

護岸ブロックの水理特性に関する実験的研究

HYDRAULIC CHARACTERISTIC EXPERIMENTAL STUDY OF THE BANK PROTECTION BLOCK

田代洋一¹・飯千富広¹・藤井伸之²・高島清光³・石川潤弥⁴・山村明⁵・松岡智⁶
Yoichi TASHIRO, Tomihiro IIBOSHI, Nobuyuki HUIJI, Kiyomitsu TAKASHIMA
Junya ISHIKAWA, Akira YAMAMURA and Satoru MATUOKA

¹正会員 財団法人 土木研究センター 河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

²株式会社 アドヴァンス 開発推進部長 (〒950-0912 新潟県新潟市南笹口1-12-12)

³共和コンクリート株式会社 技術部長 (〒112-0006 東京都文京区小日向4-6-19)

⁴技研興業株式会社 技術部長 (〒193-0801 東京都八王子市川口町1540)

⁵日建工学株式会社 総合技術研究所 技師長 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

⁶ランデス株式会社 本部技術センター開発グループ長 (〒701-1133 岡山県富吉3205)

Bank protection block was used as a riverside protection method for the first time in Yubari river in 1910. After the river row is revised in 1997, "Landscape preservation" and "Environmental preservation" in addition to stability has been requested. The bank protection block of a lot of shape has been developed along with it. However, many of these blocks are not necessarily developed based on basic experiment and theory.

Therefore, relation among bank protection block of shape, hydraulic characteristic, vibration of fluid force, and effect of decrease of fluid force is examined by the basic experiment.

Key Words : vibrational property, hydraulic characteristic, decrease of lift force, block of shape

1. はじめに

護岸ブロックは、明治43年に北海道夕張川の凹岸の河岸侵食対策工として「岡崎式単床ブロック」が用いられたのをはじめとし、揚力低減や目地からの土砂流出防止を目的に開発された「凸型ブロック」や「L型ブロック」などのブロックが利用されてきた。

その後、平成2年の「多自然型川づくりの推進について」との全国通達、平成9年の河川法改正により、ブロックにも力学的安定性に加えて環境性能や景観性など付加的な機能が求められてきた。

その中で、開発された図-1に示す植生が期待できる「ボックス型」、景観に配慮した「自然石型・擬石型」、土砂を蓄える「連結型」、覆土流出防止の「突起型」など様々な形状のブロックが利用されてきた。しかし、これらブロックの多くは、必ずしも基礎的な実験や理論に沿って開発されたものではない。

このため、固有のブロックの水理性能は「護岸ブロックの水理性能試験法マニュアル」^{※1}にしたがって財団法人土木研究センターが実施している水理特性試験により評価し、「護岸の力学設計法」^{※2}に基づいて安定照査を

行う仕組みとなっている。しかし、これまで評価してきたブロック形状の多くは非常に複雑であり、ブロック形状と流体力の低減効果及び振動特性などは、未だ明らかになったものではない。

本稿では、今後のブロック形状開発に必要となる基礎資料を得ることを目的として大型2次元水平水路で実施した①矩形ブロック、②突起ブロック、③孔口ブロック、④脚付ブロックの4種の水理特性と流体力の低減効果、作用する流体力、振動特性と安定性の関係について報告する。



(a) ボックス型 (b) 擬石型 (c) 連結型 (d) 突起型

図-1 護岸ブロックの種類

2. 護岸ブロックの水理特性

(1) 護岸ブロックの水理特性値

群体ブロックは、滑動の安定照査を行うための抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L と相当粗度 K_s 、上流端ブロックでは、

めくれの安定照査を行うため抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、揚力に関する回転半径 L_L 、抗力に関する回転半径 L_D の各水理特性値を計測し解析する。ここで、群体ブロックとは、群に設置されたブロック中の代表ブロック、上流端ブロックは群として敷設されたブロックの最上流端のブロックのことである。

なお、流体力を求めるために分力計で計測する抗力・揚力、抗力係数・揚力係数・相当粗度を解析するための電磁流速計によって計測する流速は、いずれも計測時間の平均値を用いる。

(2) ブロックに作用する流体力と示力線

上流端ブロックのめくれの照査を行うため、「護岸ブロックの水理特性値試験法マニュアル」※2 では図-2 のように示力線を求め、ブロック下流端を仮想支点とする作用位置を解析している。

ここでは、ブロックに作用する抗力・揚力の分力から求める示力線と、ブロック表面の圧力分布と圧力積分から求める示力線解析を行い、各形状の流体力の作用特性を検証した。

(3) 護岸ブロックの安定照査

護岸ブロックの安定照査法は、安全率の考え方によりいくつかの手法がある。しかし共通している点は、式(1)、(4)に示す作用外力とブロック重量の釣り合い式である。

「滑動-群体」モデル：

$$\mu \cdot (W_w \cos \theta - L) \geq ((W_w \sin \theta)^2 + D^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$D = 0.5 \cdot \rho_w \cdot A_D \cdot C_{Dg} \cdot V_d^2 \quad (2)$$

$$L = 0.5 \cdot \rho_w \cdot A_L \cdot C_{Lg} \cdot V_d^2 \quad (3)$$

C_{Dg} 、 C_{Lg} ：群体ブロックの抗力係数・揚力係数
「めくれ」モデル：

$$W_w \cdot \cos \theta \cdot (l_b/2) \geq L \cdot L_L + D \cdot L_D \quad (4)$$

$$D = 0.5 \cdot \rho_w \cdot A_D \cdot C_{Dm} \cdot V_d^2 \quad (5)$$

$$L = 0.5 \cdot \rho_w \cdot A_L \cdot C_{Lm} \cdot V_d^2 \quad (6)$$

C_{Dm} 、 C_{Lm} ：上流端ブロックの抗力係数・揚力係数
本稿では、平均値を用いた安定照査と、最大値を用いた安定照査の結果比較を行い、流体力の変動がもたらす安定性への影響を検証した。

3. 基礎実験

実験は、長さ 60m×幅 3m×高さ 2m で最大流速 1.0m/s、

最大流量 3.0m³/s の大型 2 次元水平水路を使用した。

実験では、基本形状となる「矩形ブロック」、矩形ブロックの水平面に突起を付けた「突起ブロック」、中心部に孔を設けた「孔口ブロック」、孔口ブロックの底面 4 隅に脚を設けた「脚付ブロック」の 4 種類を用いた。

模型の縮尺は原型値の 1/4 とし、ブロック模型の各諸元は表-1 の通りとした。写真 1～4 に模型写真を示す。

これら模型を用いて、ブロック模型に作用する抗力・揚力・回転モーメントの流体力を 3 分力計により計測し、併せてブロック中央線上に埋設したピエゾメーターにより、ブロック表面の圧力分布を計測した。

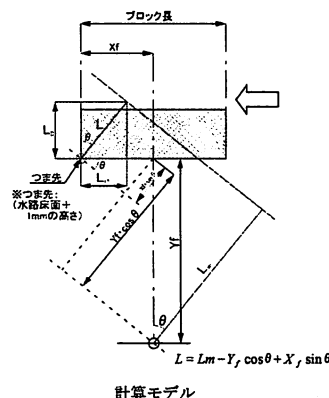


図-2 ブロックに作用する流体力と示力線解析

表-1 ブロック模型諸元

	単位	矩形	突起	孔口	脚付
ブロック幅 B	m	0.250	0.250	0.250	0.250
ブロック長 L	m	0.250	0.250	0.250	0.250
ブロック高 H	m	0.050	0.100	0.050	0.100
空隙 e	m	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
抗力作用面積 A_d	m ²	0.0125	0.0188	0.0125	0.0188
揚力作用面積 A_b	m ²	0.0625	0.0625	0.0469	0.0469
粗度要素面積 A_c	m ²	0.0689	0.0689	0.0689	0.0689
A_b/A_d	-	5.00	3.33	3.75	2.50
A_c/A_d	-	5.51	3.68	5.51	3.68
平均高 h_o	m	0.0454	0.0567	0.0340	0.0454
体積 V	m ³	0.0031	0.0039	0.0023	0.0031

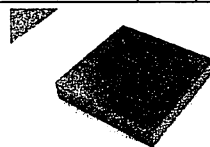


写真-1 矩形ブロック

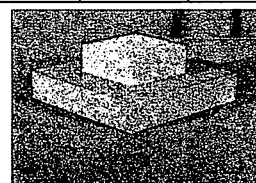


写真-2 突起ブロック

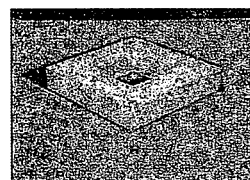


写真-3 孔口ブロック

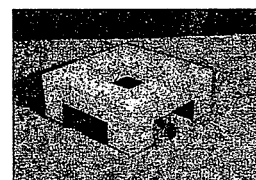


写真-4 脚付ブロック

4. ブロック形状と水理特性

(1) 矩形ブロックの水理特性

図-3 に矩形ブロックの群体及び上流端ブロックの圧力分布を示す。実験水位は「護岸ブロックの水理特性値試験法マニュアル」※¹に従って、群体ブロックでは突起高さ H_b の 10 倍、上流端ブロックはブロック全体高さ h_a の 5 倍とした。ここでブロック突起高さ $H_b=(h_a-h_o)$ と定義する。但し、矩形ブロックでは H_b が非常に小さいため、実験水位は上流端ブロックと同じとした。

-上流端ブロックに作用する圧力-

- ① ブロック上流鉛直面には、流速に応じて 2cm から 4cm 程度の圧力がほぼ均一に作用する。
- ② ブロック水平面は、上流端から流れが剥離し、負圧が生じる。負圧は、流速の増加につれて全体的に大きくなり、剥離長もブロック全体に及ぶ。
- ③ 負圧は、ブロック上流端が最大となり、ブロックをめくる揚力として作用する。
- ④ ブロック下流の鉛直面には若干負圧が生じる。

-群体ブロックに作用する圧力-

- ① ブロック上下流の鉛直面の圧力は、ブロック間の空隙が 1.25cm で流れの出入りが少ないため、上流端ブロックに比べると非常に小さい。
- ② ブロック水平面の圧力も、表面の凹凸がないためほとんどゼロに近いが、流速の増加に伴って下流側にわずかに負圧を生じるようになる。

次に、圧力積分値から得られた抗力・揚力と、分力計で計測された抗力・揚力の比較を表-2 に示す。表より

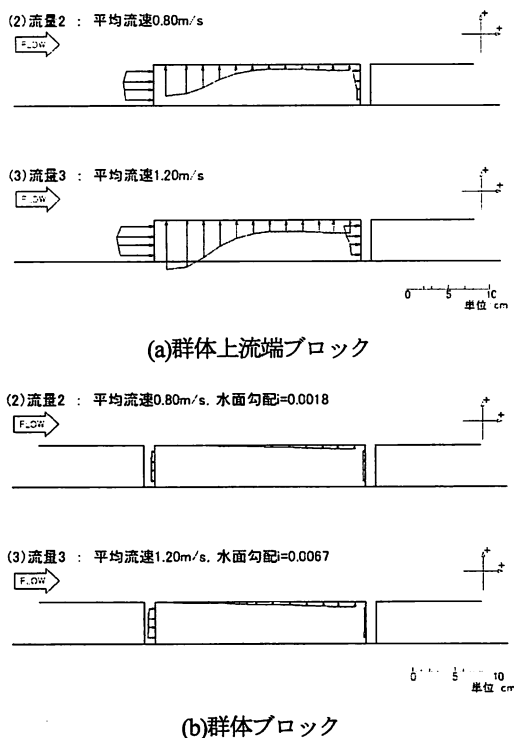


図-3 基本矩形ブロックの圧力分布

以下のことが分かる。

- ① 上流端ブロック水平面に作用する圧力の合計 0.956kgf に対し、分力計値は 1.034kgf とほぼ等しいことから、ブロック水平面に作用する圧力の合計が揚力となってブロックに作用することが分かる。
- ② 上流端ブロック上下流鉛直面に作用する圧力の合計が 0.502kgf に対し、分力計値は 0.511kgf とほぼ等しいことから、ブロック上下流鉛直面に作用する圧力の合計が抗力として作用する。つまり、上流鉛直面の圧力を P_1 、下流鉛直面の圧力を $-P_2$ とすると、 $P_1-(-P_2)$ が抗力としてブロックに作用する。

但し、水面勾配の影響やブロック水平面上のせん断力が計測できていないことから、特に群体ブロックでは両者の値に差が見られる。

表-2 矩形ブロックに作用する流体力

水理量	上流端ブロック			群体ブロック		
平均流速 m/s	0.60	0.80	1.20	0.60	0.80	1.20
水面勾配	—	—	—	0.0004	0.0018	0.0067
圧力積分値						
D(kgf)	0.172	0.502	0.718	0.010	0.070	0.122
L(kgf)	0.231	0.956	1.751	0.008	0.134	0.181
M(kgf-m)	0.054	0.181	0.306	0.001	0.011	0.017
回転半径 L_L (m)	0.151	0.148	0.150	0.059	0.067	0.064
回転半径 L_D (m)	0.112	0.078	0.061	0.072	0.035	0.043
4 分力計値						
抗力 D(kgf)	0.155	0.511	0.706	0.012	0.015	0.031
揚力 L(kgf)	0.300	1.034	1.506	0.027	0.050	0.115
M(kgf-m)	0.059	0.159	0.211	0.002	0.002	0.005
回転半径 L_L (m)	0.170	0.143	0.139	0.082	0.098	0.107
回転半径 L_D (m)	0.088	0.071	0.065	0.038	0.030	0.028

(2) 突起ブロックの水理特性

図-4 に突起ブロックの群体及び上流端ブロックの圧力分布を示す。実験水位は、マニュアル水位とした。

-上流端ブロックに作用する圧力-

- ① 突起を設けたことで矩形ブロックに比べて流れ方向の鉛直面が増える。このため、増えた箇所にも圧力が深さ方向に均一に作用する。
- ② 突起の水平面には、突起上流端で流れが剥離し、負圧が生じる。負圧は流速の増加に応じて大きくなり、剥離長さも突起長さ全体に及ぶ。
- ③ 突起間はブロック間の空隙 1.25cm に比べて 12.7cm 程度と広いので、突起の下流鉛直面には大きな負圧が作用する。

-群体ブロックに作用する圧力-

- ① ブロック上下流側の鉛直面の圧力は、隙間が 1.25cm 程度で流れの出入りが少ないため、上流端ブロックに比べて小さい。
- ② 突起の上下流鉛直面には、流れ方向の圧力が作用する。但し、下流面は流れの影響をあまり受けないの

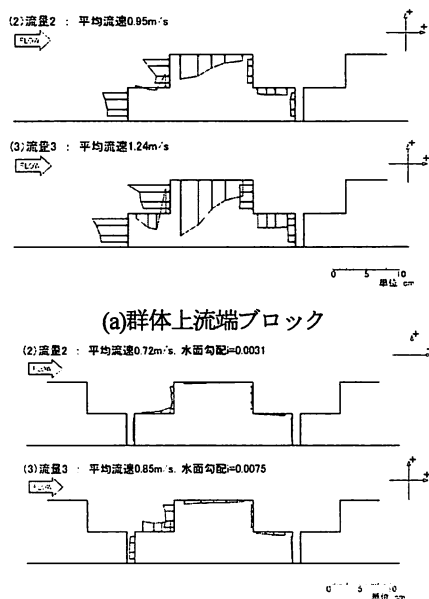


図4 突起ブロックの圧力分布

で、その値は小さい。

- ③ ブロック上流水平面は、流速に応じて変動するが正の圧力つまり下向きの圧力が作用する。
- ④ 突起水平面は、流れの剥離箇所が突起水平面先端部となり、その箇所でも最大の負圧が生じる。流速の増加につれ、剥離長が突起長さ全体に及ぶが、上流端ブロックに比べてその値は小さい。

以上のことから、突起を設けることにより、抗力を増加させる一方で、揚力を低減させる。

(3) 孔口ブロックの水力特性

図-5 に孔口ブロックの群体及び上流端ブロックの圧力分布を示す。実験水位は、マニュアル水位とした。

-上流端ブロックに作用する圧力-

- ① ブロック鉛直面に作用する圧力分布の傾向は矩形ブロックと類似する。
- ② ブロック水平面に作用する圧力分布も傾向は同様だが、ブロック中央部に孔口を設けているため、その箇所には圧力が作用しない。但し、下流よりの水平面には矩形ブロックよりは若干大きな負圧が生じる。

群体ブロックに作用する圧力の大きさは上流端ブロックより全体に小さいが、圧力分布の傾向はほぼ同様である。以上のことから、孔口部を設けることで抗力をさほど増加させることなく、揚力を低減できる。

(4) 脚付ブロックの水力特性

図-6 に、脚付ブロックの群体及び上流端ブロックの圧力分布を示す。実験水位は、マニュアル水位とした。

-上流端ブロックに作用する圧力-

- ① 上流端ブロック水平面には、上流端で流れが剥離するため、最大となる負圧が生じる。流速の増加に伴

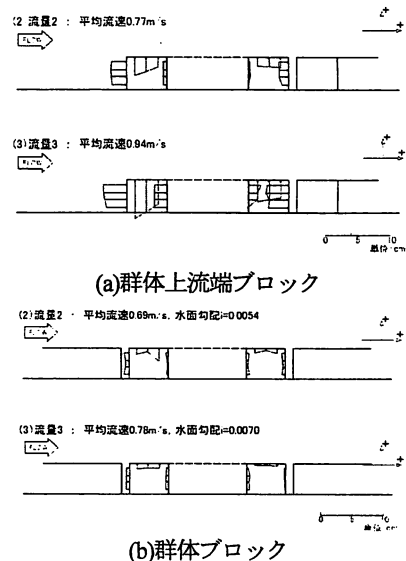


図-5 孔口ブロックの圧力分布

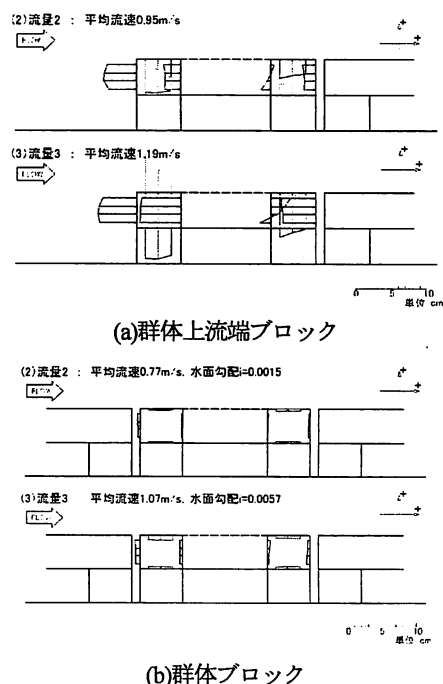


図-6 脚付ブロックの圧力分布

いその影響はブロック長さ全体に及ぶ。

- ② 脚部を設けたことで、ブロック下面にも流れが発生し、負圧が発生する。但し、ブロック上面とは逆方向の圧力となるため、上下面の圧力が相殺する。
- ③ 孔口内鉛直面にも流れにより、孔口上流側には負圧が、下流側には上部が正圧、下部に負圧が発生する。孔口上部から入り込む流れと、下部の流れによって孔口内部には回転流れが発生することがわかる。

群体ブロックも概ね同様の傾向である。

以上より、脚を設けることで孔口上下面の圧力の相殺により揚力を低減するだけでなく、孔口による作用面積の減少に伴い大幅に揚力を低減される。但し、流れに対する鉛直面が増加するため抗力は増加傾向を示す。

5. 流体力の振動特性と安定照査

(1) 作用する流体力の振動特性

図-7～10 に各形状の流体力振動の結果を示す。上段は群体ブロック、下段には上流端ブロックの結果である。左側のグラフは縦軸に揚力の平均値からの振幅、横軸に抗力の平均値からの振幅を示したもので、右側には作用する流体力の時間変動を示した。

左側のグラフは、抗力と揚力の関係が 45 度に近いほど同位相かつ同振幅での振動を意味する。

矩形ブロックは凹凸が小さいため、群体・上流端ブロックともに流体力の振動は小さい。上流端ブロックでは、上流端で流れの剥離による負圧の影響が顕著となるため、揚力>抗力の関係となる。

突起を設けると、群体・上流端ともに抗力、揚力の振幅が大きくなる。また、群体ブロックの抗力・揚力の関係は45度に近く、同位相かつ同振幅に近い。一方、上流端ブロックは抗力に比べて揚力の振動が大きい。しかし、概ね抗力>揚力の関係となる。

次に、孔口部を設けると、上流端ブロックに作用する流体力は抗力>揚力となる。振幅は揚力の方が大きい。振動の位相は顕著な違いは確認されない。一方、群体ブロックは、図中の円箇所のように瞬間的な揚力振幅の増大、特に+方向の増大が確認された。上流端ブロックでは水平面上流端で流れが剥離するため、孔口内への流れの影響が小さい。しかし、群体ブロックは流れの剥離の影響が小さくなり、孔口内へ流れの影響が及ぶため、特に上向きの振動が顕著に現れると考えられる。

孔口ブロックに脚部を設けると、孔口ブロックで見られた群体ブロックの瞬間的な揚力振幅の増大が抑制される。脚部を設けたことでブロック上下面に作用する圧力が相殺し合い、顕著な揚力振幅の増大を抑制したものと考えられる。また、振動の位相も大きな違いは見られず、比較的安定した状態でブロックに流体力が作用する。一方、上流端ブロックは、孔口ブロックと同様、抗力・揚力は作用する。但し、振動は抗力・揚力ともに振幅は大きい。特に、揚力は抗力に比べて 1/4 程度の値であるが、円箇所のように瞬間的には抗力と揚力が等しい程度まで振幅が増大する現象が確認された。脚部を設けたことで、ブロック下面にも流れの影響が及ぶためと考えられる。

(2) 群体ブロック・上流端ブロックの水理特性

表-3 に群体ブロックの揚力・抗力の平均係数および最大係数を、図-11 に上流端ブロックの揚力・抗力の平均係数および最大係数とそれぞれの示力線の結果を示す。表より、矩形ブロックに比べて振幅が顕著となる突起、孔口、脚付ブロックの各係数の平均値と最大値の差は大きくなることわかる。

この結果、上流端ブロックに作用する合力の示力線は、

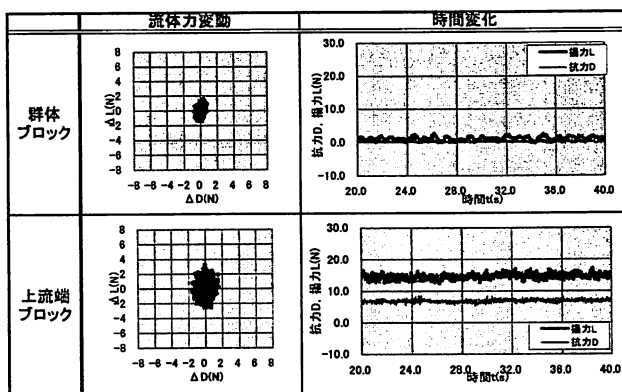


図-7 矩形ブロックに作用する流体力振動

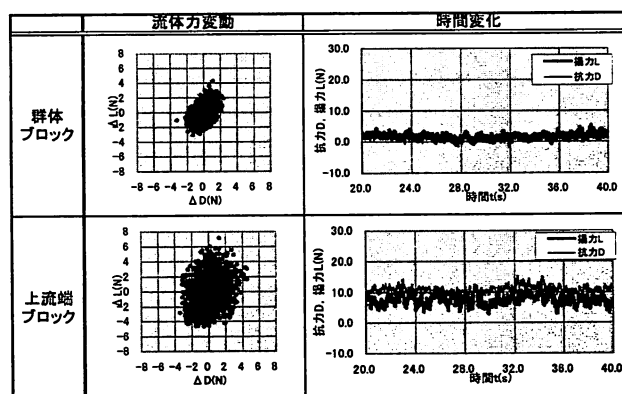


図-8 突起ブロックに作用する流体力振動

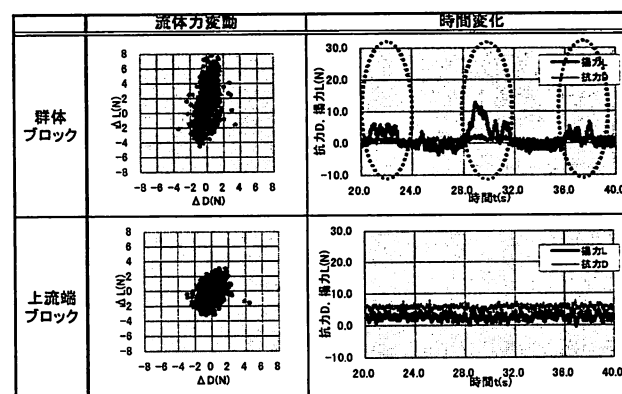


図-9 孔口ブロックに作用する流体力振動

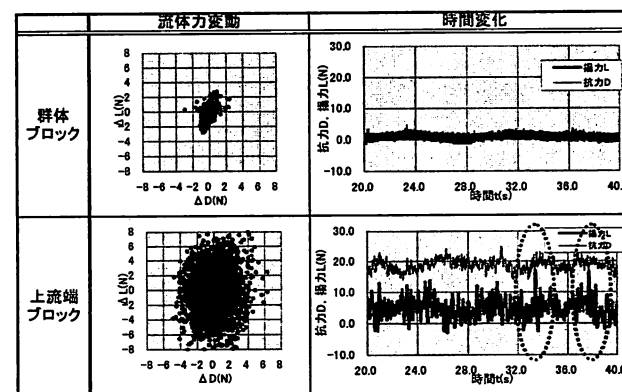


図-10 脚付ブロックに作用する流体力振動

表-3 群体ブロックの平均係数と最大係数

	平均係数			最大係数		
	揚力係数 C_L	抗力係数 C_D	相当粗度 K_g	揚力係数 C_L	抗力係数 C_D	相当粗度 K_g
矩形	0.05	0.07	0.006	0.09	0.21	0.006
突起	0.04	0.10	0.400	0.11	0.28	0.400
孔口	0.03	0.13	0.110	0.29	0.50	0.110
脚付	0.02	0.09	0.635	0.10	0.25	0.635

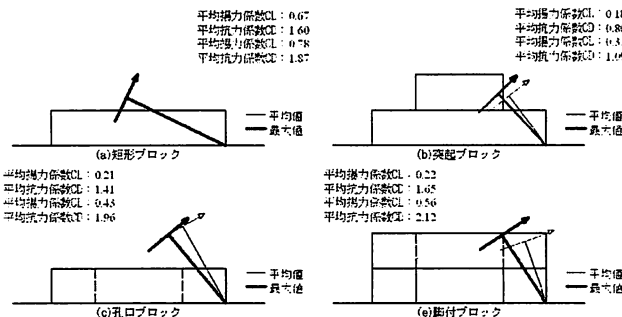


図-11 上流端ブロックの平均係数と最大係数と示力線

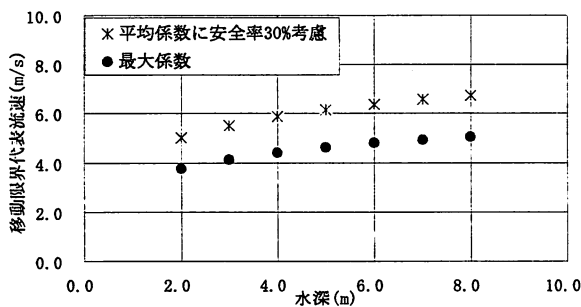


図-12 突起ブロックの安定照査結果

図-11 に示すようにブロックに作用する流体力の振動が大きくなると、示力線の勾配が大きく変動することがわかる。

(3) 振動と力学的安定

突起ブロックの平均係数と最大係数を用いて群体ブロックの安定性照査を行った。安定性照査は、2.3の式③を用いて、法勾配1:2.0、水深2mから8mと変化させて実施した。平均係数を用いた計算は30%の重量安全率を考慮し、最大係数を用いた計算は安全率を考慮しないものとした。この結果が図-12である。

最大係数を用いた場合の移動限界代表流速は、安全率を考慮した平均係数の結果よりも常に小さくなる。

つまり、平均値を30%の重量安全率を考慮した安定照査であっても、流体力の激しいブロック形状では瞬間的に安定性を損なう可能性がある。

なお、ここで用いた最大係数は、計測したデータの抗力・揚力の最大値を用いて評価したもので、ブロック形状によっては、必ずしも抗力と揚力の最大値が同時に作用するとは限らない。流体力の振動の位相関係によっ

ては、過大評価となる場合も過小評価となる場合も出てくる。このため、係数の取り扱いには安全率の考え方も含めてもう少し踏み込んだ検討が必要となる。

しかし、流体力の振動がブロックの安定性に影響を及ぼすことは明らかであり、ブロック形状の開発においては、可能な限り振動を抑制した形状を追及することが重要な要素である。

6. まとめ

(1) 3 分力計による揚力・抗力と圧力の計測値より、概ねブロックの鉛直面に作用する圧力が抗力、ブロック水平面に作用する圧力が揚力として作用することを確認した。

(2) 突起、孔口、脚を設けることで、ブロックに作用する揚力を低減させることを確認した。ただし、流向に対して鉛直面が増える突起、脚では抗力の増加や流体力の振動を引き起こすことを確認した。

(3) 孔口を設けた群体ブロックは、平均値としての揚力を低減可能だが、瞬間的に大きな揚力が発生することが確認された。揚力の振動はブロック自体の安定性に加え、河床材等の吸出しを助長する危険性もあるため、その大きさ、位置、個数については十分検討して設ける必要がある。

(4) 流体力振動の増幅はブロックの瞬間的にブロックの安定性を低下させる場合もある。ブロック形状開発には、期待される水理性能を確保するのみではなく、流体力振動を抑制することが重要である。

(5) 作用する抗力・揚力の大きさに加え、振動の振幅や位相もブロックの安定性を支配する重要な要素である。ブロック固有の水理特性のひとつとして検討を深めていく必要がある。

最後に本研究の実施にあたってご協力頂いたブロックメーカー5 社と実験を担当した JTM の小野木氏、本論文のとりまとめにあたりご指導をいただいた「護岸ブロック水理特性値評価委員会」の早稲田大学関根教授、防衛大学校林准教授、国総研金澤河川研究室長、土木研究所坂野総括主任研究員には感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 財団法人土木研究センター 護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル, 1999.7・2003.7
- 2) 財団法人国土開発技術センター編 護岸の力学設計法, 山海堂, 1999.2
- 3) 山本晃一編著: 護岸・水制の計画・設計 一歩先そして一歩手前, 山海堂, 2003.6

(2009. 4. 9受付)