

堰下流部の連結石礫河床保護工の流体力評価

EVALUATION OF HYDRODYNAMIC FORCE ON CONNECTED STONE BED PROTECTION WORKS AT THE DOWNSTREAM OF A WEIR

前野詩朗¹・山村 明²・榎熊公子³

Shiro MAENO, 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）

³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 oriented hydraulic structures made of natural stones such as riprap have been used in Japan considering river environment. Negative aspect of these structures is easy to collapse under intense flow. Therefore, a connect stone is proposed to increase its stability against the intense flow. In this study, stability of two types connected stones, one is non-porous and the other is porous type, was investigated under rapidly varied flow conditions such as supercritical flow and hydraulic jump. Stability analysis using uplift and drag force acting on the connected stone shows that the non-porous type connected stone may collapse turn up and lift up mode. Furthermore, it is clarified that the porous type connected stone is more stable than the non-porous type.

. **Key Words :** natural stone, connected stone, drag force, lift force, bed protection works, supercritical flow, hydraulic jump

1. はじめに

平成9年の河川法の改正にともない河川環境の整備と保全がその目的に加わった。また、平成15年に施行された自然再生推進法は、過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すことを目的としており、今後は以前にも増して生態系に配慮した川づくりが進められるようになるであろう。このような背景のもとでの川づくりにおいては自然石を用いた河川構造物が重要な役割を果たすことは容易に予測される。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、写真-1に示すように石礫を連結する工法が提案されている。また、連結により破壊抵抗力を増すことができる事が明らかにされている^{4), 5), 6), 7)}。前野ら⁷⁾の研究により、連結石礫の抗力係数や揚力係数が提案されたが、堰下流部や橋脚周辺などの急変流場⁸⁾への適用に際しては、どの程度の流体力がどのように作用するのかを明らかにしておく必要がある。以上の点を考慮して、本研究は、堰下流の射流や跳水が発生する場における河床保護工として連結石の作用流体力を実験的に検討する。



写真-1 連結石礫

2. 実験の概要

(1) 実験装置

実験に用いた水路は長さ 16m、幅 0.6m の可変勾配循環水路であり、水路上流端より 10m の位置に長さ 100cm、幅 60.0cm、深さ 16.0cm のピットがある。ピット内に図-1に示す 4 分力計（東京計測社製）を設置している。分力計並びに連結石礫の設置方法は護岸ブロックの試験法⁹⁾に準じた。4 分力計の仕様は表-1に示すとおりである（表中の mV/V は最大負荷を与えたときの出力電圧で、印加電圧 1V 当たりの出力電圧である）。分力計の軸は、 x : 流下方向、 y : 流下方向に向かって左方向、 z : 鉛直上向き方向とし、それぞれの方向の作用力 F_x , F_y , F_z と、 y 軸の進む方向に対して時計回りに加わ



(a) 透過型

(b) 不透過型

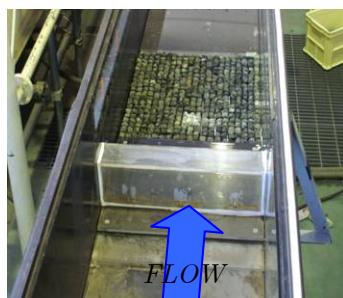


写真-2 連結石礫模型と設置状況

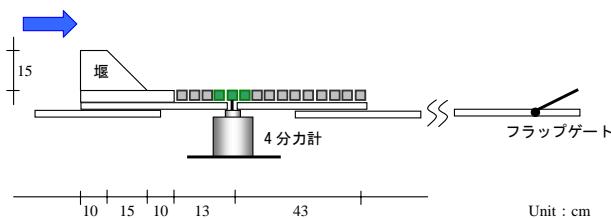


図-1 実験装置の概要

るモーメント M_y を計測した。以下、 F_x を D (抗力)、 F_z を L (揚力)、 M_y を M (モーメント)とする。なお、 F_y は現象に与える影響が小さいと判断して検討していない。護岸ブロックの試験法⁹⁾や重枝ら⁸⁾の実験を参考にして、予備実験を行い、平均値や標準偏差を検討して、サンプリング周波数は、30 Hz、サンプリング数は 1800 とした。各流体力を 5 回計測し、検討に使用する流体力はその時間平均値を使用した。また、水路下流端には跳水位置を調節できるようにフラップゲートが設置されている。流速の計測には直径 3mm のピト一管を用い、水深の計測にはポイントゲージを使用した。流速は 3 回計測し、その平均値を使用した。

透過型連結石礫は、写真-2 に示すように、粒径が 2.5 cm 程度の 9 つの石礫をエポキシ樹脂で連結した。不透過型連結石礫は透過型連結石礫の間隙をパテで埋めることで作製した。連結石礫を構成する個々の石礫は、形状が一定でないため、写真に示した A あるいは B の面を上流側に向けて、2 ケースの実験とした。連結石礫と分力計の固定方法は、中央の石の下部を削ってナットをエポキシ樹脂で定着して、直径 6mm のステンレスボルトで固定した。また、計測する石礫は水路中央部に配置し、計測連結石礫の周辺に粒径が同程度の石礫を設置し、群体となるようにした。

表-1 防水型四分力計 (Y116M2) の仕様

作用力	定格容量	定格出力
F_x	20N	約 0.5 mV/V
F_y	20N	約 0.5 mV/V
F_z	20N	約 0.5 mV/V
M_y	4N · m	約 0.5 mV/V

表-2 実験ケース (流量とフルード数)

(a) 射流場・跳水場の検討

Case	30(l/s)	35(l/s)	40(l/s)	43(l/s)	45(l/s)	50(l/s)
T.P.S.A	4.03	3.77	3.55	3.39	3.29	-
T.P.S.B	4.03	3.71	3.53	3.38	3.30	-
T.P.J.A.	-	3.55	3.39	-	3.10	2.98
T.P.J.B.	-	3.56	3.37	-	3.17	3.12
T.N.S.A	4.00	3.81	3.47	3.32	3.27	-
T.N.S.B	4.01	3.80	3.55	3.40	3.32	-
T.N.J.A.	-	3.31	3.03	-	2.95	2.76
T.N.J.B.	-	3.50	3.16	-	3.05	2.82

(b) 跳水位置の検討 ($Q=45l/s$)

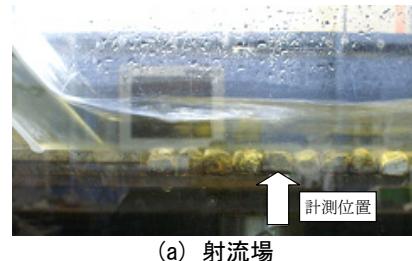
Case	1	2	3	4
T.P.J.A.	2.46	2.98	3.25	3.30
T.P.J.B.	2.31	3.07	3.27	3.31
T.N.J.A.	2.18	2.89	3.27	3.24
T.N.J.B.	2.06	3.01	3.24	3.25

Case 1 : 計測位置が跳水の中程より後寄りにある状態

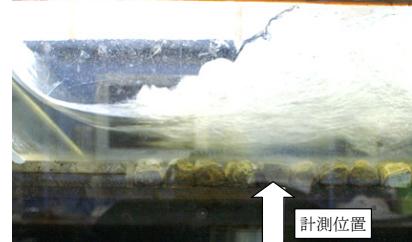
Case 2 : 計測位置が跳水の中程にある状態

Case 3 : 計測位置が跳水の中程より前寄りにある状態

Case 4 : 計測位置が跳水の先端付近にある状態



(a) 射流場



(b) 跳水場

写真-3 実験時の流況

(2) 実験条件

まず、群体の中に対象とする連結石礫を設置し、流量を段階的に増加させ、連結石礫流失時の流量を計測した。その際、破壊力が大きいと考えられる計測石礫上を射流が通過するケースと計測石礫上で跳水が発生する 2 ケースとした(写真-3)。跳水の生起位置としては、計測石礫上に跳水の中程が位置する状態とした。実験の結果、不透過型連結石礫の場合にのみ、射流の場合 43 l/s 程度で流失し、跳水の場合 45 l/s 程度で流失した。透過型連結石礫の場合には実験装置の最大流量約 70 l/s 程度においても流失しなかった。以上の点を考慮して、

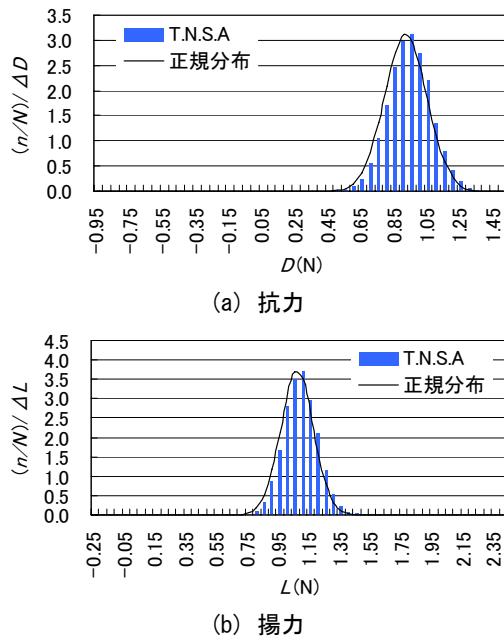


図-2 射流場の流体力の変動特性 (T.N.S.A., 40 l/s)

表-2(a)の計測流量を設定した。表中には跳水前のフルード数を示している。表中の記号は T (Tied) : 連結, P (Porous) : 透過, N (Non porous) : 不透過, S (Supercritical flow) : 射流, J (hydraulic Jump) : 跳水, A : A 断面を上流向, B : B 断面を上流向, を表す。例えば, T.P.S.A というケースは、透過型連結石礫の A 断面での計測で、水理条件としては射流ということである。また、表-2(b)に示すように、跳水場における流量 45 l/s の、TNJA, TNJB, TPJA, TPJB の 4 ケースについては、別途下流端に設置したゲートにより計測対象石礫上の跳水位置を変化させて、跳水位置の違いによる連結石礫に作用する流体力を計測した。各ケースのフルード数は表に示す通りである。なお、日本の急流河川においては床止め水叩き部の流れのフルード数は $F_r = 2.0 \sim 3.0$ であることが多いことが指摘されている¹⁰⁾。本研究で対象とした実験条件は、概ね実河川の状況を再現できるものと判断できる。

3. 実験結果および考察

(1) 流体力の変動特性

図-2 は 40 l/s の場合の射流場における不透過型連結石礫に作用する抗力、揚力の変動特性を示している。また、図-3 は、跳水場の不透過型連結石礫に作用する流体力の変動特性を示している。図に示すヒストグラムは、横軸に各流体力の値を、縦軸には、 n : 階級毎のデータ数、 N : データ総数、として、相対度数(n/N)／階級幅の値をとっている。図には各流体力の平均値 μ と標準偏差 σ を用いて、式(1)により表される確率密度関数より求められる正規分布を実線で示している。

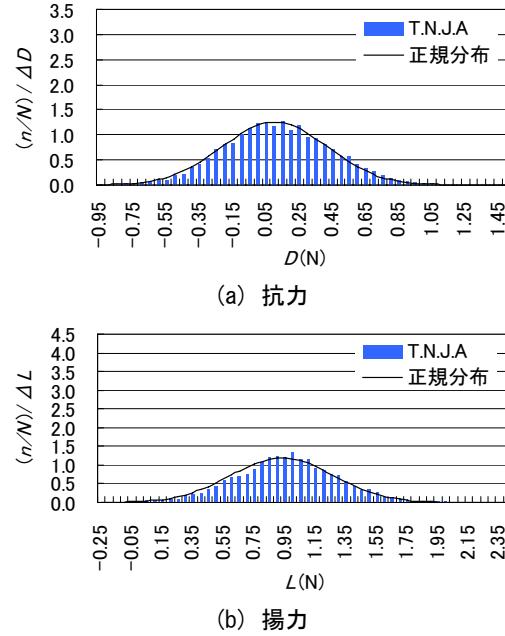


図-3 跳水場の流体力の変動特性 (T.N.J.A., 40 l/s)

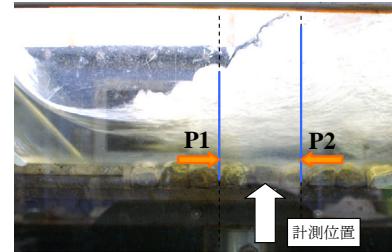


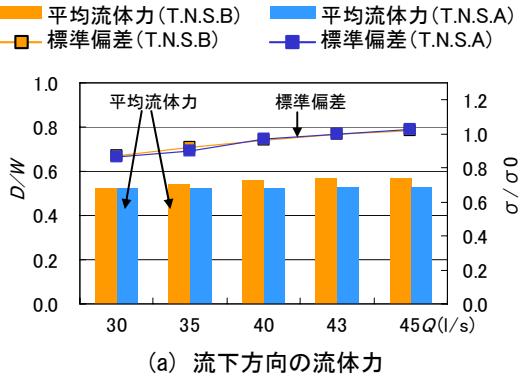
写真-4 作用線位置 (T.N.J.A)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

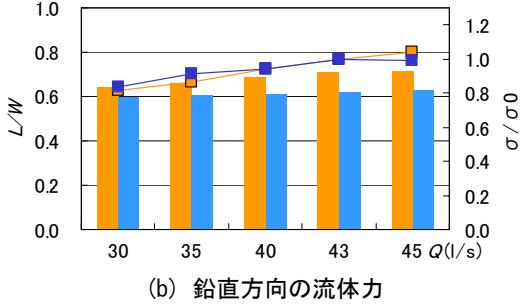
図より、跳水場の流体力変動の方が射流場における変動よりも大きくなることがわかる。また、いずれの場合も併記した正規分布とほぼ一致しており、データの変動は正規分布に従うものと考えて良い。跳水場の特徴として、抗力が負になる場合があることがわかる。計測ミスではないかということで何度も繰り返し計測を試みたが同じ結果であった。原因としては、跳水により、河床付近の流速が減少し流れによる抗力が減少した上に、写真-4 に示すように、対象連結石礫について上流側から作用する水圧 P_1 よりも下流側から作用する水圧 P_2 が大きくなることが考えられる。掲載していないが、同様な流体力の変動特性が透過型連結石礫においても見られた。内田ら¹¹⁾も、段落ち部下流部の流れにおいて同様な現象を確認しており、河床近傍の逆圧力勾配の影響を指摘している。

(2) 流量変化による流体力特性

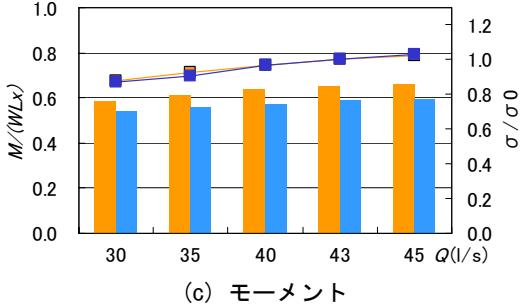
図-4, 5 は、水中重量 W (透過型 1.67N, 不透過型 1.74N) および連結石礫の流下方向の長さ L_x (8.4cm) を用いて無



(a) 流下方向の流体力

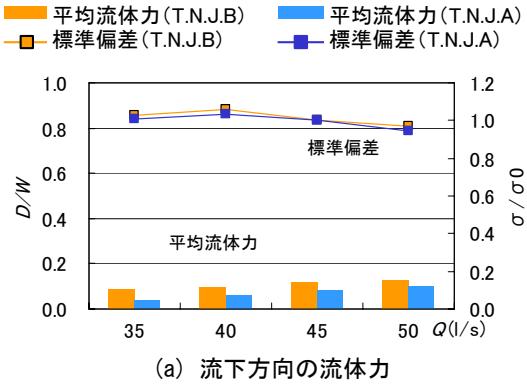


(b) 鉛直方向の流体力

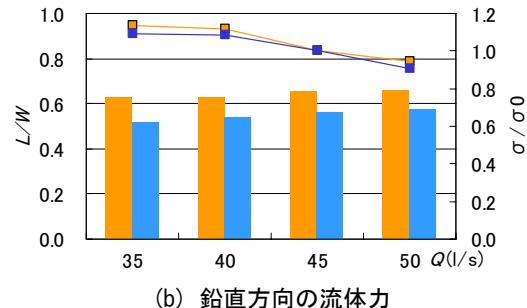


(c) モーメント

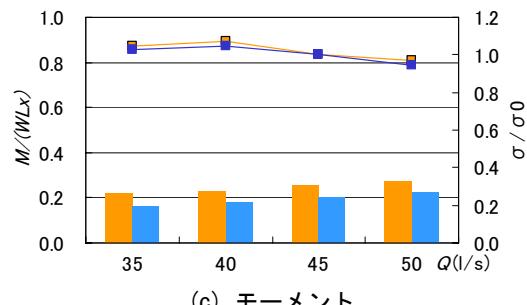
図-4 射流場における平均流体力と標準偏差



(a) 流下方向の流体力



(b) 鉛直方向の流体力



(c) モーメント

図-5 跳水場における平均流体力と標準偏差

次元化した時間平均流体力と、標準偏差 σ を破壊時の標準偏差で σ_0 無次元化した値を射流場と跳水場について示している。これらの図より、射流場、跳水場によらず流量が増すほど、平均流体力は大きくなることがわかる。また、跳水場の場合には流下方向の力 D 並びに作用モーメント M が射流場よりもかなり小さくなることがわかる。一方、標準偏差についてみると、射流場では流量の増加とともに標準偏差は大きくなるが、跳水場では 40 l/s 程度で最も大きくなり、それより流量が大きくなると逆に標準偏差が小さくなる。これは、流量が大きくなるほど跳水前の水深が増し、フルード数が若干ではあるが減少したためではないかと考えられる。また、標準偏差は射流場よりも跳水場の方が概して大きくなる。

(3) 破壊時の流体力特性

本研究では、前節でも述べたように流体力変動がかなり大きくなる点を考慮して、時間平均流体力に流体力変動の寄与分 3σ を加えた流体力で破壊時の特性を検討する¹²⁾。図-6は、図-4と同様に無次元化した射流場の破壊時における流量に対する射流場と跳水場における時間平均流体力と変動分 3σ を加えた流体力を示してい

る。図-6(a)の射流場の結果より、揚力 L は不透過型連結石礫の方が大きいが、回転モーメント M 、抗力 D は、同程度か透過型連結石礫の方がやや大きくなることがわかる。実験では、不透過型連結石礫が流失したことから破壊に対する影響度が高いのは揚力 L であると推察される。また、図-6(b)の跳水場の結果より、 M 、 D は透過不透過によらず同程度であるが、不透過型連結石礫の場合には、揚力 L が射流場における作用流体力よりもかなり大きくなることがわかる。

(4) 破壊の可能性の検討

連結石礫の破壊形態¹³⁾として、図-7に示す「めくれ」、「滑動」、「抜け出し」が考えられるが、群衆中では「滑動」による破壊は発生し難いことを考慮して、「めくれ」、「抜け出し」破壊を対象として検討を行う。図-8は平均流体力 D 、 L 、 M を用いて求めた力の作用線位置の代表例を示している。図より、連結石礫の重心位置が、連結石礫の中心位置にあるとすると、作用線は、ほぼ連結石礫の重心付近を通ることがわかる。「めくれ」破壊を検討する際には、適切な作用位置を設定する必要がある。本研究では、実験結果を考慮して、図のように連結

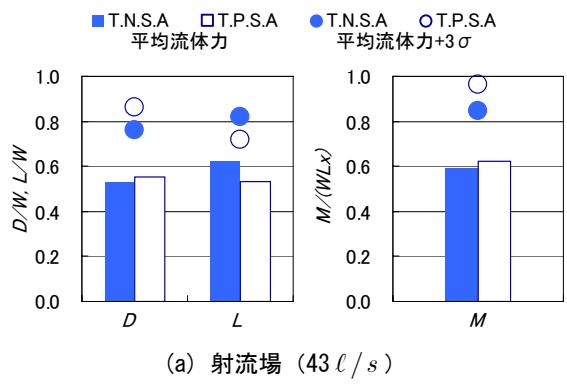
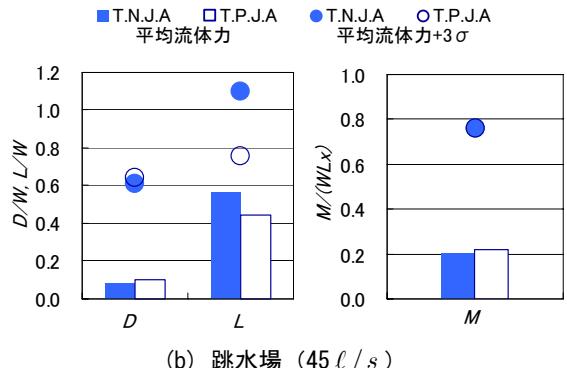
(a) 射流場 ($43 \ell/s$)(b) 跳水場 ($45 \ell/s$)

図-6 破壊時の作用流体力 (射流場の破壊流量時)

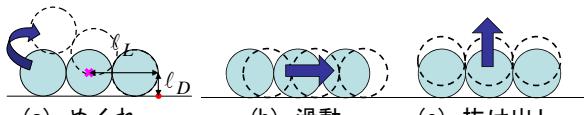


図-7 破壊形態

石礫の重心位置を中心として、 M 点を中心とした破壊モーメントと連結石礫の自重 W による抵抗モーメントの比を破壊指標 F_M により検討する。また、抜け出し破壊については、揚力 L と水中重量 W の比による破壊指標 F_L により検討する。

$$F_M = (D \cdot \ell_D + L \cdot \ell_L) / (W \cdot \ell_L) \quad (1)$$

$$F_L = L / W \quad (2)$$

図-9は、破壊指標を射流場と跳水場について示している。図において、破壊指標が1以上になると破壊の可能性があることを示している。図より、射流場では、「めくれ」と「抜け出し」破壊の両方の可能性があることがわかる。また、透過型連結石礫の場合は石礫に作用する揚力が小さくなるため、抜け出しに対する危険性は低くなり、主にめくれ破壊に対して考慮すればよいと判断できる。この結果からも不透過型連結石礫より透過型の方が破壊に対して安全であると判断できる。つぎに、破壊に対する揚力と抗力の寄与の度合いを次式により検討する。

$$F_M - F_L = (D \cdot \ell_D) / (W \cdot \ell_L) \quad (3)$$

式(3)において、 F_M と F_L の差は、破壊に対する抗力の寄与分と考えることができる。表-3は、式(3)を F_L で除した値を示している。これより、破壊に対する揚力の

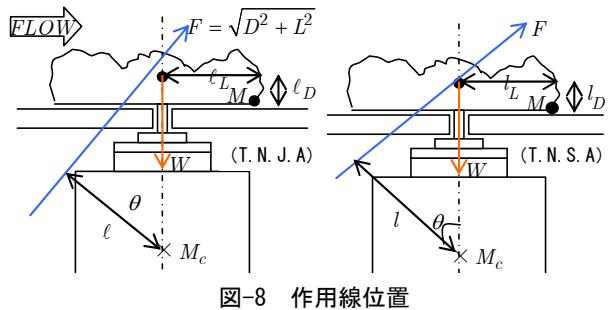


図-8 作用線位置

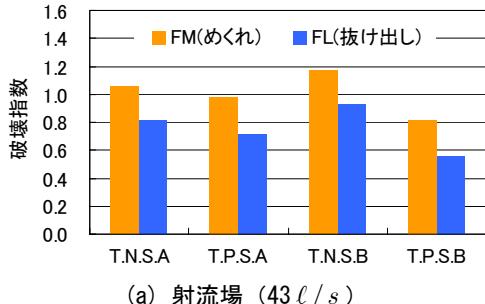
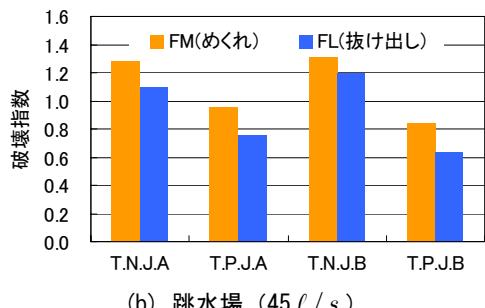
(a) 射流場 ($43 \ell/s$)(b) 跳水場 ($45 \ell/s$)

図-9 破壊指数

表-3 揚力に対する抗力の寄与

Case	$(F_L - F_M) / F_L$	Case	$(F_L - F_M) / F_L$
T.N.S.A	0.29	T.N.J.A	0.17
T.P.S.A	0.37	T.P.J.A	0.26
T.N.S.B	0.26	T.N.J.B	0.15
T.P.S.B	0.47	T.P.J.B	0.31

影響が大きいことや、跳水場より射流場の方が抗力の影響が大きいことがわかる。また、透過型連結石礫の方が不透過連結石礫よりも抗力の影響が大きくなることがわかる。

(5) 跳水位置の違いの検討

ここでは、写真-4に示すように跳水位置の違いによる破壊の危険性の違いについて前節で採用した破壊指標により検討する。写真-4において、Case 2は前節までの跳水場と同様な水理条件である。図-10は「抜け出し」と「めくれ」破壊に関する破壊指標を示している。

図より、「めくれ」破壊については、不透過型連結石礫ではCase 2の位置が最も破壊の危険性が大きく、透過型連結石礫の場合はCase 3の危険性がやや低くなるが跳水位置による変化は余り見られない。つぎに、「抜け出し」破壊については、不透過型連結石礫の場合には、透過型と同様にCase 2が最も危険であることがわかる。

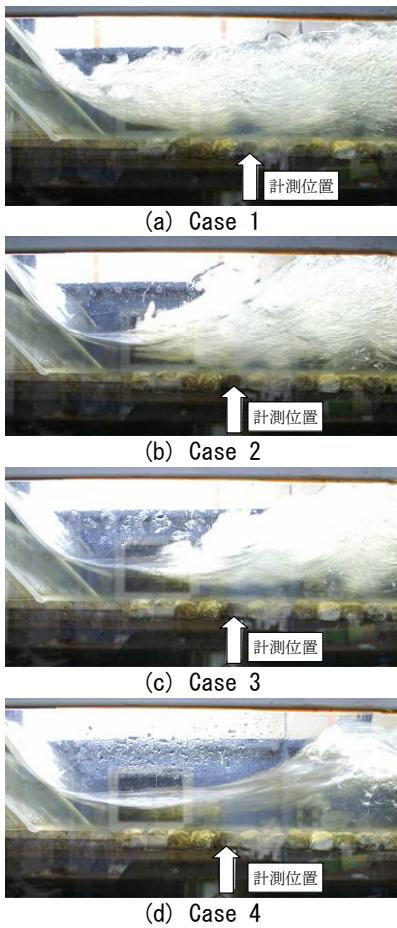


写真-4 跳水位置と流況, $Q=45$ (l/s)

透過型連結石礫の場合には跳水位置による変化は余り見られない。いずれのケースにおいても透過型連結石礫の方が不透過型連結石礫よりも安全性が高くなる。

4. 結論

本研究は、堰下流部の射流場、跳水場における連結石礫工の安定性を検討した。以下に得られた知見を示す。

- 作用流体力の変動は正規分布に従い、跳水場の変動がかなり大きくなる。
- 射流場の平均流体力と標準偏差は流量の増加とともに大きくなるが、跳水場では平均流体力は増加するが跳水強度の影響により、標準偏差は減少した。
- 射流場では、「めくれ」による破壊の可能性が高く、跳水場では「めくれ」と「抜け出し」破壊の両方の可能性がある。
- 跳水の発生位置にかかわらず、透過石礫の方が不透過石礫より安全性が高くなる。また、透過石礫の場合は、跳水位置による破壊危険度の変化は余り見られないが、不透過石礫の場合は、跳水の中程の破壊危険度が大きくなる。

参考文献

- 前野詩朗、道奥康治、森永智、大西利典：自然石を用いた

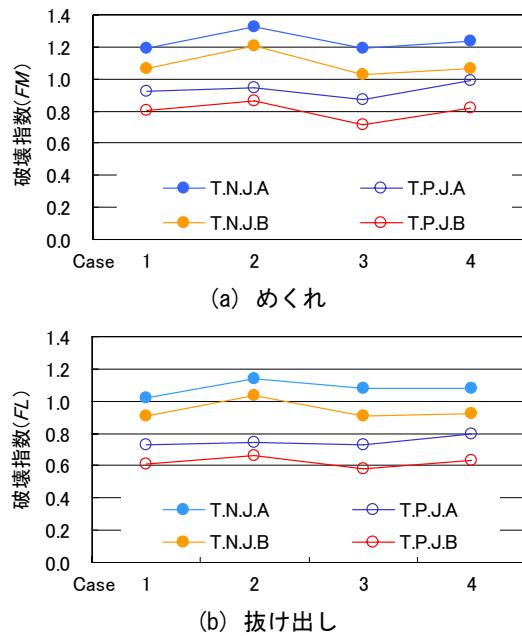


図-10 跳水位置の変化による破壊指標 ($45 l/s$)

- 堰の水理特性、水工学論文集、第46巻、pp.493-498、2002。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 前野詩朗、藤原実咲、富田晃生、山村明、伴熊公子：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。
- 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、水工論文集、第50巻、pp.889-894、2006。
- (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。
- 川口広司、諏訪義雄、高田保彦、末次忠司：護床工下の河床材料の抜け出し及び下流跳水の非定常性と護床工の応答特性、河川技術論文集、第8巻、pp.243-248、2002。
- 内田龍彦、河原能久、池田麻矢、渡邊明英：段落ち部下流の礫河床に作用する流体力とその変動に関する基礎的研究、第4回流体力の評価とその応用に関する講演集、pp.51-56、2007。
- 鬼東幸樹、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.843-852、2006。
- 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。

(2007. 9. 30 受付)