

層積みで用いられた連結礫工の安定性と破壊形態について

Stability of connected-ripraps set in some layers and mechanism of its destruction

北海道大学大学院 正員 山本太郎 (Taro Yamamoto)
 北海道大学大学院 フェロー会員 長谷川和義 (Kazuyoshi Hasegawa)
 共和コンクリート工業株式会社 正員 浅利修一 (Syuichi Asari)

1. はじめに

連結礫工は捨石工に用いられるような礫や玉石をチェーンとワイヤで連結したものであり、水制や根固め工、護床工などの材料として用いることができる新工法である。個々の礫が引っ張り合うことで流失が抑えられ全体として安定性が向上するため速い流れでも流失しにくく、また現地発生材の礫を使用できる点や空隙構造をもつなど環境面でのメリットをもつことから、特に河川の上流域や局所的に流れを制御する必要がある場所などの現場で最近使用され始めた。現地での試行設置が先行したことから、著者らは理論的なアプローチとして連結礫工の移動限界と流失過程についての検証を進めてきた。本論では連結礫工が層積み形状で河床に設置された場合を想定して、水理実験と流れの解析をもとにその安定性と破壊形態について力学的な検証を行い、最適な構造を提案することを目的とした。

2. 水理実験

2.1 実験方法

実験は図-1に示すような長さ20m、幅0.3mの直線可変勾配水路を用いて行った。実験に用いた捨石および連結礫は図-2で示されるような24個のコンクリート製楕円球粒子のセットからなり、写真-1のようにこれらの粒子の2個ずつがワイヤで連結されそのワイヤがチェーンの輪を通してできたフレキシブルな構造となっている。平野によるEgiazaroffの修正式で求めた各粒径集団A~Cに対する限界掃流力は図-3の通りである。水路勾配は1/100に固定し、水路上流端から10.0~15.0mの5m区間の河床に連結礫工模型に使用した礫と同じ礫セットを固定河床礫としてランダムに埋め込んで固定した。固定礫を埋め込んだ区間のうち、上流から3.2~3.5mの30cm区間に連結礫工を天端面の高さが河床礫高さから約6cmとなるように積んだ(写真-2)。比較としての個別のばらの礫を積むケースでは、連結礫のケースの積み方と同様の形状とした。礫を配置した後に水を流し流量を徐々に増加させて、礫の全体または一部が流失し天端面の高さが維持されなくなった時点での流量を記録してこれを限界値とした。

2.2 実験結果

実験ケースと実験結果を表-1に示す。礫のばら積みに対して連結礫を用いた場合に流失に対する限界値が高くなっていることがわかる。しかし連結礫のケースでも使用方法つまり積み方によっては礫の連結による流失限界があまり向上しない場合もある。

実験の観察では、case.1の個別礫ばら積みの場合は、

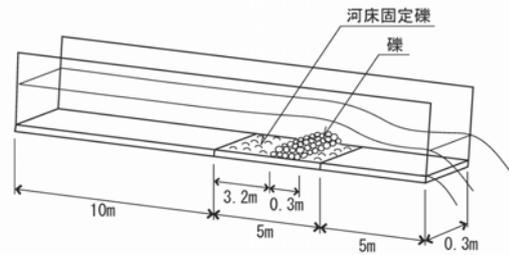


図-1 実験装置

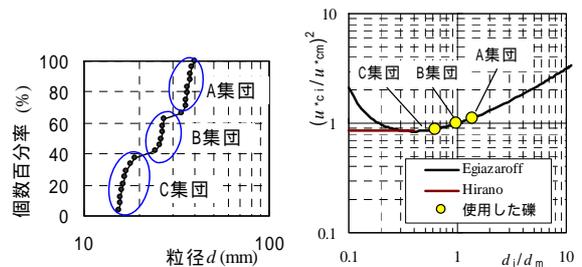


図-2 連結礫および個別礫の粒径分布

図-3 使用した礫の限界掃流力



写真-1 連結礫の模型



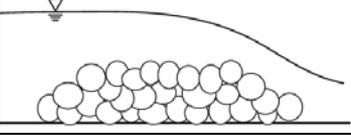
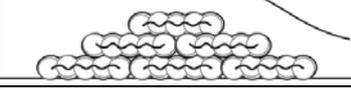
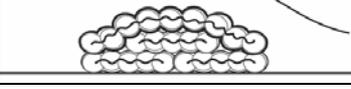
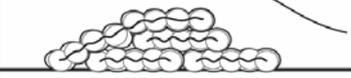
写真-2 水理実験写真

下流側法肩付近にある礫から崩壊するように流失しはじめ、崩れてくぼみとなったところに流れが集中することなどによってまわりの礫も連鎖的に離脱し、最終的にはもとの形状をなさない程度に個々の礫が流失するという経緯をたどった。

これに対して連結礫の場合は、流量が少ない段階では、置かれ方が不安定な礫が個別に離脱しかけるが、他の礫と連結されているために流失するまでには至らず、位置を変えて安定したり、ワイヤにつながれた状態の流れの中を揺動するなどの状態となる。この状態を経てから最終的に全体としてめくれ破壊に至る。

次にこれらの破壊形態を詳細に考察するため、透過流れモデルによる数値計算を行い、局所的な流速を算定することとした。

表-1 実験ケース一覧表

実験ケース	限界時の流量	
	m ³ /min	(m ³ /sec)
case.1 個別礫ばら積み 	1.0	(0.0167)
	1.0	(0.0167)
	1.0	(0.0167)
	1.0	(0.0167)
	1.5	(0.0250)
case.2 連結礫平積み 	2.0	(0.0333)
	2.0	(0.0333)
	3.0	(0.0500)
	2.0	(0.0333)
	2.0	(0.0333)
case.3 連結礫かぶせ置き 	3.5	(0.0583)
	4.0	(0.0667)
	4.0	(0.0667)
	3.5	(0.0583)
	3.0	(0.0500)
case.4 連結礫前面覆い置き 	9.0	(0.1500)
	8.0	(0.1333)
	8.0	(0.1333)
	7.0	(0.1167)
	9.0	(0.1500)

3. 数値計算

3.1 基礎式

数値計算では、海岸での消波構造物周辺での波動運動を解析するために榊山ら¹⁾によって開発されたポーラスボディモデルを用いた。これは Navier-Stokes 方程式に透過性構造物の空隙率、抵抗などを導入して方程式を構築したものである。基礎式となる連続式、運動方程式は以下の通り。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_y \frac{\partial u}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial uu}{\partial x} + \lambda_z \frac{\partial wu}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \right) \quad (2)$$

$$\lambda_y \frac{\partial w}{\partial t} + \lambda_x \frac{\partial uw}{\partial x} + \lambda_z \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - \gamma_v g - R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\gamma_x \nu_e \left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_z \nu_e \left[2 \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right) \quad (3)$$

ここで、 x, z ：水平・鉛直座標， u, w ：流速の水平・鉛直成分， ρ ：水の密度， P ：圧力， ν_e ：分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和， g ：重力加速度， γ_v ：空隙率， γ_x, γ_z ：水平・鉛直方向面積透過率であり， C_M を慣性力係数として， $\lambda_v = \gamma_v + (1 - \gamma_v)C_M$ ， $\lambda_x = \gamma_x + (1 - \gamma_x)C_M$ ， $\lambda_z = \gamma_z + (1 - \gamma_z)C_M$ である。

自由水面を有する流れの解析には再現の精度が良いとされ多くの研究に使われている VOF 法を用いた。VOF

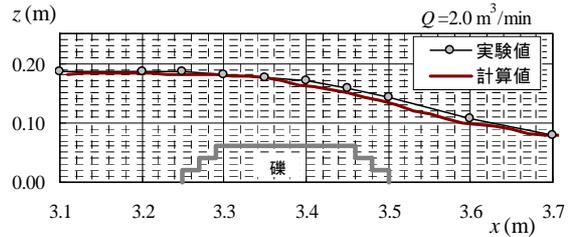


図-4 水面形の実験結果と計算結果

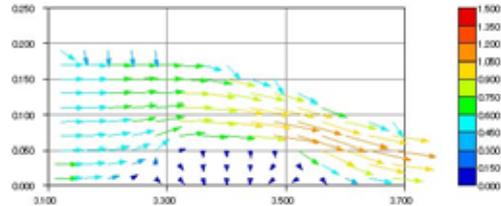


図-5 流速分布計算結果 (Q=2.0 m³/min)

法では計算セル内の流体の体積率 F を式(4)に示す移流方程式を用いて計算する。

$$\frac{\partial (\gamma_v F)}{\partial t} + \frac{\partial (\gamma_x u F)}{\partial x} + \frac{\partial (\gamma_z w F)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

乱流モデルはパラメータの標準値が確立されているなどモデル化の容易性から $k-\epsilon$ モデルを用いた。 $k-\epsilon$ モデル中の定数は標準値として $C_{\mu}=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3$ ， $C_{\epsilon 1}=1.44, C_{\epsilon 2}=1.92$ を用いた。また抗力項 R_x, R_z は前野ら²⁾によって提案された次式を用いた。

$$R_x = \gamma_v^2 u \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \gamma_v \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (5)$$

$$R_z = \gamma_v^2 w \left(\frac{v}{K} + \frac{c}{\sqrt{K}} \gamma_v \sqrt{u^2 + w^2} \right) \quad (6)$$

ここに K ：固有透水係数， c ：乱れによる抵抗係数である。 K, c は実験に使用した礫を用いて別途透水試験を行って得られた $K=0.0008\text{cm}^2, c=0.063$ の値を用いた。

3.2 計算結果

水面形の計算結果を実験結果とあわせて図-4 に示す。また計算結果の流速ベクトル図を図-5 に示す。図-6 には破壊の考察のポイントとなる4点の流速変化を示す。

3.3 計算結果をもとにした実験ケースの考察

(1) 個別礫ばら積みの場合(case.1)

通常の捨石を想定したケースであるが、実験では下流面の法肩付近から礫が離脱し、連鎖的にまわりの礫も流失した。流失限界は概ね $Q=1.0\text{m}^3/\text{min}$ 程度であり連結礫のケースと比較して低い。

下流面法肩の礫に作用する力を単純化して模式的に表すと図-7 のようになる。下流面法肩の礫に作用する流

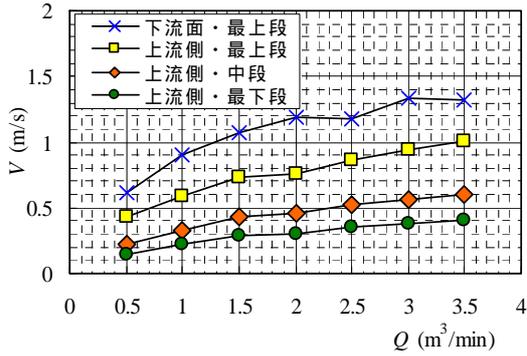


図-6 流速計算結果 (位置別)

速を u_d とすると、この礫が回転による移動を開始する条件は式(7)で表され、移動限界流速は式(8)となる。

$$L \geq W \sin \theta \quad (7)$$

$$u_d = (s g d \cdot \sin \theta / \alpha \varepsilon C_D)^{1/2} \quad (8)$$

ただし $D = \rho/2 \varepsilon C_D A u_d^2$, $L = \alpha D$, W : 礫粒子の重量とし、 α : 揚抗比(=0.85), C_D : 抗力係数(=0.4), ε : 遮蔽係数(=1.0), s : 礫粒子の水中比重(=1.35), d : 礫径(=0.027m)とした。 θ は抗力と重力とのなす角とし、計算では下流面の法勾配と同程度とみなした。また礫どうしの摩擦は無視した。

これより実験時の移動限界流速を式(8)から求めると $u_d = 1.02 \text{ m/s}$ となる。また図-6 に示されるように数値計算で求めた $Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ でのこの位置での流速は $V = 0.925 \text{ m/s}$ であった。これより $Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ でほとんど移動限界に近い流速が発生していたと推定され、個別礫ばら積みの場合に下流面法肩部から崩壊するのはこの流れによるものが大きいと言える。礫間を浸透した流れが抜け出す際の外向きの流速も作用し、これも下流面法肩の礫から崩れやすくする要因となる。

(2) 連結礫の場合(case.2~4)

連結礫を平積みにした case.2 の場合、あまり流量が上がらないうちに最上段の連結礫が早々に上流側からはがれるように流失・破壊した。最上段の連結礫を2段目に被せて置いた case.3 の場合も case.2 と同様に、低めの流量の段階で最上段の連結礫がはがれて流失した。しかし最上段の連結礫を上流面全体に覆うように置いた case.4 では流量の限界値は飛躍的に向上した。

個別礫ばら置きの場合で最初に流失した下流側の位置にある礫は、連結礫の場合は移動しかけても連結されているために流失せず、最前面にある遮蔽効果のない礫が先にめくられて移動しやすくなる。最上流側にある礫のうち最上段の礫に作用する流速が最も速いことから、ここからめくられて流失に至るものと考えられる。

case.2~4 のいずれのケースも破壊時は最上段にかがせた連結礫の最も上流側に位置する礫から離脱した。それぞれのケースでの最上段・最上流側の礫に関する力学作用に着目し、例えば case.2 の場合での作用する力を単純化して模式的に表すと図-7 のようになる。上流側・

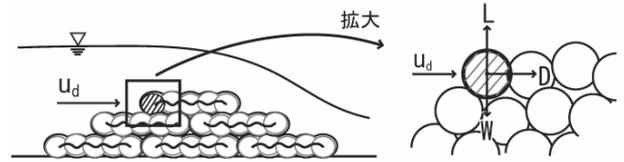


図-7 case.2 の模式図

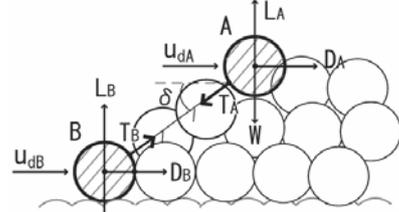


図-8 case.4 の模式図

最上段の礫に作用する流速を u_d とすると、この礫が回転による移動を開始する条件は式(9)で表され、移動限界流速は式(10)となる。

$$L \geq W \quad (9)$$

$$u_d = (s g d / \alpha \varepsilon C_D)^{1/2} \quad (10)$$

case.3,4 のケースでも、最上段・最上流側の礫は遮蔽がなく直後の礫による支持を受ける点で変わらないため、移動開始条件と移動限界流速は式(9),(10)を用いることができる。このため式(10)から case.2~4 共通の移動限界流速を求めると $u_d = 1.09 \text{ m/s}$ となる。

case.2 では最上段・最上流側の礫には図-6 に示す数値計算結果での「上流側・最上段」の位置での流速が作用するとみなせる。計算結果から case.2 では $Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度で力学モデルによる u_d が限界値に近い値となっており、最上段・最上流側の礫が流れによって離脱し、つながれた礫が一体となって離脱、破壊に至ったことが考えられる。

case.3,4 ではそれぞれの最上段・最上流側の礫には図-6 の「上流側・中段」「上流側・最下段」の位置の流速が作用するとみなせる。case.3 では力学モデルでの流速の限界値 $u_d = 1.09 \text{ m/s}$ には全く及んでおらず、case.4 では作用する流速は流量のアップでも最下段の礫付近の流速は上昇しない。これより case.3,4 で最初に移動する最上段・最上流側の礫は、流れの作用により単独で移動することはほとんど困難であるとみられ、離脱には下流側の礫からの引っ張りの作用が加わるためと予測される。このため下流側の礫が上流側の礫を引っ張り、それにより最上段・最上流側の礫が離脱する過程をモデル化する。

図-8 のように上流面の法肩の位置にある礫が先に離脱し、連結ワイヤで他の礫から引っ張りを受けながら、流れの中で釣り合いの状態となっている場合を想定する。先に離脱した礫 A についてのつり合いは式(11)となる。

$$T_A = D_A (\cos \delta + \alpha \sin \delta) - W \sin \delta \quad (11)$$

ただし $D_A = \rho/2 \varepsilon C_D A u_{dA}^2$, $L_A = \alpha D_A$, W : 礫粒子の重量、

δ : 礫 A につながれたワイヤと水平とのなす角である．添え字 A,B はそれぞれ先に離脱した上流面法肩の礫とそれによって引っ張られる礫を表す．他の係数は前項までと同様とし，ここでも前記と同様の理由から礫どうしの摩擦は無視した．礫 A と連結されている礫が複数あり，流速が空間的・時間的に変動することや，礫の置かれ方が規則的ではないことから，礫 A の引っ張りによって次に移動する B の礫は必ずしも礫 A に最も近い位置でつながれている礫であるとは限らない．

礫 A で発生した張力はワイヤを伝って他の礫に分散されることから， T_B の T_A に対する分散度 λ を用いると礫 B に働く張力は式(12)で表され，礫 B が移動する条件は式(13)で表される．

$$T_B = \lambda \cdot T_A \quad (12)$$

$$(L_B + T_B \sin \delta) \geq W \quad (13)$$

式(13)を礫 A,B に作用する流速 u_{dA} , u_{dB} を用いて整理すると式(14)となる．ただし礫 A,B いずれも最上流面にあるため遮蔽係数は見込んでいない．

$$u_{dB}^2 = \frac{4}{3} \left(1 + \lambda \sin^2 \delta \right) \frac{sgd}{C_D} - \frac{\lambda}{\alpha} \cos \delta \sin \delta (1 + \alpha \tan \delta) u_{dA}^2 \quad (14)$$

ここで礫 B の単独での移動限界流速を $[u_{dB}]$ とおけば $[u_{dB}]$ は式(15)で表され，礫 B の離脱が回転で礫 B の直下流に位置する同じ高さの礫粒子との接点が回転の支点になるとすれば式(14)は式(16)となる．

$$[u_{dB}]^2 = \frac{4}{3} \frac{sgd}{C_D} \quad (15)$$

$$u_{dB}^2 = (1 + \lambda \sin^2 \delta) [u_{dB}]^2 - \frac{\lambda}{\alpha} \cos \delta \sin \delta (1 + \alpha \tan \delta) u_{dA}^2 \quad (16)$$

式(16)における流速 u_{dA} , u_{dB} の関係を，分散度 λ を変えて示したものが図-9 である．図-6 では $Q=3.0\text{m}^3/\text{min}$ 程度までは引っ張られる側の礫 B が移動するには λ に関わらず u_{dB} に 1.0m/s 程度の流速が発生していることが必要となる．しかし流量が $Q=3.0\text{m}^3/\text{min}$ を超えると λ が大きい場合，つまり引っ張る側からの張力があまり分散されずに最上段・上流側の礫が引っ張られたときに移動しやすくなることが示されている．流量が $Q=3.0\text{m}^3/\text{min}$ を超えたあたりから case.3 では破壊し始めることはこの理由と考えられる．case.4 では引っ張られる側の礫に作用する流速があまり増加しないことに加えて，上流面法肩にある礫から最上流側の礫までの距離が長く張力が分散されることが，最上段の連結礫が移動しにくい大きな理由となるものと推測される．

case.3 の破壊時の流量は概ね $Q=9.0\text{m}^3/\text{min}$ であった．実験の水位計測値から流速を推定すれば，この時の流速

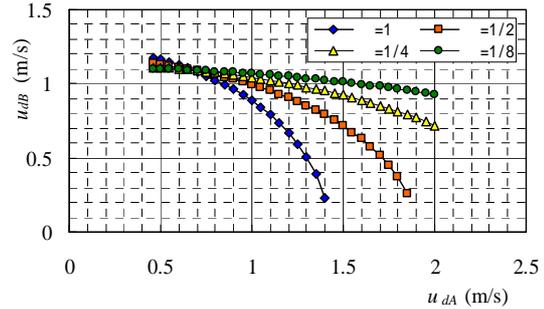


図-9 流速 u_{dA}, u_{dB} の関係

は流量と水深から算出した断面平均値で，礫配置区間上流側で 1.3m/s 程度，礫配置区間の表面流で 1.6m/s 程度である．この表面流の流速が最上段・上流側の礫付近の流速にあたと仮定すると，張力 T_A が分散度 $\lambda=1/8$ に分散された場合でも最下段・上流側の礫付近の流速が 1.0m/s 程度で離脱することとなる．図-6 の最下段・上流側の流速を外挿して考えると，破壊に十分な流速が発生していたものと考えられる．

ただし実験の目視では，流量をアップさせ流れが高速になるにつれて，積まれた礫が透過構造であるにもかかわらず，この上流側に緩流部が形成されているように見られた．高速流れが発生している際での破壊形態は，本研究での単純力学モデルをふまえ，さらに解析精度を向上させた上で判断すべきと考える．

4. 結論

本研究では，連結礫工が河床に設置された場合の安定性と破壊形態について実験と数値計算によって検証した．連結礫工が河床に設置された場合，通常の捨石工に対して安定性が向上することが確認されたが，その構造によっては破壊形態や限界値が異なることも確認され，連結礫工を河床に用いる場合，設置した礫の上流側を連結礫工で覆う形状とすることで，流失・破壊に対する限界値を大きく向上させられることがわかった．

連結礫工は，通常の捨石工より流れに対する安定性が期待でき，かつ現地で発生する礫を使用できることや空隙構造をもち生物の生育・生息にも配慮できることなどから，今後の河川工法として十分に期待できる工法ではある．しかしながらチェーンやワイヤなどの人工材料が使用されていることや，自然に存在する礫より流れにくいことがかえって局部洗掘など何らかの影響を発生させないかなど，使用に当たっては各々の現場で十分な検討を行うことが必要と考える．

参考文献

- 1) 榊山勉，阿部宣行，鹿島遼一：ポラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，海岸工学論文集，第37巻，pp.554-558，1990.
- 2) 前野詩朗，道奥康治，森永智，菊池慶太：捨石堰周辺の流況解析，水工学論文集，第48巻，pp.829-834，2004.