

二次元固定床模型実験及びそれを再現する数値解析モデルによる床止め工の圧力と流速等の考察

A STUDY ON THE VELOCITY AND PRESSURE FIELDS AROUND GROUNDSILL FROM RESULTS OF 2D HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTS AND NUMERICAL SIMULATIONS

楊宏選¹・山本陽子²・福元豊³・細山田得三⁴・大塚悟⁴・福島雅紀⁵
 Hongxuan YANG, Yoko YAMAMOTO, Yutaka FUKUMOTO,
 Tokuzo HOSYOYAMADA, Satoru OHTSUKA and Masaki FUKUSHIMA

¹正会員 博(工) 長岡技術科学大学助教 環境社会基盤工学専攻 (〒160-2188 新潟県長岡市上富岡町)

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所 河川研究室 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

⁵正会員 工博 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 室長 (同上)

³正会員 博(農) 長岡技術科学大学助教 環境社会基盤工学専攻 (〒160-2188 新潟県長岡市上富岡町)

⁴正会員 工博 長岡技術科学大学教授 環境社会基盤工学専攻 (同上)

Fixed bed hydraulic model experiments were carried out for a gentle slope block type groundsill with a flexible structure. Numerical simulations were also performed to obtain the seepage flow included velocity field and the pressure field around the groundsill. The numerical and experimental results show a good agreement. It is shown that vertical hydrodynamic forces acting on the blocks have local maximum value and the pressure varies periodically at the hydraulic jump. The computations also show that pore water pressure increases with decreasing permeability of materials under the structure, decreases at the gap of the groundsill blocks. In scoured hole, bottom velocity of submerged hydraulic jump is several times bigger than the value of undular hydraulic jump's reverse velocity.

Key Words : sand suction, hydraulic jump, hydraulic model experiment, numerical simulation, block type groundsill, flexible structure, VOF, seepage flow

1. 序論

床止め工は河床を安定させ、河床の縦横断形状を維持するために設置される河川構造物である。その設置目的と形状から、河床低下の防止を目的とするものは落差工と呼ばれる。落差工は河床高に落差が生じる場所に設けられるが、本体の縦断形状によって直壁型と緩傾斜型に、本体の構造型式によってコンクリート構造と屈とう性構造に分けることができる¹⁾。本研究は、屈とう性構造を有する緩傾斜型落差床止め工を主な対象とする。

設計¹⁾において図-1に示されるように、落差による高速射流区間 L_1 とその直後の跳水区間 L_2 を護床工Aでカバーし、跳水を通して流れを減勢し、さらに護床工B区間で整流して円滑な流れとして下流側河道に引き継ぐこととしているが、上流供給土砂量の減少と河道の二極化による河床低下等により、下流側水位が低下して跳水位置が下流側に移動し、減勢の不十分、または減勢のない

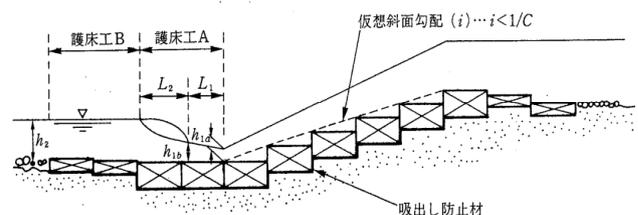


図-1 ブロック構造による落差工の模式図¹⁾

流れが床止め下流側を流れると、高速乱流による河床洗堀が生じ、洗堀孔の拡大あるいは河床低下を引き起こし、想定以上の流れによる流体力の増加や河床材料流失による河床支持力の喪失で連鎖的に上流側の護床ブロックが破壊していく。このような河床洗堀や護床ブロック破壊のプロセスを山本ら²⁾が移動床模型実験を行い報告している。移動床実験の圧力と流速は計測し難く、山本ら²⁾のこの実験では破壊現象の観測にとどまっている。河床洗堀や護床ブロック崩壊に至るメカニズムを解明するのにブロックに作用する流体力、河床表層流速と地盤内圧

力分布等の情報が必要である。そのために本研究は、信頼性が高いが点の情報しか得られない模型実験と、空間情報が得られるが実験無しに信頼性を語り難い数値実験とを組み合わせて、(実名を伏せて) A床止め工の河床上と地盤中の流れ場情報を得ることを目的とする。具体的に、まず、移動床実験の結果²⁾を踏まえてふとんかご流失前と流失後の固定床模型実験を行い、複数箇所の水位・流速・圧力を計測する。次に、実験で計測された点の情報を補完するために、数値実験を行い、計算結果の検証をして空間情報としての流速場と圧力場が得られる。最後に、得られた情報に対して考察がなされる。

2. 模型実験及び数値実験

(1) 模型実験概要

屈とう性構造の被覆ブロック形式を有するA床止め工に対する1/20二次元固定床模型実験は、幅1m、全長31.5mの水路で行った。図-2にふとんかご流失前のA床止め工とその周辺の模型実験の縦断面図を示す。ふとんかご流失後の縦断面図は紙面の関係で省略する。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。黄色▽で示さる位置に、ブロック表面と裏面に圧力センサーを埋め込み、ブロック表裏面を対にして圧力を計測した。

被覆ブロックは異形ブロック区間とふとんかご区間の2種類に分かれており、前者は長さ800mm[現地換算16m](以降、現地換算値を[]に併記する)の3連ブロックE型区間、長さ510mmの3連ブロック標準区間、長さ150mmの3連ブロックE型区間で構成される。3連ブロックE型と標準型はそれぞれ寸法100mm×100mm×53mm、および84mm×84mm×73mmの比重2.3のモルタル製である。ふとんかごは中詰め材粒径10mm[20cm]、寸法100mm×100mm×25mm[2m×2m×0.5m]と200mm×200mm×25mmの2種類を組み合わせて敷き並べている。河床材料は $d_m=0.33$ mmの珪砂6号[$d_m=6.6$ mmの中礫]を使用しているが、河床材料の流失を防ぐために厚さ70mmの粒径約10mmの碎石層を設けている。

実験は4ケースに分けて実施した。各ケースの単位幅流量は、280cm³/s/cm[2.5m³/s/m]、560cm³/s/cm[5.0m³/s/m]、1130cm³/s/cm [10.1m³/s/m]、1750cm³/s/cm[15.7m³/s/m]である。各流量ごとに下流水位を変化させて跳水位置の異なる4パターンを実施した。下流水位の調整は水路下流端にある転倒堰で行った。

(2) 数値実験概要

数値モデルは、落差工を越流する跳水の流れを扱う非圧縮性気液二相流VOFモデルと、多孔質物体中の流れを扱うDarcy-Forchheimer則によって構成される。VOFモデルは、気液境界面をより高精度に計算するために流体分

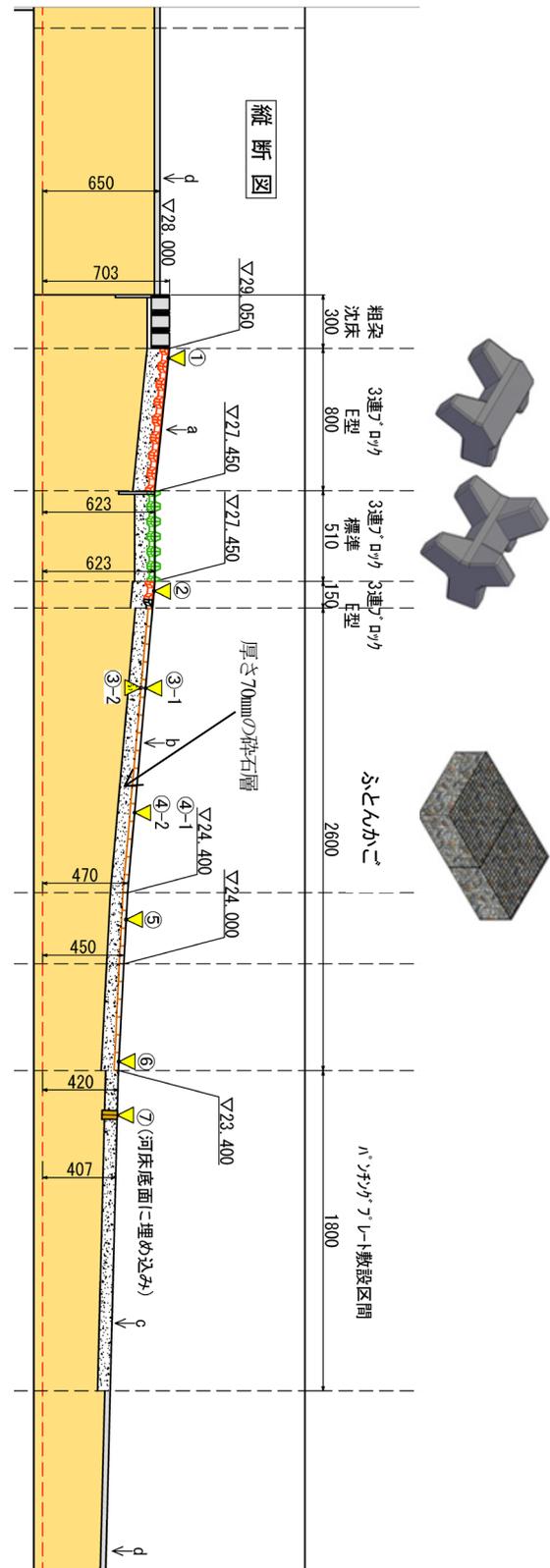


図-2 ふとんかご流失前の模型実験縦断面図

率 α の移流方程式に圧縮速度と呼ばれる相の相対速度 \vec{U}_r を導入し、運動方程式にも界面に作用する表面張力を体積力として考慮するCSF (Continuum Surface Force) モデル³⁾を使用している。詳細は楊ら⁴⁾を参照されたい。

地盤中の流れは、運動方程式に間隙率と浸透流による

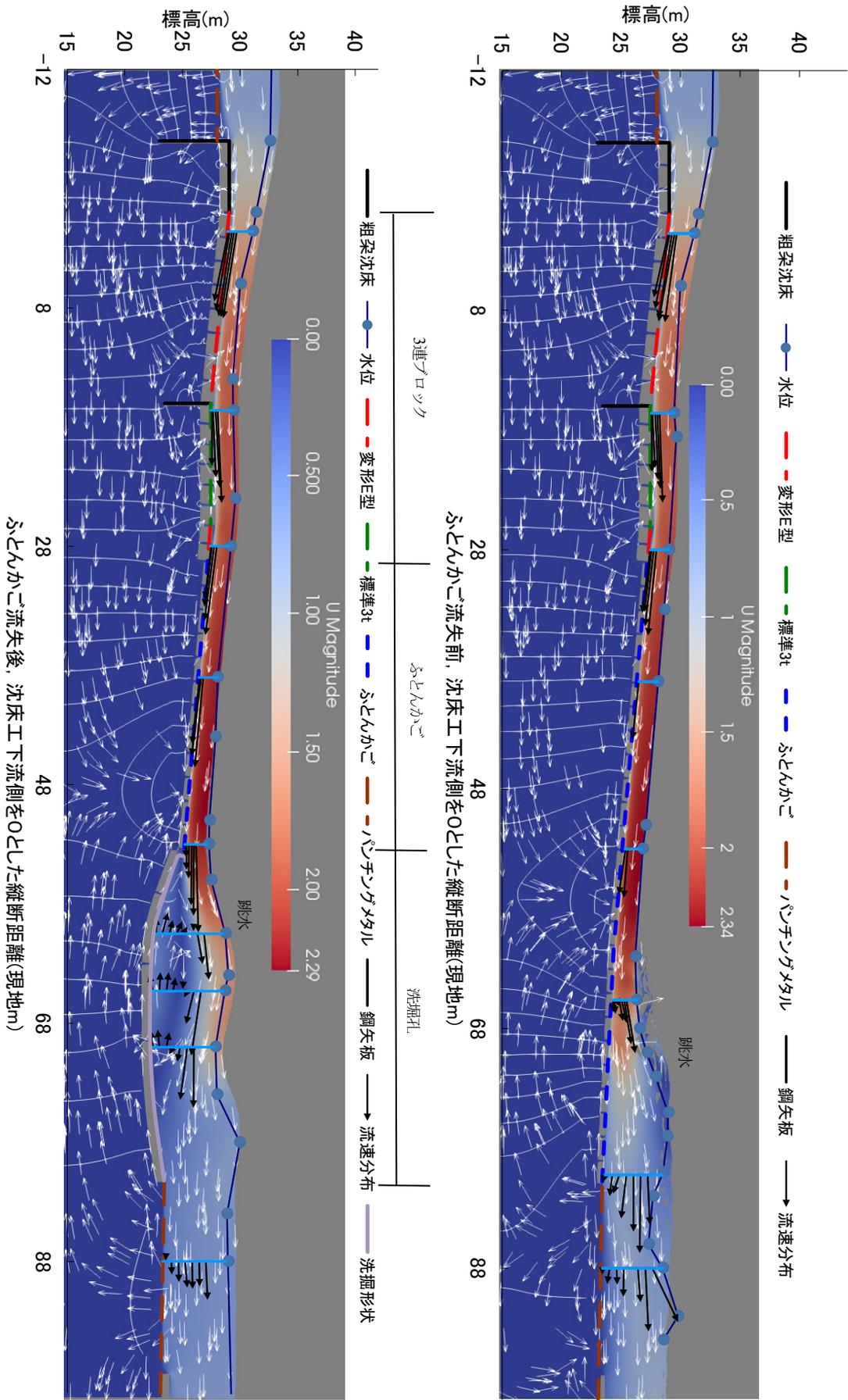


図-3 実験と計算の比較図[15.7m³/s/mまたは3000m³/s]

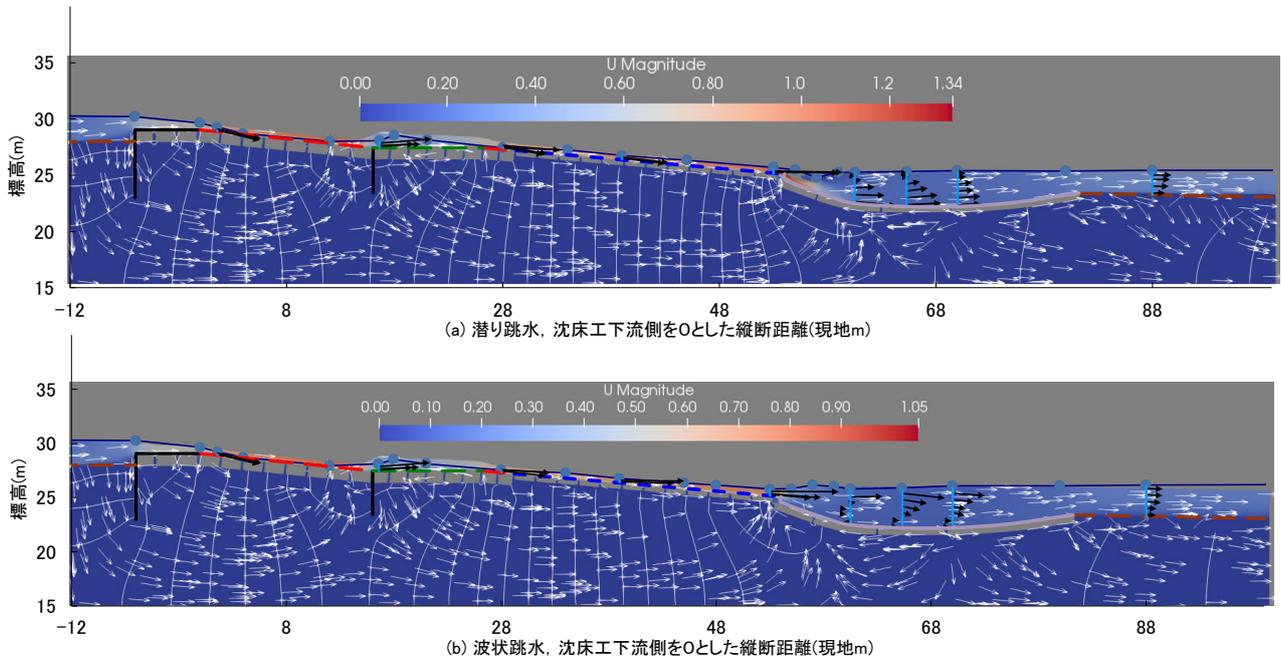


図-4 実験と計算の比較図[2.8m³/s/m または 500m³/s] (凡例は図-3 と同じ)

抵抗項を追加して、非定常な浸透流を計算している。その式は以下となる。

$$\frac{\partial(\gamma\rho\vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\gamma\rho\vec{U}\vec{U}) - \nabla \cdot (\gamma\mathbf{T}) = -\gamma\nabla p + \gamma\rho\vec{g} + \gamma\vec{F}_\sigma - \frac{\gamma^2\mu}{D}\vec{U} \quad (1)$$

ここで γ は間隙率、 ρ は密度、 \vec{U} は流速、 \vec{F}_σ は表面張力、 \mathbf{T} は $\mu_e(\nabla\vec{U} + (\nabla\vec{U})^T)$ で定義される応力テンソル、 μ_e は有効粘性係数で、粘性係数 μ と渦粘性係数 μ_t の和で表される。なお、本研究はk- ϵ 乱流モデルを用いた。式右辺最後の項は浸透流によるダルシー抵抗項であり、 $1/D$ はダルシー係数、 D は透過度(permeability, 単位[m²])である。

数値計算はRAM 192GBを搭載し、32コアを有するIntel® Xeon® Gold 6142のワークステーションで行われた。格子サイズは水平方向最大5mm、鉛直方向最大2.5mmとした。時間ステップの最大値を0.001sとしたが、実際の計算において最大0.00025s程度、数値安定性が厳しい時は0.00001sを下回る時もあった。

3. 模型実験及び数値実験の結果

図-3に $Q=1750\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ [15.7m³/s/mまたは3000m³/s]のふとんかご流失前後の計算結果と模型実験計測値を重ねて比較した。計算結果の表示は複数の情報を一つの図に収めるように工夫されている。図中の記号(-●-)は実験で計測された水面形を、黒いベクトルは複数個所の計測流速を表す。白い矢印は流速の向き、白い線は等ポテン

シャル、背景色は流速の大きさを表す。水面形に関して、ふとんかご上では計算値と計測値の一致度が最も高い。3連ブロック区間では計算水深が計測水深より全般的に高い傾向を示しているが、これは計算では四角いブロックで3連ブロックを近似し、ブロック中を流れる流量を計算ではブロックの上を流れることになっているためである。跳水区間の水深はふとんかご区間ほど高い一致が得られないが、この部分の不安定性を考えれば実験をよく再現したと言える。特に洗堀孔上の波状跳水は波形まで一致し、水深方向に下部は逆流、上部は順流である実験結果をよく再現できている。

図-4に $Q=280\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ [500m³/s]のふとんかご流失後の計算結果と模型実験計測値を重ねて比較した。(a)は潜り跳水、(b)は波状跳水である。波状跳水は水面では順流、洗堀孔底面では逆流であるのに対して、潜り噴流はその逆で、底面では順流、水面では逆流である。但し、図-4において、洗堀孔では水深が低いために循環流が弱く、場合によって循環流が形成されず、潜り噴流と表層噴流となる。洗堀孔は潜り跳水による洗堀過程と波状跳水による埋め戻し過程が交互に繰り返して発達する⁶⁾。内田ら⁷⁾⁸⁾が水面形を厳密に扱わずとも洗堀孔における波状跳水と潜り跳水が計算できる σ 座標系による解析モデルを提案している。洗堀孔底面において、潜り噴流状態の底面順流流速は主流であるために、循環流である波状跳水状態の底面逆流流速より数倍大きい。対策無しに放置すると洗堀が進行して山本ら²⁾の模型実験で観測されたように破壊が上流側に連鎖的に及ぶ可能性が大きい。3連ブロック区間の水深は、流量が500m³/sと小さいので $Q=3000\text{m}^3/\text{s}$ の場合に比べ、計算水深は計測水深よりさらに深くなった。計測水面は一部区間でほぼ河床に接して

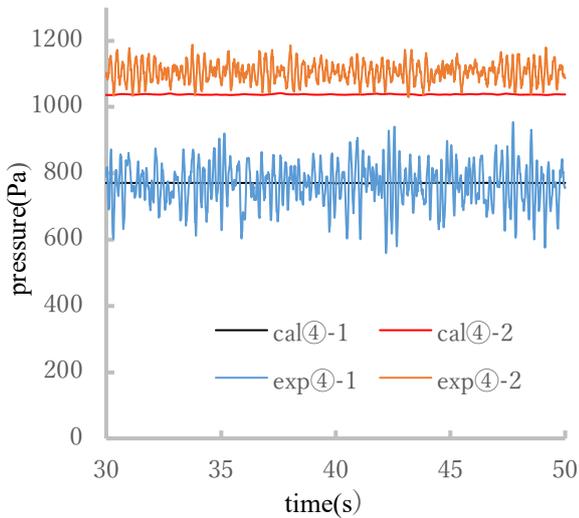


図-5 ④位置における実験と計算の圧力比較

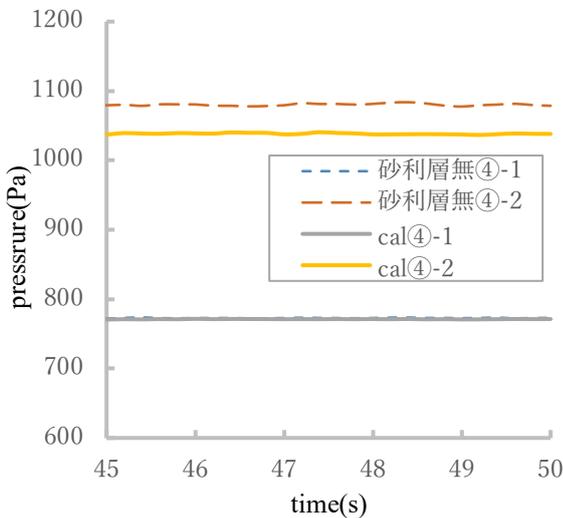


図-6 敷砂利の有無による圧力の変化

いるような状態になっており、水のほとんどが3連ブロックの隙間を流れていると考えられる。流量が大きい場合、水深も深くなるので幾分緩和されるが、流量が小さいほど、四角による異形ブロック近似の不都合が顕著になる。

粗朶沈床より上流の水位は図-4でよく合い、図-3で計算値はやや低い。これは流入境界の計算水位（計測値無し）はそのさらに上流100cm[2m]の計測水位を用いたため、後者は100cm流れて流入境界に達すると下がったからである。流量が一致するので、ある程度の助走期間を経て注目されるふとんかご区間では、初期の水位ずれの影響がなくなる。

図-3と図-4の等ポテンシャル線の間隔と流向に注目すれば、局所的に浸透流の向きが上流側に向かう箇所もあるが、著しい等ポテンシャル線の集中がなく、ほぼ等間隔に分布していることがわかる。等ポテンシャル線の間隔は動水勾配と反比例関係にあり、浸透力はまた動水勾

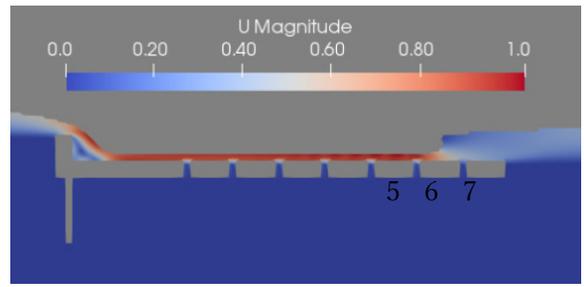


図-7 水平護床ブロック上にかかる跳水

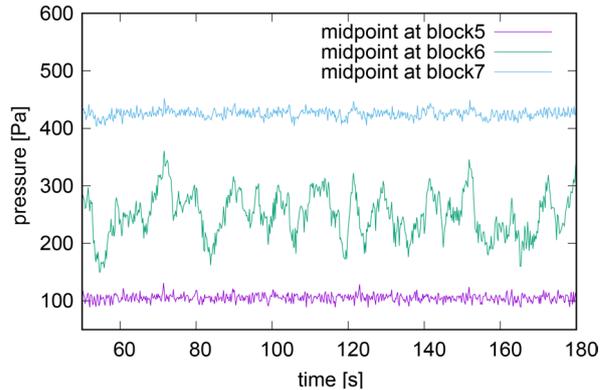


図-8 跳水前後と跳水位置の圧力時系列変化

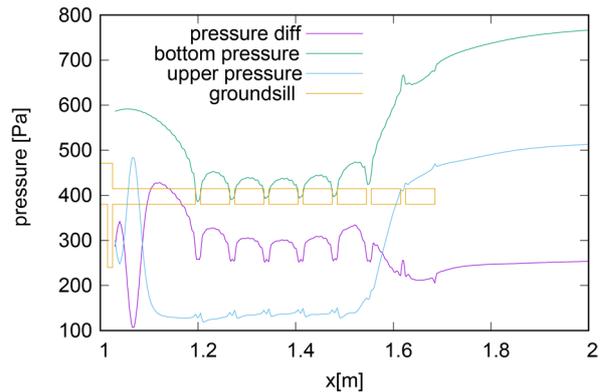


図-9 護床ブロック表面と裏面の圧力

配に比例することから、浸透力に向きの違いがあるものの、極端に浸透力が大きくなる箇所がないことを意味する。これは、直壁型落差工本体の下に等ポテンシャル線が密に分布し、特に水叩き先端直下に集中しているパターン⁹⁾とは大きく異なる。よって、A床止め工のような屈とう性構造落差工にはパイピングの問題が小さいと考えられる。しかし、洗堀孔ができると、図-4(a)のように洗堀孔内の水位低下によって、洗堀孔に隣接するブロックの上下側水位差が大きくなり、ブロック下の動水勾配が増大する状況が生じる場合がある。こうなるとパイピングの可能性は出てくるが、高速流による洗堀やブロック直後の負圧による吸出しなどの問題も起こる。今後、流速場・圧力場・乱流量などを詳細に分析して解明する必要がある。

④位置における数値計算圧力と模型実験圧力の比較は

図-5に示される。計算ケースは図-3の右図である。④-1、④-2はそれぞれブロック表面と裏面の中央の位置である。calは計算値、expは模型実験の計測値を表す。計算圧力は上面で計測値平均に高度に一致し、下面で実験値の平均よりやや小さい。本研究はk-ε乱流モデルを用いたので圧力解はアンサンブル平均値である。高周波数の圧力動揺を再現するのにLESが必要であろう。

ブロック下の敷砂利の粒径の影響について、国総研が実験を予定しているが、数値計算は先にそれを調べた。前記の計算は固定床実験に合わせてブロック下に厚さ70mmの砂利層を設けている。この砂利層をなくして、その下の砂層と同じ小さい透水係数を使えば、計算結果から敷砂利の粒径が小さくなった場合の影響が調べられる。図-6に70mm砂利層がある場合とない場合の④位置の圧力を示す。ブロック表面(④-1)の圧力は変わらないが、ブロック裏面(④-2)の圧力は粒径が小さい(透水係数が小さい)ほど上がることはわかる。紙面の関係で図を省略するが、ブロック直下の動水勾配も透水係数の減少で上がった。河川構造物を設置する時に地盤となじませるために砂利や砂を敷くことがあるが、その影響による揚力と動水勾配の変化に注意が必要である。

A床止め工はふとんかご区間で勾配の変化があり、跳水区間が勾配の異なる区間に跨る。跳水区間の特徴を調べるために本研究は別途図-7のような室内実験を行い、数値計算も行った。跳水区間はほぼ水平な護床ブロック上にあり、地形の影響が含まれず、より普遍的な跳水の特徴が調べられる。水叩き先端から順にブロックに1～7と番号を振り、跳水位置がブロック6にある場合、ブロック5、6、と7の表面中央の圧力は図-8のようになる。不規則に微振動するブロック5、7の圧力と異なり、跳水位置の圧力動揺は長い周期と大きい振幅を有する。アンサンブル平均乱流モデルは基本的に図-5に示される実験値の高周波数振動(乱流成分)は計算できないが、跳水位置の時間と共に変化する長い周期の(非定常流の)圧力変化は計算できる。ブロック表面の圧力を積分して流体力を求める時に乱流成分は互いに打ち消して合力はアンサンブル平均の圧力で積分して得られる流体力に一致すると期待できる。一方、跳水位置の圧力のアンサンブル平均は周期性を有し、ブロック6の受ける流体力も周期をもって変化する。

図-9に複数ブロック(隙間含む)の表面と裏面の圧力とその圧力差を示す。裏面の圧力は隙間で「抜けて」下がり、ブロック裏面中央で最も大きい。隙間は、内部の過剰間隙水圧を下げるためにブロックに開けられる穴の役割に相当する。pressure diffは裏面と表面の圧力差で、長さ方向で積分すれば鉛直方向の流体力となる。跳水位置の流体力が局所的に最大であることが図から読み取れる。大小様々な渦でエネルギーを消散している区間でもある。跳水区間はブロックの安定性と河床洗堀にとって最も不利な箇所の一つとなる。

4. 結論

本研究は点の情報計測を得意とする模型実験と、空間情報を得意とする数値実験を組み合わせ、床止め工の河床上及び地盤中の流速場と圧力場を得た上で、いくつかの知見を得た：1) 跳水位置に長周期性の圧力動揺があり、持ち上げ流体力が局所的に最大、2) 屈とう性構造落差工は等ポテンシャル線の集中がなくパイピングの問題が小さい、3) ブロック下の敷砂利粒径増大で揚圧と動水勾配の抑制が図れる、4) 洗堀孔ができるとその上流側ブロック下に吸出しの危険性が増す、5) 洗堀孔内で潜り噴流の洗堀と波状跳水の埋め戻しが繰り返されるが、対策無ければ洗堀が勝ち、上流側に連鎖的破壊をもたらす。

模型実験で採用するフルード相似則は移動床実験や浸透流に適用できず、実スケールの流況を知るのに数値モデルによる数値計算が有力である。実スケールの解析は今後行う予定である。

謝辞：本研究は河川砂防技術研究開発(国土交通省)「落差工周辺の河床構造物の安定性評価のための水・地盤連成解析手法の高度化」(代表：大塚悟)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター編：床止めの構造設計手引き，山海堂，1998。
- 2) 山本陽子，山本良二，諏訪義雄：被覆ブロック形式床止め工の変状水理実験から整理された研究課題，河川技術論文集，第24巻，pp.143-148，2002。
- 3) Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C.: A Continuum method for Modeling Surface Tension, *J. Comput. Phys.*, 100:335-354, 1992。
- 4) 楊宏選，福元豊，細山田得三，大塚悟：落差工による跳水・浸透流およびそれらの河床構造物の安定性に及ぼす影響，河川技術論文集，第24巻，pp.655-660，2018。
- 5) 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)，Vol.74, No.5, I_655-I_660, 2018。
- 6) 鈴木幸一，道上正規，川津幸治：床止め直下流部の流れと局所洗堀について，第26回水理講演会論文集，pp.75-80，1982。
- 7) 内田龍彦，福岡捷二，渡邊明英，山崎幸栄：二次元構造物を越流する流れの数値計算，水工学論文集，第47巻，pp.817-822，2003。
- 8) 内田龍彦，福岡捷二，渡邊明英：床止め工下流部の局所洗堀の数値解析モデルの開発，土木学会論文集，No.768/II-68，pp.45-54，2004。

(2019.4.2受付)