

連結石枠型工の中詰材の流失限界に関する研究

(株)建設技術研究所 正会員 ○藤原実咲

岡山大学 正会員 前野詩朗

岡山大学 学生会員 富田晃生

日建工学(株) 正会員 杵熊公子 日建工学(株) 山村明

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った。そのなかで、自然石を用いた河川工法が注目を浴びている。しかし、自然石は堰や水制周辺部の強度の流体力が作用する場においては強度不足が懸念される。そこで著者らは、自然石を連結することにより外力に対する破壊抵抗力を増すことのできる工法を提案し、連結石礫の抗力、揚力係数などを明らかにしてきた^{1),2)3)}。本研究では、新たに、連結石を写真-1.1に示すように連結石礫を基盤目状に設置することで石枠を作り、石枠内に個々に独立した石礫を充填して設置する工法を提案する。この工法は、現地で発生する砂礫を中詰め材として利用できるため、さらに自然に近い工法といえる。しかし、現段階では、中詰め材の設計方法が確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、実河川に適用するための設計基準の確立することを目的として、中詰め材の移動限界掃流力について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 測定項目

本実験は、移動限界無次元掃流力について計測を行

った。中詰め材の流出状況を見ながら流量 45, 50, 55, 60, 65, 70 l/s の 5 段階に分けて通水を行い、水面形、中詰め材中央の鉛直流速分布、中詰め材の変形量を計測した。

2.2 実験水路

実験に用いた水路は、図-2.1に示す長さ 16m、幅 0.6m、高さ 0.4m、勾配 1/100 の可変勾配型循環水路である。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てある。実験水路横断面図を図-2.2に、中詰め材敷設状況を写真-2.1に示す。本実験では、ピット中央部を計測地点とし、上流区間において十分に境界層が発達するように、また、下流区間においては石礫による低下背水

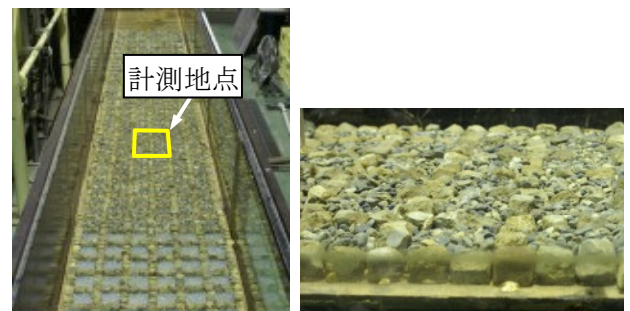


写真-2.1 中詰め材敷設状況



写真-1.1 連結石礫

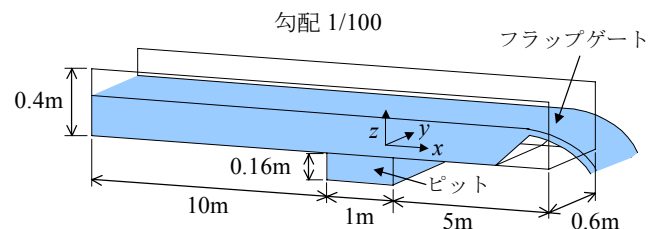


図-2.1 実験水路

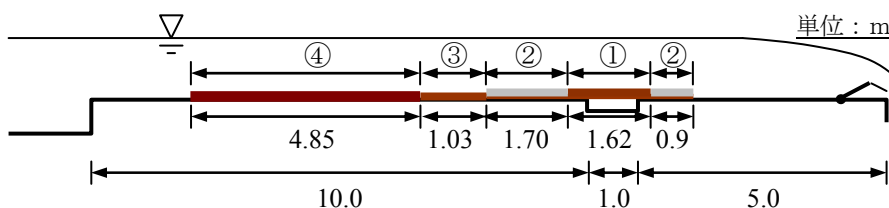


図-2.2 実験水路横断面図

- ①川砂利 ($D_m = 7.4\text{mm}$)
- ②ビー玉 ($\phi = 7\text{mm}$)
- ③石 ($\phi = 3\text{cm}$ 弱)
- ④石 ($\phi = 3.5\text{cm}$ 程度)

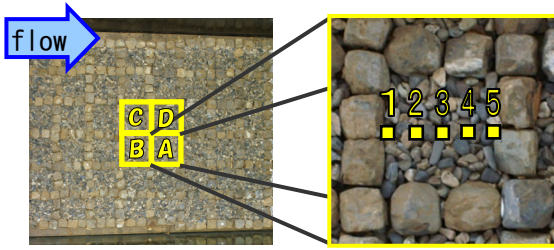


図-2.3 中詰材敷設状況

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試験区間を設定した。

2.3 計測機器

流速の計測は、2次元電磁流速計（KENEK 社製：VM-802H 型）と超音波ドップラー流速計（NORTEK 社製：Vectrino）を使用した。水深の計測は、ポイントゲージを使用した。

2.4 中詰材

使用する中詰材は、 $\phi = 5 \sim 8\text{mm}$ の川砂利で、平均粒径 $D_m = 7.4\text{mm}$ 、空隙率 0.38 である。

2.5 計測位置

・水面形

計測地点から 60cm までの間を 10cm 間隔で、210cm までの間を 30cm 間隔で上下流側に 11 点、計 23 点について計測を行った。

・中詰材変形量

計測地点に図-2.3 に示すように A～D の地点を設け各地点において図-2.3 に示す 5 点と最大値、最小値の計 7 点において洗掘深を計測した。

2.6 通水条件

本実験では、通水状態が等流になるよう下流端フラップゲートを調節した。図-2.4 に代表的な水面形として流量 700 l/s 通水時の計測結果を示す。図より、計測位置近傍では、水深はほぼ一定の値を示しており、等流状態が再現されているものとして検討を行う。

2.7 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_*

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

ここに、 u_* ：摩擦速度、 s ：石の比重、 D_m ：平均粒径である。ここでの摩擦速度 u_* は鉛直分布測定結果

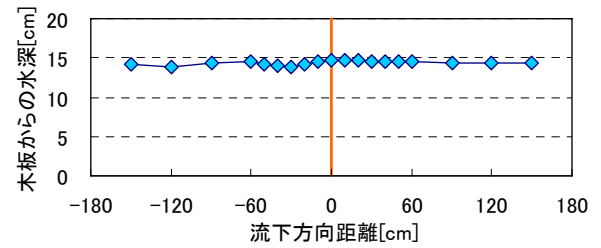


図-2.4 水面形

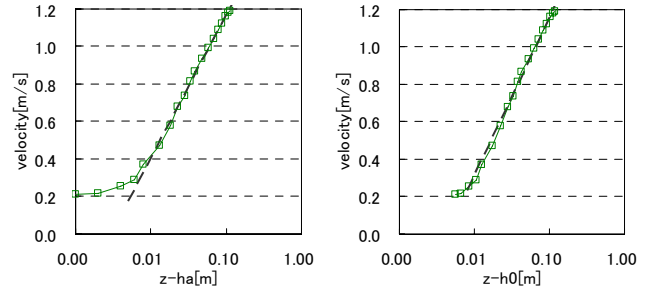


図-3.1 流速分布

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。

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

$$u = 5.75 u_* \log_{10}(z - z_0) - 5.75 u_* \log_{10} k_s + 8.5 u_* \quad (3)$$

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)の粗面對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 と $\log_{10}(z - z_0)$ 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. 実験結果の検討

3.1 流速原点位置と対象流速範囲の検討

実験結果を整理するにあたり、まず流速原点位置 z_0 を決定する。 z_0 は、護岸ブロックの試験法⁴⁾ではブロック体積を粗度要素支配面積（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。これを本実験に適用すると、中詰材全体の高さに（1-空隙率）を乗じたものとなる（以下、中詰材平均高 h_0 と呼ぶ）。また、一方で、田代ら⁵⁾は、護岸ブロックの水

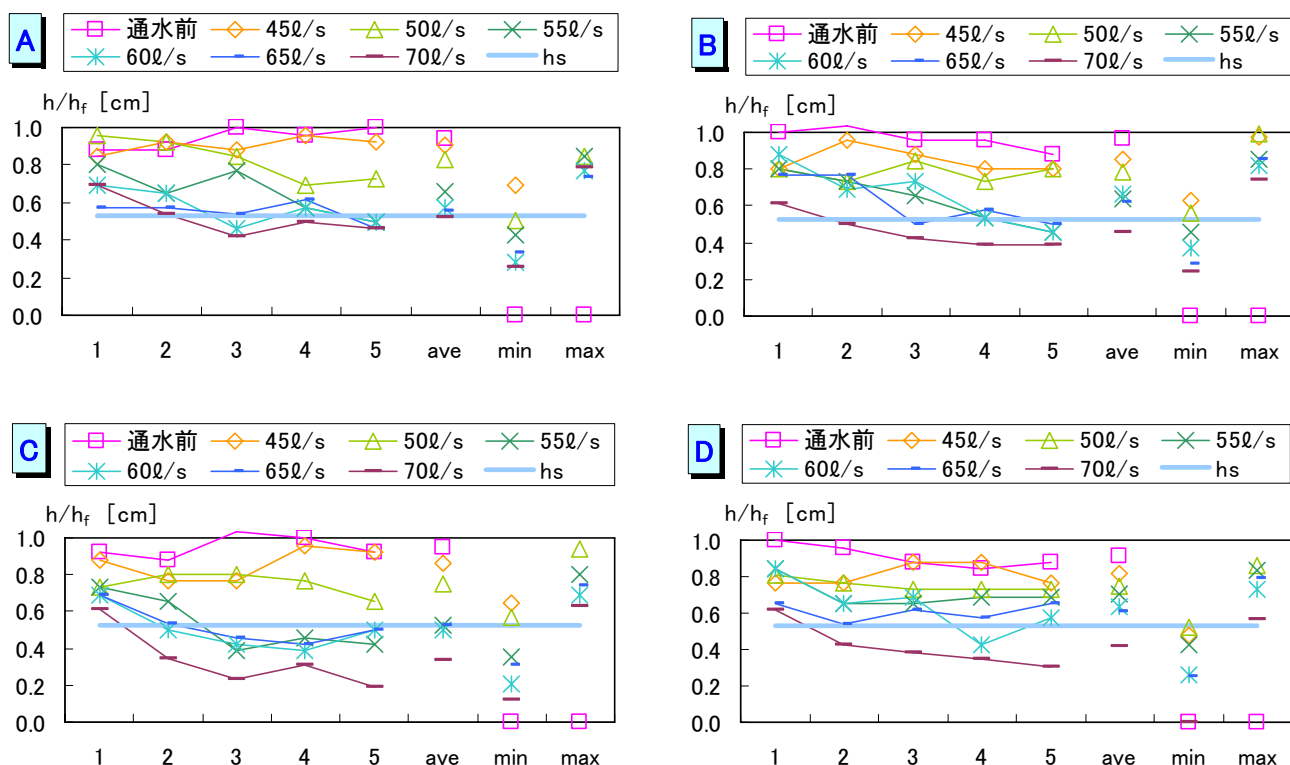


図-3.2 各地点での洗掘状況

表-3.1 各流量の τ_* と k_s

流量(ℓ /s)	45	50	55	60	65	70
τ_*	0.069	0.091	0.100	0.127	0.160	0.178
k_s (cm)	3.2	5.1	5.8	8.8	11.5	12.7

理実験よりブロック全体高さ（以下、中詰材全体高 h_a と呼ぶ）を流速原点位置 z_0 とする方が対数則に従うとしている。よってここでは、流速原点位置 z_0 に中詰材平均高 h_0 と中詰材全体高 h_a を仮定して両者の検討を行った。

図-3.1 は、代表的な例として流量 70 ℓ /s 通水時の流速 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。点線は流速原点位置を決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、中詰材平均高 h_0 と仮定した方が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。

3.2 洗掘に関する結果と検討

本研究では、流失が許される中詰材高さを底面か

ら 1.38cm とした。これは、直径が中詰材平均粒径 $D_m = 7.4\text{mm}$ と等しい球体を 2 層敷設した高さである。この高さを、この高さまでの洗掘を許容するという意味合いで許容洗掘高 h_s と呼ぶ。地点 A～D の中詰材高さ h の変化を、流量をパラメータとし、石枠の高さ $h_f = 2.6\text{cm}$ で無次元化させたものを図-3.2 に示す。図より、各地点においてばらつきはあるものの、流量 55 ℓ /s 通水時に許容洗掘高を下回る地点が現れることがわかる。よって、本研究では流量 50 ℓ /s 通水時の無次元掃流力を流失限界無次元掃流力 τ_{*c} とする。

3.3 流出限界無次元掃流力に関する結果と考察

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_* 、相当粗度 k_s を算出した結果を表-3.1 に示す。流量が増加するに伴い掃流力も増加していることがわかる。実験結果より、流失限界無次元掃流力 $\tau_{*c} = 0.091$ 、相当粗度 $k_s = 5.1\text{cm}$ を得た。 τ_{*c} については、水面形が等流に近い状態であったことより、水路勾配より算出したものとはほぼ同じ値となることが予想される。 $u_* = \sqrt{ghI}$ で I に水路勾配を用いて算出した無次元掃流力 τ_{*c} は 0.089 となり、実験値

が妥当であると判断できる。既存の設計法では、枠の影響を考慮せず、 τ_{*c} は中詰材に対する 0.05 としている。また、 k_s は平均流径 D_m とすると 7.4mm であり、 τ_{*c} 、 k_s 共に増加したことがわかる。理由の 1 つとして、石枠の粗度の影響が挙げられる。石枠設置により k_s が増加し、それに伴い枠内での流速が減少したため、中詰材に作用する流体力が減少したと考えられる。

また、既存の研究で明らかにされている袋体工、かごマット工の τ_{*c} は、それぞれ 0.06、0.30 である。よって、本研究で対象としたモデルはその間に位置するものと判断される。さらに、本研究で明らかにされた $\tau_{*c} = 0.09$ を既存の設計法に反映した結果、代表流速 5.0m/s、設計水深 2.0m の時、必要粒径は、 $\tau_{*c} = 0.05$ の場合で $D_m = 24\text{cm}$ 、 $\tau_{*c} = 0.09$ の場合で $D_m = 9\text{cm}$ を得た。これにより、流失限界無次元掃流力の増加により必要粒径の減少が可能となったことが示される。

4. 結論

1) 石枠内の中詰材流失限界無次元掃流力 $\tau_{*c} = 0.09$ を得た。

2) 石枠による流失限界無次元掃流力 τ_{*c} の増加は、相当粗度 k_s の増加による流速低減効果によるものと考えられる。

参考文献

- 1) 前野詩朗，藤原実咲，富田晃生，山村 明，忒熊公子：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.
- 2) 前野詩朗，山村 明，忒熊公子：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.
- 3) 前野詩朗，藤原実咲，富田晃生，山村 明，忒熊公子：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.
- 4) (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）
- 5) 田代洋一，千葉知由，藤井伸之，高島清光，前田稔，山村明，松岡智（2008）：護岸ブロックの水理特性値の評価－その 1 水理特性試験法について－，河川技術論文集，第 12 巻（登載予定）