

# 流水中の自然石に作用する流体力の評価

岡山大学大学院環境生命科学研究科 学生会員 ○竹内 章人  
 岡山大学大学院環境生命科学研究科 正会員 吉田 圭介  
 岡山大学大学院環境生命科学研究科 フェロー会員 前野 詩朗

## 1. はじめに

1990年代から環境に配慮した川づくりが全国各地で進められるようになり、自然石を用いた水理構造物が注目を集めるようになってきている。従来、多種多様なコンクリートブロックについては抗力・揚力係数が明らかにされ水理構造物の設計で活用されたが、自然石の抗力・揚力係数は未だ明らかではなく、設計上の課題である。

そこで、本研究では流水中の自然石に作用する流体力を解明することを目的に実験的研究を行った。実験では自然石を開水路底面に接着して通水し、流水中の流体力と周辺の流れ場を測定した。特に、自然石の形状の相違が抗力・揚力係数の変化にどの程度の影響を及ぼすか検討をした。

## 2. 実験概要

水理実験では、護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル<sup>1)</sup>に基づき、水中の自然石に作用する流体力と自然石周辺の流速を計測する実験を行う。

実験では、**図-1**の長さ16m、幅0.6m、高さ0.4m、勾配1/1000の可変勾配型循環水路に模型を設置し、各模型の流体力を計測する。流体力の計測のために、水路のピット内中央部に四分力計（東京計測社製、定格容量： $F_x, F_y, F_z; 10N, M_y; 4N\cdot m$ ）を設置した。流速の計測には二次元電磁流速計（株式会社ケネック）、水深の計測にはポイントゲージを使用した。実験は、四分力計により抗力 $D$ 、揚力 $L$ 、横揚力 $L_y$ 、モーメント $M_y$ を測定する。

模型には**写真-1**の自然石A、**写真-2**の自然石B、**写真-3**のビー玉Cを用いる。自然石の形状の相違における抗力・揚力係数の変化について検討を行うため、同じ自然石に対して、設置方向を2通り設ける。また流量は、40l/s、60l/s、80l/sの3通りである。実験ケースは**表-1**に示す。主流速を鉛直方向の各点で計測し、各ケースで境界層が発達していることを確認する。抗力・揚力係数を求めるために必要な接近流速は、四分力計より30cm上流部で、尚且つ模型の上端の位置で計測する。

## 3. 実験結果

主流速 $u$ の鉛直方向の分布と式(1)に示す滑面对数則<sup>2)</sup>との比較により、境界層の発達を確認する。

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{zu_*}{\nu} + 5.5 \quad (1)$$

( $z$ :底面から鉛直距離,  $\nu$ :動粘性係数,  $u_*$ :摩擦速度,  $\kappa$ :カルマン定数)

**図-2**、**図-3**は、流速分布の式(1)を用いて、計測した流速分布と滑面对数則とを比較した図である。主流速

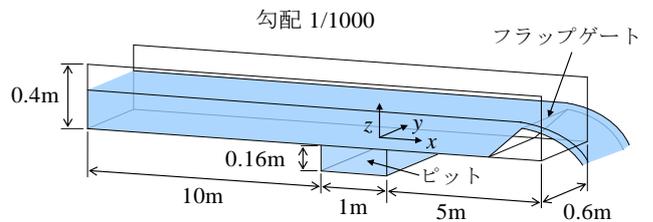


図-1 実験水路

表-1 実験ケース

石の種類	向き	流量(l/s)	設置方法	水深(cm)	勾配	サイズ(cm <sup>3</sup> ) (x×y×z)	
A	自然石	d1	単体 (S:Single)	20	1/1000	3.24×3.13×3.14	
						40	3.13×3.24×3.14
						60	
		d2				40	3.19×2.78×3.04
						60	
						80	
B	自然石	d1	単体 (S:Single)	20	1/1000	2.78×3.19×3.04	
						40	3.0×3.0×3.0
						60	
		d2				40	3.0×3.0×3.0
						60	
						80	
C	ビー玉	d1	単体 (S:Single)	20	1/1000	3.0×3.0×3.0	
						40	
						80	



写真-1 自然石 A



写真-2 自然石 B



写真-3 ビー玉 C

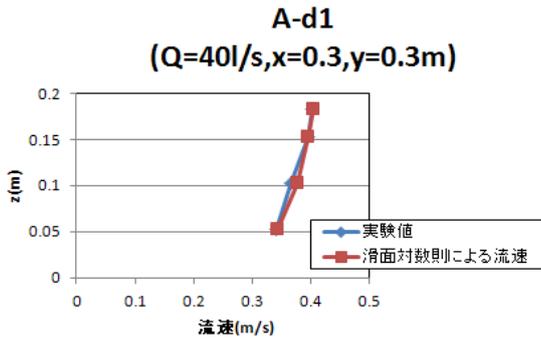


図-2 流速分布

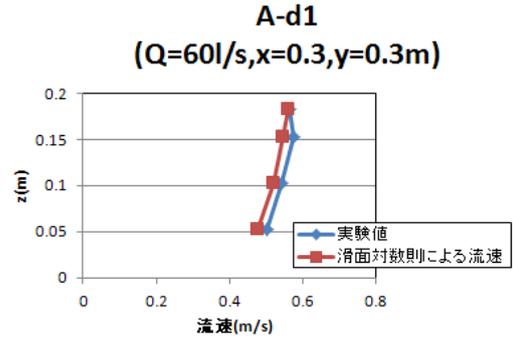


図-3 流速分布

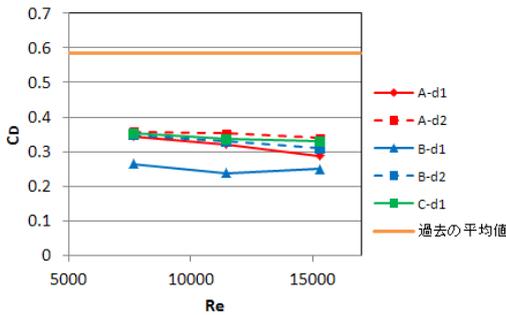


図-4 抗力係数とレイノルズ数の関係

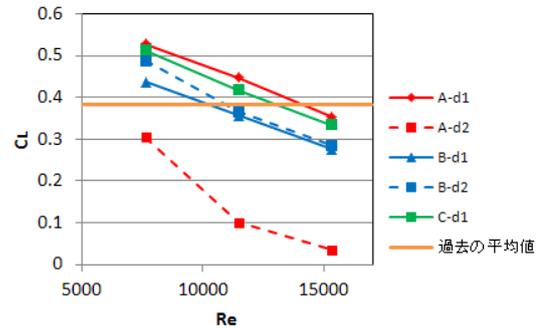


図-5 揚力係数とレイノルズ数の関係

$u$  は滑面对数則に概ね従っており、計測地点において境界層の発達した流れが形成されていることを確認した。

実験で測定した抗力  $D$ ・揚力  $L$ 、接近流速  $V_d$  を用いて、抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  をそれぞれ式(2)、式(3)より算定する。

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D V_d^2 \quad (2)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L A_L V_d^2 \quad (3)$$

( $A_D$ : 抗力作用面積,  $A_L$ : 揚力作用面積,  $\rho$ : 水の密度)

表-2 は、画像計測により求めた自然石とビー玉の抗力・揚力作用面積を示した表である。

レイノルズ数  $Re$  は式(4)より算定する。

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (4)$$

( $\nu$ : 動粘性係数,  $d$ : 模型の高さ)

図-4、図-5 は、それぞれ抗力係数  $C_D$ 、揚力係数  $C_L$  とレイノルズ数  $Re$  との関係を表している。また、過去の実験で求められた抗力係数・揚力係数の平均値も参考として示している。今回の実験から得られた抗力係数の平均値は 0.317 であった。過去に、岡山大学の富田が

表-2 粗度要素支配面積

(mm <sup>2</sup> )			
自然石A	抗力作用面積	d1	1004.183
		d2	897.274
		揚力作用面積	940.824
自然石B	抗力作用面積	d1	891.602
		d2	929.16
		揚力作用面積	1103.352
ビー玉C	作用面積		706.5

同様の実験をしている<sup>3)</sup>。今回の実験とサイズはほぼ同様で形状の異なる自然石を用いている。その実験値と比較した。過去の実験から得られた抗力係数の平均値は 0.585 であり、今回得られた抗力係数の平均値は 0.268 ほど小さいことがわかった。また、揚力係数の平均値は 0.349 であった。過去の実験値は 0.382 であり過去の実験値と比較すると、過去の実験値とほぼ近い値となった。

図-4 から自然石 A-d1, 自然石 A-d2, 自然石 B-d2, ビー玉 C-d1 の抗力係数は同じような値を示すが、自然石 B-d1 の値は他のケースと比較すると小さい値となった。他ケースの抗力係数の平均値は 0.334 となり、自然石 B-d1 の抗力係数の平均値は 0.250 となった。表-2 から

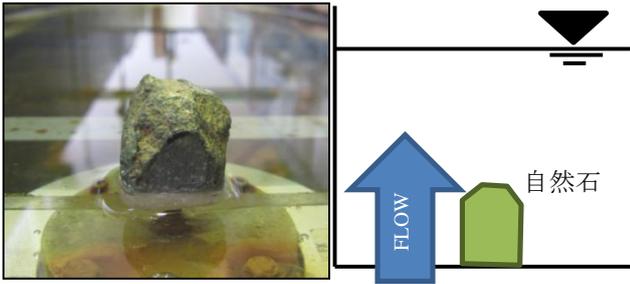


図-6 B-d1(横断方向)

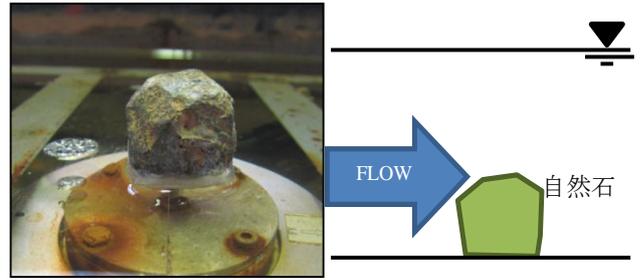


図-7 B-d1(縦断方向)

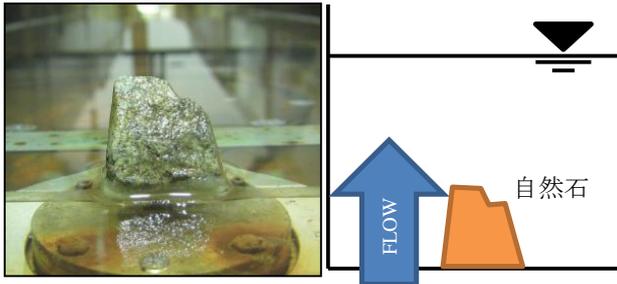


図-8 A-d2(横断方向)

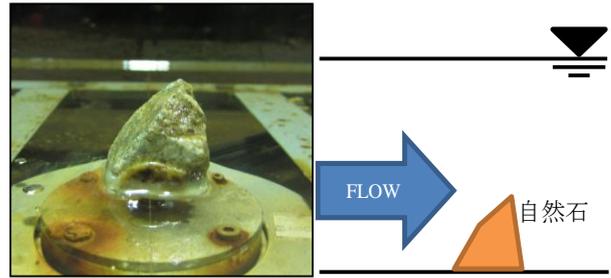


図-9 A-d2(縦断方向)

ら自然石 B-d1 の抗力作用面積は自然石 A-d2 の抗力作用面積と同程度のため、同じような抗力係数を得られるはずである。この結果の原因として、自然石 B-d1 が流線形に比較的近い形状であることが挙げられる(図-7)。流線形に近い形状の自然石では、物体表面が流線と一致しているため、物体表面から境界層と呼ばれる薄い渦層が剥離しないので、乱流の発生が抑えられる傾向にある。その結果、エネルギー損失が少なくなり抗力が小さくなったと考えられる。

ビー玉のケースにおいて、凹凸がない表面が滑らかなビー玉は抗力を受けにくいと推測していたが、実験結果からビー玉は他のケースと同程度の抗力係数を得た。この結果から物体の表面形状と抗力との関係性は小さいと考えられる。しかし、今回実験に用いた自然石のサイズは小さかった。そのため表面形状による影響が小さかったとも考えられ、今後の実験では今回の実験で用いた自然石よりも大きいもので実施する。

また、図-5 から自然石 A-d2 は他ケースの揚力係数に比べて非常に小さくなっていることがわかる。他ケースの揚力係数の平均値は 0.340 となり、自然石 A-d2 の揚力係数は 0.147 となった。これも形状が影響していると考えられる。図-9 から自然石 A-d2 の縦断方向の形状は、流れに対して傾斜していることがわかる。水はこの傾斜に沿って流れていくため、相対的に鉛直方向に作用する力が小さくなり、揚力係数が小さくなったと考えられる。

#### 4. 結論

水理実験では、自然石とビー玉の抗力・揚力係数を明らかにした。また、自然石の形状が流体力に影響を及ぼすことを確認した。

特に、自然石 B-d1 のケースでは、流れに対する形状が流線形に近いため、乱流の発生が抑えられ抗力係数が小さい値となった。

今後の課題は、今回の水理実験では二つの自然石を対象に、各単体の水理特性値を明らかにし、形状の影響による変化についても確認することができた。今後、自然石の数を増やし、今回使用した自然石と違う形状の自然石を使用した場合、抗力・揚力係数がどの程度の変化を及ぼすのか検討を行う。

#### 参考文献

- 1) (財)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(第2版), 2003.
- 2) 岩佐義朗, 金丸昭治, 尾島勝, 柿沼忠雄, 名合宏之, 齊藤隆, 余越正一郎, 鈴木幸一:水理学 I, 2006.
- 3) 前野詩朗, 藤原実咲, 富田晃生, 俣熊公子:連結石礫の流体力評価に関する研究, 水工論文集, 第 51 巻, pp.679-684, 2007.2.