

複数の礫が連結されたときの流失限界の向上効果について

北海道大学大学院

正会員 ○山本太郎

北海道大学大学院

フェロー会員 長谷川和義

共和コンクリート工業株式会社

正会員 浅利修一

1. 目的

最近、捨石工と同様に空隙構造などの環境機能をもちつつ、速い流れでも流失しにくい構造物として連結礫工が一部で使用され始めた。連結礫工は複数の礫をワイヤなどで連結して流水中に配置するものであり、通常の捨石工より流失しにくいことは現場の試行でわかってきているが、詳細な流失限界や破壊形態などは明らかにされていない。そこで本研究では水理実験と移動限界モデル理論によって捨石工に対する連結礫工の流失限界の向上効果について考察した。

2. ばら置き礫と連結礫との比較実験

実験は長さ 20m、幅 0.3m の直線可変勾配水路を用いて行った。水路勾配は 1/100 に固定し、河床の一部 5m 区間に連結礫模型と同じ粒径の礫を埋め込んで固定した。固定礫を埋め込んだ区間のうち 20cm 区間を対象とする礫（ばら置き礫または連結礫）をほぼ 1 層置きとなるようにランダムに配置した。

実験はばら置き礫と連結礫のケース、各々 5 回ずつ繰り返して行った。実験結果を図-1 に示す。ばら置き礫が $Q = 1.0 \sim 4.5 \text{ m}^3/\text{min}$ で流失しているのに対して、連結礫は $Q = 4.5 \sim 8.5 \text{ m}^3/\text{min}$ で流失しており、限界値にばらつきはあるものの、連結礫がばら置き礫より流失しにくい結果が示されている。

実験の観察では、ばら置き礫の場合、上流端やほかの不安定な礫が単発的に河床から離脱し、この礫が下流の礫に衝突したり、礫が離脱したくぼみにまわりの礫が吸い込まれるように離脱したりなど、連鎖的に多くの礫が流失するのが特徴であった。

連結礫の場合は、単発的に河床から礫が離脱しても他の礫と連結されているために、位置を変えたり、つながれたまま流れの中で浮遊する状態とどまる。そしてさらに流量を増加させると、上流側先端部の礫から離脱してめくれあがり、群体として一気に全体が流失するという過程をたどった。



写真-1 連結礫工による構造物の例

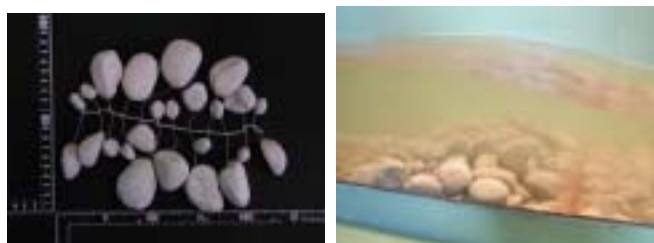


写真-2 実験に用いた連結礫の 1/10 模型（左）と連結礫のケースの実験写真（右）

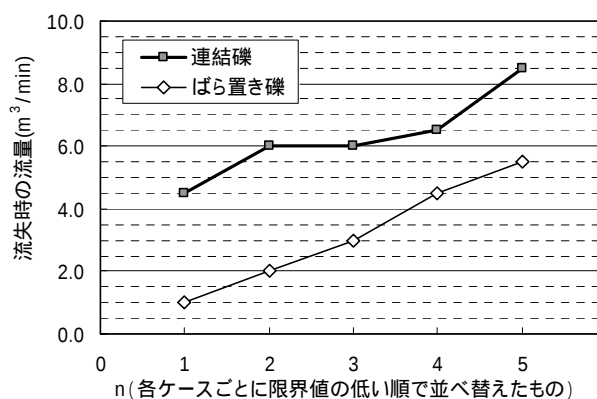


図-1 実験結果（流失時の流量）

キーワード 捨石工、連結礫工、破壊形態、流失限界、透過流れ

連絡先 〒065-0043 札幌市東区苗穂町4丁目2-8 (株)北海道技術コンサルタント TEL 011-753-5568

3. 移動限界モデル

河床に置かれた個々の礫の移動限界を与える無次元掃流力 (τ_*) は式(1)の通りとなる。

$$(\tau_*) = \frac{4}{3} \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \cdot \tan \theta} \frac{1}{\varepsilon \cdot C_D \cdot A_r^2} \quad (1)$$

連結礫の場合、図-2 に示すように一旦離脱した礫粒子が他の礫を引っ張りながら浮遊するが両者ともに移動していない状態を想定する。礫 A による張力は複数の礫粒子に分散されることを考慮すると、礫 B の限界状態を表すつり合い式は式(2)で表される。

$$(\tau_{*B}) = \frac{4}{3} \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \tan \theta} \frac{1}{\varepsilon \cdot C_D \cdot A_r^2} - \lambda \frac{1 + 1/\cos \theta}{1 + \alpha \tan \theta} \frac{A_r^2}{A_r^2} \cdot \tau_{*A} \quad (2)$$

ここに、 λ : 礫 A による張力の分散度を表す定数、 τ_{*A} : 礫 A に作用する無次元掃流力である。式(2)の右边第1項は式(1)の右边と等しいことから、式(2)で示される礫 B のつり合い式は、礫 B の限界値が単独の場合から礫 A の張力の分だけ下がることを意味していることがわかる。これを図示したのが図-3 であり (τ_{*B0}) は礫 B の単独での限界値である。

掃流力を増大させたときの粒子の移動・流失割合を、確率モデルによる移動限界として算定した結果を図-4 に示す。ただし τ_* は上流端の先頭礫の位置での値で評価している。

ばら置き礫の場合は、遮蔽効果のない上流端先頭の礫の離脱がきっかけとなって他の礫も連鎖的に離脱することが多いとの実験結果を勘案すると、 $\varepsilon=1.0$ すなわち上流端先頭の礫の離脱確率をもって全体の限界値を評価できる。

連結礫の場合でも、離脱した1個の礫粒子が上流端の先頭にある礫粒子に直接つながっている場合、すなわち $\varepsilon=1, \lambda=1$ の場合は、河床に残っている礫も浮遊した礫による引っ張りによって離脱しやすくなることが示されている。これが $\varepsilon=0.4, \lambda=1$ の場合、すなわち浮遊した礫が中間にある礫粒子に直接つながっている場合は、先頭の礫粒子と直接つながっている場合より、遮蔽効果を見込める分だけ離脱する可能性が低くなる。さらに $\lambda=1/2, 1/4, 1/8$ と浮遊した礫による張力が連結に用いたワイヤ・チェーンで複数の礫に分散されれば、河床にあって引っ張り作用を受ける礫が河床から離脱する確率は低くなることわかる。

連結礫の場合、現実として先に離脱して浮遊した礫からの張力がある1個の礫が直接受けることは考えにくく、この状況を想定した $\lambda=1$ の場合を除くと、ばら置きの $\varepsilon=1$ での離脱確率より、浮遊した礫から

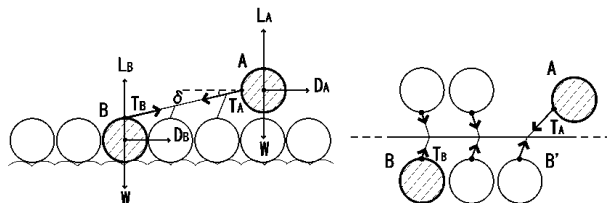


図-2 浮遊した礫を他の礫が引っ張る状態の模式図

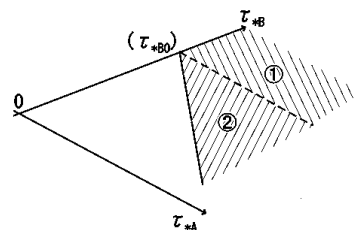


図-3 浮遊礫に引っ張られた粒子が離脱する τ_* の範囲

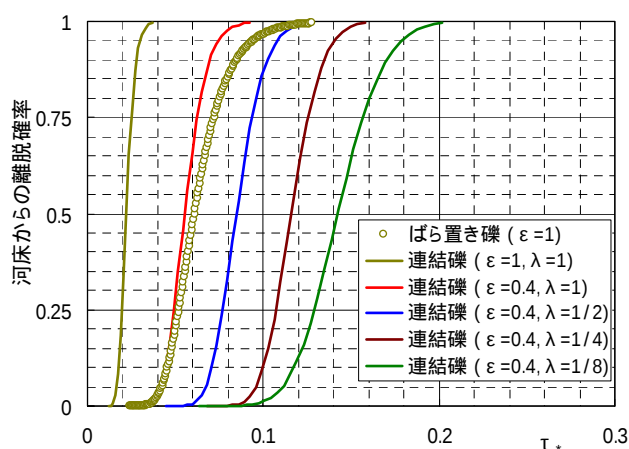


図-4 礫の河床からの離脱確率計算結果
(ばら置き礫, 連結礫)

の張力が分散される $\lambda=1/2, 1/4, 1/8$ の場合のほうが離脱確率が低くなる。これが通常の捨石工のようなばら置きの礫に対して連結礫工が高い流失限界もつ理由のひとつであると推測される。さらに連結礫の場合では、先に離脱した礫が浮遊せずに他の上面のくぼみに嵌って安定するケースや、全体が変形するが流失しないケースなども生じるため、これらも流失限界向上の要因となっていると考えられる。

この他に流失限界を左右させる要因として、連結ワイヤやチェーンの長さ、連結方法、礫の粒径分布などがあげられ、さらに移動限界モデルとしては遮蔽効果の取り扱い、粒子間の摩擦など考慮すべき点が残されており、これらの詳細な分析が今後の課題となる。

参考文献

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.