

流体力による護床エブロックの 破壊限界に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON THE FAILURE LIMIT OF THE BLOCK TYPE GROUNDSILL BY FLUID FORCE

山本 陽子¹・中村 良二²・福島 雅紀¹

Yoko YAMAMOTO, Ryoji NAKAMURA 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)

²非会員 元国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室
(関東地方整備局 河川部 地域河川課(〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心2番地1))

In the past researches, the authors conducted a moving bed experiment on a block type groundsill with a flexible structure assuming that the downstream riverbed is decreasing. As a result, with the lowering of the water level downstream, the high flow velocity acts on the bed protection mattress at the downstream end, and the block is swept away and the deformation extends to the main body. In this study, the fixed bed hydraulic experiment was carried out using the structure under the same conditions, and the flow field was measured around the mattress at the downstream end, which is the sudden change current field. On the basis of this result, we will consider the method of setting the fracture limit external force in the design and maintenance of the same type groundsill under the condition of riverbed lowering.

Key Words : *Groundsill, flowing of the bed protection mattress, fixed bed hydraulic experiment, shooting flow, non-hydrostatic pressure distribution, riverbed lowering*

1. はじめに

上流からの供給土砂量の減少、二極化の進行等により、設計当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。「床止めの構造設計手引き」¹⁾によると、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、跳水の発生位置（以下、「跳水区間」）が下流に移動し、構造物下流にも射流が発生する。その結果、構造物下流の河床が低下し、出水時における構造物本体の破壊、本体の破壊に伴う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、定期横断測量成果や構造物の点検結果を用いて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。

構造物の状態を評価するためには、被災要因や被災時に生じる破壊の進展過程、そのメカニズムを把握した上で、上記のデータ等に基づいて判断することが望ましい。そこで筆者らは、構造物下流の河床低下が河川横断構造物の被災の主要因と考え、下流河床が低下しつつある状況を想定し、床止め工本体の下流が屈とう性構造のブ

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に移動床実験を実施した²⁾。その結果、下流河床の低下に伴い構造物直下流の水位が低下し、跳水位置が下流に移動することで射流の高流速がふとんかごに作用し、床止め工下流側のふとんかごから徐々に流失し本体の破壊に至ることを確認した。

ブロックタイプの護床工の移動限界については技術的知見が蓄積されてきたが、ふとんかごについては必ずしも確立されているとは言えない。そこで本研究では、固定床水路実験を行い、ふとんかご下流の洗掘状況や床止め工下流の水位を変化させ、ふとんかごに作用する流速及び水圧等を計測した。計測時には、水位測定や流況観測を合わせて実施した。以下では、実験の概要及び実験結果について述べた上で、ふとんかごの移動限界について考察した結果について報告する。

2. 実験の概要

(1) 模型の概要

屈とう性構造の被覆ブロック形式床止め工を対象に、固定床水路実験（縮尺1/20）を実施した(図-1)。

床止め工本体の下流に、護床工として異形ブロック及

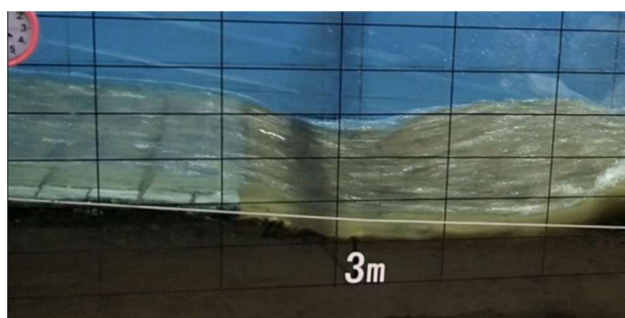
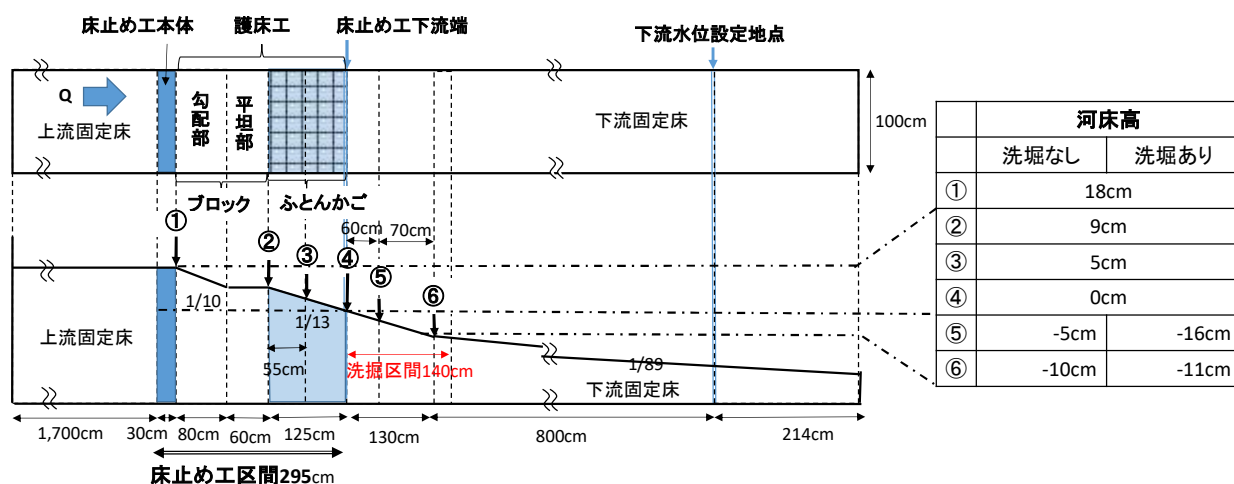


図-2 移動床実験の河床洗堀状況

表-1 単位幅流量及び下流水位条件

ケース名	目標流量 模型 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$) (現地換算 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$))	流況	下流水位 模型 (cm) (現地換算 (m))	
			洗掘なし	洗掘あり
CASE I	280 (2.5)	A	6.3 (1.3)	7.0 (1.4)
		B	2.2 (0.4)	4.8 (1.0)
		C	-0.5 (-0.1)	1.4 (0.3)
		D	-3.5 (-0.7)	-5.9 (-1.2)
CASE II	560 (5.0)	A	10.4 (2.1)	11.7 (2.3)
		B	7.8 (1.6)	8.6 (1.7)
		C	4.0 (0.8)	4.7 (0.9)
		D	0.1 (0.0)	-2.3 (-0.4)
CASE III	1,130 (10.1)	A	17.4 (3.5)	17.4 (3.5)
		B	15.5 (3.1)	15.4 (3.1)
		C	10.3 (2.1)	7.3 (1.5)
		D	7.2 (1.4)	6.1 (1.2)
CASE IV	1,750 (15.7)	A	24.9 (5.0)	25 (5.0)
		B	21.9 (4.4)	20.3 (4.1)
		C	18.1 (3.6)	13.5 (2.7)
		D	13.4 (2.7)	12.1 (2.4)

びふとんかごの模型を固定した。ふとんかごの模型は、大きさ10cm×10cm×2.5cmの鉄線製のかごのなかに、粒径10mmの中込め材を詰めた。ブロックとふとんかごの下には厚さ約30mm、粒径約10mmの砂利層を設けた。

現地換算すると、ふとんかごは大きさ $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.5\text{m}$,

中詰め材粒径20cm, かごの下には粒径20cmの割栗石が設置されている想定となる. 以降, 実験結果は現地換算値で記載する.

床止め工直下流の河床は、洗掘等が生じていない平坦な場合（以下「洗掘なし」）と、洗掘が生じた場合（以下「洗掘あり」）の2ケースを実施した。「洗掘あり」の洗掘形状は、図-2のように移動床実験において、ふとんかごの流出が発生した時点の下流河床の洗掘状況から決定した。洗掘された下流の河床表面はモルタルで成形している。

(2) 水理条件

実験の水理条件は表-1の通りである。図-3のように、跳水区間がふとんかご下流端よりも上流にあるケース（流況A）、ふとんかご下流端に跳水区間の上流端があるケース（流況B）、ふとんかご下流端より跳水区間の上流端が下流にあるケース（流況C、移動床実験でふとんかごの流出が生じた状態を想定）、跳水区間がさらに下流にあるケース（流況D）の4種類の流況を設定した。各ケースについて、流量を固定した状態で、下流水位を調整することにより流況A～Dの4段階の跳水区間の状態をつくり、流況が安定した状態で流速、水圧を測定した。なお下流水位とは、床止め工下流端④の河床標高をゼロ点としたときの、床止め工下流端より9.3m（現地換算186m）下流地点の水位である。

(3) 水圧・流速・水位の計測方法

水圧については、図-1に示した①～⑥地点で、模型の表面に測定孔を設けてピエゾ管を接続し、その先端に圧力センサーを設置して圧力水頭の時系列変化を計測した。①、②地点はブロック模型上面に、⑤、⑥地点は河床表面に各1点の測定孔を設けた。③、④地点はふとんかごを模擬するために、ふとんかごと同じ大きさの鉄線製のかごの中に、表面に測定孔を設けたアクリル板を設置した。なお、アクリル板の周囲にはふとんかごの模型を敷設しているが、アクリル板自体は浸透性を有しないので、

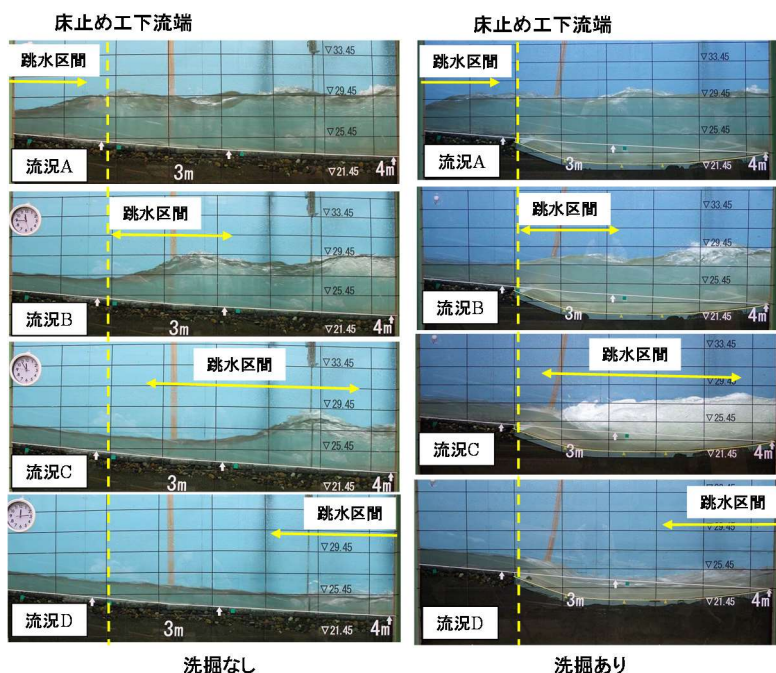


図-3 流況の設定 (写真はCASEIV)

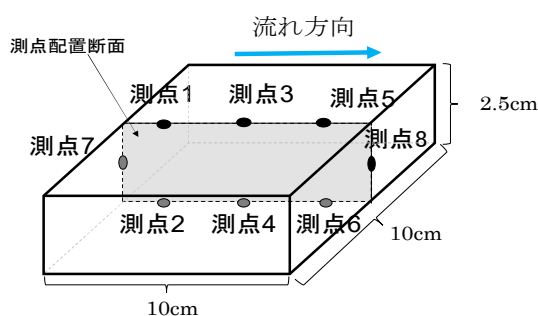


図-4 ④地点の亚克力板の圧力測定箇所

測定される圧力値はふとんかごの場合とは異なる可能性がある。④地点は図-4に示すように、測点配置断面に沿って亚克力板の表面に8点の測定孔を設けた。③地点は、上面と底面に測定孔各1点とした（図-4の測点3,4の位置）。

流速については、流速2.5m/s以下の場合、水路上に設置した観測架台に電磁流速計を固定し、サンプリング間隔1/20sで30秒平均流速を計測した。流速が2.5m/s以上の場合、ピトー管の平均値を採用した。河床から水深方向に1～3cm間隔で流速を測定し、各断面の測定値の平均値を断面平均流速とした。

水位については、ポイントゲージで計測した。

3. 実験結果

図-5に測定位置①～⑥地点の水深、ふとんかご表面の圧力水頭、断面平均流速を示す。

「洗掘なし」（左図）は、床止め工の上流側①～③地点は射流で、水深、流速ともどの流況でもほぼ等しい。流況B、Cでは、跳水区間のうち上流の測定位置では圧力水頭が水深を上回る。水深方向の流速分布については紙面の制約で割愛するが、これは水深が増大する地点では流向が上向きになる影響であると推察される。その下流では、流向がやや下向きとなるため、反対に圧力水頭が水深より小さくなる。

「洗掘あり」（右図）では、流況A、Bは④から⑤の区間で圧力水頭が水深よりもむしろ下がる。これは洗掘孔に落ち込む流れで流向が下向きになるためと推察される。また、流況A、Bでは移動床実験で観察されたのと同様、洗掘孔の河床付近では、上流側向きの流れが生じている。流況Cでは、床止め工下流端の④地点で現地換算で7～8m/sもの高流速が発生し、これがふとんかごの移動の一因となると考えられる。その

下流の⑤、⑥地点は、流量の小さいCASE I、IIでは洗掘孔内の水深が相対的に高いので、流速はそれほど大きくならないが、流量の大きいCASE III、IVは、水深は大きいものの洗掘孔内の河床に沿った流速が卓越する流れとなり、流速は下流に向かい徐々に低下する。流況Dも、④地点で高流速となるが、CASE I、IIでは洗掘孔内の水深が大きいので⑤、⑥地点の流速は低下する。CASE III、IVでは射流のまま洗掘孔内を流れが「走る」状態になり、⑤、⑥地点の流速は④地点よりもさらに大きくなる。

次に、床止め工下流端の④地点に着目する。ふとんかごの上面の測点1,3,5と底面の測点2,4,6の平均値の差分をとったのが図-6である。参考のため、上流の③地点の上面と底面の差の値も示している。下向き（ふとんかご上面の方が底面よりも圧力が大きい場合）が正である。ふとんかごの厚さは現地換算で0.5mなので、静水圧であれば③地点のように-0.5mに近い値になる。一方で④地点の「洗掘なし」では値がそれより小さくなっており、上向きにかかる水圧が大きい。洗掘のない平坦なふとんかご上で③と④にこのような差が生じる理由は明かではないが、図-5の通り、「洗掘なし」のほとんどのケースでふとんかご表面の水圧は③よりも④の方が大きいことから、④地点で底面の水圧がさらに大きくなるのは、ふとんかご下の浸透流の影響ではないかと考える。「洗掘あり」では、流況A、Bで相対的に④地点のふとんかご上面の圧力が大きい、流況Cの特にCASE III、IVで上向きに働く水圧が顕著に大きくなる。

一方、測点④地点の上下流7,8の差を取ったのが、図-7である。下流向き（上流側の方が下流側よりも圧力が大きい場合）が正である。「洗掘なし」では値はマイナス

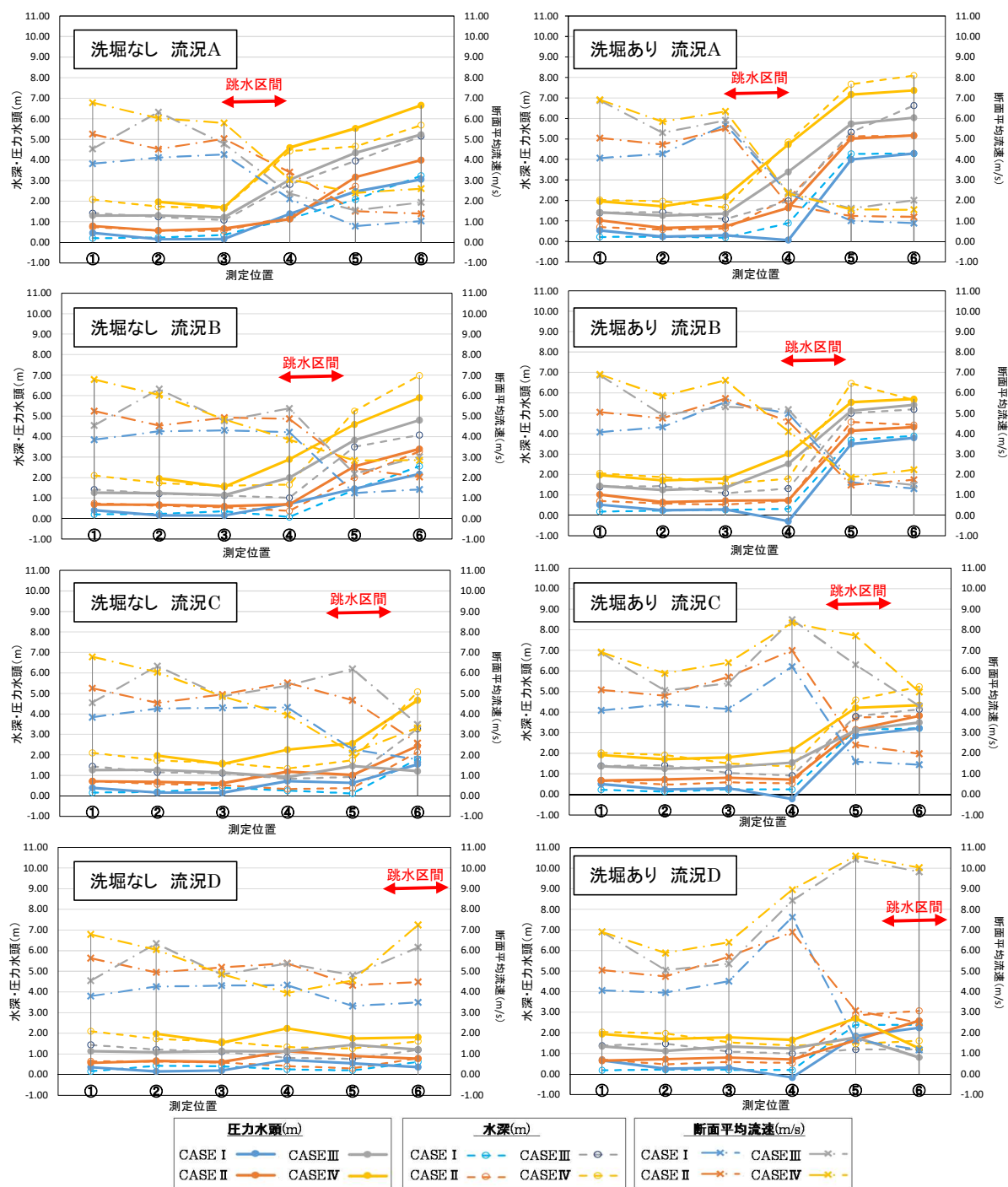


図-5 流況・流量条件別の水深、圧力水頭、断面平均流速の測定値

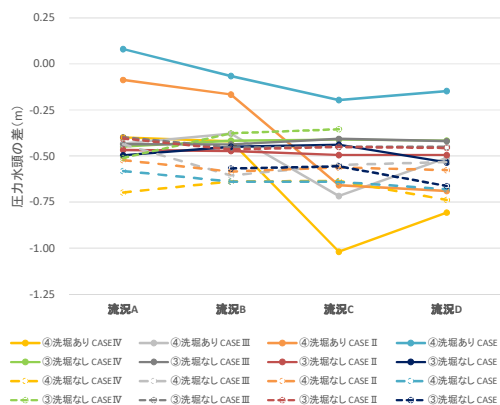


図-6 ふとんかご上面と底面の圧力差

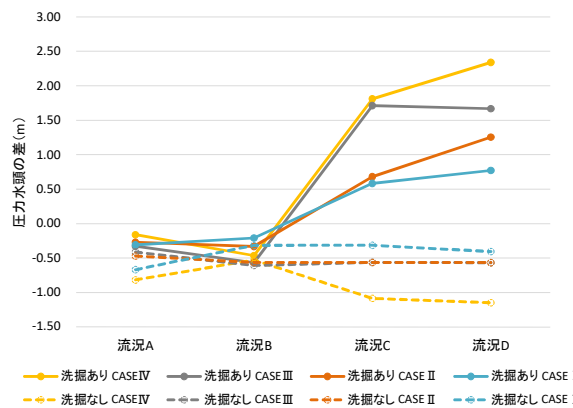


図-7 ふとんかご上流と下流の圧力差

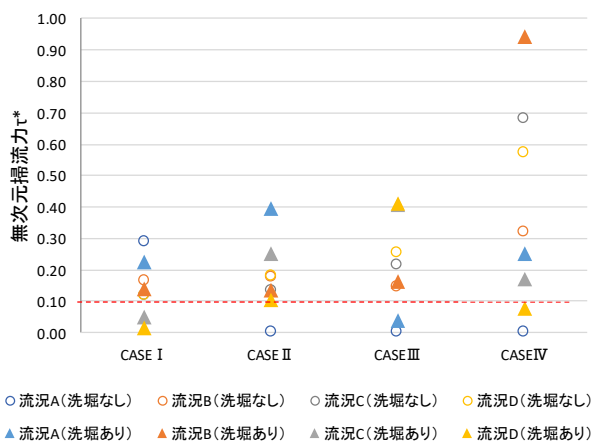


図-8 中詰め材の無次元掃流力の評価

となり、上流向きの圧力が働いている。「洗掘あり」では流況A, Bは上流向きが大きいが、流況C, Dは下流向きの圧力が顕著に大きくなる。特に流量が大きいCASE III, CASE IVの圧力差が大きい。

4. 考察

実験で得られた値から、既存の技術基準によるふとんかごの安定性について評価を試行した。

移動床実験の結果では流況Cの状態で、CASE II～IVでは急激に破壊が進行した。CASE Iは、下流端から1～2列のふとんかごが下流へ移動しただけで、それ以上は変状が進行しなかった。

(1) 掃流力による評価

「護岸の力学設計法」³⁾では、鉄線製ふとんかごの移動は、掃流一籠詰めモデルによる中詰め材の粒径検討を行うこととしている。この基準は、ふとんかごの設計上の安定性を評価するために、屈とう性のあるカゴマットの中詰め材の移動限界の実験値⁴⁾に基づき、金網に拘束された状態での中詰め材自体の移動限界を評価している。実験で用いたふとんかごのモデルはかごの変形が生じないことから、無次元限界掃流力はかごの変形を許さない場合 $\tau_{*d} = 0.10$ を採用する。実験で得られた水面勾配と流速からこのモデルで滑動の評価を行うと、移動床実験ではふとんかごの移動が発生しなかったような流況Aや流況Bのケースも含めて、多くの水理条件で滑動が生じる評価となった(図-8)。

(2) 流速による抗力・揚力の評価

「護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル」⁵⁾の方法で評価した抗力・揚力と、重量、摩擦力とのつり合いから滑動を評価した。ふとんかごの抗力・揚力係数については、文献⁶⁾のグラフより読み取った $C_D = 1.6$ 、 $C_L = 0.3$ を適用した。摩擦係数については、「護岸の力学設

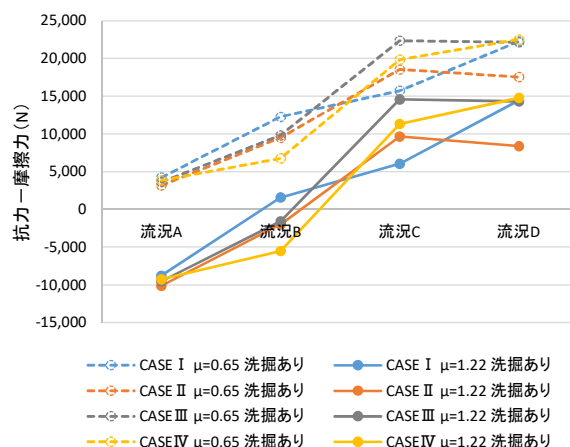


図-9 洗掘がある場合の抗力と摩擦力の差

計法」³⁾は、ブロックの滑動評価に用いる土と吸い出し防止材の間の摩擦係数を $\mu = 0.65$ としている。また、前田⁷⁾は、ジオテキスタイル製のふとんかごと地盤(玉石)の水中静止摩擦係数を実験値より $\mu = 1.22$ としている。ふとんかごは「護岸の力学設計法」³⁾が想定する底面が平滑なブロックより河床の砂利と中詰め材のかみ合わせの効果により摩擦が大きいが、屈とう性により接地面がより大きくなるジオテキスタイル製のふとんかごよりは摩擦が小さくなると考えられる。これらのことから、 $\mu = 0.65$ と 1.22 の両者について検討することにした。流速は、実験より得られた流速 V_0 、水深 H_d を以下の式(1a)に代入することにより、設計流速 V_d を求めた。相当粗度 K_s は中詰め材の粒径 0.01m を用いた。

$$V_d = \frac{8.5}{6.0 + 5.75 \log(H_d/K_s)} V_0 \quad (1a)$$

図-9は「洗掘あり」の場合について、流速によってふとんかごに働く抗力と重量を下流向きの力に、ふとんかごの重量と揚力を考慮した摩擦力を上流向きの力としてその差分を縦軸にとったもので、正の場合にブロックが滑動する評価を示す。摩擦係数が $\mu = 0.65$ では全てのケースで、 $\mu = 1.22$ でも流況C, Dの全てのケースで滑動が生じる結果となり、摩擦力の評価が過小と考えられる。また上式で設計流速 V_d を求めると水深の影響から、例えば図-9の流況Bや流況DのCASE Iのように、流量が小さくても水深の小さい場合には、よりふとんかごが移動しやすい評価になる傾向も見られる。

(3) 水圧による評価

実験で計測した水圧による流体力と、ふとんかごと河床の間の摩擦による力のつり合いでふとんかごの滑動が説明できるか確認した。上下流にかかる流体力は、測点7と測点8の水圧をふとんかごの側面面積で乗じた。また勾配方向にかかる重力を考慮した。ここではブロックの静止摩擦係数 $\mu = 0.65$ を採用した。この結果が、図-10であ

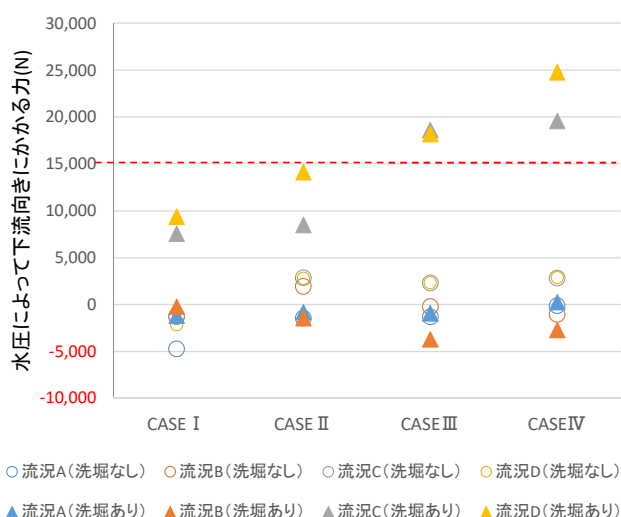


図-10 水理条件ごとの下流端ブロックにかかる力

る。赤い点線は、ふとんかごの重量に対する静止摩擦を示しており、この値を超過した場合にふとんかごの移動が生じると考えている。洗掘がある条件のうち流量が大きいCASE IIIとCASE IVで下流水位が下がった条件の流況C、Dのみで、水圧差による下流向きの力が静止摩擦を上回り、ふとんかごの移動が発生するという結果が得られた。これは移動床実験による結果とも整合すると考えられる。

以上、(1)～(3)の試算を実施した結果、(1)と(2)の手法では流量と水位の条件がそれほど厳しくない場合にも、ふとんかごの移動が発生する評価になることがわかった。この両者の評価手法は、流れの条件としては流量、断面平均流速、水深といった基本的なデータで評価ができる利点がある一方で、もし今後、実際の横断構造物で出水時に破壊が発生するかどうかを判断するために用いる場合には、やや安全側の評価となる可能性がある。

(3)の水圧差を用いる手法は、断面の流速分布の差による圧力の違いなど、複雑な流れの情報を必要とするが、より実験結果に合致する評価結果が得られる。

ただし評価の精度を向上させるための今後の課題として、ふとんかごと河床との間の摩擦力の精査、揚力の影響の評価、近傍の河床変動に伴うふとんかごの不陸等が、ふとんかごの移動限界にどのように影響しているかを解明することが必要である。特に揚力に関しては、河床付近の流れが、高流速下ではふとんかご底面の水圧に影響を及ぼしていると考えられる。そのためブロック下の河床材料粒径等に応じた圧力場の把握が今後の課題となる。

5. おわりに

構造物下流の河床低下が河川横断構造物の被災の主要因と考え、下流河床が低下しつつある状況を想定し、被覆ブロック形式床止め工を対象に固定床水路実験を実施した。その結果、河川横断構造物の安定性を評価するためには、構造物下流の水位に影響する下流河川の河床低下に加え、構造物直下流の洗掘状況に留意する必要があることを確認した。また、ふとんかごの移動限界については、ふとんかご周辺の流速よりも水圧を用いた方がよりの確に評価できることが確認された。ただし、ふとんかごの透水性を無視した実験であることに留意する必要がある。

今後、ここで実施した実験条件の下、ふとんかご周辺の流況を数値計算によって再現し、ふとんかごの流失の有無について模型実験結果と比較することで、水圧を用いることの妥当性を確認したい。

定期横断測量成果や構造物の点検結果を用いて、構造物の状態を判断するためには評価基準が必要となる。例えば、護床工が流失する洗掘深と下流水位との関係を設計段階で数値計算によって確認し、維持管理基準として設定することが有効であろう。

謝辞：本報告における課題整理にあたって、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」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と意見交換等を通じご指導いただいた。お礼を申し上げます。

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) 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。
- 3) (財) 国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法、(株) 山海堂、pp.74、1999
- 4) Flexible linings in Reno mattress and gabions for canals and canalized water courses, OFFICINE MACCAFERRI S.p.A, -BOLOGNA- ITALY, 1976
- 5) (財) 土木研究センター編：護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル第2版、2003
- 6) 高田 保彦、前田 英史、八嶋 厚：ジオテキスタイル製ふとん籠の水理特性に関する実験的研究、土木学会第59回年次学術講演会、pp.309-310、平成16年9月
- 7) 前田 英史、梅田 明宏、八嶋 厚：ジオテキスタイル製ふとん籠に関する水中静止摩擦試験、土木学会第59回年次学術講演会、pp.307-308、平成16年9月

(2019. 4. 2受付)