

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

STABILITY AND DESTRUCTION PROCESS OF CONNECTED-RIPRAP
SET ON RIVERBED

山本太郎¹・長谷川和義²・浅利修一³

Taro YAMAMOTO, Kazuyoshi HASEGAWA and Syuichi ASARI

¹正会員 工修 北海道大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒064-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院工学研究科教授 (〒064-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 共和コンクリート工業株式会社技術研究所 (〒061-1405 恵庭市戸磯385-36)

Connected-ripraps is one of the new methods for river improvement and it begun to be used in recent years in Japan. This is made by several ripraps connecting with wires and chains, and preserve stability more than using usual riprap individually. It is expected to save labor for river maintenance work and costs. Ripraps are often set in river for bank erosion control or prevention of bed scour. Since connected-ripraps have environmental advantage of porous structure as good as individual riprap and has high stability in rapid flow. Although such materials are in practical use in river channels, they have not been subjected to hydraulic analysis. We verified the stability and destruction process of connected-ripraps that were set on river bed by experiment and numerical analysis.

Key Words : *connected-ripraps, turbulent flow, destruction process, habitat structure, flow in porous medium*

1. はじめに

連結礫工は捨石工として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構造物であり、河川の現地にある石を活用できる点や空隙構造となる点など、捨石工の持つ環境面でのメリットをもちながら、連結の効果として速い流れの中でも流失しにくいという機能をもつため、最近特に河川の中上流部で使用され始めた。

通常の捨石工は大きめの礫や玉石などを河岸や河床に配置して河岸浸食や洗掘を防止するのに使用され、現地で発生する自然素材を使えることや、礫と礫との隙間に生物が生育・生息できる環境面の長所をもつことから、近年になって特に見直されてきている。現場では特に河岸法尻の保護や簡易な根固め工として護岸前面の洗掘防止目的で使われることが多く、設計指針¹⁾では単体の礫の移動限界から必要粒径を求める方法が提示されている。捨石による河川構造物に対する詳細な水理学的アプローチは、道奥ら²⁾⁻⁶⁾による流れの評価や前野ら⁷⁾⁻⁹⁾や原田ら¹⁰⁾による破壊のメカニズムの解析など、最近になって積極的になされるようになってきた。

しかし捨石工では礫が乱積み状態で使用されることが

ら中小洪水時でもその設置状況によっては流失しやすく、礫の補填や補修など維持管理の手間がかかることになるため、実際には利用できる場所と目的が限られる。

これに対して、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ちつつ、速い流れでも流失しにくく、さらに設置も容易で手間がかからないことからコスト面も含めて有効な工法として連結礫工が一部地域で使用され始めた。しかしながら連結礫工は現場での試行を優先に使用されてきたことから、安定性や破壊形態などの水理学的な面からの解析がほとんどなされていない。このため筆者ら^{11),12)}はこの連結礫工の特性を実験及び理論解析によって解明する目的で研究を始めてきた。

捨石が堰形状で用いられた場合は、既往の研究^{6),8)}により下流側法面から破壊すること、これには礫間からの抜け出す流れの強さや下流面の法勾配が影響することが指摘されている。しかし連結礫工が河床に設置された場合の破壊形態や破壊の限界値は明らかになっていない。

このため本論では、河床に設置される捨石工に連結礫工が使用される場合を想定して、実験と数値解析を行うことによりその安定性と破壊過程について考察することとした。

2. 水理実験

(1) 実験条件

実験に用いた水路は図-1に示すような長さ20m、幅0.3mの直線可変勾配水路である。水路上流端から10.0～15.0mの5m区間の河床にモルタルを1cm程度の厚さに敷き詰め、乾燥する前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粒子高さの半分程度が埋まるように1個ずつランダムに埋め込んで固定した。水路勾配は連結礫工が主に使用される河川の上流域を想定して1/100とし、河床に固定礫を埋め込んだ区間のうち、上流から3.2～3.5mの30cm区間に連結礫工を重ねて積むこととした。比較としての個別のばらの礫を積むケースでは、全体の形状を連結礫のケースと同様となるようにした。礫は河床の固定礫の上に、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-1)。

連結礫は写真-2のように礫の2個ずつがワイヤで連結され、それがチェーンによってフレキシブルにつながれたものである。実験に用いた連結礫および個別礫模型は図-2の通り粒径集団が3つに分類される24個のコンクリート製楕円球粒子のセットからなり、これらは現地河川で使用されている連結礫工の1/10程度を想定して製作された。Egiazaroff¹³⁾及び平野¹⁴⁾の式で求めた各粒径集団A～Cに対する限界掃流力を図-3に示す。

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) 実験結果

実験ケースと実験結果を表-1に示す。なお流量の単位は、実験が設備上の都合で m^3/min 単位で行われたため、表-1に m^3/sec 単位と並列表記した上で、本文中では m^3/min 単位を用いることとする。

実験結果の全般的な特徴としては、連結礫の場合、礫のばら積みに対して流失に対する限界値が高くなっていることがあげられる。しかし連結礫を用いるケースでも使用方法つまり積み方によっては流失限界があまり向上しない場合もあることもわかる。

実験の観察では、case.1の個別礫ばら積みの場合、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(写真-3)。連結礫の場合は最上面にある連結礫のうち下流側に位置する礫が先に離脱しかけてワイヤとチェーンによって上流側の礫を引っ張り、最後は全体がめくれるように群体として流失していることが典型的な破壊形態としての特徴である。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

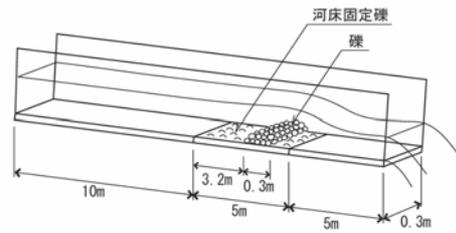


図-1 実験装置模式図



写真-1 水理実験写真



写真-2 連結礫の模型

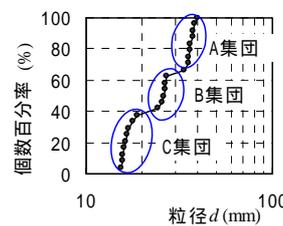


図-2 連結礫および個別礫の粒径分布

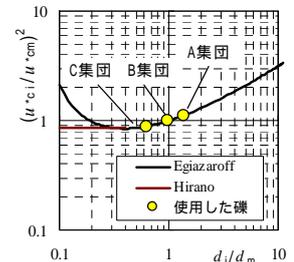


図-3 使用した礫の限界掃流力

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)

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で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(写真-4)。

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



写真-3 礫ばら置きの場合の流失プロセス (case.1)



写真-4 連結礫の場合の流失プロセス (case.3)

3. 数値計算

(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¹⁵⁾によって開発されたポ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り、前野ら⁵⁾は河川の捨石構造物周辺の流れ解析に適用し有効性を検証している。基礎式となる連続式、運動方程式は以下の通り。

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

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

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

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¹⁶⁾を用いた。

VOF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 $k-\varepsilon$ 方程式モデルを用いた。ただし k, ε 方程式では透過流れによる抵抗は前野ら⁵⁾と同様に考慮しなかった。 $k-\varepsilon$ モデル中の定数は標準値¹⁷⁾として $C_{\mu}=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.92$ を用いた。

また抗力項 R_x, R_z はWard¹⁸⁾による多孔質体の抵抗則をもとに前野ら⁵⁾によって提案された次式を用いた。

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

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

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。

(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3点（下流面・最上段、上流面・最上段、上流面・最下段）の流速変化を示す。

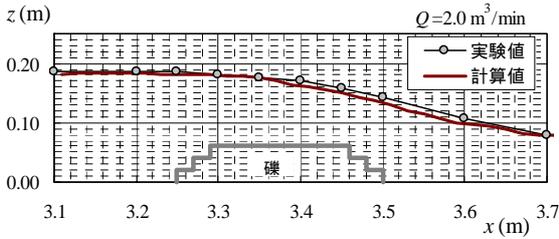


図-4 水面形の実験結果と計算結果

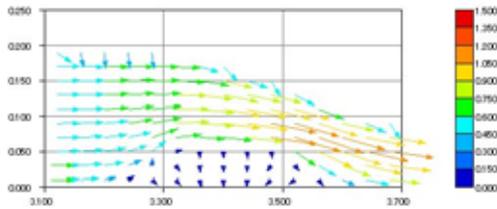


図-5 流速分布計算結果 (Q=2.0 m³/min)

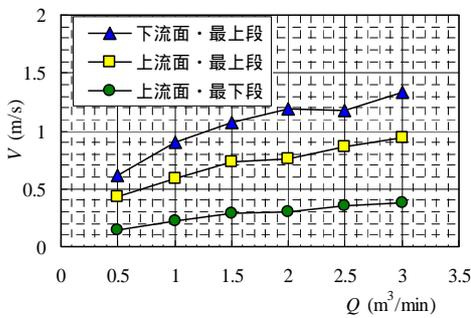


図-6 流速計算結果 (位置別)

(3) 計算結果をもとにした実験ケースの考察

a) case.1: 礫ばら積みの場合

通常の捨石を想定したケースであるが、写真-3にあるように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。

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

$$u_d = \left(\frac{4 s g d \cdot \sin \theta}{3 \alpha \varepsilon C_D} \right)^{1/2} \quad (8)$$

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。各々の定数の値は既報¹²⁾に基づいて設定したが、遮蔽係数 ε はcase.1では図-7に示すように下流面法肩付近にある礫の移動開始を想定しており、 u_d

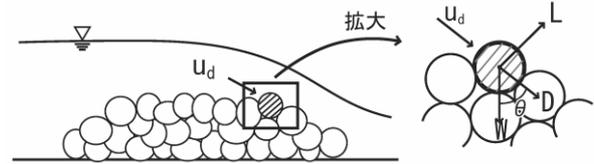


図-7 case.1 の模式図

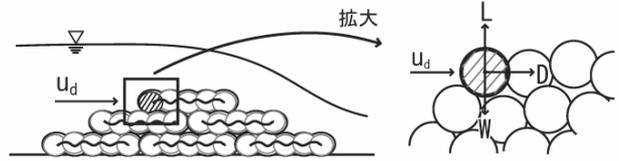


図-8 case.2 の模式図

が上流側斜め上方から作用し他の礫による遮蔽効果が小さいとみなして1.0とした。また実験で用いた礫は図-2に示す粒径分布をもつが、図-3のように粒径集団ごとの限界掃流力に大きな差異がみられないことから、ここでの考察は簡単のため平均粒径による単一粒径で扱った。 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。これは実験の観察から個々の礫どうしの摩擦境界の超過より対象の礫の下流側に位置する礫との接点周りのモーメントの増大が礫の離脱の要因に大きく左右していると判断してモデルを単純化したためである。

これより実験時の移動限界流速を式(8)から求めると $u_d=0.84\text{m/s}$ 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であろう。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。

前野ら^{6),8)}による捨石堰の実験では、捨石堰の崩壊は下流側法面の中央部から始まるとされているが、本実験では下流側法面の中央よりむしろ法肩部の礫から離脱し始めた。これは本実験で配置した礫の高さが礫径の3倍程度の高さしかなく下流側法面にある礫の高さの違いが表れにくかったためと考えられる。

b) case.2: 連結礫平積みの場合

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。case.1の礫ばら積みの場合よりは限界値が高かったものの、連結礫のcase.3と比較して限界値は低い。

実験の観察により、破壊時は上流面・最上段の礫から離脱・移動が開始された。このため上流面・最上段の礫の力学作用に着目し、この礫に作用する力を単純化して

模式的に表すと図-8のようになる．上流面・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．

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

$$u_d = \left(\frac{4}{3} \frac{sgd}{\alpha \varepsilon C_D} \right)^{1/2} \quad (10)$$

前項と同様に上流面・最上段の礫の移動限界流速を式(10)から求めると $u_d = 1.18 \text{ m/s}$ となる．図-6に示す数値計算結果からは，この位置での流速は $Q = 2.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度では力学モデルによる限界値を超えていないが，近い値で推移しており，礫の置かれ方や流れの乱れの影響などでこの上流面・最上段の礫が離脱する可能性は十分あると考えられる．

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れて移動しやすくなる．上流面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，ここからめくれて流失に至るものと考えられる．

c) case.3 : 連結礫前面覆い置きの場合

最上段の連結礫を上流面に覆うように置くことで，流失限界は飛躍的に高くなった．写真-4にあるように，まず先に最上段にある礫が単独で離脱しようとするが，ワイヤで他の礫と連結されているため流失はしない．その後，個々の礫の離脱やそれに伴って全体としての変形はするが全体としての破壊には至らず，最終的にはまず前面を覆った連結礫のうち上流面・最上段の位置にある礫が離脱し，これがワイヤでこれより上流側にある礫を引っ張りながら他の礫の上で揺動し，次に上流面・最下段の礫がめくれるように離脱して，他の1,2段目の連結礫を巻き込みながら一体となって全体が流失した．これが連結礫を前面に覆うように置いた場合の典型的な破壊過程である．

実験の目視より，前面を覆った連結礫がめくれる時に全体の破壊となることが多いことが確認され，破壊時には上流面・最上段の礫が先に離脱して他を引っ張り，次に上流側・最下段の礫が離脱したことから，これをこのケースの代表的破壊過程と想定し，他ケースと同様に単純化してモデル化する．

図-9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)で表される．

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

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

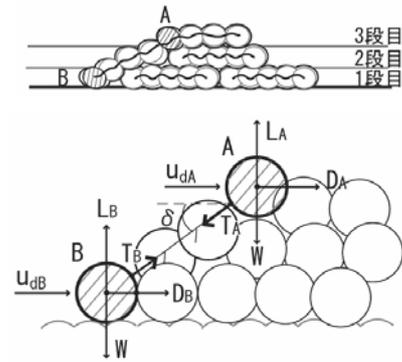


図-9 case.3 の模式図

し， δ : 礫Aにつなさ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．

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

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．

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

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

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-10である．図-6では $Q = 3.0 \text{ m}^3/\text{min}$ までは上流面・最上段の礫近くの流速は 1.0 m/s 程度で推移しており，図-10から u_{dA} が 1.0 m/s 程度の時は上流面・最下

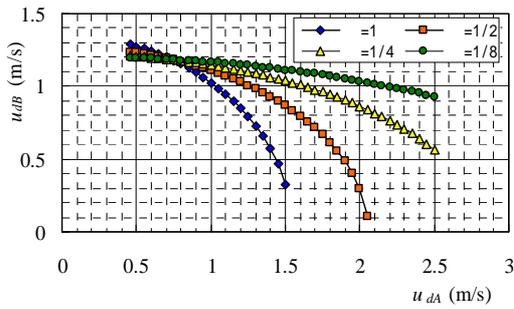


図-10 流速 u_{dA} , u_{dB} の関係

段の礫が移動するには 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。しかし図-6より上流面・最下段の礫付近の流速は0.5m/sにも満たない。このため流量が $Q=3.0\text{m}^3/\text{min}$ 程度までは上流面の礫のうち最上段の礫が離脱しても他の礫を引っ張るだけで全体としては流失しないものと考えられる。

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上流面・最上段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上流面・最下段の礫付近の流速が1.0m/s程度で離脱することとなる。図-6の上流面・最下段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られる。

4. まとめ

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を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、連結礫工を層状に重ねて用いる場合、上流面を天端から河床まで連結礫工で覆う形状とすると、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明らかとなった。

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されにくいことがあって局部洗掘など何らかの影響を生じさせないかなど、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。

また本研究では連結礫工が河床に設置された場合の破壊に関する基本的性質を把握するために、固定床での水理実験と力の分散度 λ を用いた単純化力学モデルによって破壊過程の考察を行ったが、移動床の場合に発生が予想される河床洗掘を伴う崩壊に対する検証や、連結された礫の系全体としてのつり合い・運動形態を考慮したモデル化など、連結礫工の破壊モデルの構築に向けてさらに検討を重ねるべきことは多い。これらについては今後の課題として研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター編：護岸の力学設計法，山海堂，pp.112-113，1999.
- 2) 道奥康治，福岡達信，古澤孝明：捨石堰における通過流量特性，水工学論文集，第45巻，pp.391-396，2001.
- 3) 道奥康治，前野詩朗，古澤孝明，羽根田正則：捨石堰の「水位 - 流量」特性を規定する水理量，水工学論文集，第46巻，pp.487-492，2002.
- 4) 道奥康治，前野詩朗，羽根田正則，古澤孝明：捨石堰を越流・透過する流れの構造と流量解析，土木学会論文集，第740号 -64，pp.131-142，2003.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 前野詩朗，道奥康治，大西利典，森永智：捨石堰の破壊時の水理特性，応用力学論文集，Vol.5，pp.657-664，2002.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 原田英治，細田尚，後藤仁志：Euler-Lagrangeカップリングモデルによる捨石堰の崩壊過程の計算力学的研究，土木学会論文集，第775号 -69，pp.45-54，2004.
- 11) 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.
- 12) 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，投稿中.
- 13) Egiazaroff, I. V. : Calculation of nonuniform sediment concentration, Proc. of ASCE, Vol.91, HY4, pp.225-247, 1965
- 14) 平野宗夫：混合砂れき河床の変動と平衡河床に関する研究：土木学会論文報告集，第207号，pp.51-60，1972.
- 15) 神山勉，阿部宣行，鹿島遼一：ポー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.
- 16) 神山勉：消波護岸の越波に関する数値計算モデルの開発と検証，電力中央研究所報告，研究報告：U97103，pp.5-9，1998.
- 17) 例えば，数値流体力学編集委員会編：乱流解析，東京大学出版会，pp.27-33，1995.
- 18) Ward, J.C. : Turbulent flow in porous media, Jour. Hydraul. Eng. ASCE, Vol.90, HY5, pp.1-12, 1964

(2005.9.30受付)