

河川堤防の裏法面を被覆したブロックに 越水時に作用する流体力の計測結果

西嶋 貴彦¹・三好 朋宏²・福島 雅紀³

¹ 非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

E-mail: nishijima-t924a@mlit.go.jp (Corresponding Author)

² 正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

³ 正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部 河川研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭一番地)

国土交通省が検討を進めている粘り強い河川堤防の強化工法の一つである表面被覆型は、堤体表面を被覆材で保護する工法である。堤防裏法面においては、吸出し防止材やブロック等で被覆する構造となっているが、ブロックの安定性を検討するうえで越水時の裏法面の流れは射流であり、ブロックに作用する流体力の評価が難しいという課題がある。そのため、本研究では、ブロックの表面突起形状を変えて、越流水によりブロックに作用する流体力を計測する実験を行った。その結果、突起に傾斜を設けたり、突起高を小さくすることで、抗力は小さくなるが、揚力は逆に大きくなることが確認された。また、ブロックに作用する流体力は、従来の水理特性試験から得られた係数を用い、護岸の力学設計法の算出式より求めた流体力よりも大きな値となり得ることを示した。

Key Words: overflowing, fluid force, armor blocks, strengthen levee, supercritical flow

1. はじめに

近年、堤防の施設能力を大きく超える出水が多発している。特に令和元年東日本台風による出水では全国で142箇所の堤防決壊が発生し、そのうち122箇所は越水が主要因とされた。そうした中、国土交通省は越水に対して河川堤防を強化する方策の検討が必要であるとの方針を示し、堤防を越水した場合であっても、決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなど、減災効果を発揮する粘り強い河川堤防の検討を進めている¹⁾。

粘り強い河川堤防の強化対策としては、表面被覆型、自立型、その他構造に大きく分類される²⁾。本論文では、河川研究室でこれまで研究を進めてきたコンクリートブロック（以下「ブロック」という。）を用いた表面被覆型について述べる。表面被覆型は堤体表面を被覆材で保護することで越水による堤体の侵食を遅らせる機能を有する構造である。越流水深30cmの外力に対して、越流時間3時間は堤体が表面被覆材によって被覆された状態がほぼ維持され、その結果、堤防天端高が維持される構

造が技術開発目標として設定されている³⁾。

越流水深30cmにおける越水時の裏法面の流れは、裏法面に設置されたブロックの高さと水深の比である相対水深比が1以下、フルード数が4程度の射流であり、ブロックの表面突起形状の影響を大きく受け、空気が混入し、複雑な流れとなる。そうした流れに対して、技術的な限界はあるもののブロックに作用する流体力を評価し、力学的な安定性の検討手法が必要となる。常流場でのブロックの力学的な安定性の検討手法としては、護岸の力学設計法⁴⁾があるが、越水時の裏法面の流れに適用できるかについては、確認が必要である。また、射流場における物体に作用する流体力に関して、俣熊ら⁵⁾は射流場（フルード数1.5以下）での護岸・根固めブロックに作用する流体力を水理模型実験により計測している。その結果ブロックを単体で置いた場合の抗力・揚力係数は、常流場に比較してやや大きくなる傾向があること、群体で置いた場合には、抗力・揚力係数は常流場と同程度になることを示している。重枝ら⁶⁾は相対水深比が1.0~2.5の射流場（フルード数1.5以下）において、立方体に作用する流体力を水理模型実験により計測し、抗力係数が

一定値となることを示した。しかしながら、いずれも相対水深比が 1 以上で、フルード数が 1.5 程度以下の物体が完全に水没した状態の流れ場での結果であり、越水時の裏法面の流れとは大きく異なると考えられる。そこで、本研究では、小規模模型を用いて、ブロックの表面突起形状を変えて、越流水によりブロックに作用する流体力を直接計測する実験を行った。計測結果から、表面突起形状の違いによる流体力への影響や、越水時にブロックに作用する流体力と護岸の力学設計法の手法より求めた流体力との差異について考察した。

2. 実験

(1) 実験模型の概要

幅 1m, 高さ 1.5m の実験水路内に、図-1 に示す堤体高 0.75m, 天端幅 0.50m, 表法面勾配 2 割, 裏法面勾配 2 割の堤防模型を製作した。裏法面には、木製のブロック模型及び写真-1 に示す流体力の計測対象となるアクリル製のブロック模型（以下「計測ブロック」という）を設置した。ブロック模型間の隙間は 2.5mm とした。等流状態におけるブロックに作用する流体力を計測するため、越流水が十分に加速した法尻部に計測ブロックを設置した。ブロック形状としては、覆土タイプのブロックを想定し、既存の覆土タイプのブロックの形状を参考にモデル化した。図-2 に表面突起形状を、表-1 に突起部の角度や突起高を示す。また、実験模型は実物の 1/4 スケールとした。

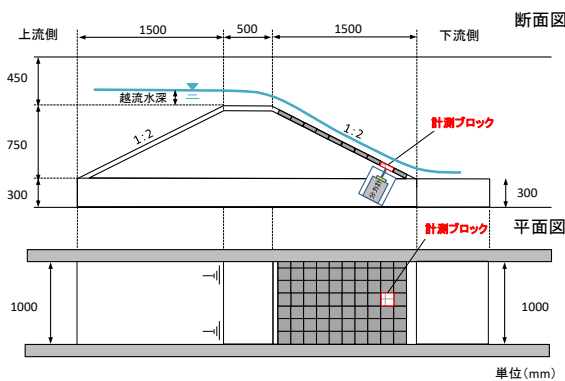


図-1 実験模型形状図

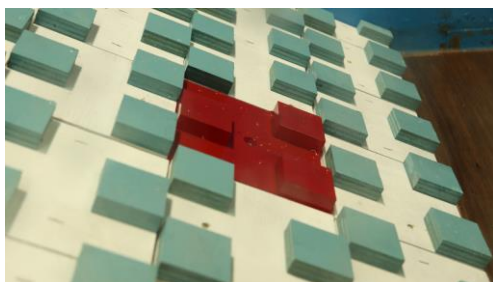


写真-1 計測ブロック (Case1) 設置状況

(2) 実験方法

ブロックに作用する流体力の計測には 4 分力計（定格容量： $F_x, F_y, F_z=200N, M_y=80Nm$ ）を用い、図-3 に示す抗力（法面平行方向：流下方向为正）、揚力（法面垂直方向：上向き为正）、モーメントの 3 つの作用力を同時に計測した。越流水深は 2.5cm~15.0cm（2.5cm 間隔）とした。目標の越流水深に到達し、流れが安定した後、各 Case で 1 回流体力を連続計測した。サンプリング周波数は 40Hz, サンプリング数は 2400 とし、検討に用いる流体力はその時間平均値を使用した。ここで、流体力は時間的に変化することから最大値を考慮することの重要性を指摘されることがあるが、抗力と揚力が同時に大きくなることは考えにくいことから、水理特性試験でも採用しているように抗力と揚力の時間平均値とした。

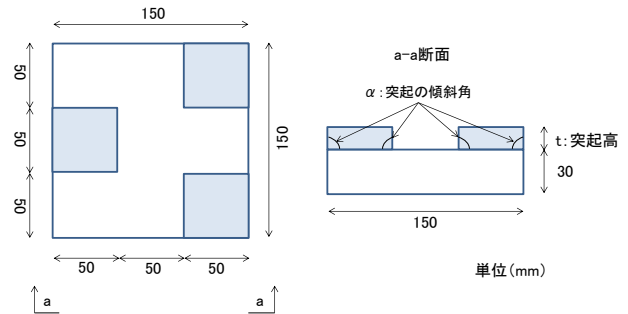


図-2 計測ブロック形状図

表-1 実験 Case 一覧

Case	1	2	3	4	5	6
突起高:t (mm)	15	15	15	12	9	6
突起角:α	90	60	45	90	90	90
体積 (cm ³)	585	550.6	531	562.5	540	517.5
浮力 (N)	5.85	5.506	5.31	5.625	5.40	5.175

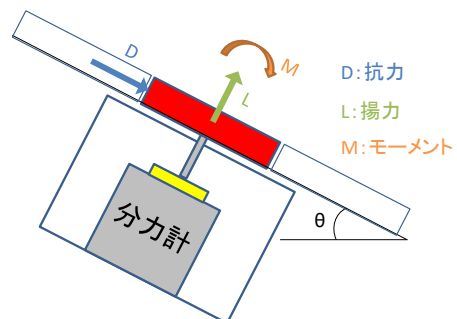


図-3 流体力の作用方向

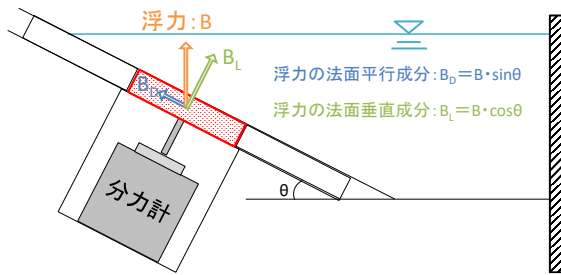


図-4 分力計のゼロ点補正

計測に当たっては、図-4に示すように下流部を堰き止めて法尻部を湛水させることで計測ブロックを完全に水没させ、表-1に示した浮力 B が作用した状態で分力計のゼロ点補正を実施した。その後、堰き止め板を撤去して排水した後に、抗力の初期値が浮力の法面平行成分($B \cdot \sin \theta$)のプラス値、揚力の初期値が法面垂直成分($B \cdot \cos \theta$)のマイナス値となることを確認した。また、各越流水深での計測が終了し、越水を停止させた後にも最終的に抗力、揚力が初期値に戻ることを確認した。

計測ブロックを設置した法尻部の流速は PTV (Particle Tracking Velocimetry) 解析および不等流計算より算定した。PTV 解析による流速は、高速度カメラ (撮影速度 300fps (10倍速)) を使用し、浮子 (約2cmのプラスチックストロー片) を投下して、計測ブロック周辺のブロック 3 個分の距離 (0.45m) を浮子が通過する時間から算定した。不等流計算に用いるブロックの粗度係数 n の推定方法は、護岸の力学設計法の護岸の粗度係数評価法を参考とし、突起の配置や突起高から相当粗度 k_s を算定し、マンニング・ストリクラーの式(1)より算出した。表-2に設定した各 Case の粗度係数を示す。

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66\sqrt{g}} \quad (1)$$

3. 実験結果と考察

(1) ブロック上の流速比較

計測ブロック上の流速を PTV 解析と不等流計算によって算出した。図-5、図-6にはそれぞれ Case1~4, Case 5, 6について、両手法による流速算出結果を比較した。

Case1~4では、やや差が出ているものの概ね一致していることが分かる。Case 5, 6では、Case 5は概ね一致しているものの、Case 6は PTV 解析による流速が全体的に大きくなる傾向が確認された。これは、PTV 解析による流速が表面流速であり、突起高の最も小さい Case6 では表面流が粗度の影響をあまり受けず、不等流計算による平均流速よりも大きくなった結果と考えられた。各 Case

表-2 各 Case の粗度係数の推定値

Case	1	2	3	4	5	6
粗度係数 (s/m ^{1/3})	0.024				0.023	

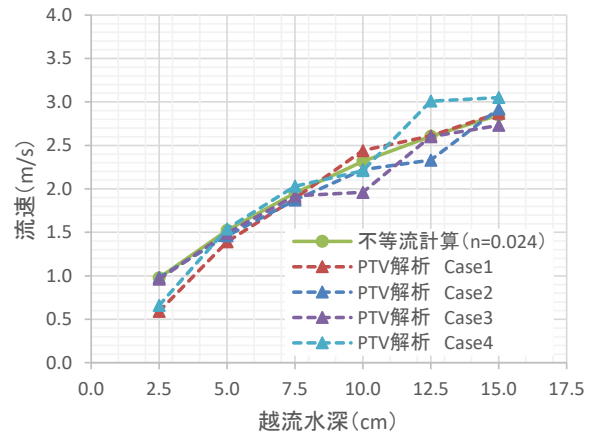


図-5 PTV 解析と不等流計算との流速比較 (Case1~4)

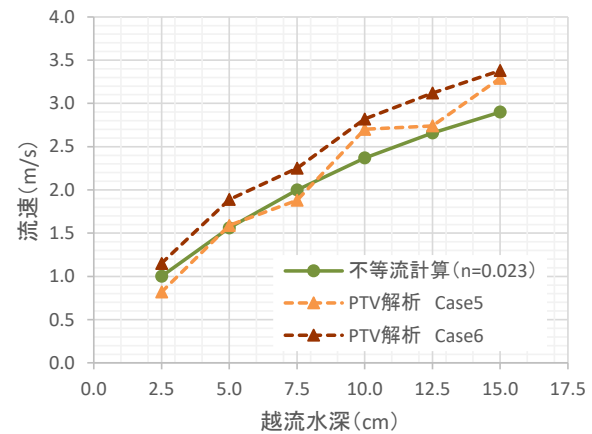


図-6 PTV 解析と不等流計算との流速比較 (Case5, 6)

で両流速値が概ね一致することから、設定した粗度係数は妥当な値であろう。相対水深比が 1 以下で、フルード数が 4 程度となる裏法面の越流水の流れについては、流速の算定手法が確立されていない。上記の結果は、不等流計算によって算定した流速値がブロックに作用する流速を概ね評価する上で有効であることを示す。以下では、裏法面に作用する流速を不等流計算によって算出することとする。

(2) ブロックに作用する抗力、揚力

図-7、図-8に、各 Case の越流水深毎の抗力および揚力の計測値を示す。ここで、図-8の Case2~4で越流水深 2.5cm のときに揚力値がマイナスとなっていることが分かる。これは浮力がブロック全体に作用した状態で分力計のゼロ点補正をした影響であると考えられる。揚力の初期値は $B \cdot \cos \theta$ のマイナス値となり、越流水深が小さい場合には浮力がブロック全体には作用せず、揚力も小さいためにマイナス値となったと推測される。図-7の抗

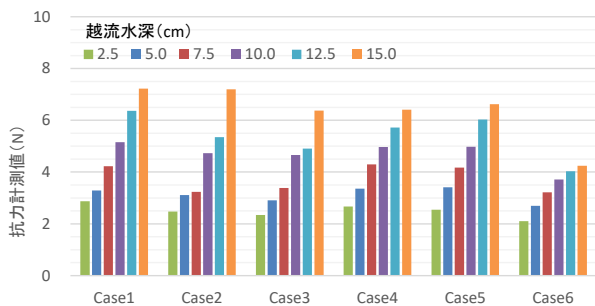


図-7 各 Case の越流水深毎の抗力計測値

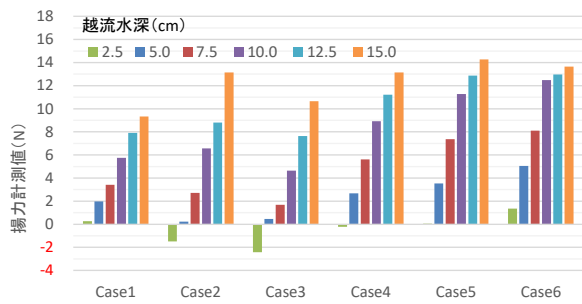


図-8 各 Case の越流水深毎の揚力計測値

力も同様に、初期値は $B \cdot \sin \theta$ のプラス値となり、水深が浅く浮力がブロック全体に作用していないときには、実際に作用している抗力よりも大きな値となっていると考えられる。

図-7 の抗力の計測値を見ると、Case1 と同じ突起高で、突起面に傾斜をつけた Case 2 や Case 3 では、突起面に傾斜のない Case 1 よりも抗力がわずかではあるが小さくなる事が確認された。これは、流れが突起面に垂直に当たる Case 1 に比べ、突起に傾斜をつけることで突起上流側の圧力の作用方向が変わり、抗力が小さくなったと考えられる。傾斜角が 60 度の Case 2 と傾斜角 45 度の Case 3 の値を比較すると、越流水深が大きいときに傾斜角の緩い Case 3 の方が小さくなる傾向が確認できた。以上のことより、突起部に傾斜をつけることは抗力を小さくすることに有効であると推測される。次に Case 1 と同様に突起面の傾斜がなく、突起高のみを小さくした Case 4 ~ 6 では、Case 4 と Case 5 でほぼ同程度の値となったが、突起高 15mm の Case 1 と比較すると突起高が小さくなるにつれて、抗力も小さくなる傾向が確認された。突起高が小さくなることで、粗度も小さくなりブロック表面の流速は速くなると考えられるが、逆に抗力の作用する面積は小さくなる。今回の計測結果からは、相対的に作用面積の影響が大きく抗力が小さくなったと考えられる。

図-8 の揚力の計測値をみると、同じ突起高の Case 1 ~ 3 で比較した場合、突起面の傾斜角と揚力に明確な関係を確認できなかった。また、突起高の違いで比較した場合は、Case 1 から Case 4, 5, 6 と突起高が小さくなると揚力が大きくなる傾向を確認できた。これは、突起高が

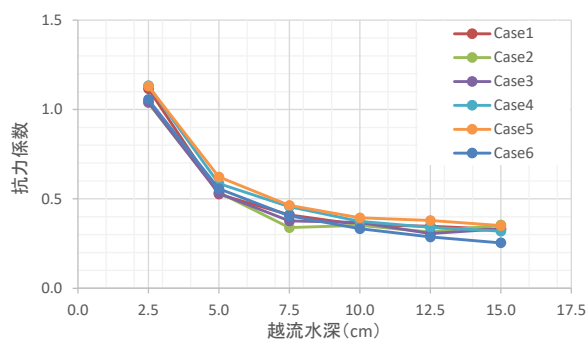


図-9 各 Case の越流水深と抗力係数の関係

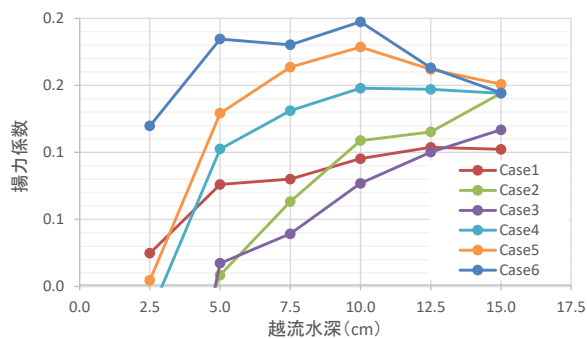


図-10 各 Case の越流水深と揚力係数の関係

小さくなることで粗度の影響も小さくなり、流速が速くなったことにより揚力が大きくなったと考えられる。

(3) 抗力係数, 揚力係数

図-9, 図-10 に計測した抗力, 揚力の平均値から、護岸の力学設計法に記載の群体時の抗力係数 C_{Dg} , 揚力係数 C_{Lg} の算出式(2), (3)を用いて算定した各係数と越流水深の関係を示す。

$$C_{Dg} = \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot A_D \cdot V_d^2} \quad (2)$$

$$C_{Lg} = \frac{2 \cdot L}{\rho \cdot A_b \cdot V_d^2} \quad (3)$$

ここで、 D は抗力、 L は揚力、 A_D は抗力作用面積、 A_b は揚力作用面積であり、 V_d はブロック近傍流速を表す。 A_D , A_b は、写真-2 に示すように越流水深によって水面形が大きく変化しており、越流水深によって、 A_D , A_b は変わりうるが、計測ブロックが水没した状態と仮定し、 A_D , A_b を算出した。また、 V_d については、常流場の設計ではブロック近傍流速を用いているが、相対水深比が小さい場合のブロック近傍流速を評価することは難しいため、ここでは不等流計算より算出した流速値とした。

Case 2 ~ 4 では越流水深が 2.5cm の時の揚力がマイナス値であるため、揚力係数もマイナス値となっている。

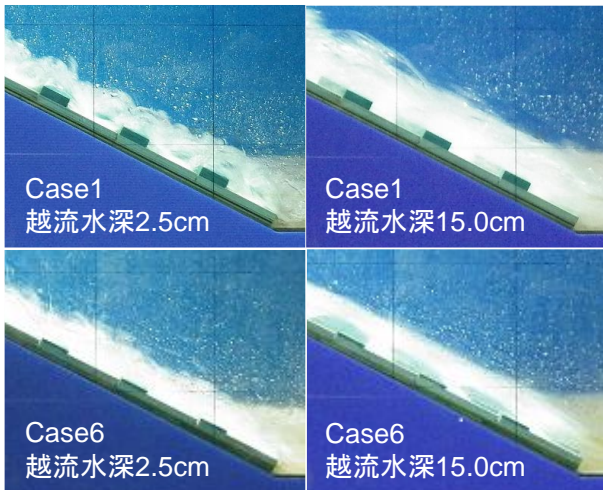


写真-2 実験時の法尻部の流況

抗力係数は、全ての Case で越流水深の増加に伴って、小さくなる傾向が確認でき、越流水深毎の値も概ね等しい値となった。越流水深 7.5cm 以上では係数の変化がほとんどないが、越流水深が小さい場合に係数が大きくなっている。これは前述したとおり、越流水深が小さい段階では浮力がブロック全体に作用していなかった影響で、本来の抗力よりも大きな値となっていたと考えられる。

揚力係数は、Caseによって傾向が異なり、越流水深毎の値も大きく異なった。最大値はCase6の越流水深 10cm 時の 0.197 となった。突起に角度をつけた Case2, 3 では越流水深の増加に伴って、揚力係数も増加する傾向を示した。突起が 90 度の Case1, Case4~6 では、Case1, 4 は越流水深が増加しても揚力係数は収束する傾向となったが、Case5, 6 は越流水深 10cm までは増加するが、その後低下する傾向となった。各 Case で傾向が異なった要因としては、近傍流速ではなく平均流速を用いたことが考えられ、揚力係数の評価においてはその影響が大きく出たと考えられる。

(4) (3)で求めた抗力係数、揚力係数と一般的な護岸ブロックの係数との比較

3. (1) で述べたように、裏法ブロックに作用する流速は不等流計算によって算出した流速、いわゆる平均流速を用いる。ところで、一般的な護岸ブロックに作用する流速にはブロックの近傍流速が用いられ、その流速に対応したブロックの抗力係数・揚力係数が求められている。そこで、平均流速を使って算出した抗力係数・揚力係数と一般的な護岸ブロックとして算出された係数との関係を整理し、平均流速を用いる場合の係数を推測する。

護岸の力学設計法では、抗力係数について、実験により定めることが基本である。一方、群体の抗力係数については、ブロック 1 個に作用する抗力をせん断力で評価し、ブロック上の流速が対数分布するものと仮定し、式

表-3 抗力係数の実験値と理論値の比較

抗力係数	1	2	3	4	5	6
①実験値	0.411	0.339	0.376	0.456	0.463	0.405
②理論値	0.119	0.128	0.136	0.130	0.143	0.162
①/②	3.5	2.6	2.8	3.5	3.2	2.5

表-4 揚力係数の実験値と既存ブロックの最大値の比較

揚力係数	1	2	3	4	5	6
①実験値	0.080	0.063	0.039	0.131	0.164	0.180
②既存最大値	0.100					
①/②	0.8	0.6	0.4	1.3	1.6	1.8

(4) (以下「理論式」という) のように揚力作用面積と抗力作用面積の比 (A_b/A_D) の関数に定式化されている³⁾。

$$C_{Dg} = \frac{2 \cdot A_b}{8.5^2 \cdot A_D} \quad (4)$$

本研究で使用したブロック形状についても、常流場での水理特性試験を実施していないため、群体の抗力係数を理論式より算出した。

表-3は現地スケールで 30cm に相当する越流水深 7.5cm 時の抗力係数(実験値)と理論式より求めた抗力係数(理論値)を比較した結果である。

抗力係数の実験値と理論値の比は、Case1, 4が最も大きく 3.5 倍となった。突起面に傾斜を設けたり、突起高を低くすることで、その比は小さくなり、突起高が最も低いCase6では 2.5 倍となった。

揚力係数は、抗力係数のような理論式がないが、一般的なブロックの水理特性試験値は、群体の場合、最大でも 0.10 程度とされている⁹⁾。表-4は表-3と同様に越流水深 7.5cm 時の揚力係数(実験値)と既存ブロックの揚力係数最大値(既存最大値)を比較した結果である。既存ブロックの最大値の 0.10 と比較して突起高 15mm のCase1~3では、0.10 以下となるが、突起高を小さくしたCase4~6では 0.10 を上回った。

4. おわりに

3. (2) で述べたように、ブロックの突起面に傾斜を設けた場合は、抗力は小さくなるが、揚力については明確な関係が確認できなかった。また、突起高を小さくすると抗力は小さくできるが、揚力は逆に大きくなること分かった。

3. (4) で述べたように、相対水深比が 1 以下で射流場の抗力係数、揚力係数については、ブロックの近傍流速

として平均流速を用いた場合，一般的な護岸に用いられる抗力係数，揚力係数に比べ，抗力係数で 2.5~3.5 倍，揚力係数で 1.3~1.8 倍と大きくなることが確認された。このことは，越水時に裏法ブロックに作用する流体力を平均流速を用いて算定せざるを得ない状況において，常流場の水理特性試験から得られた係数を用いると，流体力を過小評価する可能性があることを示唆する。

なお，上記は特定のブロック形状やブロック間隔で行った実験に基づくものであり，表面突起形状の違いやブロック間の隙間の違い等の影響を受け，変わり得ることに留意する必要がある。また，今回得られた係数を用いて裏法ブロックの安定性を検討した結果と実現象が一致するかを今後検証する必要がある。さらに，相対水深比が 1 以下での流速の評価手法や流体力の変動に関する更なる検討が重要である。

最後に，粘り強い河川堤防の強化において，裏法ブロックは，堤体土の吸出しを防止する吸出し防止材を抑える役割を持ち，越流水によって簡単には流出しない構造が求められる。今回の実験結果を踏まえ，相対水深比 1 以下で射流場となる越水時にも流体力が極端に大きくならないような護岸ブロックの開発が望まれる。これまでは，深い水深において安定するブロック形状の開発が主

となってきたが，粘り強い河川堤防の強化工法として適用できるブロックを開発するうえでは考え方を考える必要がある。

参考文献

- 1) 令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会：令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書，2020.
- 2) 河川堤防の強化に関する技術検討会：2022., URL: https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/teibou_kentoukai/dai01kai/index.html
- 3) (財) 国土技術研究センター：改訂 護岸の力学設計法，2007.
- 4) 俵熊公子，前野詩朗，吉田圭介，高田大資，山村明：射流場の護岸・根固めブロックに作用する流体力評価，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_691-I_696, 2013.
- 5) 重枝未玲，秋山壽一郎，石原仁：常流あるいは射流中に置かれた水没柱状物体に働く流体力，水工学論文集，第 50 巻，pp.889-894，2006.
- 6) (財) 土木研究センター：実務者のための護岸・根固めブロック選定の手引き（案），2010.

(Received May 31, 2022)

(Accepted September 1, 2022)

MEASUREMENT RESULTS OF FLUID FORCE ACTING ON ARMOR BLOCKS OF THE BACK SLOPE OF THE RIVER LEVEE WHEN OVERFLOWING

Takahiko NISHIJIMA, Tomohiro MIYOSHI and Masaki FUKUSHIMA

One of the levee strengthening construction methods that the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism is studying is the surface protected type, which is a construction method that protects the surface of the levee body with a covering material. On the back slope of the embankment, the structure is protected with an erosion prevention sheets, a block, etc., but in order to study the stability of the block, the flow on the back slope at the time of overflow is a supercritical flow, and there is a problem that it is difficult to evaluate the fluid force acting on the block. Therefore, in this study, we changed the shape of the surface protrusion of the block using a small-scale model and measured the fluid force acting on the block by overflow water. As a result, it was confirmed that by providing an inclination in the surface protrusion or reducing the protrusion height, the drag acting on the block is reduced, but the lift force is conversely increased. In addition, using the coefficient obtained from the conventional hydraulic property test, it was shown that the fluid force acting on the block can be larger than the fluid force obtained from the calculation formula of the mechanical design method of the river revetment.