

# 史跡保全に配慮した鋼製部材を用いた土石流対策における 大粒子の集積化に関する研究

Counterplans for hazards due to debris flow around a historic site using small steel-grid SABO dam considering the larger-particles concentration at the frontal part of debris flow

原田紹臣<sup>1</sup>・里深好文<sup>2</sup>

Norio Harada and Yoshifumi Satofuka

<sup>1</sup>立命館大学 非常勤講師 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Part-time Lecturer, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>2</sup>立命館大学 教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Generally, larger particles concentrate at the frontal part of debris flow under unsaturated-flow conditions; further explanation is required. In this study, in order to propose an effective countermeasure for debris flow around a historic site, experiments were conducted using a conveyor belt and an experimental flume to understand larger-particles concentrations better. Particles of two sizes were sieved on the conveyor belt. The results indicated that the concentration of larger particles on the conveyor belt, in the absence of water, was affected by the moving distance, the flow depth, the particle diameter ratio, the riverbed gradient and the internal frictional angle of the particles.

**Keywords :** debris flow, steel-grid SABO dams, concentration of larger particles, flume experiment

## 1. はじめに

平成24年8月、広島において豪雨に伴って発生した大規模な土石流により多くの犠牲者を出した<sup>例えば, 1)</sup>。一方、史跡に隣接して土石流危険溪流等が存在する場合、将来にわたって史跡を保全するための土石流対策が必要であると考えられる。しかしながら、史跡に隣接した場所において不透過型コンクリートダム等に代表される大規模なコンクリート製の構造物を構築した場合、観光地としても価値の高い史跡の良好な景観を阻害する恐れがある。そこで、筆者らはこれまで、従来のコンクリート等で構築された不透過型砂防堰堤等に代表される大規模な砂防堰堤の代替施設として、周辺景観への影響を軽減することを目的に小規模化を図った鋼製部材によって構成される土石流フェンス(図1)を用いた土石流対策を提案している<sup>2)</sup>。

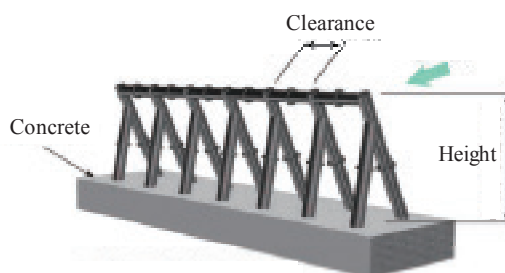


図1 提案する土石流フェンス概要図<sup>2)</sup>



写真1 土石流の先頭部における状況<sup>3)</sup>

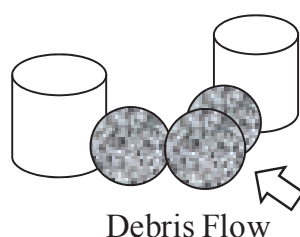


図2 巨礫のアーチ形成による透過部の閉塞メカニズム<sup>4)</sup>

なお、提案する鋼製部材を用いた土石流フェンスは、土石流中に見られる先頭部における巨礫の集積（例えば、写真1）を期待し、常時の無害の土砂は下流へ流下させ、土石流発生時のみに先頭部に集積する巨礫のアーチアクション効果<sup>4)</sup>（図2）等により閉塞させて土石流を捕捉させる工法である。

石礫型土石流の先頭部における大粒子の集積化（礫の分級現象）については、これまで多くの報告が存在している。大粒子の集積化に関するメカニズムは、一般的に逆グレーディング現象（堆積層において上部に向かって粒径が大きくなる現象）や流動層の鉛直方向における流速分布の違いに関連付けて説明されている（例えば、<sup>5)</sup>）。なお、逆グレーディング現象に関してBagnold<sup>6)</sup>は河床から与えられるせん断力等の影響を受けた礫の粒子衝突によって発生する分散圧力の考え方をを用いて、土石流中における大粒子の浮き上がりについて説明している。一方、Middleton<sup>7)</sup>は小粒子が大粒子の間隙へ落下することにより、最終的に大粒子が上部へ輸送されるとして説明している（動的篩効果：Dynamic sieving）。また、高橋<sup>9)</sup>はBagnold<sup>6)</sup>により示されている分散圧力の概念を用いて、逆グレーディング現象を考慮した土石流の流動に関する予測手法を示している。さらに、諏訪<sup>9)</sup>は粒子径の違いに応じた各粒子の移動速度の違いが土石流の先頭部における集積化に影響を与えているものとして説明している。しかしながら、現時点では土石流先頭部における大粒子の集積化に関するメカニズムについては明確な見解の統一が図られていない。

さらに、鋼製部材を用いた土石流フェンスを適用するに際して、大粒子の集積化過程を考慮した配置検討が必要であると考えられる。なお、高橋ら<sup>8)</sup>の研究によると、流下に伴って大粒子が先頭部に集積する傾向が示されていることから、大粒子の集積化には一定の流下距離が必要であると考えられる。前述に示したとおり、土石流の先頭部における大粒子の集積化に関するメカニズムについて明確な見解の統一が図られていないことから、流下距離の変化に対する土石流の先頭部における大粒子の集積化に関する応答について明確な結論が得られていないと考えられる。そこで、土石流の先頭部における大粒子の集積化に必要な流下距離について議論するため、流下距離に応じた大粒子の集積過程や無限長に流下させた場合における大粒子の集積化に関する程度の最大値について把握しておく必要があると考える。また、Bagnold<sup>6)</sup>やMiddleton<sup>7)</sup>により示されている分散圧力や動的篩効果等による逆グレーディング現象（礫の分級現象）の機構は濃度の高い粒子流を対象としたものであるため、その検証においては高濃度な土砂の流動状態を対象とした実験を行う必要がある。

石礫型土石流の流動における粒子間の相互作用や大粒子の浮き上がり等の解明を目指す第一段階として、高濃度な状態とするために水等の流体を用いず、乾燥した試料を対象に実験や個別要素法を用いた解析により検討されている<sup>10), 11)</sup>。前田ら<sup>10)</sup>は実験により傾斜させた直線水路の後方にある試料箱内に詰めた粒子を一度に崩壊（流動）させてその挙動等について観察し、同条件を想定した個別要素法による解析結果を用いて大粒子の浮き上がりに関して考察している。なお、検討結果より粒状体の流れにおいて発生する応力鎖の影響を受けて、大粒子が上部へ輸送されるとして説明している。ただし、検討等に用いられている粒子は円形であり、実渓流等に存在する異形の礫を用いた更なる検討が望まれる。また、実験等に用いられている水路長は有限であり、流下距離の影響に関する考察が望まれる。一方、堀口ら<sup>例えば、11)</sup>は無限長の流下距離における挙動に関して、回転する円形水路の装置を用いて実験し、二種類のガラスビーズを対象に分級現象について観察している。また、個別要素法を用いた検討を通して、大粒子の上部への輸送に関して考察しており、大粒子の浮き上がりのメカニズムについて粉体工学のブラジルナッツ効果を用いて説明している。しかしながら、回転する円形装置では移動距離に応じた大粒子の集積化に関する程度を把握するために、一定時間の間隔毎に粒子の移動を完全に停止させて、その集積化の程度について計測することは困難であると考えられる。また、本実験では河床勾配を任意に設定できず縦断方向において一様な流動深を保つことが出来ないため、河床勾配や流動深の変化に対する大粒子の集積化に関する傾向を正確に把握することは困難であると考えられる。さらに、無限長に流下した先頭部における大粒子の集積化に関する定量的な議論が望まれる。

以上より、提案する史跡保全に配慮した小規模な土石流フェンスを効果的に配置するため、本対策工で期待している土石流先頭部における大粒子の集積化に関するメカニズムの解明に向けて、先ず流下距離の変化に対する先頭部における大粒子の集積化に関する応答を把握する必要があると考えられる。そこで、本研究では土石流において見られる分散圧力や動的節効果等による逆グレーディング現象を発生させ、流下距離と逆グレーディング現象との関係を考察することを目的とする。なお、土石流中における流動過程については不明瞭な点も多いため、本検討では水流の干渉を受けない環境下におけるブラジルナッツ効果や動的節効果等の影響による大粒子の集積化に着眼し、水等の流体を用いずに乾燥した粒子（礫）を対象に、ベルトコンベア及び透明な固定されたプラスチック製の側壁を有する直線の実験装置を用いて擬似的に無限長の流下距離を表現し、任意距離における大粒子の集積化状況（各粒子の存在割合）を把握している。さらに、河床面から流動表面までの鉛直方向における礫の移動を確認している。

## 2. 実験条件及び実験方法

石礫型土石流の流下に伴って発生する土石流先頭部における大粒子の浮き上がりや集積化について定量的に把握するため、実験装置の下部に設置されたベルトコンベアを用いて河床のみを一方向に移動させた。なお、ベルトコンベアの進行する側を土石流の後方とし、その反対側を前方（先頭部）としている。粒子の下部底面だけが後方に移動させることにより、擬似的に任意距離における粒子群の流下に伴う底面からのせん断抵抗を表現している。なお、実験に用いた装置は図3に示される矩形装置長50cm、高さ及び幅15cmの矩形断面であり、事前に用意した二種類（平均粒径 $d_1$  35mm：長径約40mm及び短径約30mm、 $d_2$  25mm：長径約30mm及び短径約20mm、 $d_3$  15mm：長径約20mm及び短径約10mm）の三種類の礫の中から二種類を選択し、礫

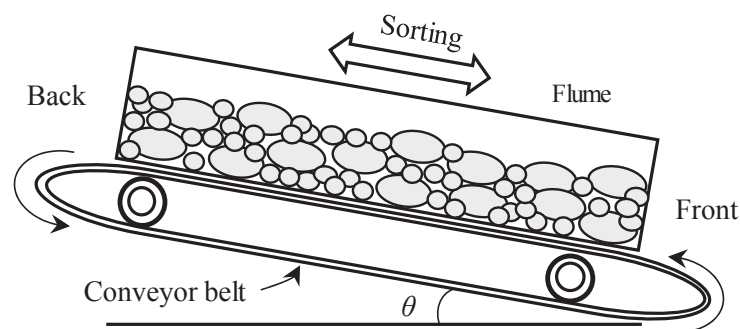


図3 実験模型の概要

の平均径について大きい順にそれぞれ $d_L$ 、 $d_S$ として設定)の礫をそれぞれ同じ重量( $w_L$ 、 $w_S$ )で可能な限り分散させて装置の底面に敷き詰めた。なお、各粒子( $d_1$ 、 $d_2$ 及び $d_3$ )の内部摩擦角については傾斜法を用いて試験し、それぞれ約35、40及び45度であった。ベルトコンベアの回転(移動)速度は約5cm/sの一定とし、使用したベルトの表面における摩擦係数は約0.9<sup>12)</sup>とした。また、実験装置を水平に設置して実験した場合、ベルトコンベアの移動に伴って全ての粒子が後方に集積してしまう。一方、土石流表層において見られる速い流速の影響を受け、表層に存在する大粒子が先頭部に輸送され集積する現象が知られている<sup>(例えば、5)</sup>。そこで、図3に示されるとおり実験装置の後方を上部に傾斜し、礫の内部摩擦角の違いにより流動層の表層に存在する粒子が重力の影響を受けて停止できずに装置前方に向けて移動させ、先頭部に礫を随時に輸送させるように工夫している。実験装置の傾斜角 $\theta$ は事前に実施した予備実験結果より、装置内における礫の堆積厚がベルトコンベアの移動においても全体的にほぼ一定の状態を確保できる角度(表1参照:後述)とした。

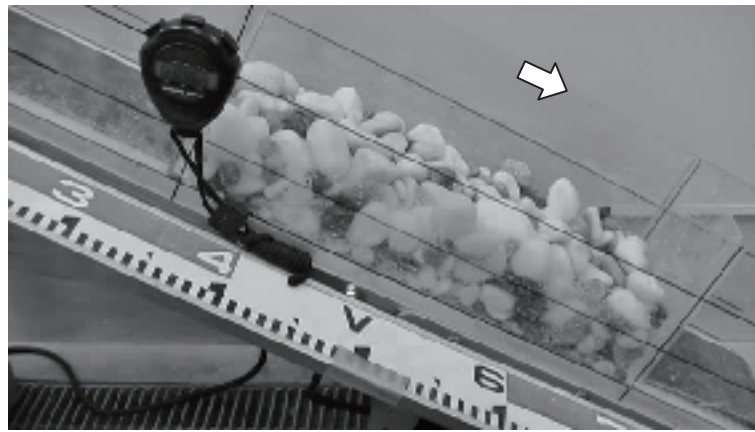
ベルトコンベアによる移動距離に応じた大粒子の集積化について定量的に把握するため、定期的にベルトコンベアを停止させて、実験装置を移動方向に二等分した前方及び後方における大粒子及び小粒子の重量をそれぞれ計測した。具体的な計測方法として、一回目の実験においては10秒後の重量、二回目の実験においては30秒後の重量、三回目以降の実験においては前の実験に30秒を加えた時間の経過後の重量をそれぞれ計測し、ベルトコンベアの移動に伴う各礫径に対する重量の存在割合に関する時間的な変化について比較した。その際、毎回の計測後に大粒子と小粒子を初期の状態(実験開始時)と同じように実験装置に分散させて敷き均し、実験を繰り返して実施した。なお、毎回の実験において実験装置に敷き詰められた各粒子の存在割合に関する不均一性を考慮して、設定された条件に対してそれぞれ三回実施した。実験条件を表1に示す。表1に示されるとおり、実験においては礫径や流動深等の違いが大粒子の集積化に与える影響を把握するため、それぞれの条件を変化させている。また、実験中における大粒子の集積化や逆グレーディング現象の様子について把握するため、ビデオカメラを用いて連続的に観察した。

### 3. 実験結果及び考察

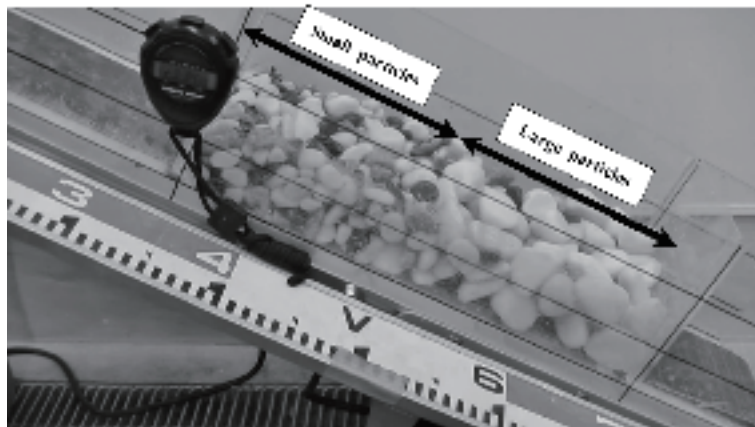
実験開始前及び実験終了後における大粒子の集積状況(礫の分布状況)をそれぞれ写真2に示す。写真2(下)に示されるとおり、実験終了後においては概ね実験装置の前後において礫の分級現象(前方:大粒子、後方:小粒子)が確認されている。ただし、最終的に大粒子と小粒子の完全な分級は確認されなかった。ここで、ベルトコンベアの移動距離に応じて見られる大粒子の集積化(礫の分級現象)の過程に関して、観察結果より推測される概念図を図4に示す。図4(b)に示されるとおり、本実験結果は河床のベルトコンベアから礫に伝達されるせん断力や振動等の影響を受けて分散圧力<sup>6)</sup>やブラジルナッツ効果<sup>11)</sup>等で説明されている大粒子の浮き上がりが水路の全体で確認されたことより、従来検討されている大粒子の浮き上がりと同様の現象であったと考えられる。その際、実験装置後方において端壁の影響を受けて小粒子による密な集合体が河床に対して約35から50度程度の傾斜角( $\theta_s$ )で形成された。浮き上がっている大粒子の一部はこの傾斜角 $\theta_s$ の境界部に沿って、各礫の内部摩擦角の違いの影響を受けて上部に浮上していく様子が確認された。なお、大粒子の浮き上がりに関して、上流側の端壁からの受動的な影響も一部受けていると考えられるが、境

表1 大粒子の集積化に関する実験ケース

CASE	Particle weight $w_L$ or $w_S$ (kg)			Flume gradient $\theta$ (degrees)	Flow depth (mm)
	$d_1$ 35 mm	$d_2$ 25 mm	$d_3$ 15 mm		
1-1,1-2&1-3	2.0	-	2.0		~60
2-1,2-2&2-3	1.0	-	1.0	27.5	~30
3-1,3-2&3-3	3.0	-	3.0		~90
4-1,4-2&4-3	-	2.0	2.0	30	~50
5-1,5-2&5-3	2.0	2.0	-	28.5	~70



(Before)



(After)

写真2 実験結果（上：実験開始前、下：実験終了後）

界部分だけでなく全体で浮き上がりが確認されたため、従来検討されているような大粒子の浮き上がりと同様の現象であると考えられる。最終的に、表面に持ち上げられた大粒子は、重力の流下方向成分が表面粒子との接触による摩擦力より卓越するため前方に向かって移動し、前方で大粒子の集合体が形成されていくことが確認された（図4、(c)）。

一方、小粒子は大粒子とは異なり、内部摩擦角度の違いにより表面粒子との接触による摩擦力が重力の流下方向成分よりも卓越したため、堆積物の表面に存在している小粒子は前方に向かって殆ど移動しなかった。なお、これらの粒子間に働く摩擦力等の違いは、粒子の遮蔽や落ち込みの影響を受けた咬合効果の違いによるものだと考えられる。実験措置の河床部に設置されたベルトコンベアの移動に伴って確認された先頭部における大粒子の集積化（礫の分級現象）と移動距離との関係を図5に示す。なお、大粒子の集積化率  $R_1$  は、

$$R_1 = (w_{ft} - w_{if}) / w_{if} \quad (1)$$

と表される。ここに、 $w_{ft}$  (kg) は  $t$  秒後の装置前方部における大粒子の重量及び  $w_{if}$  (kg) は実験開始前の装置前方部における大粒子の重量である。なお、式 (1) に関して先頭部における大粒子の重量を小粒子の重量とした場合、距離に応じて負の値を示し、小粒子の分散化（逆集積化）を表現することが可能となる。図5に示されるとおり、移動距離が300cm程度において概ね大粒子の分級が終了しており、最終的な大粒子の集積化率  $R_1$  はそれぞれ約0.6（例えば、 $w_{ft}$  が3.2kg、 $\Sigma w_{if}$  が2.0kg）であった。これより、前方における大粒子の重量は前方における全礫径（大粒子及び小粒子）の重量に対して約80%（例えば、 $3.2\text{kg} / (2.0+2.0)\text{kg} \times 100\% = 80\%$ ）となる。ここで、移動層が厚い場合、落ち込む粒子が後方への移動速度の比較的大きい下層へ到達するのに時間を要し、先頭部において一時的に滞留するため、集積化の進行に影響を与えると考えられる。また、装置の傾斜角 ( $\theta$ ) を変化させた場合、重力の河床に対する垂直方向の成分が異なり、下面から与え

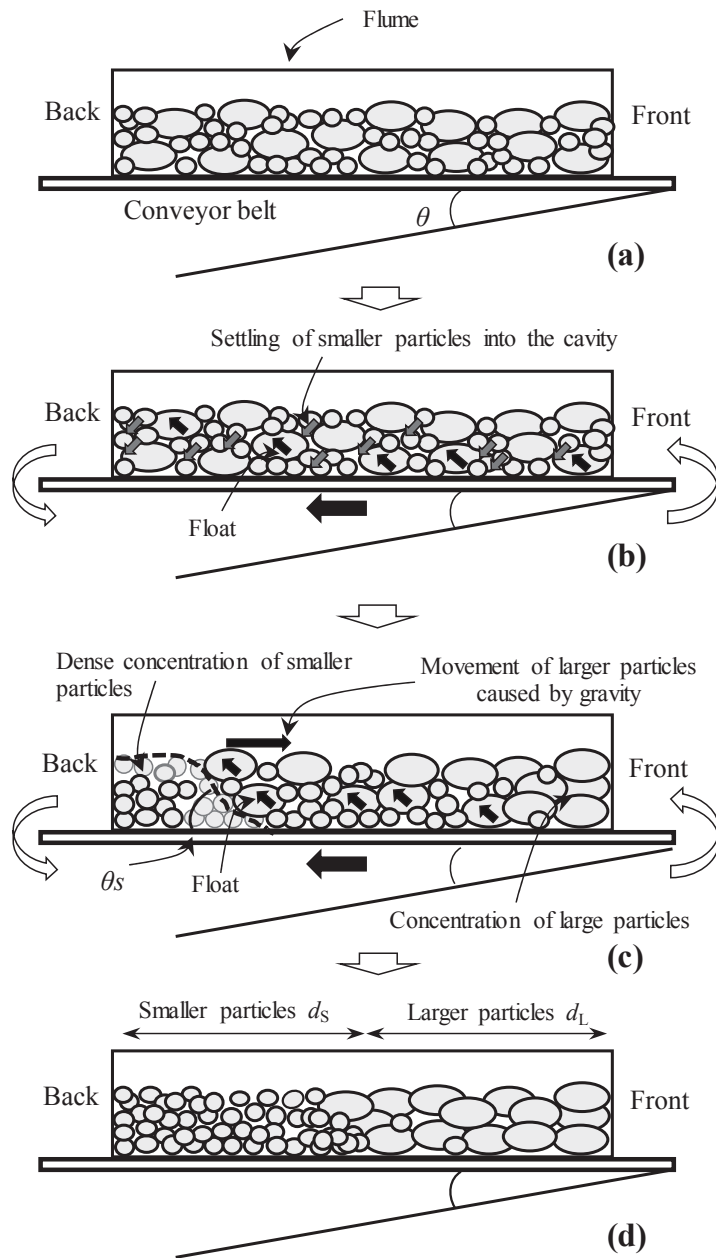


図4 移動距離に応じた大粒子の集積化に関する概要図

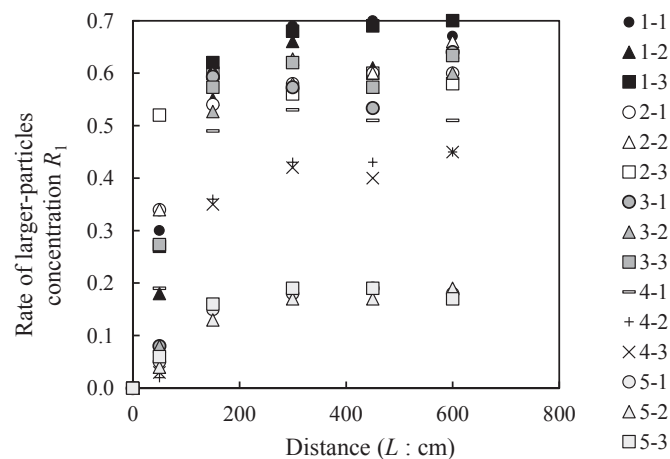


図5 礫の集積化率と移動距離との関係

られる摩擦力がその影響を受けると考えられる。そこで、図5に示される結果について一般化を図るため、移動距離 $L$ については移動層厚 $h$ で除して整理し、大粒子の集積化率  $R_1$ については実験に用いた礫の粒径比 $f_1$  (礫の平均粒径比) 及び水路の傾斜角 $\theta$  (余弦) で除して整理した。なお、整理された大粒子の補正集積化率  $R_*$ と無次元移動距離 $L_*$ との関係を図6に示す。また、最終的な大粒子の補正集積化率  $R_*$ は、

$$R_* = R_1 / (f_1 \cdot \cos\theta) \quad (2)$$

$$f_1 = (d_L - d_m) / d_m \quad (3)$$

$$L_* = L / h \quad (4)$$

と表される。ここに、 $\theta$ は河床勾配、 $d_m$ は平均粒径である。なお、図6に示されるとおり、無次元移動距離 $L_*$ が25より小さい場合 (移動層厚 $h$ に対して25倍以下の距離) においては大粒子の補正集積化率 $R_*$ はほぼ線形的に増加し、無次元移動距離 $L_*$ が25より大きい場合においては一定値で推移することがわかった。これより、大粒子の補正集積化率  $R_*$ と無次元移動距離 $L_*$ との関係は、

$$R_* = 0.07 \cdot L_* (L_* < 25) \quad (5)$$

$$R_* = 1.7 (L_* \geq 25) \quad (6)$$

と表される。これより、土石流フェンスの配置に際しては、礫の集積化を期待するために上流域の溪流において十分な流下距離が必要であることがわかった。今後、礫の集積化に必要な流下距離について更なる詳細な検討が必要である。なお、流下距離が十分に確保できない場合には、鋼材部材間隔 (格子幅) を通常<sup>2)</sup>に比べて狭くして確実に捕捉する必要があると考えられる。

また、本実験では一般的に知られている礫同士の衝突応力や準静的なクーロン摩擦応力等の内部応力が優勢な分級現象を対象に、高濃度な流動状態を仮定して実験している。今後、土砂濃度が低い土石流中において、濃度や流速分布の違いが大粒子の集積化に与える影響について把握するため、水を加えた実験による検討が望まれる。特に、水を加えた濃度が低い流動状態において、河床勾配の違いが集積化に与える影響について更なる検討が望まれる。さらに、本実験では同重量の大粒子と小粒子の二粒径間における相互作用に着眼しており、更なる検討条件 (例えば、三粒径以上の混合粒径や重量の違い) における大粒子の集積化を対象にした検証が望まれる。

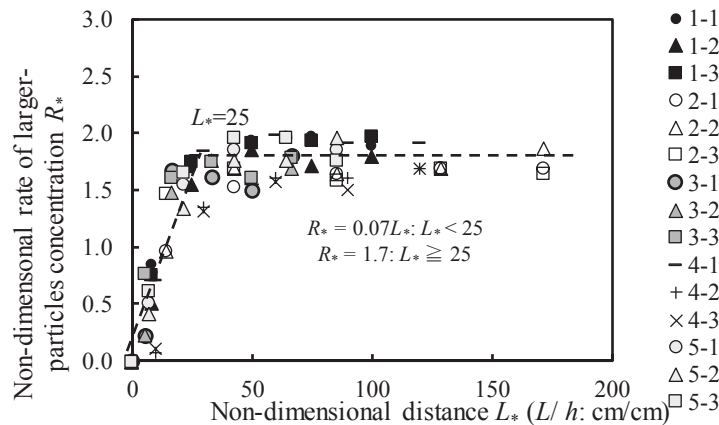


図6 礫の補正集積化率と無次元移動距離との関係

## 4. おわりに

史跡保全に配慮した小規模な土石流フェンスの提案に際して、土石流先頭部における巨礫の集積化を考慮して効果的に配置するために、本対策工において期待している先頭部での大粒子の集積化に関するメカニズムの更なる解明が望まれる。そこで、本研究では、先ず流下距離の変化に対する先頭部における大粒子の集積化に関する応答を把握することを目的に、土石流先頭部における距離に応じた大粒子の集積過程に関する基礎的な実験を実施した。本研究で得られた成果を以降に要約する。

- 1) 移動層厚を考慮したベルトコンベアの無次元移動距離に応じて大粒子が分級し、先頭部に大粒子が集積することがわかった。なお、集積化率には上限があり、そこでまでは線形的に集積することがわかった。また、最終的に縦断方向における大粒子と小粒子の完全な分級は確認されなかった。
- 2) 流動深、礫の粒径、河床勾配及びそれぞれの粒径に応じた粒子の内部摩擦角の違いがベルトコンベアからのせん断力等による大粒子の集積過程に対して影響を与えることがわかった。
- 3) 史跡の保全や景観に配慮した小規模な土石流フェンスの配置に際しては、閉塞メカニズムに関して礫の集積化を期待するために上流域の溪流において十分な流下距離が必要であることがわかった。なお、流下距離が十分に確保できない場合には、鋼材部材間隔（格子幅）を通常<sup>2)</sup>に比べて狭くする必要があることが示唆された。今後、礫の集積化に必要な流下距離について更なる詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 土木学会四国支部：広島豪雨災害調査報告，<http://www.jsce.or.jp/branch/chugoku/disaster2014/disaster.html> (2015.4.10\_Check).
- 2) 原田紹臣・里深好文：土地利用の高機能化による史跡保全に配慮した土砂災害対策，歴史都市防災論文集，第7号，pp.31-38，2013.
- 3) 奥田節夫・諏訪 浩・奥西一夫・仲野公章・横山康二：土石流の総合的観測 その3，京都大学防災研究所年報，第22号，pp.237-263，1977.
- 4) 高橋 保・中川 一・里深好文・王 浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル，水工学論文集，第45号，pp.697-702，2001.
- 5) 岡田博有：礫質堆積物にみられる逆グレイディング，地質学雑誌，第11号，pp.589-594，1968.
- 6) Bagnold, R. A.: Deposition in the process of hydraulic transport, *Sedimentology*, 10, pp.45-56, 1968.
- 7) Middleton, G. V.: Experimental studies related to problems of flysch sedimentation, Lajoie, J. ed., *Flysch Sedimentology in North America*, Geological Association of Canada Special Paper 7, pp.253-272, 1970.
- 8) 高橋 保・中川 一・原田達夫：混合粒形材料からなる溪床侵食型土石流の予測，京都大学防災研究所年報，第33号B-2，pp.443-456,1990.
- 9) 諏訪 浩・奥田節夫：焼岳上々堀沢扇状地における土石流の堆積構造，京都大学防災研究所年報，第25号B-1，pp.307-321,1982.
- 10) 前田健一・舘井 恵・福間雅俊：個別要素法を用いた粒子流れの構造と大粒子の浮き上がりのマイクロメカニクス，砂防学会誌，第64号，pp.3-14，2011.
- 11) 堀口俊行・香月 智・長池広樹：回転円筒による混合球形粒子の偏析実験と個別要素法解析，土木学会論文集A2，第64号 No.1，pp.41-56，2013.
- 12) バンドー化学株式会社：サンライトベルトFMS, SL-MO400, 2014.