

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

RESEARCH TO EVALUATE THE FAILURE LIMIT OF GROUNDSTALL CONSIDERING DEGRADATION RIVERBED

下津 隆介¹・山本 陽子¹・福島 雅紀¹
Ryusuke SHIMOTSU, Yoko YAMAMOTO and Masaki FUKUSHIMA

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

The purpose of this study is to establish a design criteria for the downstream end block of the bed protection works in case of riverbed degradation. Through hydraulic experiments, the outflow limit of the block and the fluid force around the block were determined. We compared the experimental results with the current design method, and clarify that the rolling of the block and the safety factor due to the turbulence of the flow should be considered. Furthermore, after confirming that the experiment was reproducible by numerical calculation, we discuss the effects of deformations such as unevenness and scouring on the fluid force acting on the block.

Key Words : riverbed degradation, ground sill, bed protection works, hydraulic experiment, vertical two-dimensional analysis, design criteria

1. はじめに

設計時に想定した以上の河床低下が進行し、堰や床止め工などの河川横断構造物が被災する場合がある。出水時における構造物本体の破壊は、急激な上下流の河床変動を引き起こし、周辺堤防や護岸の侵食、構造物近傍の橋脚基礎の洗掘等、周辺構造物への影響が懸念される。そのため、設計時に将来の河床低下による外力変化を想定するか、維持管理のプロセスで構造物の状態を把握し、必要に応じて対策を実施することが河川管理上重要である。

現行の床止めの設計で用いられる「床止めの構造設計手引き」¹⁾では、射流の高速流を護床工区間で跳水により減勢させることとしているが、河床低下に伴って上下流の水位差が大きくなると、跳水区間が下流に移動する。内田ら²⁾は、護床工ブロックの移動限界について、下流端水位の低下により、最下流ブロックは他のブロックより大きな流体力を受け流失するとしている。山本ら³⁾は、下流河床が低下しつつある状況を想定した屈とう性構造の被覆ブロック形式床止め工の移動床実験を実施し、最

下流端のふとんかごの流出をきっかけに、護床工が連鎖的に流失し、床止め本体の破壊に至ることを確認した。

現行の床止めの設計では、護床工ブロックは全て群体の(ブロックが敷き詰められた中央にある)状態で評価した抗力係数・揚力係数を適用することとされている。しかし、護岸ブロックの水力特性試験法⁴⁾と同様の評価方法で群体と下流端の抗力係数、揚力係数を計測した結果、ブロックの種類によっては下流端での抗力係数は、群体の2倍以上になった(図-1)。また、現行基準では下流端

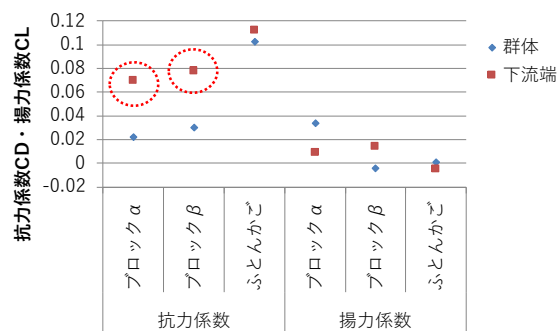


図-1 群体、下流端の抗力係数、揚力係数

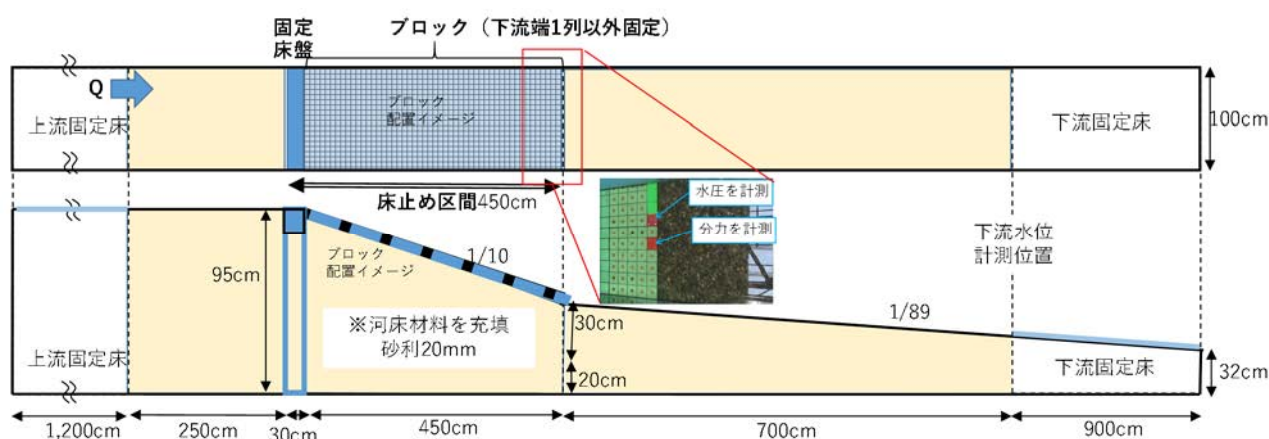


図-2 実験水路の概略図

表-1 移動実験の計測ケース

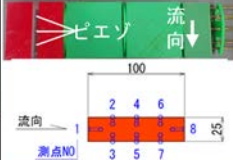
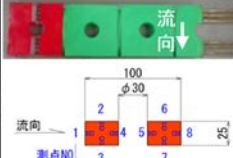
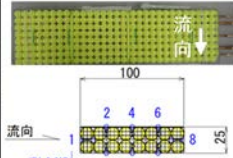
	移動実験用ブロック	水圧計測用ブロック
ブロックα		
ブロックβ		
ふとんかご		

図-3 実験に用いたブロックの種類

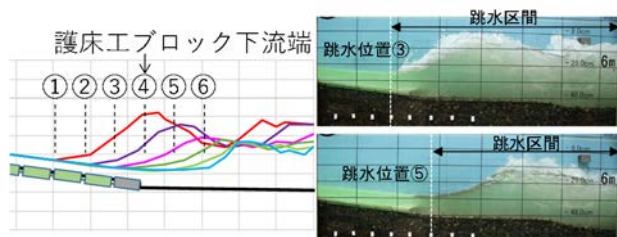


図-4 実験条件の変化に伴う跳水位置の変化

のブロックの設計法は定められていない.

横断構造物の破壊限界の評価に向けては、対象構造物の流況とブロックにかかる流体力を解析できる手法が検討されているが⁵⁾⁶⁾、横断構造物は設置数が多く、さらに許可工作物である場合も多いため、個々の構造物に高度な解析を適用して検証することができない場合もある。

そこで本研究では、現場の設計・照査で利用する簡易な手法を前提に、下流に河床低下が生じた場合の、護床工の下流端ブロックの評価法を確立することを目的とし

流量 [L/s/ m]	ブロック の種類	下流水位[cm] (護床エブロック下流端を基準)					
		①	②	③	④	⑤	⑥
90	ブロックα	25.3	22.1	<u>20.7</u>	<u>19.5</u>	—	—
	ブロックβ	25.3	22.3	20.2	18.3	16.6	15.3
	ふとんかご	21.7	18.3	16.4	15.0	13.5	<u>11.6</u>
150	ブロックα	31.7	29.4	28.4	<u>27.5</u>	<u>26.5</u>	<u>24.7</u>
	ブロックβ	32.8	30.0	28.6	27.0	25.8	<u>24.7</u>
	ふとんかご	28.2	24.6	23.2	22.1	20.8	<u>19.2</u>
210	ブロックα	40.0	37.4	35.8	<u>33.9</u>	<u>32.1</u>	<u>31.4</u>
	ブロックβ	37.6	35.3	33.9	<u>32.5</u>	—	—
	ふとんかご	34.6	32.6	30.8	29.6	27.8	—

下線 ブロックが流出 斜体 ブロックが動くが流出しない

た. まず, ブロックの移動限界や横断構造物周辺の流体力を水理実験によって把握した. また, その結果を現行の設計法と比較した検証を行った. さらに鉛直二次元の数値計算によって実験が再現可能であることを確認した上で, 不陸や洗掘など種々の変状が, ブロックに作用する流体力に与える影響を考察した.

2. ブロックの移動限界を確認する水理実験

(1) 下流端ブロックの移動実験

ブロックの移動が発生する水理条件を把握するために、**図-2**に示す水路において、下流端以外のブロックを全て固定し、下流端ブロックの移動実験を行った。模型の縮尺は現地の1/20とした。対象とするブロックは、**図-3**に示す3種類(ブロック α 、ブロック β 、ふとんかご)とした。ブロックの寸法は全て縦10cm×横10cm×高さ2.5cmである。ブロック α 、ブロック β はモルタルで成形し、ふとんかごは金網の中に粒径10mmの砂利を詰めた。

対象流量は、90L/s/m, 150 L/s/m, 210 L/s/mの3流量とした。水路下流端の堰を転倒させることにより構造物模型から7m下流の水位(以下、「下流水位」)を徐々に下げ、

跳水の位置が図-4の①～⑥の位置になるよう調整した。跳水区間の上流端の位置(以下、「跳水位置」)が護床工ブロックの下流端に位置する状態を④とし、①～③では下流端ブロック上に跳水が、⑤～⑥では射流が位置する。下流水位を①～⑥に合わせ、その状態を1分～1分30秒間維持し、ブロックの移動がないことを確認する。その後、次の段階に下流水位を低下させた。これをブロックが移動するまで繰り返し、ブロックが移動する下流水位を記録した(表-1)。

下線で示した(赤網掛け)下流水位で、流れの力により下流端ブロックが構造物から30cm以上下流に移動した(以下、ブロックの「流出」)。斜体で示した(青網掛け)下流水位では、下流端ブロックは動きはじめるが、構造物の近傍に滞留し、それ以上は移動しなかった。

全体の傾向としては、ブロック α 、ブロック β 、ふとんかごの順に、下流水位が高い条件で下流端ブロックが流出した。ただし、流量90L/s/mのケースでは、ブロック β 、ふとんかごは下流水位を下げても流出しなかった。また、ブロック α の150 L/s/mでは、④、⑤でブロックが流出したが、⑥ではそれ以上下流水位を下げてもブロックは流出しなかった。

(2) 流体力の計測

図-2の水路で下流端ブロックに水圧計と分力計を設置し、ブロックに作用する流体力を計測した。水圧計を設置したブロックはアクリルで製作し、周囲にピエゾ孔を開けて、各点の圧力水頭を測定した。ふとんかごは、中詰め材を模した球状体を3Dプリンタで成形して同様にピエゾ孔を設け、周囲を金網で覆った(図-3)。流量条件は、ブロックの移動実験と同じ3流量とした。下流水位は、移動実験の下流水位(表-1)を目安として、跳水位置が①～⑥となる下流水位(表-2)に固定した。流況が安定するまで5分程度維持した後、分力及び水圧をそれぞれ計測した。分力は50Hzで、水圧は200Hzで1分間計測したデータをそれぞれ時間平均している。

下流水位と抗力、揚力の関係を図-5に示す。図-5中の跳水、射流の表記は各下流水位における下流端ブロック上の流況である。水圧の計測結果より、抗力は上流側と下流側の圧力値の差、揚力は上面3点と下面3点の単純平均の差で評価した。青で示した分力計による計測値に対して、赤で示す水圧の積分値には誤差がみられる場合もあるが、ブロック模型加工上のピエゾ孔形状の製作誤差や水中の細かい塵芥の詰まり等に起因する水圧の計測上の誤差が主因と考えられるため、以降は分力計による値を正値と見なして考察を行う。

下流端ブロックに作用する流体力は、図-5の跳水の範囲で、下流水位を低下させるに従い揚力が徐々に大きくなる。さらに下流水位を下げて射流になると、揚力はほぼゼロに近づく一方、抗力が急激に大きくなる傾向が見られた。

表-2 流体力の計測のケース

流量 [L/s/m]	ブロック の種類	下流水位[cm] (護床工ブロック下流端を基準)					
		①	②	③	④	⑤	⑥
90	ブロック α	25.4	22.1	21.0	20.3	19.6	19.2
	ブロック β	25.5	22.5	20.4	18.5	16.5	14.4
	ふとんかご	22.4	19.3	17.5	15.3	13.3	11.3
150	ブロック α	31.7	29.4	28.6	27.3	26.4	24.6
	ブロック β	33.4	30.3	28.5	26.4	24.4	23.3
	ふとんかご	28.3	26.5	24.5	22.2	20.4	18.4
210	ブロック α	40.3	37.5	35.9	33.8	32.0	31.1
	ブロック β	38.5	36.3	34.5	33.4	32.4	31.3
	ふとんかご	35.4	33.5	31.4	29.5	27.6	25.3
下線		ブロックが流出		斜体	ブロックが動くが流出しない		

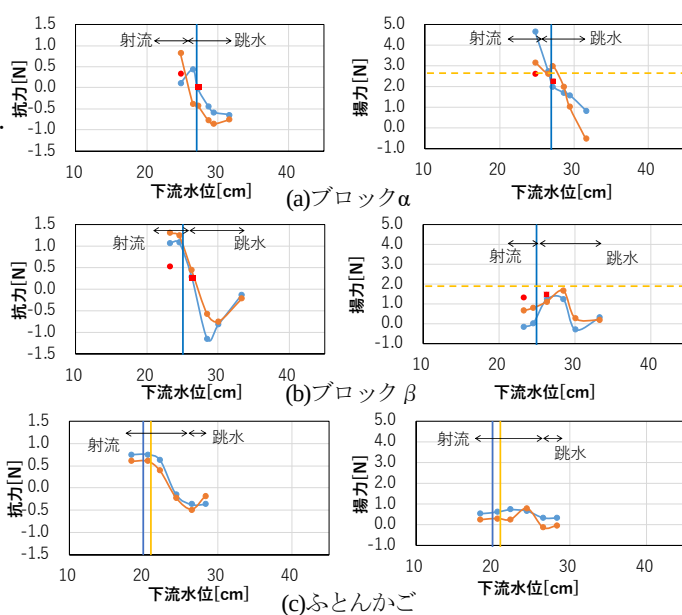


図-5 下流水位と抗力、揚力(流量150 L/s/mの場合)

ブロック α は、移動実験では③の下流端ブロックの位置が跳水の状態、ブロックの上流側が浮き上がり、下流側を支点にめくれあがって流出した(以下、「転動」という)。ブロック α の流出には、揚力によるモーメントの影響が大きいと考えられる。

一方、ブロック β 、ふとんかごは、図-5からは、射流の高流速によって抗力が大きくなる時点で、回転を伴わない水平な移動によって流出(以下、「滑動」という)が生じていると解釈される。しかし移動実験では、ふとんかごは回転を伴わない滑動による流出であったことが観察されたが、ブロック β は転動によって流出しているように見える場合もあった。

なお、図-5より、分力計での計測値に対して、水圧の積分値によってもブロックに作用する抗力、揚力を概ね

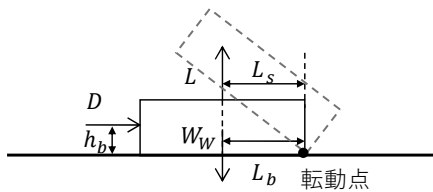


図-6 転動における抗力、揚力の作用位置

評価できることから、今回の実験条件のような射流に近い条件では、流速によるせん断力の影響は比較的小さく、ブロック周囲の水圧の積分値で分力を評価できると考えられる。この結果を受けて、3章では数値計算による水圧分布よりブロックに作用する分力を評価する。

(3) 設計法との比較

前節の結果から、滑動と転動の2種類の移動形態が確認されたため、「床止めの構造設計手引き」⁹⁾における滑動の式、「護岸の力学設計法」⁷⁾における転動の式を参考に、以下のモデル(図-6)によって、実験でブロックが流出したときにブロックに作用した流体力を計算した。なお、現行の「床止めの構造設計手引き」では、滑動の評価のみで、転動による評価は規定されていない。また、護岸の力学設計法⁷⁾には安全率の記述はない。

a)滑動のモデル

$$\mu(W_w - L) \geq D \cdot F_s \quad (1)$$

D : ブロックにかかる抗力

L : ブロックにかかる揚力(浮力を含まない)

μ : 摩擦係数 W_w : 護床工の水中重量

F_s : 安全率(現行の設計では1.3)

b)転動のモデル

$$(D \cdot h_b + L \cdot L_b) \cdot F_s < W_w L_s \quad (2)$$

h_b : 抗力の作用の重心位置と河床面との垂直距離

L_s : 揚力の作用の重心位置と部材の転動点との水平距離

L_b : 部材の重心位置と転動点との水平距離

F_s : 安全率

図-7は、分力計で計測した抗力、揚力と、滑動、転動の移動限界の評価式を重ね合わせた。図-7(a)のブロック α の90L/s/mでは跳水位置①～④の間で、抗力の変化に比べて揚力の増加が顕著であり、跳水位置③で転動のラインを越える。一方で150L/s/m, 210L/s/mでは転動と滑動のラインの交点付近で滑動のラインを越えている。しかし、前節の移動実験では転動で流出したことが観察されたことから、転動と滑動のラインの交点付近では2つの流出形態がどちらも起こり得ると推察できる。

ブロック β やふとんかごは図-7(b),(c)よりブロック α に比べて揚力が作用しにくく、跳水位置③～⑥に掛けて抗力の増加が顕著であり、転動のラインよりも先に滑動のラインを越える傾向がある。しかし、前節の移動実験でブロックの流出が認められたケースについて、ふとん

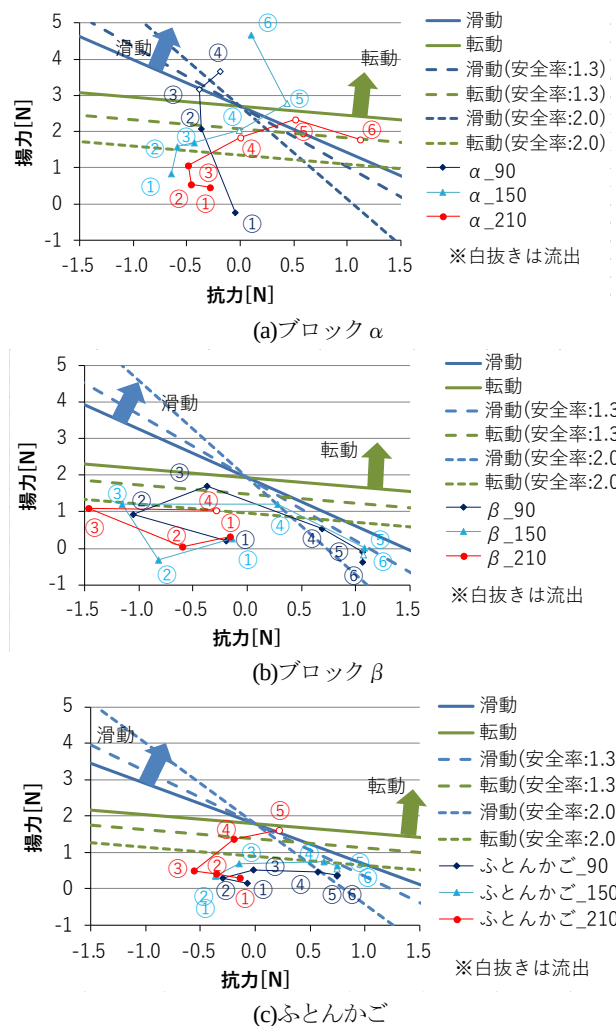


図-7 計算値と実験値の比較

かごの210L/s/m以外のケースでは安全率1.0の計算値で滑動と転動のラインを越えていない。

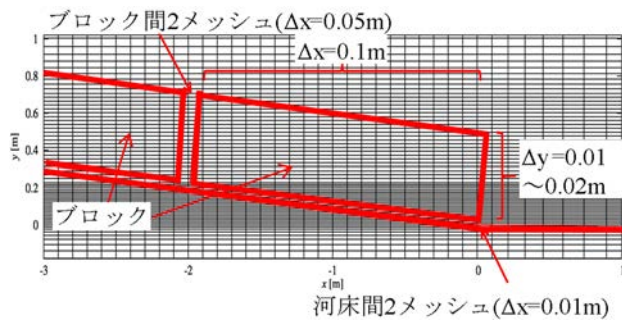
計算値と移動実験での流出の結果が異なる要因の一つとして、計算値を算出する際に、実験の抗力・揚力を1分間の時間平均値を用いている。しかし、実際には流れの乱れにより瞬間的に大きな力がブロックに作用している可能性がある。

そこでさらに、安全率1.3を乗じた計算値と、2.0を乗じた計算値を図中に追記した。安全率1.3では、移動実験での流出が概ね再現できるものの、流出したケースを全て再現できていない。安全率2.0とすると、移動実験で流出したケースが全て滑動と転動のラインを越える。

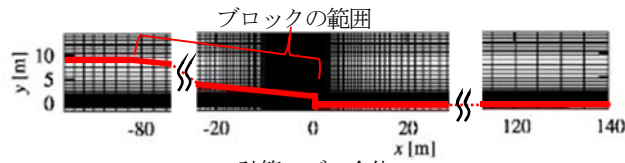
3. 解析によるブロックの流体力の評価

(1) 実験の再現計算

鉛直二次元流計算モデルにより、2章の実験条件における構造物全体及び下流区間を含む流れを計算し、護床工ブロック周囲の水圧分布を評価することを試みた。計算には、非圧縮性流体のNS方程式および連続の式を基礎



(a) 下流端ブロック近傍



(b) 計算モデル全体

図-8 計算メッシュ

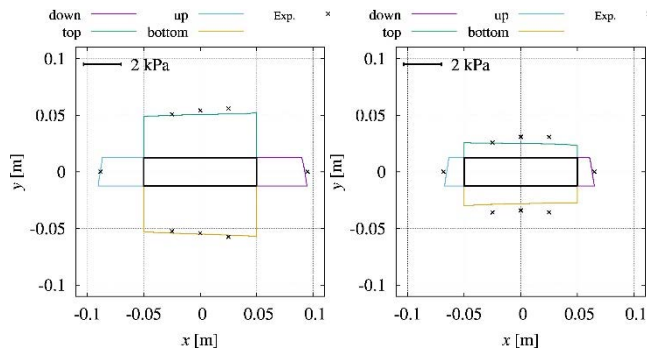


図-9 下流端ブロック周辺の水圧分布の比較
(ブロックα, 210L/s/m)

方程式とする差分法の $k-\varepsilon$ モデルを使用した。計算メッシュは、図-8に示すように、注目する下流端ブロック周辺で細かくした。また水面の変動は、各計算セルで定義される液相体積率を用いて輸送方程式を解くVOF法を用いて計算した。ブロックや洗掘孔等の斜め形状はIBMにより取り扱った。IBMでは格子点位置と一致しない壁面において、流速に対するディリクレ境界条件を式(3)で表される強制外力 f_i の形で与えている。

$$f_i = -RHS_i + \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (3)$$

ここで、

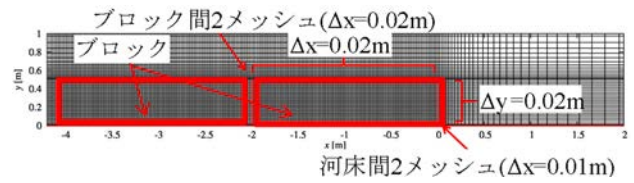
Δt : 時間刻み

i : 座標(x 及び y)

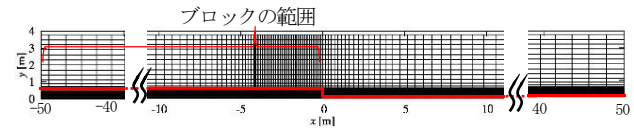
RHS_i : 対流項、圧力項、拡散項および重力加速度項を含む。

u_i^n : 時間ステップ n での流速

u_i^{n+1} は壁面上の流速とその周辺のメッシュにおける流速を対数則により補完して与えている。



(a) 下流端ブロック近傍



(b) モデル全体

図-10 計算メッシュ

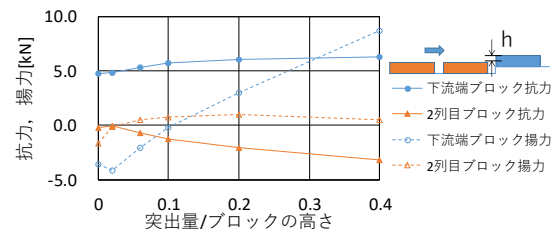


図-11 下流端ブロックの突出量と抗力、揚力

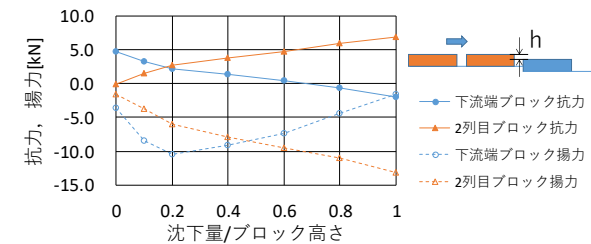


図-12 下流端ブロックの沈下量と抗力、揚力

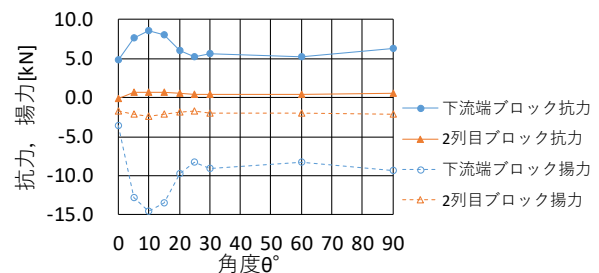


図-13 護床工ブロック下流の洗掘と抗力、揚力

まず、解析で用いる粗度高さを決定するために、実験の再現計算を実施した。実スケールの全長247mのモデルを作成し、実験を実施した3流量を実スケールに換算し、数値計算を行った。再現する実験条件は下流端ブロックの位置が跳水となる図-5の③(ブロックβのみ④)と、射流となる⑥の12ケースを選定した。計算結果を実験のスケールに換算して図-5に赤点をプロットした。図-9では水圧の計算結果と実験値を比較し、計算結果と実験値が概ね一致することを確認した。

(2) 護床工の変状の影響の検証

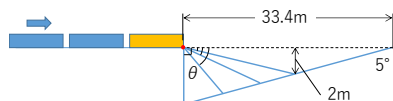


図-14 洗掘の形状

竣工から年月が経った河川横断構造物では、ブロック下流の洗掘やブロック自体の沈下、不陸等の変状の影響も考慮する必要がある。

そこで、前節で設定した粗度高さを用いて、ブロックが敷設された平坦な水路(図-10)を設定し、下流端ブロックが1つ上流側のブロックよりも突出、沈下した条件(以下、「突出、沈下」)や、護床工下流の洗掘のある条件(以下、「洗掘」)で鉛直二次元流計算を実施した。ブロック α を対象とし、流量は $140\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ 、上流水位 1.5m 、下流水位 2.0m とし、計算範囲全体が射流となる条件とした。図-11～13は、下流端ブロックとその1列上流側のブロック(以下、「2列目ブロック」)について、変状量に対する抗力と揚力の変化を示している。なお、洗掘の形状は図-14のように設定した。

突出(図-11)では、下流端ブロックが1つ上流側のブロックに対して突出している量をブロック高で割ったもの(以下、「突出量」)を0.02から0.4まで変化させた。突出量が0.4までは、突出がない場合と比較して、下流端ブロックの抗力は1.3倍程度まで増大する。揚力は突出量が0.02までは減少するが、それ以降、増大する。2列目のブロックは、抗力、揚力とも大きく増大しない。

沈下(図-12)では、突出量と同様に沈下量を定義し、それを0.1から1.0まで変化させた。沈下量が大きくなるほど、下流端ブロックの抗力は減少し、揚力は下向きであるため、流出が起こりにくくなる。一方、2列目のブロックにかかる抗力は増大し、沈下量がブロック高の0.6～1.0倍では当初の下流端ブロックの1.0～1.4倍になる。これは後述する洗掘と同様、当該ブロック下流の勾配が増大することにより当初の平坦な状態よりも抗力が大きくなるためであると考えられる。

洗掘(図-13)では、洗掘孔の上流側の角度を $5^\circ\sim 90^\circ$ に変化させた。下流端ブロックの抗力は洗掘がない状態より増大するが、角度が 30° 以上では1.3倍程度である。今回の検討ケースで抗力が最も大きくなるのは 30° よりも角度が小さい場合で、 10° で最大値(当初の1.8倍)となる。

4. まとめ

以上より、今回の実験及び解析の結果からは、下流の河床低下を見込んだ場合の河川横断構造物の設計・維持管理の基準について、以下の結論が得られた。

- 1) 現行の基準における群体ブロックの評価だけでなく、下流端ブロックの評価をすることが望ましい。
- 2) 下流端ブロックが流出する際に滑動と転動の流出形

態が見られた。そのため揚力が作用しやすいブロックの場合には特に、現行の滑動に加え、転動の照査も行うとよい。

- 3) 滑動と転動の計算値では、安全率2.0を用いると、実験でのブロックの流出を概ね説明できた。
- 4) 下流端ブロックが1つ上流側のブロックに対してブロック高の1割以上の突出(不陸)がある場合、突出がない場合と比較して、抗力と揚力が共に増大する。突出高4割で抗力が1.3倍程度となる。
- 5) 下流端ブロックが沈下している場合には、下流端ブロックにかかる流体力は減少するが、1つ上流側のブロックにかかる抗力が増大する。
- 6) 今回の解析結果では、護床工下流端から下流方向への洗掘角度(俯角) $5^\circ\sim 30^\circ$ のとき下流端ブロックに働く抗力の増大量が大きかった。

なお今回の検討はブロック形状を単純化し、解析も鉛直二次元計算により実施したため、ブロック間のすきま等の3次元性の影響や、実際のブロックの複雑な形状は評価できていない。さらに現地で観察されるブロック下の河床変動によりブロックに傾きが生じている場合の評価も今後の課題である。

謝辞：本研究にあたり、河川技術開発制度の「河床低下状況下の河川における横断構造物の劣化・損傷・破壊予測技術の開発」(平成29年度～令和元年度)における間瀬肇先生、秋山壽一郎先生、群馬大学 清水義彦先生とそのグループ、長岡技術科学大学の大塚悟先生とそのグループにご指導いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) (財)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) 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。
- 3) 山本陽子，中村良二，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。
- 4) 護岸ブロック試験法検討委員会編：護岸ブロックの水理特性試験法，財団法人土木研究センター，2003。
- 5) 樋口敬芳，北野和徳，片山直哉，須藤達美，斎藤隆泰，清水義彦：移動床水理模型実験と粒子法による河床低下に伴う床止めの破壊現象の把握，河川技術論文集，第25巻，pp.441-446，2019。
- 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)，75 巻 2 号，pp.519-530，2019。
- 7) (財)国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，山海堂，2001。

(2020. 4. 2受付)