

連結石礫の流体力評価に関する研究

EVALUATION OF HYDRODYNAMIC FORCE ON TIED GRAVELS

前野詩朗¹・藤原実咲²・富田晃生³・山村 明⁴・俵熊公子⁵
Shiro MAENO, Misaki FUJIWARA, Akio TOMITA, Akira YAMAMURA and Kimiko KASEGUMA

¹正会員 工博 岡山大学助教授 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岡山大学環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

⁴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)

⁵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 tied gravels 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 gravels and tied gravels experimentally.

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

1. はじめに

平成 9 年の河川法の改正にともない、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、その多くがコンクリート製の従来型の護岸ブロックを多自然型に改良したものであり、今後進められる「多自然川づくり」では、さらに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、著者らは、環境機能を保持したまま河床保護機能を高めるために、写真-1 に示すような自然石を連結する工法を提案している。しかし、コンクリート製の護岸ブロックとは異なって、形状や重量がそれぞれ異なる自然石によって形成された連結石礫に対する流体力評価に関する研究例は少なく、作用流体力を算定する際に必要となる抗力係数などは類似のコンクリートブロックに適用されているものを流用しているのが現状である。山本ら^{4), 5), 6)}は、礫を 2 個連結したものの、あるいは 2 個連結したものをワイヤで連結し、チェーンによりフレキシブルに繋げた連結礫工（連結された礫と礫は離れている）の安定性を検討し、連結礫工の有効性などを明らかにしているが、本研究で対象とする連結石礫はそれと



写真-1 連結石礫とその施工例

は構造が異なる。すなわち、本研究で提案する連結石礫は写真-2 に示すように、比較的剛な形で連結されている点が特徴であり、現時点では、作用流体力を算定する際に必要となる抗力係数などについて、確立された設計基準がないのが現状である。護岸ブロックの試験法では、単体、群体上流端、群体試験

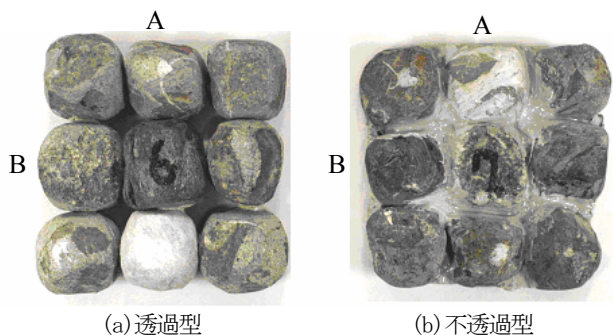


写真-2 連結石礫模型

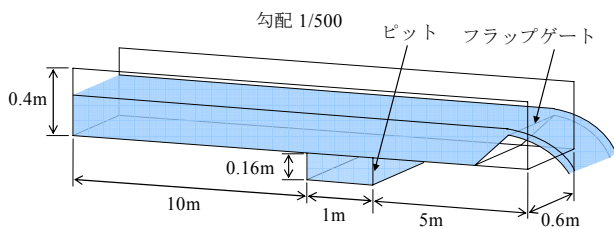


図-1 実験水路

の実施が規定されている。本研究は、基礎的研究として、単体の連結石礫に作用する抗力・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するものである。

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 の循環水路であり、水路上流端より 10m の位置に長さ 1m、幅 0.6m、深さ 0.16m のピットがある。また、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。

計測機器は四分力計（東京計測）を用い、図-2 に示すように水路ピット内に設置した。また、石礫は単体一個または連結一群のみを河床に設置した。分力計並びに石礫の設置方法は護岸ブロックの試験法⁷⁾に準じた。ここで M_c はモーメントセンターを示す。また、四分力計の仕様は表-1 に示すとおりである。

実験ケースを表-2 に示す。なお、今回は石礫の大きさの違いによる流体力の変化を見るために三種類の大きさの異なる石礫を用い、わかりやすく区別するため S:small, M:medium, L:large と表示する。また、連結による流体力の違いを見るために連結数の異なる石礫を用い、石礫間に隙間があり透過性を有する場合(写真-2(a))を P: permeable, 石礫間に隙間がなく不透過な場合(写真-2(b))を IP: impermeable と表示し、連結石礫については、写真-2 に示す A, B 方向を上流側に向けることにより 2 方向を対象とした。さらに、x: 縦断方向, y: 横断方向, z: 鉛直方向として石礫の規格も示す。

本実験では、護岸ブロックの試験法⁷⁾に準じて 1×10^4 から 4×10^4 程度のレイノルズ数 Re が得られる流量 50, 55,

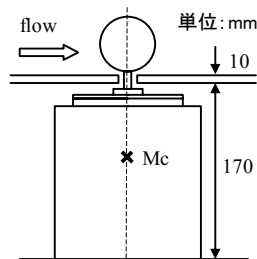


図-2 四分力計

表-1 四分力計の仕様

型式	防水型四分力計 (Y116M2)	
	定格容量	定格出力
Fx方向	20N	約0.5mV/V
Fy方向	20N	約0.5mV/V
Fz方向	20N	約0.5mV/V
Mx方向	4N・m	約0.5mV/V

表-2 実験ケース

Case	構成	規格 (x・y・z) (cm)	重量 (N)
1-1-S	1個	2.8・2.8・2.8	0.38
1-2-S	1個	2.9・2.8・2.5	0.35
1-3-S	1個	3.0・2.8・2.9	0.38
1-1-M	1個	5.3・6.3・4.4	1.68
1-2-M	1個	4.8・5.7・4.4	1.54
1-3-M	1個	4.1・5.6・4.5	1.57
1-1-L	1個	7.4・8.3・6.1	4.77
1-2-L	1個	7.7・9.8・5.2	5.07
1-3-L	1個	7.4・8.9・5.6	4.68
4-P-A-S	4個連結	5.8・6.3・2.9	1.45
4-P-B-S	4個連結	6.3・5.8・2.9	1.45
4-IP-A-S	4個連結	6.2・6.5・2.9	1.59
4-IP-B-S	4個連結	6.5・6.2・2.9	1.59
9-P-A-S	9個連結	8.9・8.7・3.0	3.09
9-P-B-S	9個連結	8.7・8.9・3.0	3.09
9-IP-A-S	9個連結	8.9・9.0・3.0	3.16
9-IP-B-S	9個連結	9.0・8.9・3.0	3.16
9-P-A-M	9個連結	13.4・14.0・4.6	7.71
9-P-B-M	9個連結	14.0・13.4・4.6	7.71
9-IP-A-M	9個連結	13.4・14.0・4.6	8.54
9-IP-B-M	9個連結	14.0・13.4・4.6	8.54

60, 65, 70l/s を与えた。この時のフルード数 Fr は 0.34 から 0.68 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。

3. 実験結果および考察

本試験では、水路について実河道における流れの状態を再現するため、水路上流区間で河床粗度による境界層が十分に発達するよう、計測地点から上流側に 2.4m、下流側に 1.8m の区間に人工芝を敷設した。図-3 は、計測地点から 30cm 間隔に上流側 8 ポイント、下流側 5 ポイントにおいてポイントゲージにより水面形を求めた結果である。これにより計測地点付近では十分に流れが安定していることが確認された。

次に、護岸ブロックの試験法⁷⁾に準じて、一様な流れが形成できているかの確認を行う。石礫のない状態で計測地点より上流側へ 5cm の地点の実測流速分布と次式(1)に示す粗面對数則との比較を図-4 に示す。

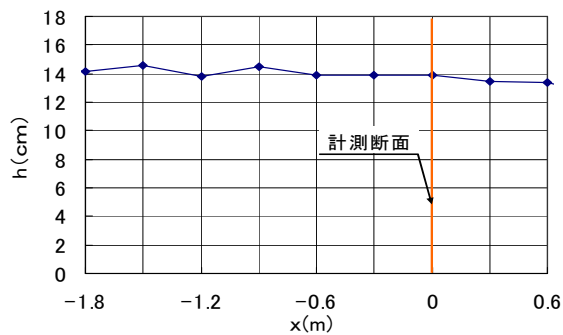


図-3 水面形

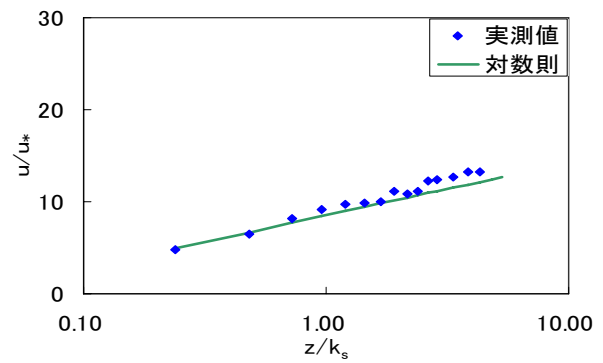


図-4 流速分布と対数則との比較

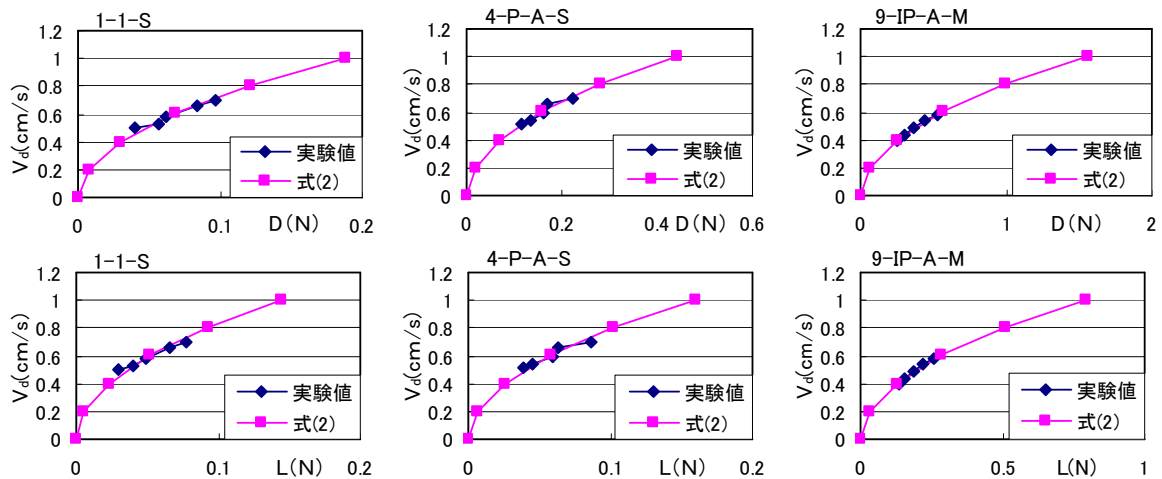


図-5 実験値と式(2)との比較

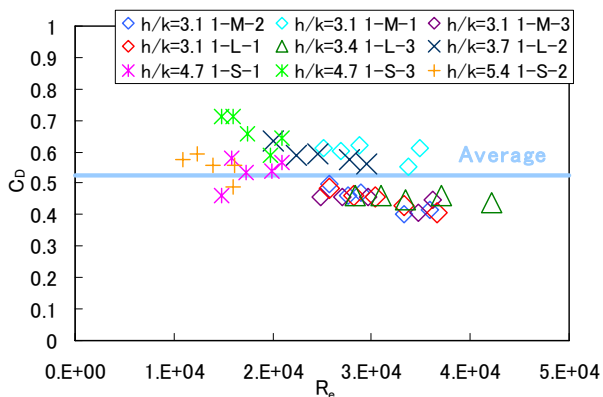


図-6 C_D と $R_e \cdot h/k$ との関係

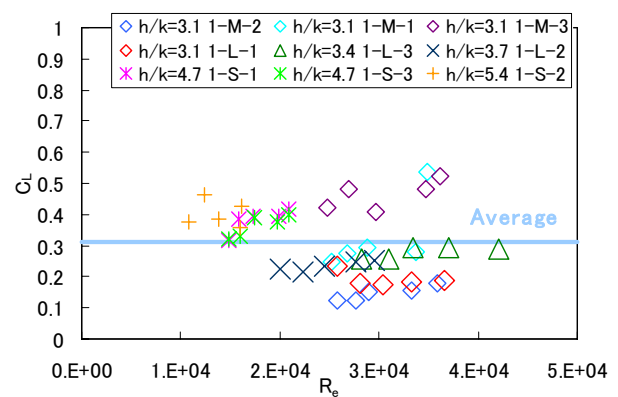


図-7 C_L と $R_e \cdot h/k$ との関係

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log_{10} \frac{z}{k_s} + 8.5 \quad (1)$$

ここに、 u ：流速， u_* ：摩擦速度， z ：河床からの距離， k_s ：粗度高さである。

図より、 u/u_* は式(1)で示す粗面对数則に概ね従っていることがわかる。また、 $x=0\text{cm}$ 、 -30cm 、 -60cm の地点における流速分布と水深がほぼ一致していたことから、計測地点において、境界層の発達したほぼ様な流れが形成されていることを確認した。

次に、次式(2)に示す抗力・揚力を算出する際に必要となる抗力係数 C_D と揚力係数 C_L について検討する。

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

ここに、 A_D, A_L ：抗力，揚力作用面積， 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⁷⁾に準じてブロック全体高 k における流速とし、 $x=-30\text{cm}$ の水路中央地点で計測した。

図-5は、実験結果より得られる C_D 、 C_L の平均値により算出される D, L と本実験結果を比較したものである。図には、試験体1個・4個連結・9個連結について代表的なものを示している。図より、抗力、揚力が速度の2乗に比例し、抗力・揚力係数として一定値を用いてよいことがわかる。

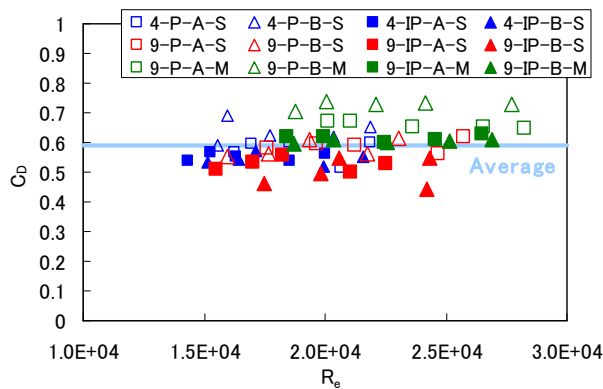


図-8 C_D と R_e との関係

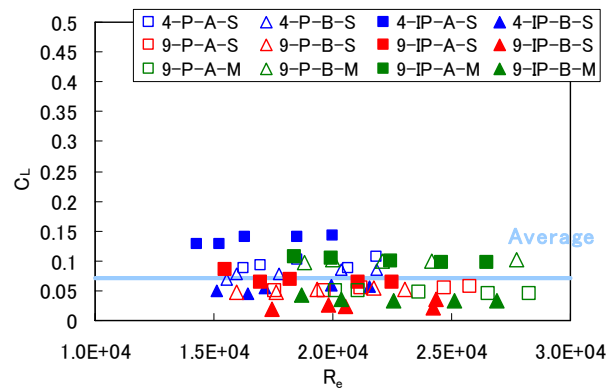


図-9 C_L と R_e との関係

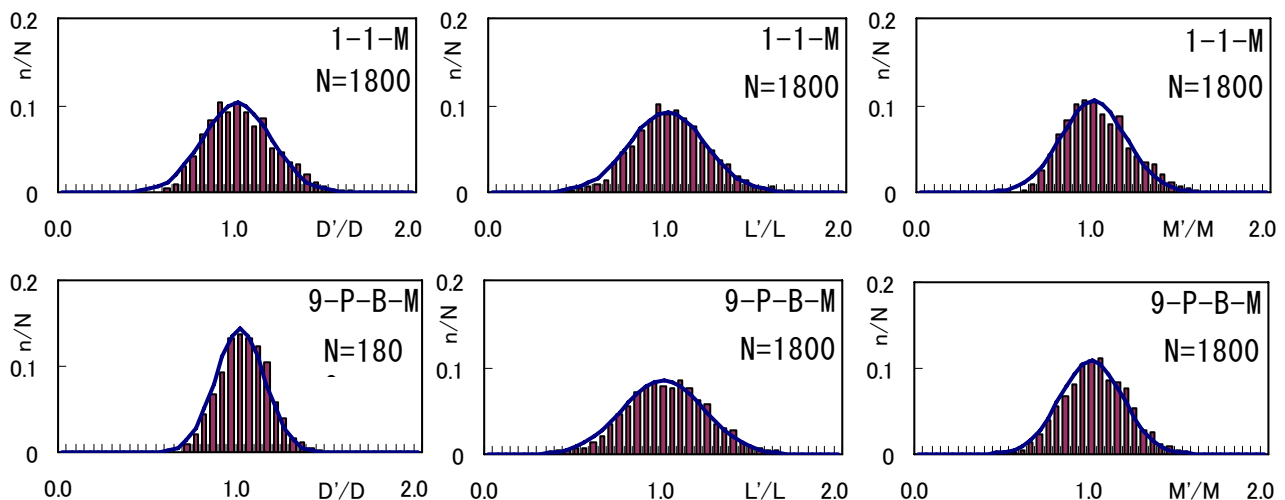


図-10 ヒストグラムと確率密度関数

(1) 抗力・揚力係数の結果と考察

図-6および図-7は、1個の非連結石礫についてそれぞれ、 C_D 、 C_L とレイノルズ数 R_e の関係について、相対水深 h/k をパラメータとして示したものである。なお、図では粒径の違いを記号の大きさで示している。図-6の C_D 値と相対水深 h/k の関係からは、相対水深が小さくなるにつれて C_D も小さくなる傾向が見られる。重枝ら⁸⁾が示したように、相対水深が小さくなるにつれ C_D は大きくなることが予想されるが、本実験の場合、有意な傾向は見られなかった。これは、石礫形状や大きさがケースごとに異なることなどが原因であると考えられる。粒径についても同様に有意な変化傾向は認められない。また、図-7より、 C_L は C_D よりもばらつきが大きくなることがわかる。しかし、 C_L についても今回の実験の範囲では、相対水深や粒径の変化による有意な変化傾向は認められなかった。次節では、 C_D 、 C_L として図中の実線で示すそれぞれの平均値 $C_D = 0.53$ 、 $C_L = 0.31$ を用いて、破壊抵抗に関する検討を行う。

次に、図-8および図-9は、連結石礫について、それぞれ、 C_D 、 C_L とレイノルズ数 R_e の関係を示している。不透過型と透過型の石礫を記号の塗りつぶしの有無で表している。これらの図より、 C_D については、石礫数によ

る違いは確認できないが、透過型の方が不透過型よりも若干大きくなる傾向が見られるものの、有意な差があるとは言えない。一方、 C_L については、石礫数の違い、透過・不透過による違いが確認できなかった。よって、多少のばらつきはあるものの、ほぼ同程度であると考え、次節では C_D 、 C_L として図中の実線で示すそれぞれの平均値 $C_D = 0.59$ 、 $C_L = 0.07$ を用いて、破壊抵抗に関する検討を行う。なお、これらの係数値は類似した形状のコンクリートブロックを対象とした設計値 $C_D = 0.6$ 、 $C_L = 0.1$ 程度と同オーダーであり、妥当な値と判断できる。

(2) 破壊に関する結果と考察

連結石礫を実河川に敷設するに当たっては、護岸の力学設計法⁹⁾に示されるように石礫の①めくれ②滑動③抜け出しに関して破壊の有無を検討しておく必要がある。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、石礫を連結することによる安定性の向上について検討する。

まず、①、②、③の現象は、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、1-1-M と 9-P-B-M 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(3)で表される正規分布の確率密度関数である。

$$f\left(\frac{F'}{F}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}F_{\sigma}} \exp\left(-\left(\frac{F'-F}{F_{\sigma}}\right)^2 / 2\right) \quad (3)$$

図より、作用流体力の変動はほぼ正規分布に従っていることがわかる。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 1.5 倍程度の瞬間流体力 F' が作用している。本来であれば、鬼束ら¹⁰⁾が指摘しているように、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、また、今回は石礫の連結効果に焦点を当てて検討を行うことなどを考慮して、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。

次に、図-11 に示す石礫に働く流体力の作用位置を決定するため、以下に示す式(4), (5)によって定義される

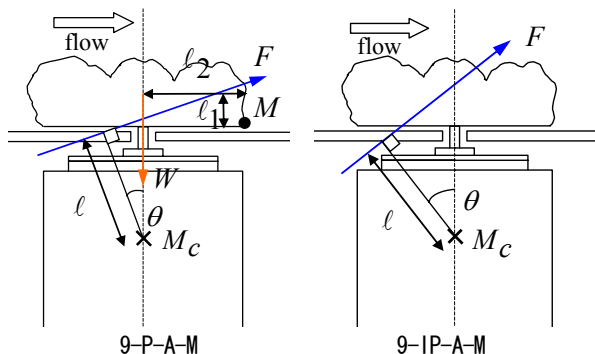
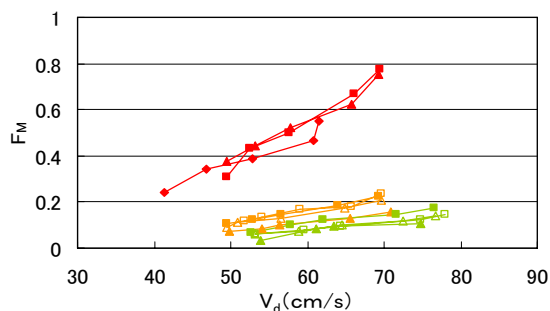
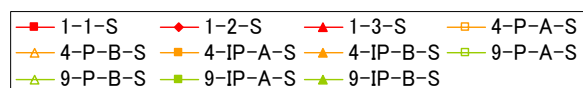
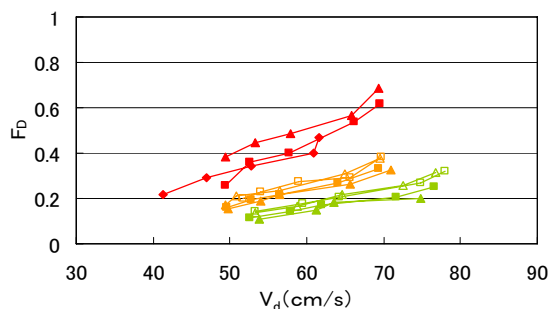


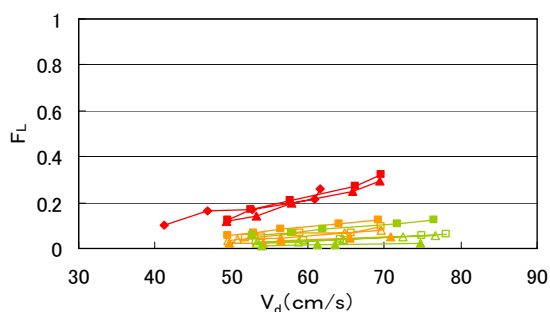
図-11 作用線位置



(a) めくれ

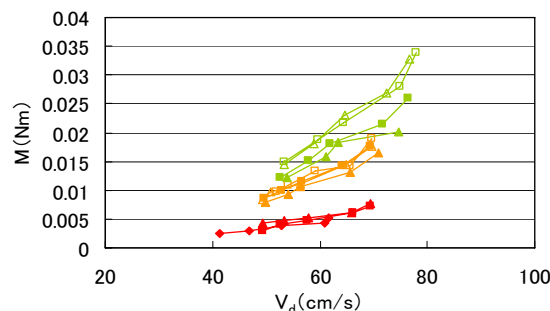
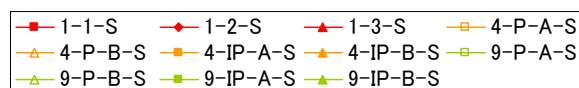


(b) 滑動

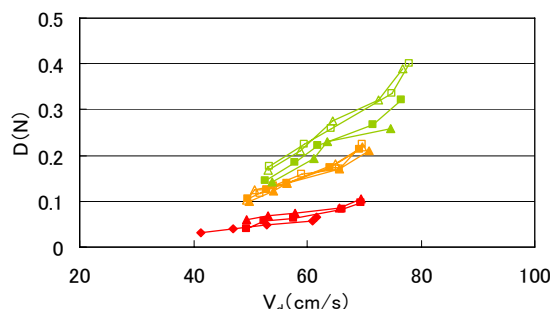


(c) 抜け出し

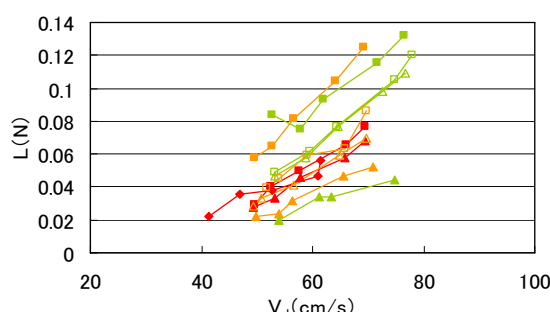
図-12 破壊指数



(a) 流速と M の関係



(b) 流速と D の関係



(c) 流速と L の関係

図-13 流体力

M_c から作用線までの距離 ℓ と、 M_c から作用線へ下ろした垂線の成す角度 θ を算出した。

$$\ell = M / \sqrt{D^2 + L^2} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1}(L/D) \quad (5)$$

その結果、石礫によって多少のばらつきはあることがわかった。図-11 にその代表例を示す。図より、作用線は石礫の重心付近あるいはやや下流寄りを通ることがわかる。このことから以下では、流体力は石礫の重心に働くものとして検討する。

①のめくれについては、抗力と揚力によって生じる作用流体力に対する図-11 左図中の M 点でのモーメントを、水中重量 W によって生じる M 点での抵抗モーメントで除することによって破壊指数 F_M を算出した。 F_M が 1 以上になるとめくれ破壊が生じる。

$$F_M = (D \cdot \ell_1 + L \cdot \ell_2) / W \cdot \ell_2 \quad (6)$$

これによって得られた結果を図-12(a)に示す。また、各石礫に働く流体力 M の結果を図-13(a)に示す。図-13(a)から連結数が多くなるほど M が大きくなることがわかる。一方、図-12(a)より、破壊指数については石礫数が多くなるほど減少する傾向があることが確認され、9 個の連結石礫の破壊指数が最も小さくなり、連結の効果が確認できる。

②の滑動については、効力を、河床と石礫間に作用する摩擦力で除することによって滑りの破壊指数 F_D を算出した。

$$F_D = D / \mu W \quad (7)$$

ここで摩擦力を求める際に利用する静止摩擦係数 μ は、河床の一般的な値である 0.65 とした。これによって得られた結果を図-12(b)に示す。また、各石礫に働く流体力 D の結果を図-13(b)に示す。図より、連結数が多くなるほど流体力 D が大きくなるが、めくれの場合と同様に 9 個の石礫の破壊指数が最も小さくなり、石礫数が多くなるほど破壊指数が減少することが確認された。

③の抜け出しについては、揚力を、自重で除することによって破壊指数 F_L を求めた。

$$F_L = L / W \quad (8)$$

これによって得られた結果を図-12(c)に示す。また、各石礫に働く流体力 L の結果を図-13(c)に示す。図より、多少データにばらつきは見られるが、概ね連結数が多くなるほど流体力 L が大きくなることがわかる。抜け出しの場合も、9 個の石礫の破壊指数が最も小さく、石礫数が多くなるほど破壊指数は減少することが確認された。

以上より、連結数が多くなるほど、いずれの破壊モードに対しても安定性が増すことが確認された。また、連結なしの石礫の場合は、めくれによる破壊が滑動による破壊の危険性よりも大きい、石礫を連結すると逆に、滑動による破壊の危険性の方が大きくなる。したがって、連結石礫を設計する際には、できる限り抗力作用面積を小さくすることが安定性の増加に繋がることがわかる。

なお、写真-2に示すように石礫を 9 個連結した場合と、

重量が同じで、連結無しの場合、すなわち、一個の石礫の 9 倍の重量を持つと仮定した石礫について、本実験で得られた抗力・揚力係数を用いて、めくれ、滑動、抜け出しに関する破壊指数を試算した結果、それぞれ約 3 倍、1.3 倍、2.1 倍に増加し、破壊に対する耐力は連結石礫の方が大きくなることがわかった。このことから、石礫を連結する効果は大きいことが確認された。

4. 結論

本研究は、単体の連結石礫における抗力・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。以下に、得られた知見について示す。

- 1) 単体石礫並びに連結石礫の抗力・揚力係数を明らかにした。
- 2) 連結数が多くなるほど、いずれの破壊モードに対しても安定性が増すことから、連結石礫が破壊に対して有効であることが確認された。
- 3) 連結石礫については、本実験条件下では、滑動が最も可能性の高い破壊であ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) (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.
- 8) 重枝末玲, 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, 水工論文集, 第 50 巻, pp.889-894, 2006.
- 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, 重枝末玲, 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.

(2006. 9. 30 受付)