

群体・上流端設置時の連結石礫の流体力評価

EVALUATION OF HYDRODYNAMIC FORCE ON CONNECTED STONE

前野詩朗¹・藤原実咲²・富田晃生²・山村 明³・俵熊公子⁴

Shiro MAENO, Misaki FUJIWARA, Akio TOMITA, Akira YAMAMURA and Kimiko KASEGUMA

¹正会員 工博 岡山大学准教授 環境学研究科社会基盤環境学専攻 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

²学生会員 岡山大学環境学研究科社会基盤環境学専攻博士前期課程 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

³日建工学株式会社 総合技術研究所 (〒160-0023 新宿区西新宿 6-10-1 日土地西新宿ビル 17F)

⁴正会員 日建工学株式会社 総合技術研究所 (〒160-0023 新宿区西新宿 6-10-1 日土地西新宿ビル 17F)

Nature friendly hydraulic structures made of natural stones such as ripraps have attracted attention in recent years. However, those structures are subject to failure problem under flood flow. Therefore, the authors proposed connected stone to increase its stability against flood flow. Coefficients such as the drag and lift force are necessary in designing those structures. However, the authorized values for those coefficients are not established yet, the coefficients used for concrete structures are therefore applied in designing structures made of stones at present condition. This study aims to clarify the drag and lift coefficient for connected stones placed at the middle and upper reach of the bed protection works using connected stones.

Key Words : nature friendly structure, natural stone, connected stone, drag coefficient, lift coefficient

1. はじめに

1990年代から環境に配慮した「多自然型川づくり」が全国各地で進められるようになった。しかし、実態は、必ずしも多自然型ではない事例もあった。そこで、より自然に近い川づくりを進める必要があるとの観点から、今後は「多自然川づくり」が展開されることとなった。このような背景により、自然に優しい材料である自然石礫で構築される水理構造物が望まれる。しかし、石礫で構築される構造物は、前野ら^{1),2),3)}が指摘しているように、環境機能には優れているものの、洪水時の破壊に対する強度不足が懸念される。

そこで、環境機能を保持したまま河床保護機能を高めるために、自然石を連結する工法に関する研究が進められている^{4),5),6),7)}。前野ら⁷⁾は、連結石礫が単体として設置された場合の抗力係数、揚力係数を明らかにしている。本研究は、従来の研究で明らかにされていなかった、連結石礫を群体として設置する場合、また、群体中の先頭部分に設置する場合の連結石礫に作用する流体力を分力計により計測することにより、連結石礫の抗力・揚力係数を実験的に明らかにし、めくれ、滑動、抜け出し破壊に関する連結石礫の効果について検討を行った。また、群体設置時については相当粗度の検討も行った。さらに、

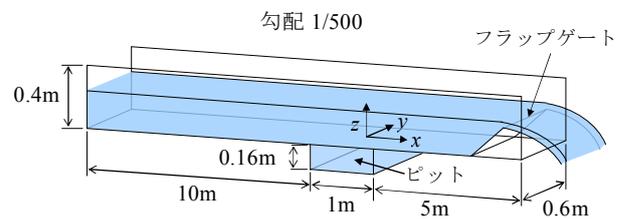


図-1 実験水路

群体試験時における流速場を計測し、連結石礫周辺の流速変動、流速原点位置についての検討も行った。

2. 実験の概要

実験に用いた水路は図-1に示すような長さ16m、幅0.6m、勾配1/500の循環水路である。水路上流端より10mの位置に長さ1m、幅0.6m、深さ0.16mのピットがあり、水路下流端には水深を調節できるフラップゲートが設けられている。

流体力の測定には、四分力計(東京計測社製、定格容量： F_x , F_y , F_z ; 20N, M_y ; 4N・m)を水路ピット内中央部に設置した。定格出力(最大負荷を与えた時の印加電圧1V当たりの出力電圧)はいずれの成分も約0.5mV/Vである。本研究では、流体力が小さく出力電圧も小さくなるため、0.2N程度の载荷によるキャリブレーションを行い精度を確認した。四分

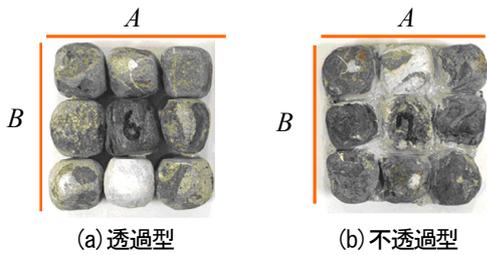


写真-1 連結石礫模型

表-2 連結石礫諸元

諸元	透過型	不透過型
重量 (N)	3.09	3.16
最大寸法 (cm) $x \times y \times z$	8.7 × 8.9 × 3.0	9.0 × 8.9 × 3.0
平均高 h_0 (cm)	1.41	1.50
抗力作用面積 A_D (cm ²)	21.23	20.72
揚力作用面積 A_L (cm ²)	69.56	71.29

A面を上流側に向けて設置した場合

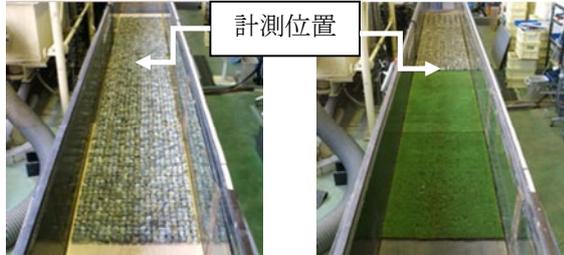


写真-2 設置状況

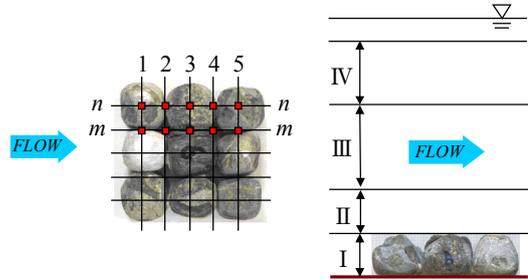


表-1 実験ケース

試験名	透過・不透過	方向
群体	P・IP	A・B
上流端	P・IP	A・B

	区間長	測定間隔	測定方法
I	3.0 cm	0.3 cm	x, y, z
II	3.0 cm	0.5 cm	x, y, z
III	6.0 cm	1.0 cm	x, y, z
IV	4.0 cm	1.0 cm	x, z

図-3 流速場測定点

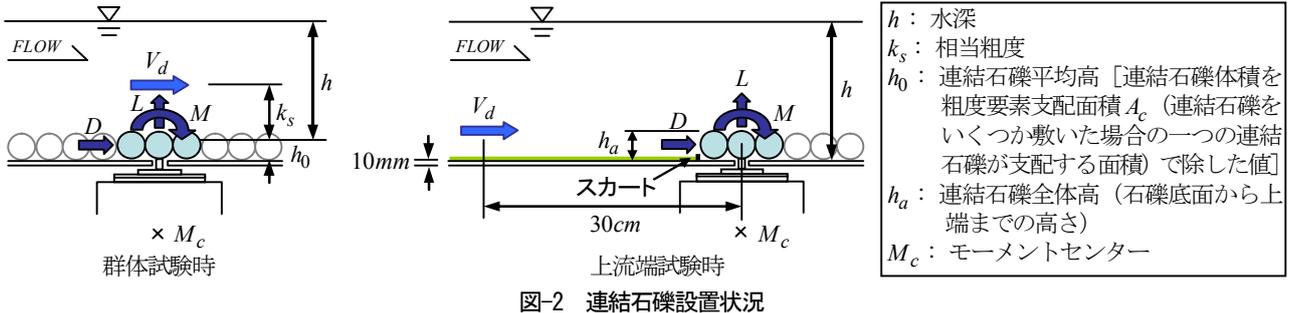


図-2 連結石礫設置状況

力計並びに石礫の設置方法は護岸ブロックの試験法⁸⁾に準じて行った。実験には、写真-1 (a) に示す石礫間に隙間があり透過性を有する透過型連結石礫(P: permeable)と、写真-1 (b) に示す石礫間に隙間がなく不透過な不透過型連結石礫(IP: impermeable)を用いた。石礫の敷設状況を写真-2 に示す。

実験ケースを表-1 に示す。なお、連結石礫を構成する個々の石礫がそれぞれ異なった形状であることを考慮して、実験ケースとしては、写真-1 に示す A, B の面をそれぞれ上流側に向けることにより 2 方向を対象とした。また、表-2 に石礫の諸元を示す。

本実験では、護岸ブロックの試験法⁸⁾に準じて 1×10^4 以上のレイノルズ数 Re が得られる試験を 3 ケース以上含むよう、流量 50, 55, 60, 65, 70 l/s を与えた。この時フルード数 F_r は 0.35 から 0.56、水路床から水面までの高さは 17.93 cm である。各流量について水深 h 、流下方向の近傍流速 V_d 、石礫に働く流体力である抗力 D 、揚力 L 、モーメント M を計測した。なお、横断方向の作

用力は小さいため本研究では検討していない。

抗力・揚力係数、相当粗度は下記により求めた。

・抗力係数 C_D ・揚力係数 C_L

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

ここに、 A_D, A_L : 抗力, 揚力作用方向の投影面積, V_d : 近傍流速, ρ : 水の密度である。ここでの近傍流速 V_d は、護岸ブロックの試験法⁸⁾に準じて、図-2 に示す位置の水路中央地点で計測した。なお、上流端試験においては、石礫底面に流れが生じないように連結石礫上流端より 1 mm の地点にスカート ($x: 1 \text{ mm}, y: 90 \text{ mm}, z: 5 \text{ mm}$)を設置した⁸⁾。

・相当粗度 k_s

本実験では式(2)の平均流速公式を用いて算出することとし、摩擦速度 u_* については群体試験における抗力を用いて式(3)により算出した。

$$\frac{V_m}{u_*} = 6.0 + 5.75 \times \log_{10} \left(\frac{h}{k_s} \right) \quad (2)$$

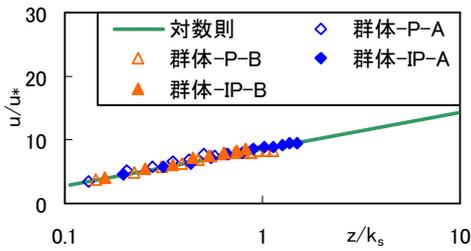


図-4 連結石礫中央上の流速分布と対数則との比較

$$u_* = \sqrt{\frac{D}{\rho \cdot A_c}} \quad (3)$$

ここに、 V_m ：平均流速である。

流速場の計測は、図-3に示すように石礫の頂点位置と連結位置に対して鉛直方向に図に示す(I)～(IV)の鉛直区間で計160点において群体透過型敷設時の流量500/s時に行った。(I)～(III)区間でADV (NORTEK社製: Vectrino)による3次元計測を行い、(IV)区間では2次元電磁流速計 (KENEK社製: VM-802H)による計測を行った。

3. 実験結果および考察

本試験では、計測地点より上流区間において十分に境界層が発達するよう、また、下流区間においては石礫による低下背水やゲートによる堰上背水の影響が計測地点まで及ばないように以下のように試験区間を設定した。

- ・群体試験時：計測地点から上流側に2.4m、下流側に1.5mの区間に石礫を敷設 (写真-2 左)。
- ・上流端試験時：計測地点から上流側に2.4mの区間に厚さ2mm程度の人工芝を敷設、下流側に2.8mの区間に石礫を敷設 (写真-2 右)。

紙面の都合上図には示していないが、計測地点上下流における水深がほぼ同様であることを確認した。次に、護岸ブロックの試験法⁹⁾に準じて、境界層が十分に発達しているかの確認を行う。群体敷設状態で流量700/s通水時の計測断面における実測流速 u の分布と式(4)に示す粗面对数則との比較を図-4に示す。

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log_{10} \frac{z}{k_s} + 8.5 \quad (4)$$

ここに、 z ：連結石礫平均高 h_0 からの距離、 k_s ：相当粗度(抗力より求めた u_* を用いて、平均流速公式より算出)である。

図より、 u/u_* は粗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ほぼ一般的な流れが形成されていることを確認した。

(1) 抗力・揚力係数の結果と考察

連結石礫に働く時間平均流体力 D 、 L と石礫周辺の流れの概況を図-5、図-6に示す。なお、透過型を図中の中抜きマーカーで、不透過型を塗りつぶしマーカーで示している。

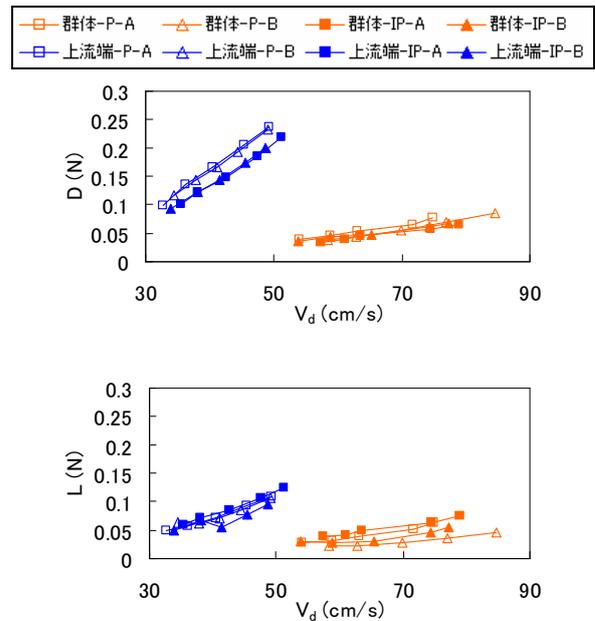
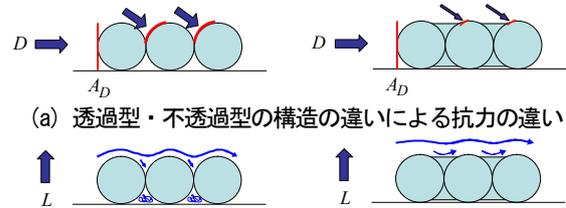


図-5 流体力



(b) 揚力に影響する周辺流れの概況

図-6 石礫周辺の流れの概況

a) 群体試験

抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を図-7に示す。図中の点線は透過型の平均値を、実線は不透過型の平均値を表している。図より、 C_D は透過型の方が不透過型よりも大きいことが分かる。ここで、図-5に示す流体力 D を見ると、透過型の方がやや大きな流体力が作用していることが分かる。これは、図-6(a)に示すように、透過型の方が不透過型よりも抗力 D を受け易い構造をしているからであると言える。また、抗力作用面積は透過型、不透過型による差異はほとんどない。よって、抗力 D による違いが直接的に抗力係数の違いに反映されたものと言える。これより、 C_D については透過型、不透過型による違いを考慮する必要がある。一方、図-7の揚力係数 C_L は透過型、不透過型による差は C_D と比べて半分程度とかなり小さくなった。ここで、図-5に示す流体力 L を見ると不透過型の方が透過型より同程度かやや大きいことが分かる。これは、図-6(b)に示すように、透過型は石礫間に空隙を有しているため、石礫上下面の圧力差が開放されるのに対し、不透過型は空隙を有さないため石礫上下面に圧力差が生じることが原因と考えられる。しかし、揚力係数 C_L については、揚力作用面積が透過型の方が小さくなるのが影響し、結果的に、透過、不透過によ

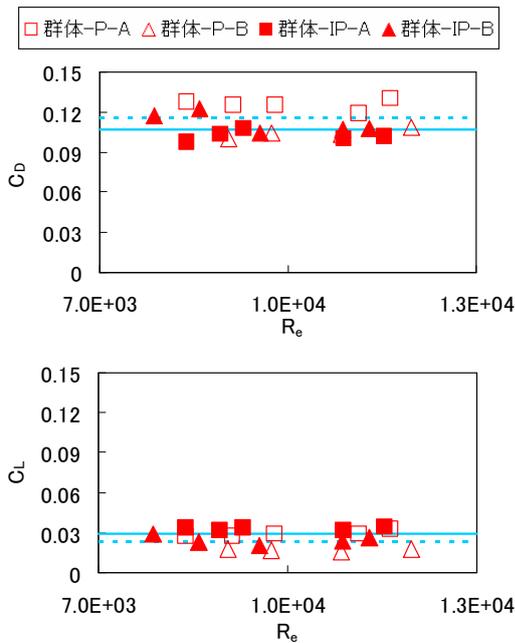


図-7 群体試験の抗力・揚力係数

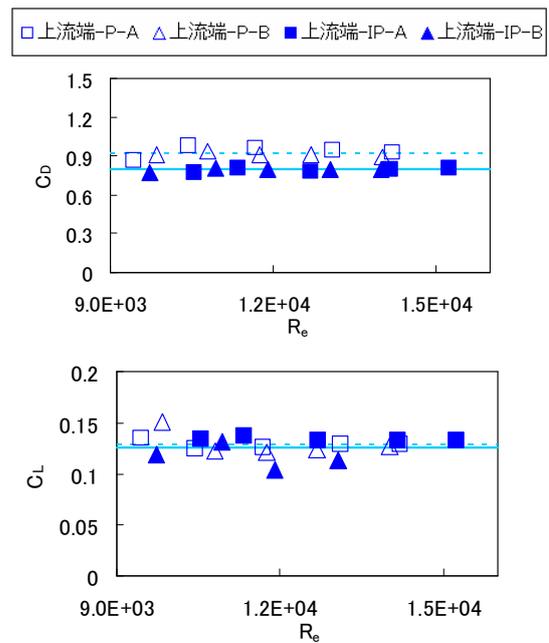


図-8 上流端試験の抗力・揚力係数

る差が現れなかったと言える。

よって、 C_D は透過型が 0.12, 不透過型が 0.11, C_L は透過型, 不透過型の違いが小さかったことを考慮して, 平均値である 0.026 を得た。

b) 上流端試験

抗力係数 C_D および揚力係数 C_L を図-8 に示す。図より、 C_D については群体試験と同様の傾向が見られ、その理由も同様のものと考えられる。一方、 C_L については透過型、不透過型による差異は見られない。また、揚力 L の差も見られない。

よって C_D は透過型が 0.92, 不透過型が 0.79, C_L は透過型、不透過型全ての平均値である 0.13 を得た。

(2) 破壊に関する検討⁹⁾

連結石礫を実河川に敷設するに当たっては、図-9 に示す (a) めくれ、(b) 滑動、(c) 抜け出しの 3 つの破壊モデルに関して検討する必要がある。ここでは、破壊駆動力と抵抗力の比による破壊指数を求め、連結石礫の群体設置時、上流端設置時の安全性について検討する。

まず、破壊現象は、鬼東ら¹⁰⁾が指摘しているように、時間平均された流体力ではなく、瞬間的な流体力による影響に依存するため、瞬間的な流体力を把握することが必要となる。図-10 に代表的な例として、群体-P-A と上流端-P-A の D 、 L 、 M について、それぞれの瞬間流体力 F' を時間平均流体力 F で無次元化したヒストグラムの例を示した。図中の実線は、標準偏差 F_σ を用いて式(5)で表される正規分布の確率密度関数である。

$$f\left(\frac{F'}{F}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}F_\sigma} \exp\left[-\left(\frac{F'-F}{F}\right)^2 / 2F_\sigma^2\right] \quad (5)$$

図より、作用流体力の変動はほぼ正規分布に従ってい

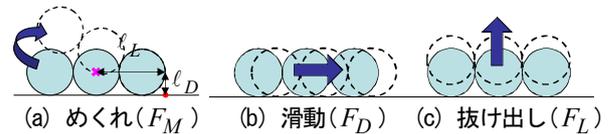


図-9 破壊モード

ることがわかる。このことは、実際の設計の際には、正規分布を仮定して流体力の変動を推定できることを示している。また、石礫には最大で平均流体力 F の 2.0 倍程度の瞬間流体力 F' が作用している。本来であれば、時間平均流体力 F のみならず標準偏差 F_σ 、安全率を用いて変動流体力を割り増しして石礫の安定性を検討する必要がある。しかし、石礫に対する安全率の設定等の基準が明確でないことにより、以下では石礫に作用する流体力として時間平均流体力 F を用いることとする。

(a)、(b)、(c) それぞれに対する破壊駆動力と抵抗力の比による破壊指数 F_M 、 F_D 、 F_L を次式によって求めた。

$$F_M = (D \cdot \ell_D + L \cdot \ell_L) / W \cdot \ell_L$$

$$F_D = D / \mu W$$

$$F_L = L / W$$

ここに、 ℓ_D : 石礫底面から石礫中央部までの距離、 ℓ_L : 石礫下流端から石礫中央部までの距離、 W : 石礫の水中自重、 μ : 0.65 である。なお、抗力・揚力の作用位置については、実験結果より算出した力の作用線が、全試験において連結石礫中心もしくは、それより下流側を通ることが確認されたため、安全側である石礫中心位置とした。

その結果を図-11 に示す。図より、本実験条件下での破壊指数は、群体、上流端共に $F_L < F_M < F_D$ の順で大きくなることがわかった。しかし、群体や上流端設置時には、下流に隣接する連結石礫が当該連結石礫の滑動を抑制するため、めくれに対する破壊の危険性が最も大き

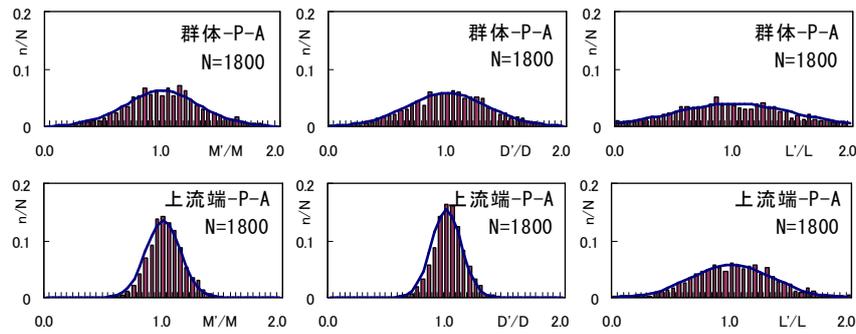


図-10 ヒストグラムと確率密度関数

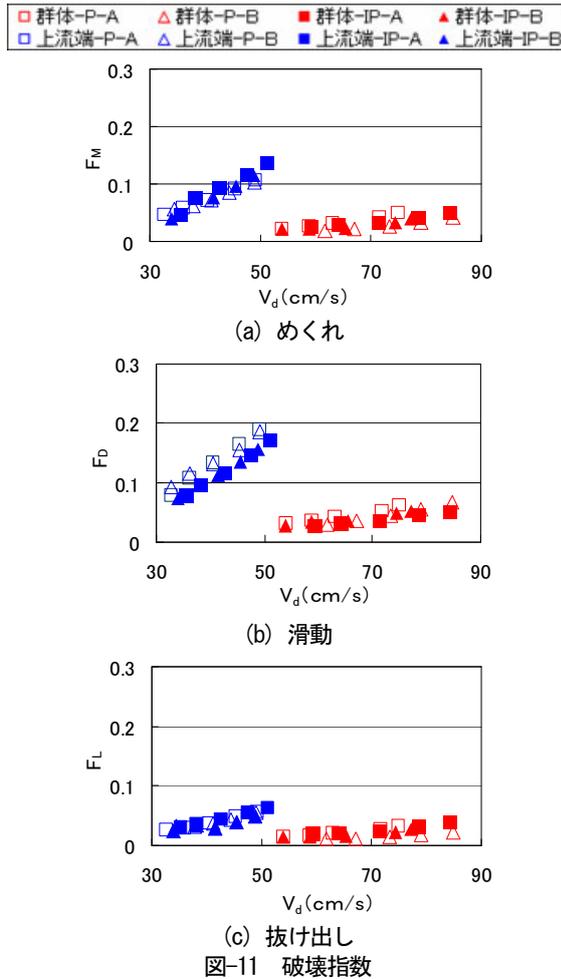


図-11 破壊指数

くなる。群體と上流端を比較すると、当然ではあるが、上流端に設置される連結石礫の破壊に対する危険性がかなり大きくなることからわかる。

(3) 流れ場の特性

a) 相当粗度

図-12 は群體試験時の平均流速 V_m に対する相当粗度 k_s の変化である。透過型、不透過型それぞれの平均値は約 12cm, 10cm であり、それぞれ連結石礫突起高 h_b ($h_a - h_0$) の 7.7 倍, 6.8 倍となった。若干ではあるが透過型の方が大きくなっている。これは、透過型の有する石礫間の空間の存在による流れの乱れが影響しているものと考えられる。林¹¹⁾は六脚ブロックの相当粗度は突

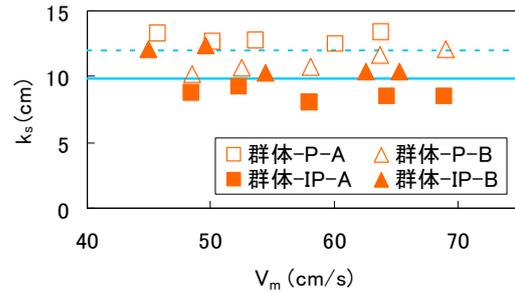


図-12 V_m に対する k_s の変化

起高さの約 1.6 倍であるとし、富永¹²⁾は栈粗度の場合、相対栈間隔(栈粗度の間隔/粗度高さ)が 10 前後で、相当粗度は突起高さの 4~6.5 倍となると報告している。これらと比較すると、石礫による流速低減効果が大きいことがわかる。これは、自然石の個々の異なった形状や凹凸のばらつきによる効果により石礫上部の流れの乱れがかなり大きくなったことが原因と考えられる。また、本研究では、水深に対する相当粗度が半分以上とかなり大きい結果となった。これについては、林¹¹⁾の研究や山本ら¹³⁾による実験結果においても、本実験結果と同様に半分程度あるいはそれ以上という結果も示されている。

b) 流速変動

図-13, 図-14 は主流方向、鉛直方向の流速成分の標準偏差の分布を表したものである。図より、主流方向の流速変動は、石礫間、石礫直上で大きく、鉛直方向のそれは、石礫直上から $z = 8.5$ cm 付近までが大きくそれより上層では小さくなることからわかる。また、各測定点の流速分布を用いて式(2)より求めた相当粗度の平均は 8.7cm であった。(摩擦速度は群體透過型試験時の抗力から求めた。)このことから、石礫による乱れの影響範囲と相当粗度の間には相関が認められる。

c) 流速原点位置

表-3 は、式(4)の z を z_{01} を原点とした高さとし、 u と $\log_{10} z$ の関係を片対数紙にプロットし、境界層発達区域内においてプロットした流速の傾きが $5.75u_*$ (u_* は群體透過型設置・流量 500/s 時の抗力より算出) と等しくなるように求めた流速原点位置 z_{01} と、河床付近の 2 点の流速分布を外挿することにより求めた河床からの z_{02} である。表-3 より、石礫間の谷の部分へ流れが流入し m-m 上で流速原点が小さくなることからわかる。また、対

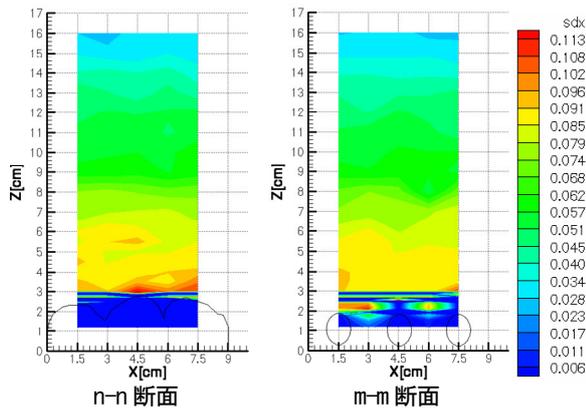


図-13 流下方向(x)の標準偏差 ($Q = 50\ell / s$)

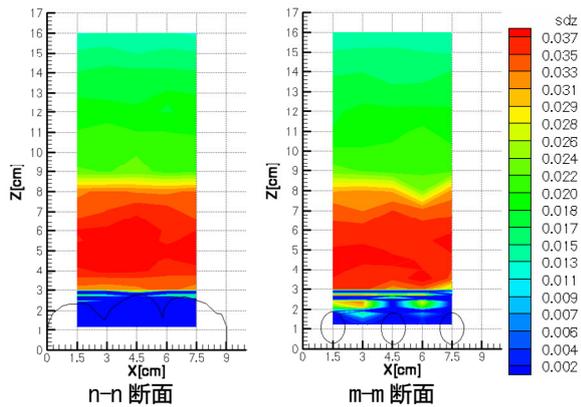


図-14 鉛直方向(z)の標準偏差 ($Q = 50\ell / s$)

数則、外挿それぞれの平均値は、いずれも連結石礫平均高 h_0 :1.41cm よりも大きい。外挿については、礫の隙間に当たる m-2, m-4 では h_0 とほぼ同程度である。護岸ブロックの試験法⁸⁾では、流速原点位置を平均高さ h_0 に設定しているが、本研究では、流速原点位置がそれよりも若干大きな値となった。また、算出した z_{01} , z_{02} を図-4の連結石礫中央上の流速分布と対数則との比較に反映した結果、最も対数側に相関しているのは h_0 であることが確認された。しかし、これは限られた実験条件下での結果であるため、流速原点位置については、今後さらに検討する必要があると考える。

4. 結論

本研究は、連結石礫の群体・上流端における抗力・揚力係数を実験的に検討した。また、めくれ・滑動・抜け出しに対する破壊抵抗について検討した。さらに群体試験透過型においては、流速の挙動を実験的に検討した。以下に、得られた知見について示す。

- 1) 連結石礫の群体・上流端設置時の抗力・揚力係数を明らかにした。
- 2) 群体設置時にはめくれ破壊に対する検討を行う必要がある。また、上流端に設置する石礫の破壊の検討が重要である。
- 3) 連結石礫の相当粗度は突起高の数倍程度になる。透過

表-3 流速原点位置 (単位: cm)

case	z_{01}	z_{02}	case	z_{01}	z_{02}
n-1	1.67	2.35	m-1	1.69	1.88
n-2	2.20	2.10	m-2	1.50	1.41
n-3	1.92	2.87	m-3	1.56	2.45
n-4	2.30	2.49	m-4	1.56	1.50
n-5	2.38	2.65	m-5	2.47	2.78

平均値: 対数則 1.93cm, 外挿 2.25cm

連結石礫平均高 1.41cm

型の連結石礫の相当粗度の方が不透過型よりも大きくなる。

4) 流速変動は、流下方向は石礫間や直上で、鉛直方向は石礫上部で大きくなり、主流方向の変動成分が卓越することが確認された。

5) 流速原点位置は石礫頂点や谷間で異なり、その平均値は連結石礫平均高よりも若干大きくなるが、連結石礫平均高が最も対数則に従っていることが確認された。

本実験により、連結石礫の基本的な水理特性が明らかにされた。しかし、実際の設計に際しては、石礫周辺の乱れ強度をどの程度見積もるかが重要である。今後は、堰直下流部や水制周辺、跳水などによる乱れ強度の影響もさらに検討する予定である。

参考文献

- 1) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 大西利典: 自然石を用いた堰の水理特性, 水工学論文集, 第46巻, pp.493-498, 2002.
- 2) 前野詩朗, 道奥康治, 森永智, 大西利典: 捨石堰の破壊機構のモデル化, 水工学論文集, 第47巻, pp.781-786, 2003.
- 3) 前野詩朗, 道奥康治, 加瀬瑛斗, 菊池慶太: 個別要素法を用いた捨石堰の破壊予測, 水工学論文集, 第49巻, pp.787-792, 2005.
- 4) 山本太郎, 長谷川和義, 浅利修一: 連結された2個の礫に対する限界掃流力の評価について, 水工学論文集, 第49巻, pp.919-924, 2005.
- 5) 山本太郎, 長谷川和義, 浅利修一: 河床に設置された連結石礫工の安定性と破壊過程について, 水工学論文集, 第50巻, pp.955-960, 2006.
- 6) 山本太郎, 長谷川和義, 浅利修一: 複数の礫が連結されることによる流失限界の向上効果と掃流力評価について, 土木学会論文集, No.810/II-74, pp.31-42, 2006.
- 7) 前野詩朗, 藤原実咲, 富田晃生, 山村 明, 俣熊公子: 連結石礫の流体力評価に関する研究, 水工学論文集, 第51巻, pp.679-684, 2007.
- 8) (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.
- 9) 国土開発技術研究センター編: 護岸の力学設計法, 山海堂, 1999.
- 10) 鬼束幸樹, 秋山壽一郎, 重枝未玲, 中川達矢, 尾関弘明: 斜水路下流部に配置された円筒形ブロックを用いた跳水制御に関する実験的研究, 応用力学論文集 Vol.9, pp. 846-852, 2006.
- 11) 林健二郎: 大きな突起高と空隙を有する護岸ブロックに作用する流体力と流れに関する研究, 歴史的工法及び自然工法を用いた河川環境の評価と保全に関する研究, プロジェクト 1-1-2
- 12) 富永晃宏: 棧粗度の相対棧間隔が開水路の乱流構造に及ぼす影響, 水工学論文集, 第36巻, pp.163-168, 1992
- 13) 山本晃一, 林健二郎, 関根正人, 藤田光一, 田村正秀, 西村晋, 浜口憲一郎: 護岸ブロックの抗力・揚力係数, および相当粗度の計測方法について, 水工学論文集, 第44巻, pp.1053-1058, 2000.

(2007. 9. 30 受付)