

浸透流と跳水の影響を受ける護床エブロックの 流体力特性及びその安定性評価

HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS AND STABILITY OF GROUNDSILL
BLOCKS WITH CONSIDERING SEEPAGE AND HYDRAULIC JUMP IN RIVER

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 HOSUYAMADA, 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)

Movable block hydraulic model experiments were carried out for a gentle slope block type groundsill. VOF and Darcy Law based numerical simulations were also performed to obtain the seepage flow and river flow simultaneously. Hydrodynamic forces acting on the movable blocks, pressures at the upper and bottom surfaces of blocks, are measured and calculated in both experiments and simulations. The numerical results show good agreement with experimental data. Dynamic stabilities based on fluid forces acting on block and frictional force between block and riverbed, are then evaluated numerically. It is shown that lifts acting on blocks are bigger and should not be estimated by using lift coefficient and velocity at close upstream of hydraulic jump, due to upwelling seepage flow. The computations also show drag acting on end block may be several times bigger than that acting on others.

Key Words : *hydraulic model experiment, hydrodynamic force, groundsill, dynamic stability
drag, lift, seepage flow*

1. はじめに

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。設計¹⁾の考え方は、落差によって生じる高速射流を床止め工区間で跳水により減勢し、さらに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の進行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する。減勢の不十分な状態で流れが床止め下流側を流下し、強い乱れを伴う高速流による河床洗掘が生じ、床止め工は設計で意図していない状態に置かれていることになる。

山本ら²⁾は屈とう性構造のブロックとふとんかごの護床工で覆われた被覆ブロック形式床止め工を対象とした移動床模型実験を行い、下流洗掘孔の進行

で下流端ブロックの流失を招き、それがきっかけとなり、上流に向かってブロックが次ぐ次と流されるプロセスを確認した。破壊のプロセス観察に止まったこの実験では圧力や流速などが計測されていないが、後に山本ら³⁾は同一床止めの固定床模型実験を実施し、複数箇所での流速・圧力・水面形のデータを計測し、流速による揚力・抗力と圧力による流体力でブロックの移動限界の評価を検討した。ただ、表面摩擦力を考慮せずブロック表面数点の圧力で見積もられる流体力は精度が高くない。楊ら⁴⁾は楊ら⁵⁾の浸透流と落差工を越流する跳水を同時に計算する数値モデルを用いて、山本ら³⁾の固定床実験に合わせた数値計算を実施し、流速と圧力の空間分布を考察して跳水位置手前で圧力の周期的変動と揚力の増大を指摘した。浸透破壊の脆弱箇所に注目して粒子法を用いて定性的に安定性評価した楊ら⁵⁾のアプローチと違い、楊ら⁶⁾は同数値モデルで得られた流体力

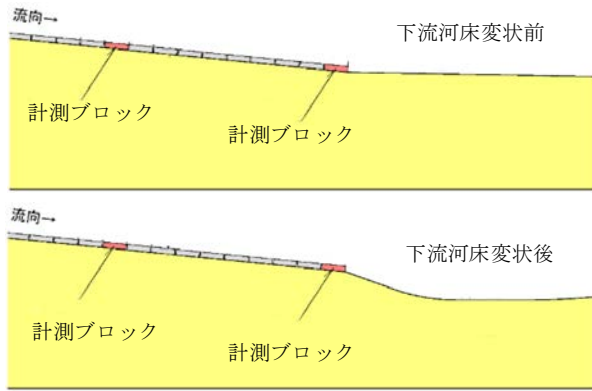


図-1 模型実験の護床工下流端付近の縦断面図

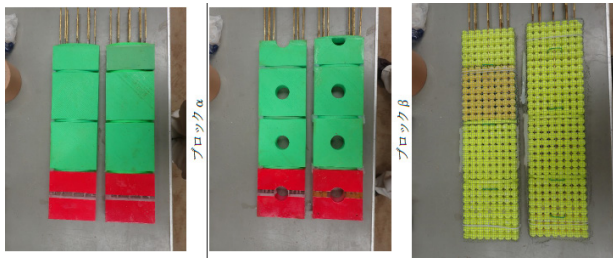


図-2 護床工ブロックの種類

を用いて定量的に安定性評価を行い、堰の移動床模型実験で観察された堰ブロックの流失に一致する結果を得ている。但し、流体力自体は模型実験では計測されていない。

下流端護床ブロックの流失が上流側ブロックの連続的な流失を誘発した山本ら²⁾の移動床実験結果を踏まえ、本研究は、最下流端ブロックの移動と流体力に注目して上記固定床実験³⁾の被覆ブロック斜面と下流側河床の洗堀前後の形状だけに実験範囲を縮小した移動ブロック模型実験に基づいて、浸透流と河川流を同時に計算してブロックの受ける流体力と摩擦抵抗力を以て護床工ブロックの力学的安定性評価を行うとともに、跳水位置による流体力の変化特性を考察する。移動ブロック模型実験は山本ら³⁾の固定床実験に比べ、分力計によるブロック流体力計測に加え、ブロック表面と裏面・河床表面・河床下10cmの圧力も計測されており、実験データがより広く詳細に得られている。

2. 模型実験と数値実験の概要

(1) 模型実験概要

被覆ブロック形式を有するA床止め工に対する縮尺1/20移動ブロック模型実験は、幅1m、全長31.5mの水路で行った。実験の幾何形状は前報³⁴⁾の固定床模型実験とほぼ同じであるが、上流側の粗朶沈床と異形ブロックの区間を省いて実験範囲を縮小した。

図-1に下流側河床の洗堀前後の形状で行われた模型実験の護床工下流端付近の縦断面図を示す。既往固定床実験と異なる部分は、河床材料は20mmの砂利、護床工ブロックはブロックα、ブロックβとふとんかごの三種類別に分けられた(図-2)。ブロックのサイズはいずれも10cm×10cm×2.5cmであるが、ブロックβに間隙圧を逃がす中空穴がある。ブロック各面の圧力は、ブロックの表面数箇所・裏面数箇所・側面1箇所に穴をあけ、金属製のピエゾ管を埋め込み、非圧縮性のホースでピエゾ水頭を圧力センサーまで通すピエゾと圧力センサーの組み合わせで計測する。ブロックの受ける揚力・抗力はブロックの下に設置された分力計で計測される。一つのブロックに対して圧力と流体力は同時に計測できないので、奥行き方向に9ブロックがあり、異なるブロックに対して圧力と流体力を別々に計測することにした。ブロックの移動限界実験を行う場合、圧力と流体力は計測せず、下流端一列のブロックを可動にして上流側の他のブロックを固定した状態で行われる。縦断方向に、河床表面(ブロック表面含む)の圧力、河床下10cm位置の間隙圧力も計測されているが、すべての項目が同一実験で計測されるのではない。

(2) 数値実験概要

数値モデルは、既報⁴⁾と同じで、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。その概要は以下に示すが、詳細は楊ら⁵⁾を参照されたい。

流体分率 α の移流方程式

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{U}) - \nabla \cdot (\alpha(1-\alpha) \vec{U}_r) = 0 \quad (1)$$

運動方程式

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

ここで $\vec{U}_r$ は気液の相対流速、 γ は間隙率、 ρ は密度、 $\vec{U}$ は流速、 $\vec{F}_\sigma$ は表面張力、 $\mathbf{T}$ は流速勾配で定義される応力テンソル、 D は透過度(permeability[m²])である。式(2)右辺最後の項は浸透流によるダルシー抵抗項であり、河床上の気液領域で D が無限大になってダルシー抵抗が消えると同時に γ は1となる。間隙率と透過度をゾーンごとに設定すれば、実際の計算において河川流と浸透流を意識せずに一つの運動方程式で対応することができる。

実験は図-2示される3種類のブロックで行ったのに対して、計算はブロックαのみで行った。流れ場として3種類のブロックに大差がなくても、流体力を求める場合、中空穴のあるブロックβと透水性のふとんかごに対して、表面近くとブロック中の流れ

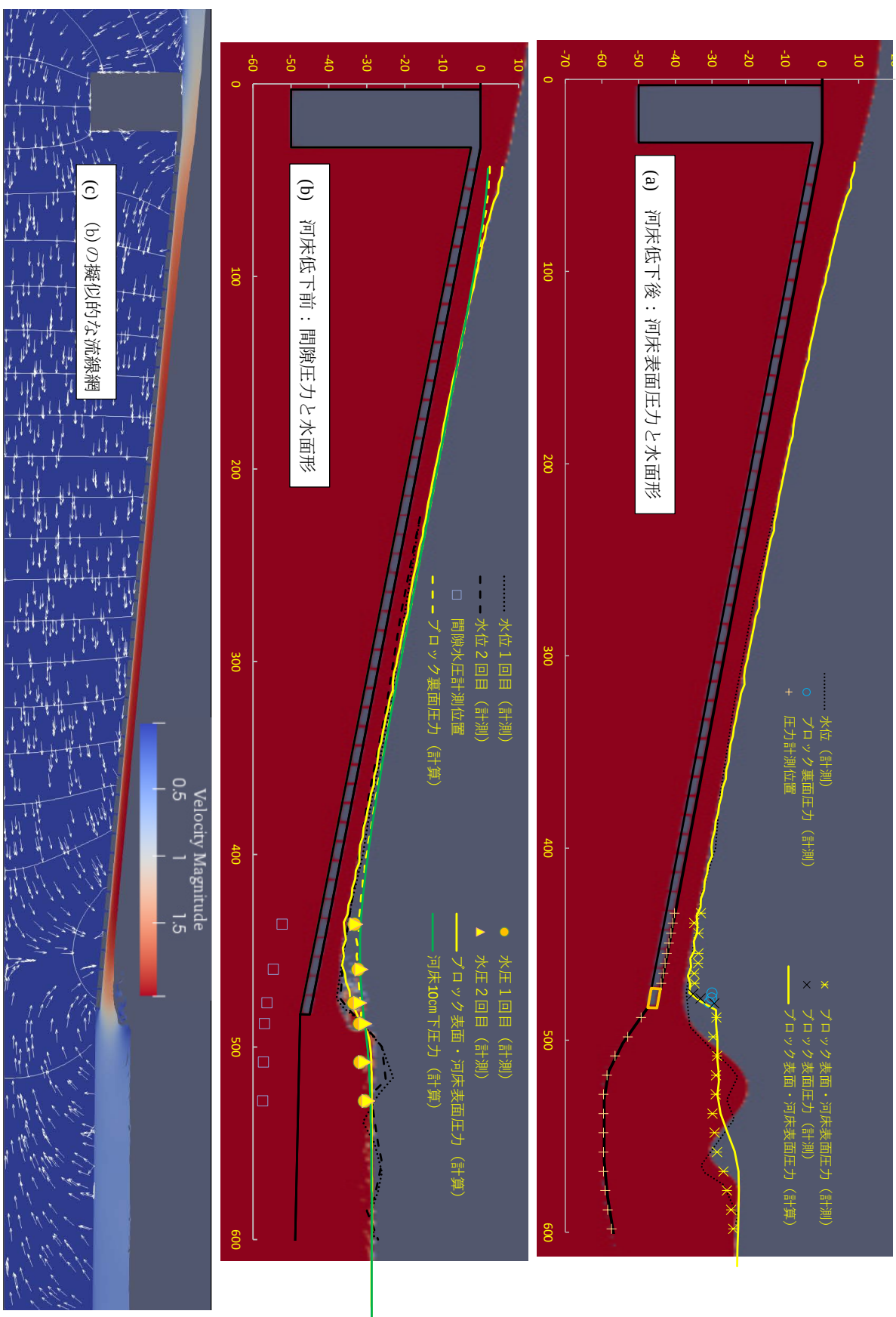


図-3 水面形，河床表面圧力および間隙圧力の計算と実験との比較 軸単位：cm

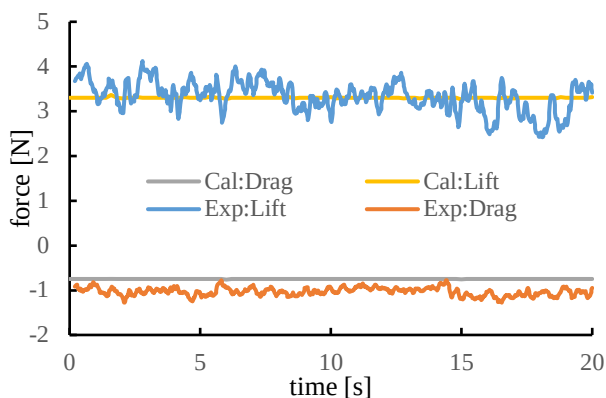


図-4 流体力の計算と実験の比較

を高精度に計算できない本研究の二次元計算では、流体力の計算精度が期待できないと想定されるからである。

3. 結果と考察

図-3に水面形、河床表面圧力および間隙水圧の計算と実験の比較を示している。図-3(a)は洗堀が進行して下流側河床が低下した後の模型実験（流量が150L/s、下流水位が-22cm）に対して行われた計算である。赤が水を表し、赤とグレーの境界は水面である。黒い点線は実験の水面形、+は河床表面（ブロック表面含む）圧力の計測位置、*は計測された圧力である。下流端ブロックの表と裏で計測された圧力も×と○でプロットされている。黄色い線は計算圧力である。水位と比較するために、圧力はすべて水柱に変えてさらに位置水頭を加えてポテンシャルになっている。計算は水面形も河床表面圧力も実験によく一致している。波状跳水の手前まで河床表面圧力と水面線が重なっていることから、その区間で河床表面圧力は水深とほぼ一致することを意味する。しかし、跳水の水面急変区間では、河床表面圧力線と水面線に乖離があり、圧力は水面が急変する箇所、水面形を移動平均するように変化を滑らかにしている。河床表面圧力の水面形に追従しない理由を山本ら³⁾が流速の上向きと下向きで分析している。水面形の1個目の山の上半分の区間で左に流速の上向き成分、右側に下向き成分があり、どちらも圧力は水位以下なので、向きに加えて、跳水による空気の混入も一つの要素と思われる。

図-3(b)は河床低下がない模型実験（流量が90L/s、下流水位が-27cm）に対して行われた計算である。この図で水面形と間隙水圧を計算と実験とで比較している。水色の□は河床の10cm下に設置された間隙水圧の計測位置、黄色い▲と●は2回の実験で計測された間隙圧力、緑の線は計算された圧力である。

計算は跳水後の波打つ水面を再現できていないが、凡そ実験に一致している。この図に計算されたブロックの表面（下流河床表面含む）と裏面の圧力を、黄色い実線と破線でそれぞれプロットした。図-3(a)と同様、水位が急激に増加する跳水手前ではブロック表面圧力は水位より高い。ブロックの裏面圧力は間隙圧力と一致する区間もあるが、被覆ブロックの最上流のところで間隙圧力よりわずかに高く、下流の十数ブロックの区間で間隙圧力よりわずかに小さい。これを理解するために等ポテンシャルと流速の向きを表すベクトルで構成される図-3(b)の擬似的な流線網である図-3(c)を見るとわかりやすい。最上流のブロックのところで浸透流が下向き、逆に跳水手前の区間では上向きである。ブロックの裏面とその10cm下の位置を比べて、浸透流の流線から見て、上流側にある方がポテンシャルが僅かに高い。

図-3(b)のブロック裏面と表面の圧力差から各ブロックの受ける揚力分布の特性がわかる。図-3(b)を見て、最上流側の数個のブロックの揚力が下向き、下流側の十数個のブロックの揚力が上向き、その間のブロックの揚力がゼロに近いことがみてとれる。明らかに、跳水手前の浸透流が河床から抜け出るところでブロックが最も大きい揚力を受ける。したがって、跳水手前の、上下流側の浸透流が会って河床から湧昇する区間では、浸透流の向きが揚力を左右し、そのブロックの受ける揚力は揚力係数と流速から求めることができない。揚力係数を以て揚力を見積もることができる区間は、跳水の影響を受けない、浸透流が河床に平行する流れに限定されると考えるべきである。

図-4は河床低下無し、流量が150L/s、下流水位が-22cmの模型実験で計測された下流端ブロックの流体力を計算と実験と比較している。計算値は計測値の平均値に近いと評価できるものの、アンサンブル平均であるk-ε乱流モデルの限界で、流体力の変動を再現できていない。変動を計算するのにLESが必要であろう。なお、流体力はブロック表面の圧力と摩擦力を積分して算出されるが、摩擦力は壁面摩擦速度 u_τ を用いて ρu_τ^2 で評価されるために、摩擦速度の精度が悪いと流体力精度の低下につながる。よって、既報⁴⁾と違って、ブロック表面の格子サイズをもっと小さい1mmにした。これは、流れ場を把握したい場合、ブロック近傍の流速を正確に計算する必要がないが、本研究のような、表面に突起がない群体ブロックにおいて、抗力は主にブロックの表面摩擦によるものと想定されるからである。本計算の壁面からの無次元距離 y^+ は場所によって100前後で変動しており、対数則の目安とされる $30 < y^+ < 200 \sim 500$ からみて、壁面近傍メッシュサイズが過大ではなく、壁面摩擦速度が適切に評価できていると判断される。

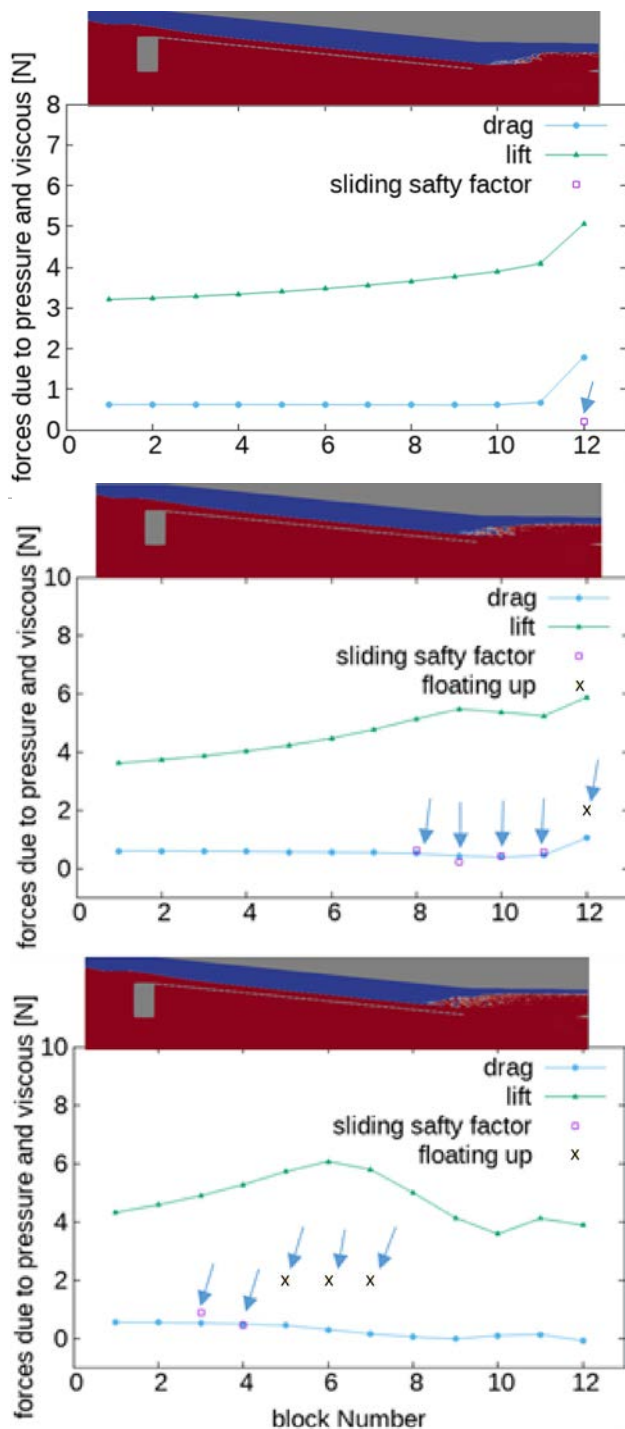


図-5 流体力と摩擦抵抗力による安定性評価

「床止めの構造設計手引き」に従って、護床エブロックと河床と摩擦係数を0.65として、揚力、浮力、と摩擦抵抗力による力学安定性解析を行ってみた。滑動に対する安全係数は次式で求める。

$$F_s = \mu(W_w - L)/D \quad (3)$$

ここで μ は摩擦係数、 W_w はブロックの水中重量、 L はブロックの受ける揚力、 D はブロックの受ける抗力である。「床止めの構造設計手引き」において、揚力と抗力は揚力・抗力係数で求めるが、本研究は

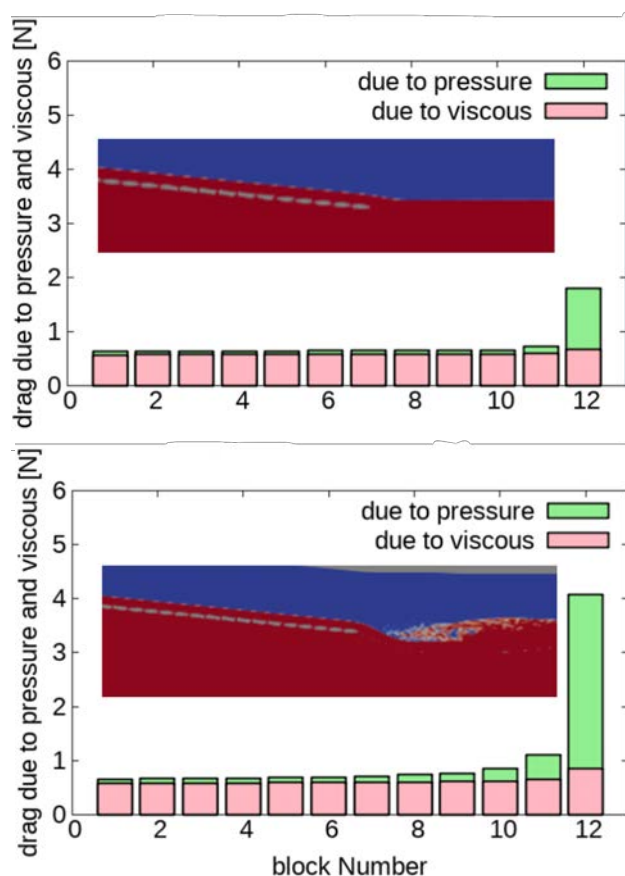


図-6 河床低下前後の抗力とその内訳

摩擦応力と圧力をブロック表面にわたって積分して得られる値を使う。図-5はに流量が180L/sの場合に、跳水位置が下流側から徐々に上流側に移動する時、各ブロックの力学的安定性の判定結果である。なお、下流端のブロックに番号12が振られ、そこから上流側へ降順で番号が減り、全部で12個のブロックに対して安定性の判定が行われた。滑動安全係数が1より小さい場合、ブロックの上に□をプロットし、案係数がマイナス、つまりブロックが浮き上がると判定する場合、ブロック番号の上に×をプロットする。×の縦位置は一律縦軸の2に合わせているが、□の縦位置は安全係数の値に応じて、流体力の座標軸を借りて、縦軸の0~1の間で変動する。跳水位置がわかるように水面図も各判定グラフの上方に表示している。全般的に、抗力は下流端ブロックを除いて変動が小さいのに対して揚力は跳水位置の手前で大きくなる。その結果、跳水位置の手前のブロックは滑動または浮揚する判定結果になっている。下流端ブロックを除いて、滑動すると判定されるブロックは抗力がほとんど変わらず、揚力の増加による摩擦抵抗力の減少が原因である。なお、図中の揚力は浮力分を含む。これはブロック表面の圧力を積分する都合上、浮力が含まれる方が計算上自然的という理由である。図-5の上段の、跳水位置の上流にある下流端ブロックが流される判定結果は模型実験と一

致する。下段の、群体中ブロックの流失はこの実験の観察範囲に含まれないが、既往の堰の移動床模型実験における群体中のブロック流失を、本研究の手法でその不安定化は評価できている⁹⁾。

図-6に跳水がもっと下流側にあり、護床工ブロックが全部射流域にある状況で、各ブロックの受ける抗力とその内訳を示す。ブロックの表面に突起がないので抗力はほとんど表面の摩擦応力によって構成されるものの、下流端ブロックだけは圧力の寄与が摩擦の寄与を大きく上回る。圧力分布図を省略するが、これは下流端ブロックの下流側での著しい圧力低下による結果である。下流端ブロックの後ろに段差があり、その後ろに段落ちまたは越流による低圧の渦ができてしまう。下流河床低下の場合、流速がもっと速くなり段差後ろの圧力はさらに低下して圧力の抗力に占める割合がさらに高くなる。内田ら⁷⁾が数値計算と実験を通して、粗度群の下流端ブロックが最も大きい抗力を受けることを指摘し、それを避けるために粗度群の食い違い配置を提案しているが、護床工の場合、そのよう対策はできない。剥離流れによるブロック背後の圧力低下を防ぐために、下流端ブロックだけを他のブロックと異なる形状にして、段差のない流線形テールを提案したい。

山本ら²⁾の移動床模型実験で示したように、下流端ブロックで跳水が発生した場合、洗堀孔ができて、波状跳水に発展してやがて下流端ブロックが流失する。下流端ブロックが流失すると、跳水位置が上流側に移動して次々とブロックが流される連鎖的な破壊となった。これは図-5のような、跳水位置の上流側移動に起因する跳水手前の揚力増大と、図-6のような、下流端ブロックが最大抗力を受ける特性の、複合作用の結果と考えられる。下流端ブロックの流失が護床工ブロック破壊の一つのきっかけと考えると、下流端ブロックの流線形テール設計だけでは安心できず、下流側洗堀の進行による新たな段差の形成と地盤支持力の弱化をも考慮に入れて、根入れを持たせたりして下流端ブロックが流されない特別な配慮が望ましい。

4. おわりに

本研究はブロックの流体力と移動に着目する模型実験と、浸透流と河川流を同時に計算する数値実験を通して、次の知見が得られた。1)ポテンシャルに換算した河床表面圧力は、水面形にほぼ一致するが、水面が急変する箇所で、水面形を移動平均するように変化を滑らかにしている。2)上下流の浸透流が出会って湧昇する跳水の手前の区間で浸透流の視点か

らブロックの裏面が表面より上流側に位置し、ポテンシャルに換算したブロック裏面の圧力は、表面よりも大きい。3)その結果、跳水手前の区間で揚力が大きくなり、摩擦抵抗力が減少し、滑動に対する安定性が低下する。4)跳水区間とこの浸透流の湧昇区間では、揚力は主に浸透流の向きと圧力に影響され、揚力係数と流速から計算することができない。5)抗力は下流端ブロックを除いて鉛直方向の圧力の影響が小さく、抗力係数と流速から見積もることは依然可能である。6)跳水が護床工下流側に移動し、護床工下流端まで射流域に置かれた状況では、段差によるブロック背後の圧力低下により、下流端ブロックが最も大きい抗力揚力を受ける。下流端ブロックの流失が連鎖的破壊を誘発した模型実験の結果からも、下流端ブロックだけに特別な対策を講じることを推奨する。

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る。

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.143-148，2018。
- 3) 山本陽子，山本良二，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) 楊宏選，山本陽子，福元豊，細山田得三，大塚悟，福島雅紀：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，河川技術論文集，第25巻，pp.451-456，2019。
- 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），第74巻，5号，I_655-I_660，2018。
- 6) 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，I_519-I_530，2019。
- 7) 内田龍彦，福岡捷二：大型粗度群上の浅い流れの平面二次元解析とその応用，土木学会論文集，No.691/II-57，pp.93-103，2001.11。
- 8) 内田龍彦，田中幸志，福岡捷二：護床工最下流粗度要素の移動限界と破壊の実験，水工学論文集，第48巻，pp.841-846，2004。

（2020.4.2受付）