連結石枠型工の中詰め材の掃流限界評価

EVALUATION ON TRACTIVE CRITERIA OF FILLED GRAVEL IN FRAME-SHAPED CONNECTED STONE

前野詩朗¹·藤原実咲²·山村 明³·忰熊公子⁴ Shiro MAENO, Misaki FUJIWARA, 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正会員 工修 株式会社建設技術研究所 大阪本社防災室 (〒541-0045 大阪市中央区道修町 1-6-7) 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)

The authors developed a frame-shaped connected stone as a nature oriented bed protection work. For these types of hydraulic structures, it is necessary to fill appropriate size gravels in the frame to protect the filled gravels against scouring. However, it is considered that some scouring of the filled graves can be allowed in designing this type of frame-shaped connected stone. Therefore, in this study, hydraulic characteristics of the frame-shaped connected stone and critical tractive force on the filled gravels were investigated by small scale experiments. Experimental results show that the velocity decreases in the frame and the critical tractive force increases due to the frame of the connected stone. The critical tractive force of the frame-shaped connective stone is similar to that of gabion mattresses.

Key Words : nature friendly structure, natural stone, connected stone, filled gravel, tractive criteria

1. はじめに

平成9年の河川法の改正により、治水、利水に加 えて河川環境の整備と保全が河川環境の目的に加わ った.その後,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,必 ずしも多自然とはいえない例も見受けられたため, 平成18年度からは「多自然川づくり」と呼ばれ、さ らに自然に近い川づくりが求められるようになっ た. このような背景のもと、自然石を利用した自然 に近い水理構造物を対象とした研究が進められてい る^{1), 2), 3) 4), 5)}. これらの研究により, 自然石による堰 などの構造物の水理機能は明らかにされつつある. 一方,自然石で構築される構造物は,前野ら^{2),3),5)}が 指摘しているように、堰体内に自然の多様な空間を 有し, 河川生態系に優しいのみならず, 曝気機能も 期待できるため,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,連結石礫の効果や設計に必要となる抗力係数, 揚力係数が明らかにされている^{6), 7), 8), 9), 10)}.

本研究は、新たに多自然河床保護工として、写真 -1の赤枠に示すような5つの石礫で構成される連結 石を組み合わせて構築される連結石枠型工を提案す



連結石枠型工

る.本工法では、写真の青枠で示す部分に河川工事 の際に現地で発生する石礫を中詰め材として利用す るため、中詰め材の掃流限界を明らかにする必要が ある. このような河床保護工の中込材の安定性を取 り扱った研究としては、金網による籠工や化学繊維 による袋体工の変形と中込材の挙動に着目して設計 限界掃流力を明らかにした研究がある. 例えば, 藤 田ら¹¹⁾は、コロラド大学で行われた水理実験により、 籠工の無次元限界掃流力が籠の無い場合の2倍程度 0.10 になるという結果を紹介している. この実験で は、籠工の変形が考慮されていなかったため、藤田 ら¹¹⁾は,籠の変形を許容変形量以下に抑える場合の 設計法を検討し, 籠無しの場合の中込材の無次元限 界掃流力は0.047で、柔らかい金網では0.06、剛なも



ので0.12 となることを明らかにした.また,高田ら¹²の 実験によると,無次元限界掃流力が0.05の中込材を用い た袋体工の中込材のそれは0.06 となり,籠マット工の場 合0.30 となることを明らかにしている.これらの研究か ら,籠や袋を用いることにより限界掃流力を大きくする ことができることがわかる.

本研究で提案する連結石型枠工では、金網は使用しないため、構造的には図-1(a)に示す木工沈床等に相当すると考えられる.この場合、護岸の力学設計法¹³⁾にも示されているように、中詰め材の設計無次元限界掃流力は0.05とするのが妥当であろう.一方、本研究で提案するような連結石枠型工を設置する場合には、図-1(b)に示すように、連結石枠型工が掃流されない限り、枠型工の高さ h_f の半分程度の高さ h_a まで中詰め材の流失を許容しても、枠型工自体の構造上の問題は生じないものと考えられる.そこで、本研究では、これまで検討されていない中詰め材の流出を許容する場合の掃流限界を提示することを目的とする.なお、実物の連結石枠型工は強固に連結されており、中詰材を敷きならす工程で枠型工の形状が乱されることはない.

2. 実験およびデータ整理の概要

(1) 実験装置の概要

実験に用いた水路は図-2 に示すような長さ 16m, 幅 0.6m, 勾配 1/100 の循環水路である.実験では,上流端 から 10m~11m の①区間の中央付近を計測地点とした. 模型縮尺は実物の 1/20 程度を想定し,図中の①,②の領 域に粒径が 2.5~3.0cm 程度の石礫で構成される枠型工を 設置した.石礫の隙間は数 mm 程度あり,若干の流れは 生じると考えられる.①の区間には,後述する平均粒径 *D_m* が 7.4mm の石礫を中詰め材として詰め,②の区間に



図-3 流速計測位置

は、中詰め材が不足したため、粒径が同程度の直径 7mm のビー玉(比重は2.50で石礫の比重2.65と同程度である) を中詰め材として用いた. 写真-2 は、①の領域の枠型工 と中詰め材の設置状況を示している. また、③の区間に は、河床粗度による乱流境界層を十分発達させるため、 枠型工より粒径が大きな 3cm~3.5cm 程度の礫を全面に 敷き詰めた.

(2) 流速・水位の計測法

河床付近の流速の計測には3次元超音波ドップラー流 速計(NORTEK 社製: Vectrino)を使用した.ただし, 装置の特性上,水面下9cm程度までは同流速計が使用で きないため,その間は3次元電磁流速計(KENEK 社製: VMT3-200-13P型)を用いた.各測点2分間計測(サン プリング周波数は超音波流速計が 30Hz,電磁流速計が 20Hz)し,結果の整理にはその平均流速を用いた.なお, 両流速計による平均流速が同一計測点で同程度の値を示 すことは予備実験により確認した.流量50ℓ/sの場合に ついては,図-3に示す地点で流速分布を計測した.その 他のケースでは,図の(R4,4)の地点で流速の鉛直分布を 計測した.水深の計測には,ポイントゲージを使用した. また,計測地点から上下流60cmまでの間を10cm間隔で, 150cmまでの間を 30cm 間隔でポイントゲージを用いて



区4 加大10元11別120 (田方16)元114,末計

水位を計測した.

(3) 中詰め材

使用する中詰め材は、実物の枠型工の高さの $1/3 \sim 1/4$ 程度で、現地で得られることが可能な 15cm 程度の粒径 を想定した. 模型縮尺を考慮して、実験では、粒径 5~ 8mmの川砂利で、平均粒径 $D_m = 7.4$ mm、比重 2.65、間 隙率n = 0.38 程度の石礫を用いた. なお、図-1(b)で示し た流失が許容される中詰め材高さ h_a を底面から 1.38cm とした. これは、直径が中詰め材の平均粒径 $D_m = 7.4$ mm と等しい球体を 2 層敷設した高さである.

中詰め材の変形量の測定に際しては、まず、枠型工と同じ高さまで中詰め材を詰めておき、粒子の移動が認められなくなる 60 分間通水した.その後、枠Aの中央(図-3のR4,4の位置)において鉛直流速分布を計測した後、通水を止めて、図-4に示すA~Dの4つの枠内において図に示す計測点5点と枠内の最大、最小洗掘箇所の計7点において洗掘深をポイントゲージにより計測した.これらの計測を流量の最も少ない45ℓ/sの条件で実施した後、流量を増加させて実験を行った.

(4) 流量条件

予備実験の結果,許容流失限界中詰め材高さ h_a 程度ま で中詰め材が流失するための流量条件が 50 ℓ/s から $60\ell/s$ 程度であったことを考慮して、本実験では、中詰 め材の流失限界を検討するために、流量を 45 ℓ/s から $70\ell/s$ まで 5 ℓ/s 間隔で流量を増加させて、合計 6 つの 流量ケースで実験を行った.

(5) 無次元掃流力,相当粗度の算定

本実験で検討する無次元掃流力,相当粗度は下記により求めた.

・無次元掃流力 τ*

$$\tau_* = u_*^2 / (s \cdot g \cdot D_m) \tag{1}$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、s: 石の比重、 D_m : 中詰め材平 均粒径である.ここでの摩擦速度 u_* は、表面に凹凸や内 部に空隙を有する護岸ブロックの試験法マニュアル¹⁴に 示してある手法を準用し、枠内中央部の鉛直分布測定結 果より対数則を仮定して算出した.以下に摩擦速度 u_* の 算出方法について示す.

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log_{10} \frac{z - z_0}{k_s} + 8.5$$
 (2)



 $u = 5.75u_* \log_{10}(z - z_0) - 5.75u_* \log_{10} k_s + 8.5u_*$ (3) ここに、u: 計測地点毎の流れ方向の流速、z: 計測地点 の水深、 z_0 : 流速原点位置、 k_s : 相当粗度である. 式(2) の粗面対数則を展開すると式(3)が得られる. 式(3)の z_0 を仮定して流速 $u \ge \log_{10}(z - z_0)$ の関係を片対数グラフ にプロットし対数近似をとると、流速の傾きは5.75 u_* と 等しくなることがわかる. このことより u_* を算出した. ・相当粗度 k_s

式(2)より水深別の相当粗度を逆算し、その平均値とした.

3. 実験結果および考察

(1) 水深分布

図-5 に計測地点上下流の代表的な水深の変化として 流量 50 ℓ/s と 70 ℓ/s 通水時の計測結果を示す. 図より, 計測位置近傍では,水深はほぼ一定値を示している. ま た,図には示していないが,計測位置上下流約 0.5m の 鉛直流速分布はほぼ一致した. したがって,概ね等流状 態が再現されているもの判断できる.

(2) 流速分布

図-6は、50ℓ/s流した場合の連結石枠型工付近の断面 流速分布を示している(R1~R4は図-3参照).図のx,z 軸は、それぞれ流下方向、鉛直上向きを示す.また、矢 印の色は鉛直方向の流速成分wを表しており、暖色系が 鉛直上向き、寒色系が下向きである.図より、R3、R4 断面では枠型工内に流れが流入し、その後流出する様子 がわかる.また、枠内では中詰め材上面近傍で流れがか なり低減する.一方、R1,R2断面では、枠となる石礫の 形状に沿うように流れ、枠工の上面近傍の流速は、枠工 内ほどは低減しないことがわかる.このことより、枠型 工内部では、流速が低減し、掃流力が低減することが推 察される.以上の点を考慮して、以下において、中詰め 材の掃流抵抗を検討する際には、枠の遮蔽効果と中詰め



枠型工の中央部の流速(図−3 の R4,4 の計測点)を用いることにする.

次に、実験結果を整理する際に必要となる流速原点位 置 $z_0 を検討する. z_0$ は、護岸ブロックの試験法¹⁴⁾では、 ブロック体積を平面的に見た粗度要素支配面積(群体と してブロックを設置したときの粗度要素(ブロック)1 個が受け持つ面積)で除した値としている.中詰め材が 間隙を有することと、中詰め材の高さを2層程度と想定 していることを考慮して、本実験にも適用することにす る.間隙率をnとして、中詰め材全体高 h_a に(1-n) を乗じた $h_0 = (1-n)h_a$ となる(以下、本研究では h_0 を中 詰め材平均高と呼ぶ).連結石を用いた前野ら⁷の実験に より流速原点位置が概ね中詰め材平均高になることは示 されているが、確認のため、本研究においても、流速原 点位置 z_0 として、 h_a と h_0 のどちらが妥当であるかを検 討する.

図-7 は、代表的な例として流量 70 ℓ/s 通水時の枠型工 内中央部の主流速u と水深hの関係を片対数グラフにプ ロットしたものである。破線は流速原点位置 $z_0 \approx h_a$ あ るいは h_0 と仮定することにより求めた u_* , k_s を用いて、



式(2)より算出した対数則流速分布である.図より,流速 原点位置 z_0 は、中詰め材平均高 h_0 と仮定した方が計測 点全体に渡って対数則に良く一致することがわかる.よ って、本研究では、流速原点位置 z_0 を中詰め材平均高 h_0 とした.なお、 u_* を算出するための対象流速範囲は、最 も対数則に従う 3cm から水面付近までとした.

(3) 中詰め材の流失状況

前述のように本研究では、流失が許容される中詰め材 高さを底面から 1.38cm とした.これは、直径が中詰め材 平均粒径 $D_m = 7.4$ mm と等しい球体を 2 層敷設した高さ である.本研究では、この高さまでの洗掘を許容すると いう意味合いで許容中詰め高と呼ぶ.図-4 に示した地点 A~Dの枠内の中詰め材高さhの変化について、流量を パラメータとし、石枠の高さ $h_f = 2.6$ cm で無次元化した ものを図-8 に示す.図には、許容中詰め高を青い実線で 示している.また、平均値と枠型工内の最小、最大洗掘 箇所の値も合わせて示している.図-9 は、最大洗掘(max) と最小洗掘(min)の発生場所をA~Dの枠を重ねて平面 的に示している.これらの図より、流量が小さい場合

(50 ℓ/s 以下)には、最大洗掘と最小洗掘の生起箇所は かなりばらつくが、それより流量が多くなると、枠型工 内の下流側の方が、より洗掘が進むことがわかる.また、 許容中詰め高に着目すると、流量が55 ℓ/s 以上になると 許容中詰め高を下回るまで洗掘が進むが、流量が50 ℓ/s 以下では、許容中詰め高程度までしか洗掘されないこと がわかる.



図-8 各地点での洗掘状況(図中の横軸は図-4参照, ave は平均値, max, min はそれぞれ最大, 最小洗掘箇所の値)



図-9 最大洗掘(max)と最小洗掘(min)の生起箇所(A~Dは図-4参照)

以上の結果より,流量 50 ℓ/s 通水時の掃流力であれば, 中詰め材の破壊が生じないものと判断できるので,本研 究では流量 50 ℓ/s のときに得られる無次元掃流力を流失 限界無次元掃流力 τ_{*c} とすることにした.

(4) 流出限界無次元掃流力

各流量において計測された流速分布をもとに、無次元 掃流力 τ_* および連結石枠型工の高さ $h_f = 2.6$ cm で無次 元化した無次元相当粗度 k_s/h_f を算出した結果を表-1 に示す.流量が増加するのに伴い掃流力も増加している ことがわかる.本実験では、流量が大きくなると相当粗 度 k_s が連結石枠型工の高さ h_f の4~5倍程度とかなり大 きくなった.条件は異なるが、図-10(a)に示すような直 径d = kの球を千鳥に配置した 3次元配置の球形粗度を 用いて行われた Shlichtingの実験結果¹⁵によると、 λ/k が 2付近で k_s/k の最大値が4程度となることが示されてい

表−1 各流量の無次元掃流力 *τ*_{*} と無次元相当粗度 *k_s* / *h_f*

流量(ℓ/s)	45	50	55	60	65	70
$ au_*$	0.069	0.091	0.100	0.127	0.160	0.178
k_s / h_f (cm)	1.23	1.96	2.23	3.38	4.42	5.52



る.また、図-10(b)に示すような高さkの桟を溝の長さ s、間隔 λ で設置した 2 次元の桟粗度を用いて行われた 既往の実験結果を、足立が $1 \le t/k \le 2, 2.7 \le t/k \le 4$ の条件 で整理した結果¹⁵⁾によると、s/kが 10 程度で k_s/k の最 大値が5 程度となることが示されている.これらの実験 による相当粗度の大きさ k_s/k は、本研究で得られた相当 粗度と同程度の大きさである。本研究で用いた連結石枠 型工では、枠を構成する石礫を球体として捉えることが でき、また、枠部分を桟粗度として捉えることができる. このことから本研究で得られた相当粗度は概ね妥当な大 きさと判断できる.

次に、前節でも述べたように流量 50 ℓ/s の掃流力を中 詰め材の掃流限界とすると、**表**-1 より、流失限界無次元 掃流力 $\tau_{*c} = 0.091$, 無次元相当粗度 $k_s/h_f = 1.96$ ($k_s = 5.1$ cm) が得られる.流失限界無次元掃流力 0.091 は、藤 田ら⁷⁾ が行った剛な籠工の限界掃流力 0.12 と柔らかい金 網の限界掃流力 0.06 の中間程度となり、連結石枠型工は 籠工と同程度の効果を有することがわかった.また、相 当粗度ついては、中詰め材そのものの k_s が平均流径 D_m 程度であると仮定すると、中詰め材の相当粗度は 7.4mm となり、枠型工の相当粗度の方が 5.1cm と数倍程 度大きくなる.理由の 1 つとして、連結石枠型工の粗度 の影響が挙げられる.すなわち、枠型工設置により、枠 に依存する形で相当粗度が増加し、それに伴い枠内での 流速が減少したため中詰め材に作用する流体力が減少し たと考えられる.

護岸の力学設計法¹³⁾では、木工沈床等を設計する場合 には枠の影響を考慮せず、中詰め材に対する限界掃流力 $\tau_{*c} \ge 0.05$ としている.このような条件を課すことによ り、枠自体の破壊を防ぐこともできる.一方、本研究で は、連結石による枠組が掃流されない条件を課して設計 するため、中詰め材の多少の流出を許容することにより、 中詰め材の設計基準を緩和できる.すなわち、粒径の小 さな現地発生石礫を中詰め材として利用できるようにな ることが示された.

4. 結 論

本研究では、多自然河床保護工として、連結石枠型工 を提案し、枠型工の水理特性と、その中詰め材の設計限 界掃流力を検討した.その結果、以下のことが明らかに された.

1) 連結石枠型工の中詰め材の流速原点位置は中詰め材 平均高となる.

2) 中詰め材の多少の流出を許容する場合には、中詰め材 の無次元限界掃流力を大きくすることができる.

3) 連結石枠型工の中詰め材の限界掃流力は, 籠工のそれ と同程度である.

4) 中詰め材の限界掃流力は,連結石枠型工の枠により規 定される.

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 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.
- 4) 道奥康治・南條雅志・石垣泰輔・前野詩朗: 捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル,土木学会論文集, No. 782/II-70, pp.31-50, 2005.
- 5) 前野詩朗, 富田晃生, 脇野修平: VOF-DEM 連成モデルに よる捨石堰の破壊予測, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.781-786, 2008.
- 前野詩朗,藤原実咲,富田晃生,山村 明, 忰熊公子: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.
- 前野詩朗,山村 明, 忰熊公子:堰下流部の連結石礫河床 保護工の流体力評価,水工学論文集,52巻,2008.2.
- 前野詩朗,藤原実咲,富田晃生,山村 明, 忰熊公子:群 体・上流端設置時の連結石礫の流体力評価,水工学論文集, 52 巻,2008.2.
- 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.
- 10) 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.
- 11)藤田光一,諏訪義雄,東高徳,平林桂:流れによる変形特 性に着目した新しいふとんかご設計の試み,河川技術に関 する論文集,第6巻,pp.357-362,2000.
- 12) 高田保彦,末次忠司,諏訪義雄,東高徳,平林桂:袋体工の流れに対する応答特性と設計上橋呂すべき事項について、河川技術論文集,第7巻、pp.127-132,2001.
- 13) 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.
- 14) (財)土木研究センター(2003):護岸ブロックの水理特性試験法マニュアル(第2版)
- 15) 椿東一郎:水理学I,森北出版㈱, pp.90-91, 1976.