

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

EVALUATION OF CRITICAL SHEAR STRESS FOR TWO CONNECTED RIPRAP PARTICLES WITH A WIRE

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正会員 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)

In recent years, preservation of the river environment has gained attention, and there has been a demand for river structures built of materials that promote favorable habitat diversity, channel complexity and aesthetics. As a material for weirs or groins, which sit within the river flow, riprap has been reconsidered for its permeability. However, riprap is inferior to concrete in stability and is readily washed away. To address this problem, connected-riprap has been used at every place in Japan. This material is made by connecting riprap using wires. Even if an individual riprap is carried off by rapid flow, the wire connectors preserve stability. Although such materials are in practical use in river channels, they have not been subjected to hydraulic analysis. A hydraulic approach was applied to clarify the stability of connected riprap by estimating its shear stress, comparing it to that of unconnected riprap, and explaining the mechanism whereby unexpectedly the shear stress becomes less.

Key Words : *two connected riprap particles, critical shear stress, permeable structure
stochastic evaluation, hydraulic analysis*

1. はじめに

これまで河川では流れを制御するために様々な構造物が用いられてきており、その材料もコンクリートや礫・玉石、木材など様々なものが使われてきた。近年では環境に対する意識の高まりの中で、生物の生息環境や景観、流れの多様性などを保全・創出できるような構造およびその材料が求められるようになってきている。

特に堰や水制工では、その透過性から環境に対する負荷が少ないとされる捨石工が見直されてきており、水理学的な評価も例えば道奥¹⁾によって積極的になされてきている。しかし捨石工は礫や玉石などを流水中で固定せずに使用するために、コンクリートによる強固な構造物などと比べて中小規模の洪水でも個々の礫が流されやすいことから、特に堰上げや流向の切り替えなど局所的に速い流れが発生する場所でのその機能を維持し続けるためには、流失する礫の補填や補修などが必要となり、維持管理の手間と労力を考えると使用しにくいことが欠点であった。

このような中、捨石工の機能を持たせながら流速に対する安定性も見込める材料として、連結礫工が各地で使われ始めた。連結礫工は複数の礫をワイヤなどで連結して構成されたもので、群体として流水中に設置されたとき、連結されている個々の礫が流れによって微妙に位置を変えながらも全体としては大きく移動せず、当初の機能を維持し続けることを期待するものである。

流水中の砂礫の移動形態については過去に多くの研究がなされ、得られた知見も非常に多い。しかし砂礫粒子が連結された場合に流水中でどのような移動形態をとるのかは過去に研究例がなく、従って連結礫工についても、そもそも礫の連結の効果がどのようなものなのかなど明らかにすべき点は多い。

そこで本論では、この連結礫工の安定性に対する水理学的な解明に向けて、まずは基礎的研究として2個の礫が連結された最も単純なモデルを想定し、限界状態や移動形態などを確率的に評価することにより、礫の連結によって生じる効果を明らかにすることとした。

2. 掃流力にもとづく評価

(1) 単体の礫の場合

河床に置かれた礫に作用する流速 u_d が正規分布に従う場合、流速 u_d の確率密度関数 $f_1(u_d)$ は式(1)で表される。

$$f_1(u_d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{u_d}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(u_d - \bar{u}_d)^2}{\sigma_{u_d}^2}\right\} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{u}_d$: u_d の時間平均値、 σ_{u_d} : u_d の標準偏差である。また相当粗度を k_s 、河床からの高さを z としたときの抵抗則式は式(2)で表され、 $z = k_s$ の位置の流速が対象とする礫に作用するとみなすと $u_d/u_* = A_r$ であり、無次元掃流力 τ_* は式(3)で表される。

$$u/u_* = A_r + 5.75 \log(z/k_s) \quad (2)$$

$$\tau_* = \frac{1}{sgd} \frac{1}{A_r^2} u_d^2 \quad (3)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度、 s : 礫粒子の水中比重、 g : 重力加速度、 d : 礫径である。

式(1)を式(3)から無次元掃流力 τ_* の関数に変数変換すると式(4)となる。

$$f_2(\tau_*) = \frac{1}{2\sqrt{\tau_*}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\sqrt{\tau_*}}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(\sqrt{\tau_*} - \bar{\sqrt{\tau_*}})^2}{\sigma_{\sqrt{\tau_*}}^2}\right\} \quad (4)$$

ここに、 $\bar{\sqrt{\tau_*}} = \sqrt{\frac{1}{sgd} \frac{1}{A_r^2} \bar{u}_d}$ 、 $\sigma_{\sqrt{\tau_*}} = \sqrt{\frac{1}{sgd} \frac{1}{A_r^2} \sigma_{u_d}}$ である。

また簡単のため河床とその上に置かれる礫を直径 d の等球径粒子と仮定し、これに働く抗力を D 、揚力を $L = \alpha D$ (α : 定数)、重力を W 、この粒子の中心と下流側で支える河床粒子の中心とを結ぶ直線が鉛直線となす角を θ とすると、上に置かれる粒子が移動を開始する条件は式(5)で表され、抗力 D についての式(6)を用いると、式(5)は無次元掃流力 τ_* を用いて式(7)で表される。また移動限界を与える無次元掃流力を (τ_*) とすれば (τ_*) は式(8)で与えられる。

$$D > (W - \alpha D) \tan \theta \quad (5)$$

$$D = \frac{\rho_w}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot u_d^2 \quad (6)$$

$$\tau_* > \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \cdot \tan \theta} \frac{4}{3} \frac{1}{C_D \cdot A_r^2} \quad (7)$$

$$(\tau_*) = \frac{\tan \theta}{1 + \alpha \cdot \tan \theta} \frac{4}{3} \frac{1}{C_D \cdot A_r^2} \quad (8)$$

ここに、 ρ_w : 水の密度、 C_D : 抗力係数、 A : 礫粒子の流れ方向の投影面積である。

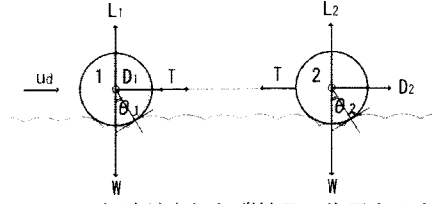


図-1 2個連結された礫粒子に作用する力

一方、限界掃流力は、底面に存在する粒子のうちある割合 p （例えば1%, 5%など）の粒子が移動した時の値をもって定義することが多い。いま式(4)の確率密度関数が移動確率に他ならないものとみなした場合、限界掃流力は、

$$\int_{(\tau_*)}^{\infty} f_2(\tau_*) d\tau_* = p \quad (9)$$

を満たすときの τ_* の期待値として求められるべきものとなる。すなわち、

$$\tau_{*c} = \int_0^{\infty} \tau_* f_2(\tau_*) d\tau_* \quad (10)$$

ここに、 τ_{*c} : p の移動確率により定義される無次元限界掃流力である。

(2) 2個連結された礫の場合

次に図-1に示されるような、河床上に礫が2個連結されて流れ方向に沿って配置されている状態を想定する。ここでも河床とその上に置かれる礫の両方を等球径粒子と仮定する。各々の礫粒子に作用する流速 u_{d1} および u_{d2} がそれぞれ式(1)で示される正規分布を示しかつ独立ではないとすれば、 u_{d1} と u_{d2} の同時確率密度関数は式(11)で与えられる。

$$f_3(u_{d1}, u_{d2}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{u_{d1}}\sigma_{u_{d2}}\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{u_{d1} - \bar{u}_{d1}}{\sigma_{u_{d1}}} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{u_{d1} - \bar{u}_{d1}}{\sigma_{u_{d1}}} \right) \left(\frac{u_{d2} - \bar{u}_{d2}}{\sigma_{u_{d2}}} \right) + \left(\frac{u_{d2} - \bar{u}_{d2}}{\sigma_{u_{d2}}} \right)^2 \right\} \right] \quad (11)$$

ここに ρ : u_{d1} と u_{d2} の相関係数、また以降、添字1, 2はそれぞれ上流側粒子と下流側粒子に関する値を示す。式(11)を単体の場合と同様に無次元掃流力 τ_{*1} および τ_{*2} の同時確率密度関数に変数変換すると式(12)が得られる。

$$f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2}) = \frac{1}{4\sqrt{\tau_{*1}}\sqrt{\tau_{*2}}} \frac{1}{2\pi\sigma_{\sqrt{\tau_{*1}}}\sigma_{\sqrt{\tau_{*2}}}} \frac{1}{\sqrt{1-\rho^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left\{ \left(\frac{\sqrt{\tau_{*1}} - \bar{\sqrt{\tau_{*1}}}}{\sigma_{\sqrt{\tau_{*1}}}} \right)^2 - 2\rho \left(\frac{\sqrt{\tau_{*1}} - \bar{\sqrt{\tau_{*1}}}}{\sigma_{\sqrt{\tau_{*1}}}} \right) \left(\frac{\sqrt{\tau_{*2}} - \bar{\sqrt{\tau_{*2}}}}{\sigma_{\sqrt{\tau_{*2}}}} \right) + \left(\frac{\sqrt{\tau_{*2}} - \bar{\sqrt{\tau_{*2}}}}{\sigma_{\sqrt{\tau_{*2}}}} \right)^2 \right\} \right] \quad (12)$$

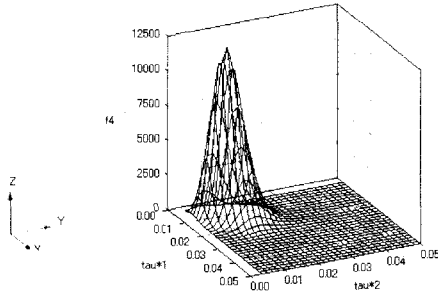


図-2 無次元掃流力 τ_{*1} , τ_{*2} の同時密度関数

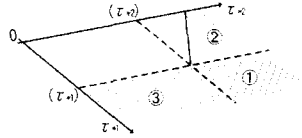


図-3 連結された粒子が τ_{*} に対して同時に移動する範囲

式(12)で表された無次元掃流力 τ_{*1} , τ_{*2} の同時確率密度関数 $f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2})$ は例えば図-2のような分布となる。

ここで、連結された2個の礫粒子が同時に移動する限界時を考えると、①上流礫1と下流礫2の各々が単独で限界状態を超えるとき、②上流礫1は単独では限界を超えていないが下流礫2が単独で限界状態を超えて張力 T が生じ、これにより上流礫1が限界状態を超えるときが想定される。この②のケースのみ2礫粒子間の張力 T が加わった移動開始条件を想定する必要性が生じ、下流礫2についてはつり合い条件として式(13)、上流礫1については移動開始条件の式(14)が立てられる。

$$D_2 - T = (W - L_2) \tan \theta_2 \quad (13)$$

$$T + D_1 > (W - L_1) \tan \theta_1 \quad (14)$$

式(13), (14)から T を消去して整理すると式(15)が得られる。

$$(1 + \alpha \tan \theta_1) D_1 + (1 + \alpha \tan \theta_2) D_2 > (\tan \theta_1 + \tan \theta_2) W \quad (15)$$

ただし揚力は $L_1 = \alpha D_1$, $L_2 = \alpha D_2$ とした。

式(15)は式(6)および式(8)を用いて式(16)となる。

$$\tau_{*1} > \frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{\tan \theta_1} (\tau_{*1}) - \frac{1 + \alpha \tan \theta_2}{1 + \alpha \tan \theta_1} \tau_{*2} \quad (16)$$

また②の逆のケースとして、下流礫2が単独では限界を超えていない時に上流礫1が限界状態を超えた時は、上流礫1のみが移動し始めるが下流礫2は移動するとは限らない。しかし移動した上流礫1の衝突や引っ張りによって下流礫2も結果的に移動する場合が多いものと考えられ、このケースも③として両方の礫が同時に移動する場合として加えるものとする。①から③のケースは無次元掃流力 τ_{*} を用いて式(17)～(19)で表される。

$$\textcircled{1} : \tau_{*1} > (\tau_{*1}) \quad \text{かつ} \quad \tau_{*2} > (\tau_{*2}) \quad (17)$$

$$\textcircled{2} : \tau_{*1} > \frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{\tan \theta_1} (\tau_{*1}) - \frac{1 + \alpha \tan \theta_2}{1 + \alpha \tan \theta_1} \tau_{*2} \quad (18)$$

$$\text{かつ} \quad \tau_{*2} \geq (\tau_{*2})$$

$$\textcircled{3} : \tau_{*1} > (\tau_{*1}) \quad \text{かつ} \quad \tau_{*2} \leq (\tau_{*2}) \quad (19)$$

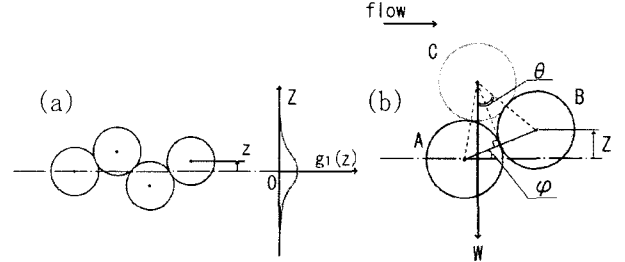


図-4 河床粒子の中心高さ分布(a)と河床とその上に置かれる粒子の関係(b)

①から③の範囲を図示すると図-3の通りとなる。図-3の $\tau_{*1} - \tau_{*2}$ 平面上に、 τ_{*1} , τ_{*2} の同時密度関数 $f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2})$ を重ね、①から③の範囲上にある曲面の体積を積分すると、これが連結された礫が同時に移動する確率となる。

これより礫粒子が2個連結された場合の限界掃流力は、連結されたひと組を1単位として単体の場合と同様に、まず図-3の①, ②, ③の範囲における $f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2})$ の積分値が p となる $f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2})$ を確定し、その時の τ_{*1} の期待値をとることによって得ることができる。すなわち、

$$\int_0^\infty \int_{(\tau_{*1})}^\infty f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2}) d\tau_{*1} d\tau_{*2} + \int_{(\tau_{*2})}^\infty \int_{\frac{\tan \theta_1 + \tan \theta_2}{\tan \theta_1} (\tau_{*1}) - \frac{1 + \alpha \tan \theta_2}{1 + \alpha \tan \theta_1} \tau_{*2}}^{(\tau_{*1})} f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2}) d\tau_{*1} d\tau_{*2} = p \quad (20)$$

によって $\sqrt{\tau_{*1}}$, $\sqrt{\tau_{*2}}$ を定め、

$$\tau_{*c} = \int_0^\infty \int_0^\infty \tau_{*1} f_4(\tau_{*1}, \tau_{*2}) d\tau_{*1} d\tau_{*2} \quad (21)$$

から限界掃流力が定まる。なお式(21)は上流礫1を主体として τ_{*1} の期待値としているが、上流礫1と下流礫2の移動は同時生起であるため τ_{*2} の期待値としても同等である。

3. 河床面の粒子高さの存在確率にもとづく評価

河床に置かれた礫の移動限界は置かれる河床面の傾きにも左右される。関根ら²⁾によると、河床面上に露出している粒子の中心高さの存在確率は図-4(a)のような標準偏差 σ_z が $d/3$ (d : 粒径) の正規分布となり、隣接粒子の高さには強い相関性がないことから、図-4(b)に示されるように、中心高さが平均中心高さにある礫粒子とその下流側にある礫粒子の上に1個の礫粒子が置かれる状況を想定すると、下流側の礫粒子の中心高さ z は平均中心高さを0とおくと式(22)で表される。

$$g_1(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (22)$$

図-4(b)のように河床の礫A, Bの中心を結ぶ線と水平とのなす角を φ とすると z は式(23)で表され、変数変換により式(22)を φ の関数に置き換えると式(24)となる。

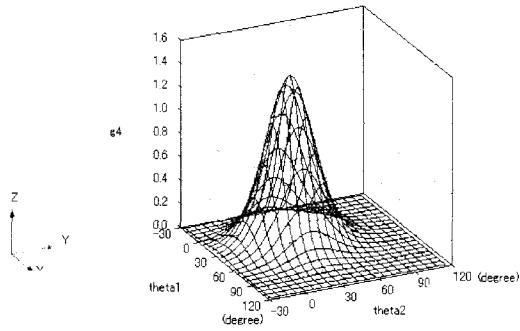


図-5 θ_1, θ_2 の同時密度関数

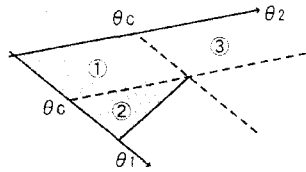


図-6 連結された粒子が θ に対して同時に移動する範囲

$$z = d \sin \varphi \quad \text{ただし } (-\pi/2 < \varphi < \pi/2) \quad (23)$$

$$g_2(\varphi) = \frac{d \cos \varphi}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{d^2 \sin^2 \varphi}{2\sigma_z^2}\right) \quad (24)$$

また各々の粒子を等球径として仮定しているため $\theta = \varphi + \pi/6$ であり、式(24)を θ の式に変換すると式(25)が得られる。

$$g_3(\theta) = \frac{d \cos(\theta - \pi/6)}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{d^2 \sin^2(\theta - \pi/6)}{2\sigma_z^2}\right] \quad \text{ただし } (-\pi/3 < \theta < 2\pi/3) \quad (25)$$

次に、2個の礫が連結されて河床面に置かれる場合を想定すると、河床面の礫粒子の配列に強い相関がないため上下流粒子1,2に対する θ_1, θ_2 は独立とみなせることから、 θ_1, θ_2 の同時確率密度関数は式(26)となる。

$$g_4(\theta_1, \theta_2) = \frac{d^2 \cos(\theta_1 - \pi/6) \cos(\theta_2 - \pi/6)}{2\pi\sigma_z^2} \times \exp\left[-\frac{d^2}{2\sigma_z^2} \{\sin^2(\theta_1 - \pi/6) + \sin^2(\theta_2 - \pi/6)\}\right] \quad \text{ただし } (-\pi/3 < \theta_1, \theta_2 < 2\pi/3) \quad (26)$$

式(27)の θ_1, θ_2 の同時確率密度関数 $g_4(\theta_1, \theta_2)$ は例えば図-5のような分布となる。

連結された2個の礫粒子が同時に移動する条件は式(15)で表されるが、 θ_1, θ_2 の確率変動のみを考えるため $D_1 = D_2 = D$ として各々の礫粒子に作用する流体力を等しいと仮定し、さらにその場合に単体礫粒子が移動限界となる時の θ を θ_c とおくと、 $\tan \theta_c = D/(W - \alpha D)$ であるため、2個同時の移動限界として式(27)が得られる。

$$\tan \theta_1 + \tan \theta_2 < 2 \tan \theta_c \quad (27)$$

この場合も前述の①から③のケースに分けて2個の礫粒子が同時に移動する θ_1, θ_2 の範囲を図示すれば図-6の

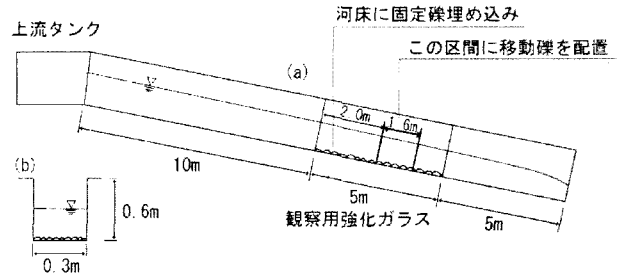


図-7 実験装置(a)側面図, (b)断面図

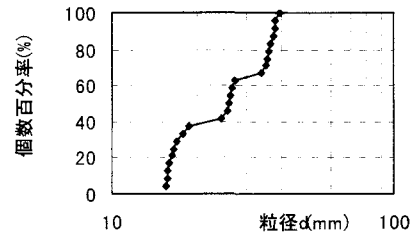


図-8 河床に埋め込んだ楕円球粒子の粒径分布

ようになる。

ここでも限界掃流力を全ての礫粒子のうち p の割合の粒子が移動するときの無次元掃流力 τ_* とすると、単体の場合は式(28)によって θ が小さいほうからの存在確率が p となるような θ を確定するとこれが移動確率 p を与える移動限界角 θ_c となることから、この θ_c を式(29)に代入することによって得られる τ_* が限界掃流力となる。

$$\int_{-\pi/3}^{\theta_c} g_3(\theta) d\theta = p \quad (28)$$

$$\tau_{*c} = \frac{\tan \theta_c}{1 + \alpha \cdot \tan \theta_c} \frac{4}{3} \frac{1}{C_D \cdot A_p^2} \quad (29)$$

礫粒子が2個連結された場合の限界掃流力も同様に、式(30)によって θ_c を確定し、この θ_c を単体の場合と同じ式(29)に代入することによって得られる。これは θ_c が式(30)においても各々の粒子の単独での移動限界角として扱われているためである。

$$\int_{-\pi/3}^{2\pi/3} \int_{-\pi/3}^{\theta_c} g_4(\theta_1, \theta_2) d\theta_1 d\theta_2 + \int_{-\pi/3}^{\theta_c} \int_{\tan^{-1}(2 \tan \theta_c - \tan \theta_2)}^{\tan^{-1}(2 \tan \theta_c - \tan \theta_2)} g_4(\theta_1, \theta_2) d\theta_1 d\theta_2 = p \quad (30)$$

4. 実験による検証

(1) 実験の概要

実験は図-7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い、水路上流端から10.0~15.0mの区間の河床には、モルタルを1cm程度の厚さに敷き詰め、乾燥する前に図-8で示されるような粒径集団が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を多数混ぜ合わせて、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。

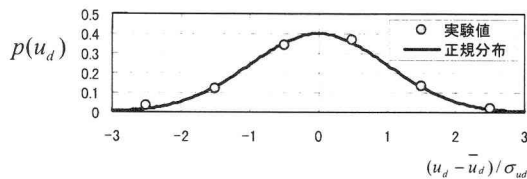


図-9 実験結果（底面流速の確率密度分布）

表-1 実験結果（移動する粒子の個数割合と無次元掃流力）

case	粒子の状態	全個数の10% 移動時の τ_*	全個数の90% 移動時の τ_*
単体-1	単体	0.0147	0.0333
単体-2		0.0128	0.0331
単体-3		0.0135	0.0416
連結-1	2個連結	0.0112	0.0249
連結-2		0.0136	0.0262
連結-3		0.0128	0.0281

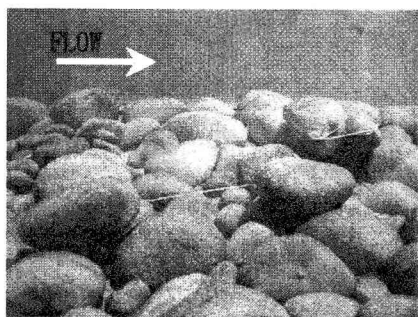


写真-1 2個連結ケースの実験

（手前は移動していない連結礫，奥は上流粒子が先に移動したが下流側粒子で止まった連結礫）

水路勾配は1/100に固定し、底面に楕円球粒子を敷き詰めた5m区間（この最上流地点を $x=0\text{m}$ とする）のうち、ほぼ等流状態で水が流下することが確認された $x=2.0\text{m} \sim 3.6\text{m}$ の区間に、河床に敷き詰めたコンクリート製楕円球粒子のうち粒径の最も大きい粒径集団の楕円球粒子を単体または連結状態で20個（連結の場合は10組となる）移動礫として河床の上に置き、流量を徐々に増加させながら、限界状態となって移動する粒子とその時の水理条件（水深、流速）を測定した。実験は単体と連結の場合とを各々3ケースずつ行った。楕円球粒子には通し番号をつけ、最初に行った2個連結ケース(case:T-1)で河床の無作為の位置に置き、その位置を粒子ごとの定点としてケースごとに同じ位置に配置した。なおここで使用した楕円球粒子は現地河川で使用されている連結礫工の粒径の1/10程度を想定して製作されたものである。

粒子の移動実験を行うにあたり、河床面の上の楕円球粒子が移動し始める程度の流速として、底面近くの流速を5分間、1秒間隔で測定し、図-9に示す通り平均流速 $\bar{u}_d = 0.45\text{m/s}$ 、標準偏差 $\sigma_{u_d} = 0.05\text{m/s}$ のほぼ正規分布に従った流れであることが確認された。

(2) 限界掃流力の検証

実験結果より、移動する粒子の個数割合と無次元掃流力を表-1に示す。限界掃流力をここでは全体の10%の礫粒子が移動するときの無次元掃流力の期待値として定義

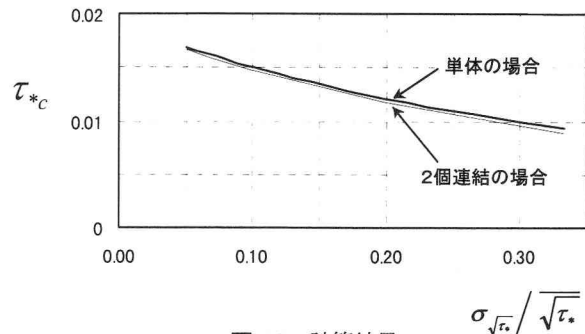


図-10 計算結果

（ $\sigma_{\sqrt{\tau_*}} / \sqrt{\tau_*}$ を変化させた場合の限界掃流力）

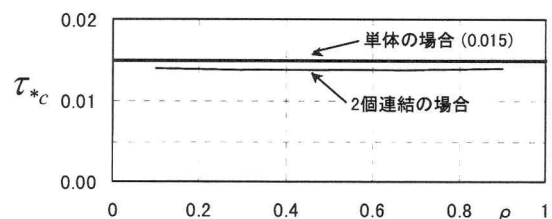


図-11 計算結果

（相関係数 ρ を変化させた場合の限界掃流力）

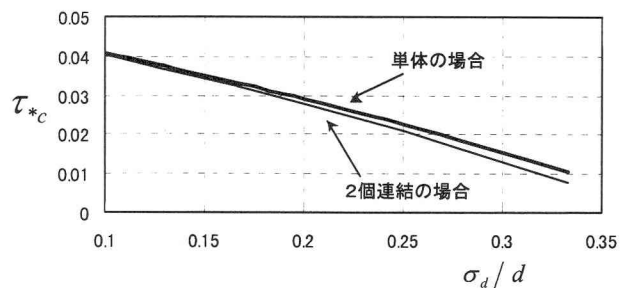


図-12 計算結果

（ σ_d / d を変化させた場合の限界掃流力）

すると、移動礫の総計が20個のため、単体の場合では2個の粒子が移動したとき、連結の場合では1組の粒子が移動したときに作用している無次元掃流力とみなせる。このように限界掃流力を定義した上で、実験での無次元限界掃流力は、単体のケースでは τ_* が0.013～0.015程度となったのに対し、2個連結のケースでは τ_* が0.011～0.014程度と単体のケースよりやや小さめの値となった。

理論式(10),(21),(29)によって、単体の場合の実験結果をもとに諸定数を想定したときの限界掃流力の計算を行うと、図-10～12に示す通りとなり、 $\sigma_{\sqrt{\tau_*}} / \sqrt{\tau_*}$ を変化させた場合、相関係数 ρ を変化させた場合、 σ_d / d を変化させた場合の3通りいずれの結果も、わずかではあるが単体の場合より2個連結の場合のほうが限界掃流力が下回る結果となった。ただし図-12では σ_d / d の増加、すなわち河床面の起伏が増大するに従って限界掃流力が低下する結果となっている。これは σ_d / d の増加に伴って移動しやすい粒子の割合が増えるため、 τ_* が低い値でも粒子が動き出しやすくなると判定されるためと考えられる。

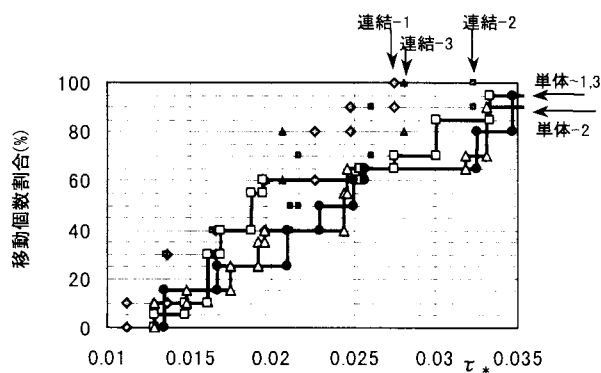


図-13 実験結果

(無次元掃流力の変化と移動する粒子の個数割合)

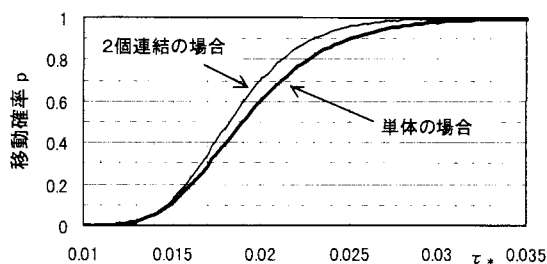


図-14 計算結果

(無次元掃流力の変化と移動する粒子の個数割合)

(3) 掃流力の増大に伴う移動割合の検証

図-13では、同じ実験において流量をさらに増加させ、掃流力を増大させたときの移動・流失した粒子の個数割合の変化を示している。これによれば同一の掃流力のもとでは単体のケースより連結されたケースのほうが移動しやすい傾向にみえる。

理論式(9),(20)において、 (τ_*) を実験結果をもとにした値に固定し、 τ_* を増加させたときの移動確率 p を計算した結果が図-14である。図-13と比較すると、実験結果とほぼ同様の傾向が計算によって再現されており、掃流力が同じ場合には移動確率は単体のほうが低いことが示されている。

5. 考察

当初は、2個の礫粒子を連結すると下流粒子を上流粒子が引っ張る作用が生じて、単体の場合より移動しにくくなるものと予想していた。しかし実験結果は逆であり、理論式による計算結果でも実験と同様の傾向が示された。

実験の観察では、単体のケースの場合は、全個数の半分程度が移動した時点で移動せずに残っている礫粒子は、流量を増加させてもなかなか移動しなくなり、最終的にはほとんどの粒子が移動するには τ_* が0.04程度になるまで流量を増加させる必要があった。これに対して2個連結のケースの場合は、半分程度の粒子が移動した後も同じようなペースで移動する粒子は増え、 τ_* が0.03前後となったところで全ての粒子が移動・流失した。

2個連結のケースでは、当初予想していた効果である、2個のうち下流側の粒子が先に移動限界に達したが上流粒子の引っ張りによって移動しない状況がよく観察された。このとき下流粒子はその位置で小刻みな振動を繰り返して上流粒子を引っ張り続け、やがてその引っ張りに耐えられなくなった上流粒子が河床から離脱して両方ともが移動するという過程をたどった。これは上流粒子が引っ張りに耐えている間は両方が移動せずに残り続けるというプラス効果であるが、その反面、本来ならば移動限界となっていなかった上流粒子が、下流の引っ張りによって移動・流失してしまうというマイナスの効果もあわせ持つことを示している。

また、2個のうち上流側の粒子が先に移動したときは、 τ_* がまだ小さい場合は、上流粒子のみが位置を変え下流粒子は移動しないケースもみられたが、 τ_* がある程度増大してからは上流粒子が流下する勢いをもって下流粒子も引っ張り、結果的には一緒に移動するケースが多く観察された。これも連結の逆効果であり、連結されていなければ下流粒子は移動せずに残っていた可能性が高いと推測される。これら上流粒子が先に動くケースは図-3,6に示される③の部分の扱いの問題であり、本論では上流粒子は移動するが下流粒子は移動しない場合も「両方移動」とみなしている。しかしながら τ_* の程度や移動を始めた上流粒子の慣性力の大きさなどによっては下流粒子が動かず「両方移動」ではない場合もあり、連結の効果を適切に見込めていないとも言えるため、より実現象に近いモデルを構築するためには解決すべき課題である。

いずれにしても、連結された場合には、上流側の粒子の移動しやすさ(しにくさ)がポイントとなるのがこの結果から言えることから、これが連結礫工を河床等を使用するときの配慮事項のひとつとなる。

6. おわりに

本論では、連結礫工に対する基礎的研究としてまず2個の礫が連結された場合を扱ったが、連結によって上流粒子が移動しやすくなるために、むしろ連結したほうが単体の状態より全体として移動しやすくなるとの結論を得た。しかしこの結果は上流粒子が安定であれば連結の利点が活きることも同時に意味し、例えば凸型のマウントの上に縦断的に連結礫工を布設する場合などに連結の効果が発揮されやすいとも考えられる。このほかにも、複数の礫が連結され群体となった場合に同様の性質を持つのか、また別の効果が発生するのかなど未だ解明されていないことが多く、今後の研究として取り扱ってきたい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 関根正人, 吉川秀夫: 掃流砂の停止機構に関する研究, 土木学会論文集第399号, pp. 105-112, 1988.

(2004.9.30 受付)