変わらないが、流線網は大きく変わっている。20mm割栗石ゾーンの動水勾配は等ポテンシャル線がないほど小さい。

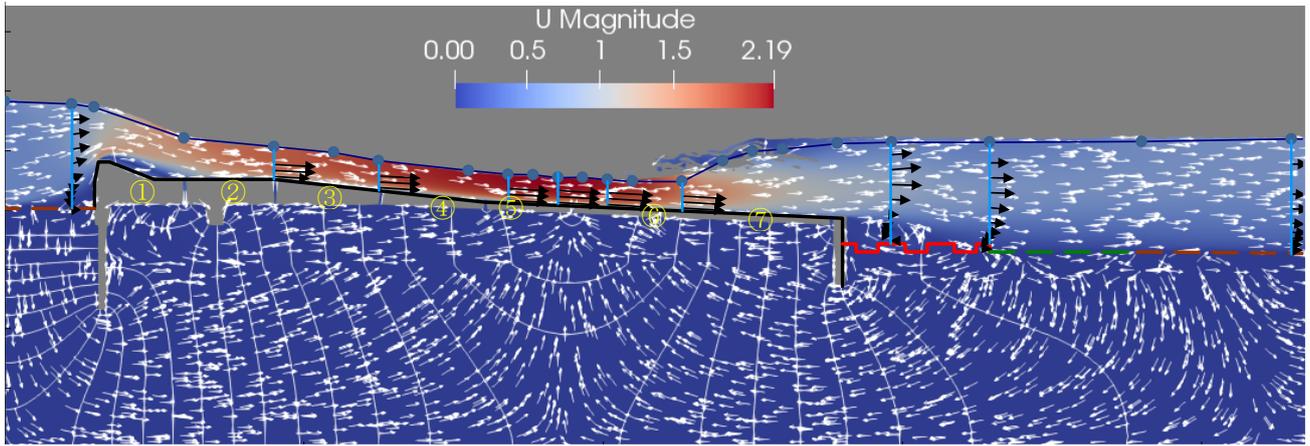
図-3(c)は(b)の各透水ゾーンを全て砂に変更して得られた計算結果である。堰下の等ポテンシャル線分布は(b)から大きく変わり、元20mm割栗石ゾーンの

動水勾配が大きくなっている。

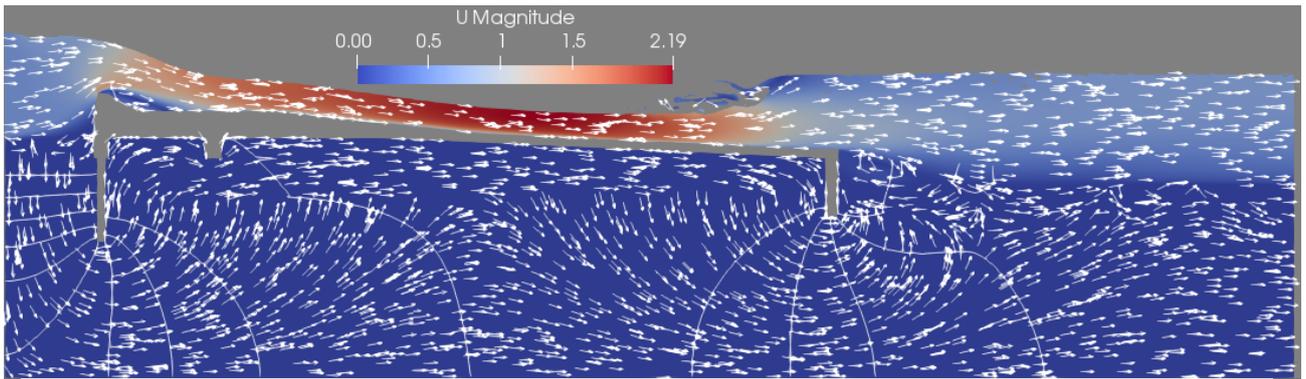
図-3から得る知見として、浸透流相似の前提条件は、まず、河川構造物幾何形状の相似である。外形が相似していても、僅かな隙間があると水と圧力が漏れて河川流にほぼ影響を及ぼさないものの、浸透流が劇的に変わる。次に、複数透水ゾーンが存在すると、透水係数の相対的大きさによって動水勾配が大きく変わる。

図-4に河川と浸透流の同時相似に関して複数の数値実験から得たpoint1~7の間隙圧力を示す。point1~7はブロック①~⑦のほぼ真ん中直下の位置であり、その座標値はここで省略する。見やすくするためにマーカーを通る線も描いたが、線に特に意味はない。破線は図-3(b)の実物スケールに対する計算で、透水係数は模型の $\sqrt{10}$ 倍であり、相似に必要なとされる理論的倍率の値である。◇は模型である図-3(b)の計算値を縮尺1/10で割った値（模型から得た実物の値）である。+と□はそれぞれ図-3(b)の透水係数を0.5倍と2倍にして計算された結果である。重なって見にくいほど、◇+□は実物の破線と高度に一致している。よって、模型の透水係数は理論的な縮尺(◇)に従わなくても、ゾーン間透水係数比を実物と合わせれば(+□)相似性のある圧力が得られるということが数値実験で検証されたことになる。

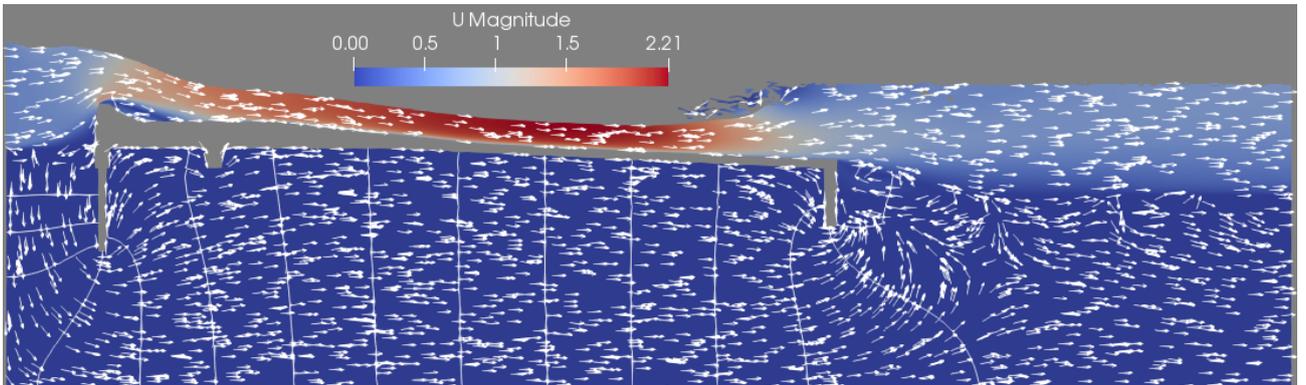
図-4の○と×はゾーン間透水係数比が間隙圧力の



(a) ブロック構造の堰,  $k_2/k_1=321$



(b) 一体構造の堰,  $k_2/k_1=321$



(c) 一体構造の堰,  $k_2/k_1=1$

図-3 ブロック構造・一体構造・ゾーン間透水係数比の浸透流に及ぼす影響（流速単位[m/s], 等ポテンシャル間隔 0.01m）

相似性に及ぼす影響を比べている。○は堰直下の割栗石と砂の透水係数比 $k_2/k_1$ が10:1の場合（ $k_0, k_3, k_4$ と $k_1$ の比は正しく維持）に得られる圧力である。割栗石の透水係数が相対的に小さくなった結果、圧力は全般的に高くなっており、目視からpoint1でずれが最も大きい。このずれを数値として出すと2%である。このケースに限って、割栗石と砂の透水係数比を321:1から10:1に変えても圧力のずれは最大2%程度出ると言える。あらゆる場所の圧力を比べていないこと、いろんな河川構造物の透水ゾーンの配置を検討していないことから、どの程度の透水係数のずれでどの程度の圧力のずれを誘発するかは、まだはっ

きり言えないが、この結果は一つの目安になる。×は、割栗石と砂の透水係数比 $k_2/k_1$ が1:1の場合（ $k_0, k_3, k_4$ と $k_1$ の比は正しく維持）に得られた計算値である。さすがにずれが大きく相似性があるとはいえない。ここで気になるのは、10:1の○は全体的に圧力が高めに出るが、1:1の×は圧力が低めに出る場所もある（point7）。透水係数比 $k_2/k_1$ を321:1から10:1に変えた場合、割栗石は抵抗がまだ砂に対して十分大きく支配的であったが、1:1にしたとたん、割栗石ゾーンの支配的地位が失われ、圧力や流れの相似性が完全に失われたと考えられる。割栗石ゾーンの透水係数が相対的に小さければ常にあらゆる場所

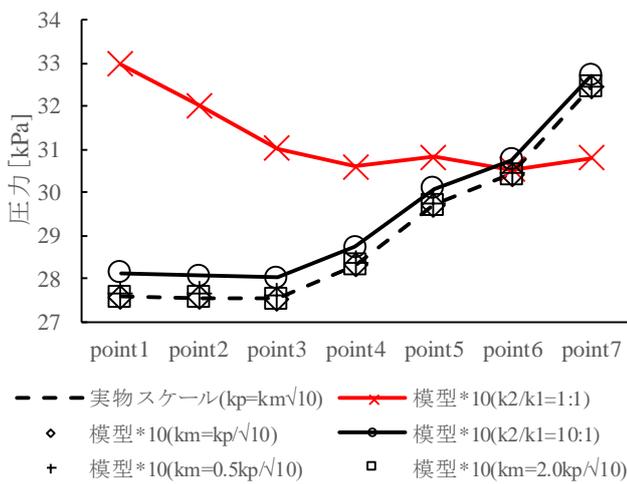


図-4 ゾーン間透水係数比と圧力相似の関係  
( $k_m$  と  $k_p$  はそれぞれ模型と実物の透水係数)

で圧力は高くなるとは限らないことに留意する必要がある。

最後にこの相似性の適用範囲と限界を考察する。浸透流の圧力相似と河川流のフルード相似によって構造物に作用する流体力や揚力が再現され、模型実験で実物の力学安定性を調べることができる。一方、レーンの式は構造物底面に沿った浸透路の平均動水勾配と粒径に応じるクリープ比でパイピング評価をしている。粒径が小さいほどクリープ比が大きくなることからわかるようにパイピングは動水勾配だけに依存せず粒径に強く影響される。浸透流相似で実物と同じ動水勾配が得られても、実物と同じ粒径でないとパイピング相似は実現できない。

次にダルシー則に基づいて検証された相似条件が乱流の浸透流に適応できるか考察する。既報<sup>6)</sup>はDarcy-Forchheimer則に基づく抵抗項を導入しているが、数値実験は乱流項を扱うForchheimerを省略した。吉岡と登坂<sup>9)</sup>は $Re$ が10になると、乱流項が10%程度の割合を超え、Forchheimer係数を適切に見積もることが重要とし、Forchheimer係数に関して信頼度が高いとされる四つの推算式を比較検討したものの、理論的にも実験的にもまだ不十分な状況にあるとした。本研究で乱流項を省略した理由の一つはここにある。

#### 4. 結論

浸透流にも相似性を持たせるために、自由水面を有する複雑な流れに対応できるVOFモデルにダルシー項を導入して河川流と浸透流を同時に計算する数値モデルによる数値実験と模型実験から、以下の知見が得られた。

1) 透水係数の異なる複数透水ゾーンの存在が一般的であるが、浸透流相似を持たせる透水係数は理論的縮尺(速度縮尺)にしなくとも、ゾーン間透水係数の比率を維持すれば高精度の圧力相似性が得られる。比率に多少の乖離があっても相似性は大きく損なわれない。

2) 構造物直下の割栗石とその下の砂地盤との透水係数比率を相対的に小さくすると一般的に揚圧を上げることになる。しかし、極端に比率を小さくすると相似性が崩れ、場所によっては揚圧が下がることもあり得る。

今後の課題は、非ダルシー流としても扱えるような数値実験を行い、オーダーレベルで扱われる透水係数に対して乱流項の導入に有意の結果が得られるか確認する。

謝辞：本研究はJSPS科研費21K04270の助成を受けた。実験データについては国総研河川研究室から提供を受けた。

#### 参考文献

- 1) 吉田昭治：飽和浸透流の相似律と模型実験則について、農業土木研究別冊第5号，pp.1-9，1963.
- 2) 沢田敏男：浸透水の流動に関する研究，農業土木研究，第21巻，6号，pp.360-368，1954.
- 3) 山本陽子，中村良二，福島雅紀：流体力に護床工ブロックの破壊限界に関する実験的検討，河川技術論文集，第25巻，pp.469-474，2019.
- 4) 下津隆介，山本陽子，福島雅紀：河床低下を考慮した護床工ブロックの破壊限界評価に向けた検討，河川技術論文集，第26巻，pp.425-430，2020.
- 5) 楊宏選，福元豊，細山田得三，大塚悟：落差床止め工の流れ場および安定性について，土木学会論文集 A2(応用力学)，第75巻，2号，pp.I\_519-I\_530，2019.
- 6) 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.
- 7) 楊宏選，福元豊，細山田得三，大塚悟：浸透流を含む河川の水利模型実験の相似性について，土木学会論文集 A2，Vol.76，No.2，pp.I\_411-I\_422，2020.
- 8) 河川横断構造物周辺の急変流に関する水利実験業務報告書，建設技術研究所，8月，2019.
- 9) 吉岡真弓，登坂博行：高透水性多孔質体中の非ダルシー流れに関する考察，地下水学会誌，52巻3号，pp.275-284，2010.