

透過型砂防堰堤に対する土石流内部の先端形状の違いが荷重に与える影響について

A STUDY ON LOAD GIVEN TO DIFFERENT FRONT SHAPES OF DEBRIS FLOW
REGARD TO OPEN SABO DAM

齋藤 和樹¹・堀口 俊行²

Kazuki SAITO and Toshiyuki HORIGUCHI

¹防衛大学校理工学研究科後期課程 (〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20)

E-mail: ed24006@nda.ac.jp

²防衛大学校建設環境工学科 (〒239-0811 横須賀市走水 1-10-20)

E-mail: htoshi@nda.ac.jp

Key Words: debris flow load, movable bed, open sabo dam, boulder front shape

1. 緒言

近年、山間地での集中豪雨や台風の発生により、土石流による被害が増加している。特に、石礫型土石流は、先頭部に巨礫が集中することで大きな衝撃力を保有し、住宅地等に対して被害を大きくするといわれている¹⁾。その土石流対策の一つとして、透過型砂防堰堤(以降、透過型)が、建設されている。しかし、昨今では大規模土石流によって透過型の損傷を受けた例が報告されている^{2) 3)}。これらの事例では、設計荷重を超える土石流が流下したことで損傷に至ったとされている⁴⁾。このような被災を背景として、透過型に作用する土石流荷重の検討が求められている。

ところで、土石流流下時に生じる土石の流れを見てみると、土石流先端部の大粒子集中機構は、土石流内部における逆グレイディング現象⁵⁾によるものや、小粒子が土石流内部の砂礫間隙を通過して下層に落ち込むことにより発生する動的ふるい効果⁶⁾などで、土石流内の巨礫の集中機構に関する研究がなされている⁷⁾。いずれも、流れが段波形状になり礫が先端に集中することで成り立っている。そのため、土石流と透過型の衝突は直接、流体力および礫衝突を受けることから衝撃力が増すことが想定される。一方、水路実験を観察すると礫が先端に集中せずに、

礫の先端が鋭角な形状で流下してくることがある⁸⁾。このような景況を見ると、構造が複雑な透過型にとって、流れてくる先端形状によっては、堰堤が受ける応答が異なる可能性がでてくる。さらに、先端形状の条件によっては透過型の部材に対して局所的に大きな荷重が生起することが想定され、部材の損傷の原因になりかねない。

砂防構造物の作用荷重に関する研究は、実験スケールにおける検討が多く報告されている⁹⁾⁻¹²⁾。このような研究では、構造物に対する耐荷性能に焦点がおかれ、作用荷重として最も大きいと思われる石礫型土石流に限定して、堰堤全体が受ける荷重について検討される¹⁰⁾、例えば、水山ら¹¹⁾はガラスビーズと礫を用いて、土石流水路実験を行い、土石流荷重と局所的な衝撃力を整理した。三好ら¹²⁾は、ガラスビーズを用いた実験を用いて、土石流の最大衝撃荷重を計測した。その際、土石流の最大流動深よりも小さい先端部が衝突した際に最大荷重が発生していることから、先端部の形状が関係していると推測した。石川ら¹³⁾は、水路底面に砂を張り付けた水路を用いて軽石を用いた土石流実験を行い、先端部が段波形状となる条件を整理し、衝撃的な荷重が発生することを明らかにした。よって、土石流先端部の形状によって土石流の作用荷重が変化すると考えられるが、先端部の変化から荷重に与える影響や最

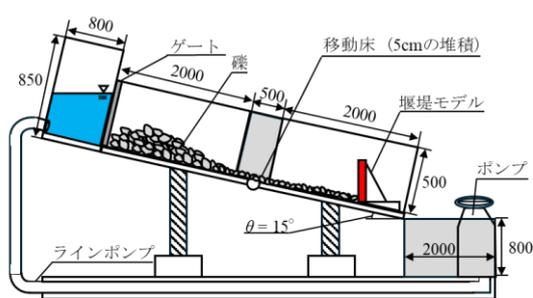
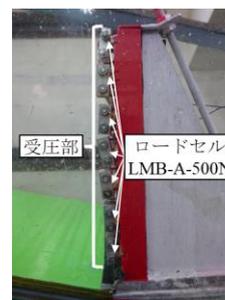


図-1 実験水路諸元



(a) 前面



(b) 側面

写真-1 堰堤モデル

表-1 礫モデルの礫量

礫径 (mm)	礫量 (kg) 総量：75 kg	移動床礫量 (kg) 総量：30 kg
40~60	25.5	10.2
24~40	31.5	12.6
15~24	18.0	7.2

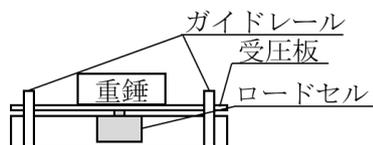


図-2 ロードセルの校正装置



写真-2 礫モデル

大荷重に至るまでの応答について検討の余地が残されている。

ところで、小松ら¹⁴⁾は動的荷重分布の提案のために、土石流荷重の水平高さ方向の荷重を計測できる装置を作成し、荷重の変化について検討した。その際、土石流の荷重は衝突面での作用荷重と比べて各段高さが高くなるにつれて徐々に低下することを示した。しかし、土石流の先端形状による作用荷重の変化についての検討は行われていない。

そこで本研究は、礫を敷き詰めた移動床を用いて土石流実験を行い、土石流の水平高さ方向の荷重を整理し、土石流の先端形状の違いが土石流荷重にあたる影響について検討する。

2. 実験条件

(1) 実験装置等の概要

図-1に、実験で使用した水路の諸元を示す。水路は、水路長4.5 m、水路幅300 mm、水路高さ500 mmの2段階勾配型水路である。ただし、今回の実験では、勾配 $\theta=15^\circ$ と一定にした。また、水路の底面は、礫を配置するために木材を敷いた。土石流の発生には、空気圧で開閉するゲートで水を貯めて一挙に流した。

写真-1に示す堰堤モデルは、高さ280 mm、幅300 mmであり、木材を用いて作成した。各段には、写真-1(a)に示すように荷重計測装置を配置している。荷重計測装置は、木材と鋼材で固定されている受圧部を設置しており、正面から受けた荷重を高さ方向ごとに計測できる。写真-1(b)に示す受圧板の後方には、500 Nロードセル(LMB-A-500 N)を配置しており、それぞれの受圧部の左右に1つずつ計14個

配置している。この装置を水路上流のゲートから4.0 m下流側に固定した。

(2) 計測要領

計測システムの構成は、ユニバーサルレコーダー(EDX-100A)を使用しており、それぞれの計測器、PC、ロードセルに接続した。図-2に、ロードセルの校正要領の一例を示す。ロードセルの校正は、ロードセルの上部に受圧板を配置し、重錘を載荷することで、校正係数を決定した。流下時の土石流荷重の妥当性を検証するために、堰堤モデルの受圧板前面に仕切り板を入れ、水を貯めることで静水圧を計測し、各段で計測された荷重の合計値が静水圧の理論値と一致することを確認した。

動的荷重の計測において、コンクリートや鋼材によっては、詳細な分析の後に設定するものである¹⁵⁾。まずは、実験の速度帯と波形分析において、土石流は低周波数帯であることがわかる。よって、サンプリング周波数100 Hzとした。また、ローパスフィルター無しの条件で当初土石流荷重を計測し、計測された荷重～時間関係をフーリエ変換した。フーリエ変換の結果から本実験における土石流の主要な周波数帯が10 Hz以下であることが確認できたので、高周波数帯のノイズ除去を目的としてローパスフィルターを1.0 kHzとした。

(3) 礫モデル

写真-2に示す礫モデルは、比重2.6であり、3種類の粒径の礫材を混合して用いた。表-1に、礫径ごとの質量を示す。礫モデルは、水路最上部に堆積させ、幅50 cm程度に敷きならして配置している。次に、移動床として礫モデルを水路底面に配置し、礫

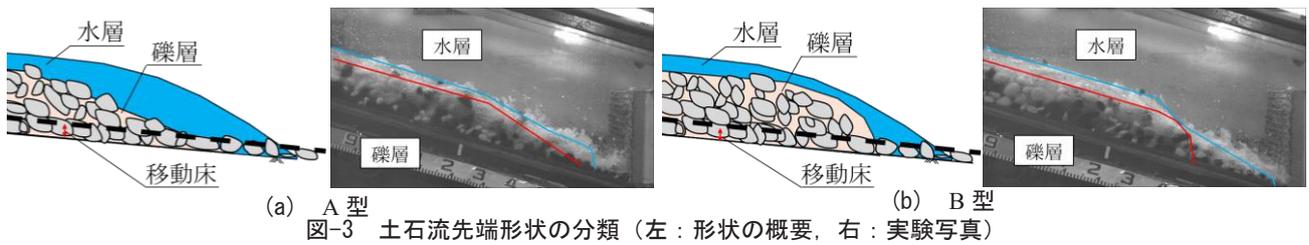


図-3 土石流先端形状の分類 (左：形状の概要，右：実験写真)

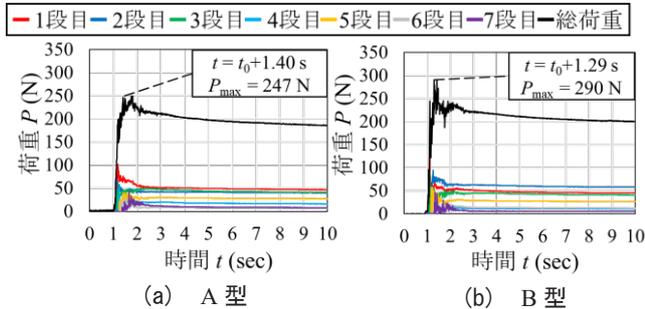


図-4 土石流総荷重～時間関係 (代表値)

の配置時の高さは、5 cm となるように水路底面が一律の高さになるようにした。流下要領は、堆積させた礫モデルの上流で、水を 30 L 溜めてダムブレイク方式を用いて流下させた。これは、文献¹⁶⁾を参考に、堰堤の損傷条件を検討した実験の礫量と流下要領を基に実施した。

土石流の撮影要領は、水路側面からハイスピードカメラを用いて撮影した。撮影条件は、フレームレート 150 fps、シャッタースピード 1/3000 である。この映像結果を基に流速と礫の移動形態を分析する。

(4) 先端形状と実験ケース

作用荷重における影響を分析するために、実験の土石流先端形状を基に大きく 2 つに区分することとした。図-3 に 2 つの土石流先端形状を示す。図-3(a) の A 型は、先端部の流水が多く含まれる領域(水層)が薄く伸びて、同時に礫も鋭角に流れている。そのため、礫の立ち上がりがない。次に、図-3(b) の B 型は、水層の先端部の伸びは比較的少なく、水層内に礫が多く含まれる領域(礫層)の先端部が段波のように立ち上がっている。本実験では、礫の初期配置や移動床について同条件であるにもかかわらず 2 つの先端形状をもつ土石流に着目した。そのため、堰堤衝突前の土石流の先端形状を水が多く存在する A 型と礫が多く存在する B 型に分類し、それぞれ 5 ケースずつ実験を行った。その際、各々の荷重～時間関係の影響について整理した。

3. 実験結果

(1) 総荷重～時間関係

図-4 に A 型と B 型の代表例として 1 ケースの荷

重～時間関係を示す。 $t = t_0 + 1.00$ s を荷重の立ち上がりとした。図-4(a) は、最大荷重 $P_{\max} = 247$ N であり、最大荷重の発生時間は $t = t_0 + 1.40$ s である。一方、図-4(b) は、最大荷重 $P_{\max} = 290$ N であり、最大荷重の発生時間は $t = t_0 + 1.29$ s である。A 型に比して B 型は最大荷重が大きく、その立ち上がりの最大荷重までの発生時間も早いことが分かる。これは、全体の応答は、荷重が 50 N 程度大きくなっており、先端形状が段波を生じている方が荷重の立ち上がりに影響が生じている。

(2) 土石流の流下景況

写真-3 に A 型の流下景況を示す。写真-3(a) に示す土石流が堰堤モデルの衝突前を $t = t_0 + 1.00$ s とする。写真-3(b) の $t = t_0 + 1.11$ s では、1 段目に土石流が衝突した景況である。写真-3(c) の $t = t_0 + 1.29$ s では先端部が捕捉され、停止した礫の上部をせり上げるようにして礫が流下し、6 段目まで礫が衝突している。写真-3(d) の $t = t_0 + 1.40$ s では、堰堤天端部付近まで礫が到達し、総荷重が最大値となる。これは、先端衝突時に最大荷重が生じるのではなく礫全体が流下し、堰堤全面に礫が到達したときに最大荷重になることを示している。

写真-4 に B 型の流下景況を示す。写真-4(a) に示す土石流が堰堤モデル衝突前を $t = t_0 + 1.0$ s とする。写真-4(b) の $t = t_0 + 1.11$ s では 1～3 段目に土石流先端部が衝突し、1, 3 段目が最大荷重となる。写真-4(c) の $t = t_0 + 1.29$ s では、6 段目まで礫が衝突し、総荷重が最大となる。写真-4(d) の $t = t_0 + 1.40$ s において、A 型と同様に堰堤天端部まで礫が満砂する。このことから、B 型は A 型に比して礫が先端部に集中し、先端部が高密度で流下している。また、最大荷重発生時は、衝突時に生起しており、衝撃的な荷重が生起している。ただし、A, B 型ともに最終的な堆積形状に大きな変化はなかった。

(3) 各段荷重の比較

図-5 に A 型と B 型の各段の荷重～時間関係を示す。実線で示す黒色が A 型、赤色が B 型を示しており、破線で示す時刻はそれぞれの最大荷重が発生した時刻である。図-5(a)～(c) に示す 1～3 段目では B

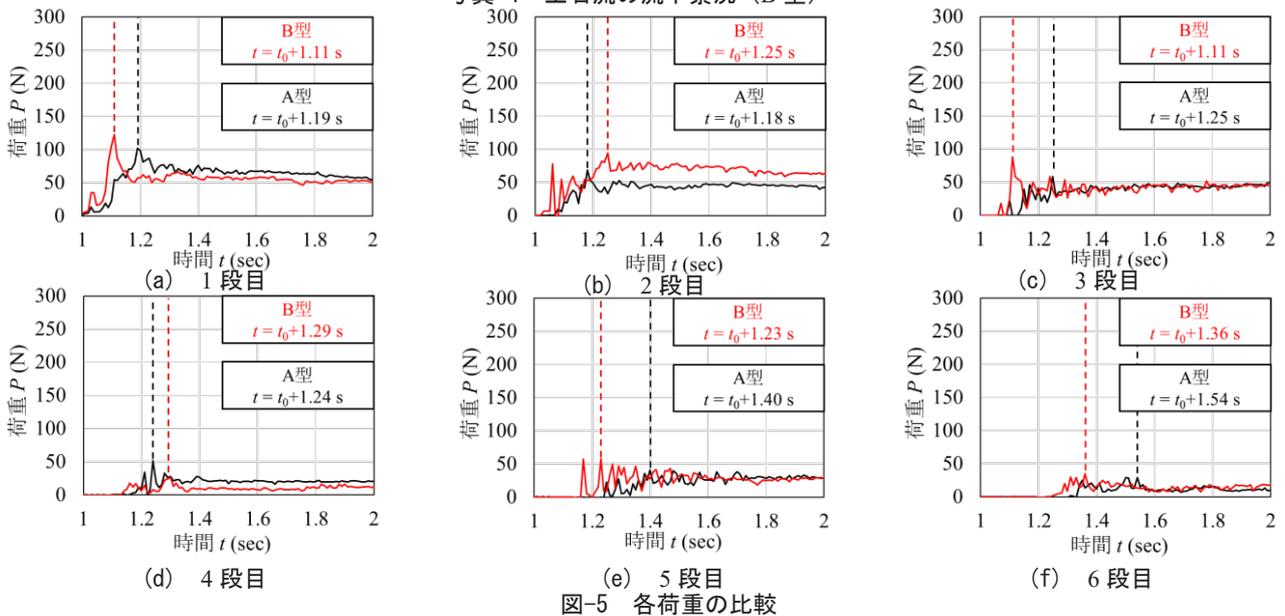
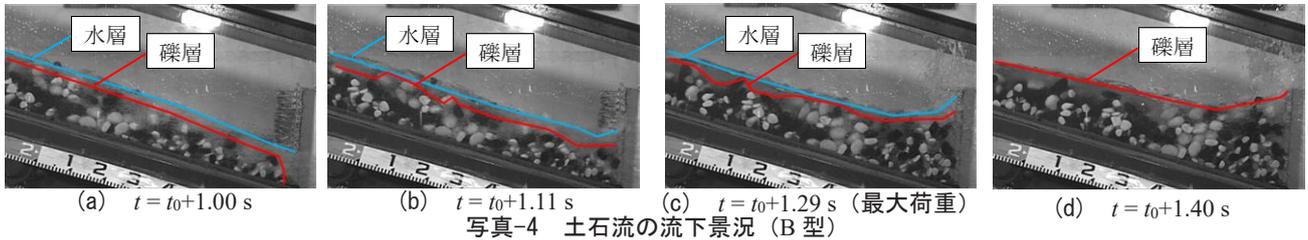
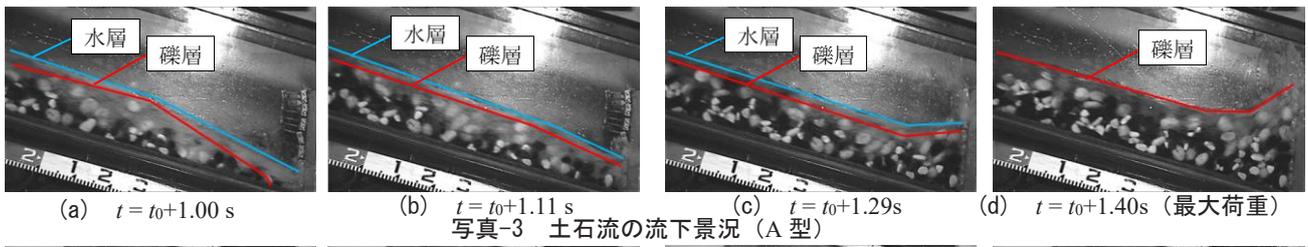


図-5 各荷重の比較

型はA型に比して大きな荷重が発生し、その発生時間も早いことがわかる。これは、衝突面の形状に影響が出ているためである。また、下段における荷重のみで、衝撃的な荷重の有無に影響をしている。また、図-5(b)は、B型の1, 3段目の荷重の立ち上がりより遅れて最大荷重となっている。これは、土石流先頭部衝突時に2段目の周辺で礫のかみ合いや礫と受圧板との空隙によって生じたものと思われる。そのため、先頭部の衝突で最大荷重が発生せず、後続礫による堆砂圧の上昇によって荷重が大きくなるものと推測される。なお、2段目は、図-5(d)~(f)に示す4~6段目のA型とB型の最大荷重は、概ね近い値であり、4段目のみA型の方が大きいことがわかる。つまり、土石の先端部が少しでも堰堤に捕捉されて礫が後続礫と衝突もしくは乗り上がることによる制動力で堰堤に作用する荷重が低減する。これはいずれの結果においても同様であった。なお、7段目はA, Bともに大きな差はなかった。表-2にA型とB型の各段荷重の計測開始時刻と最大荷重の計測時刻および最大荷重を示す。最大荷重の灰色に

ハッチングした箇所は、A型とB型を比較してより大きな荷重が生起している。B型は、A型に比して各段の荷重の計測開始時刻が早いことがわかる。

図-6に各段荷重と総荷重の最大値を箱ひげ図で整理したものを示す。この結果は、実験の全ケースを含む。A型に比してB型が計測高さ3.1 cm, 7.3 cm, 11.4 cm (1~3段目) で大きい値となることが分かる。15.6 cm (4段目) 以降の荷重を比較するとA型とB型が近い値となる。これは、写真-3, 4に示す土石流先端部の形状の違い、特に礫が先頭部に密集しているB型がより大きな荷重が発生している。よって、土石流先頭部に礫が高密度で流下する場合、その先頭部が衝突する箇所に局所的に大きな荷重が発生することが示唆される。

(4) 流下時の礫の移動

図-7に、高速ビデオカメラから分析した土石流の礫移動をトレースしたものを示す。土石流が堰堤衝突前からの0.9 s間を0.1 s間隔で3個の礫をトレースした。トレース開始時に土石流先頭部に存在した

表-2 各段の荷重および最大荷重発生時間

段	A型				B型			
	荷重計測開始時刻	時間差	最大荷重発生時刻	最大荷重(N)	荷重計測開始時刻	時間差	最大荷重発生時刻	最大荷重(N)
1	1.00	0.07	1.20	99	1.00	0.01	1.11	122
2	1.06	0.03	1.18	69	1.01	0.05	1.25	95
3	1.09	0.07	1.25	59	1.06	0.07	1.11	89
4	1.16	0.08	1.24	54	1.13	0.03	1.30	26
5	1.24	0.09	1.40	41	1.16	0.08	1.23	58
6	1.33	0.07	1.50	30	1.24	0.05	1.36	35
7	1.40		1.66	44	1.29		1.34	47

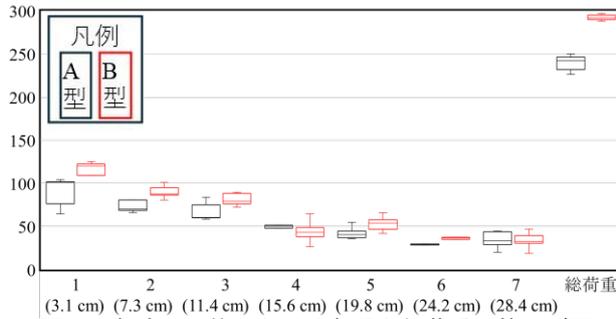


図-6 各流下形態における各段と総荷重の箱ひげ図

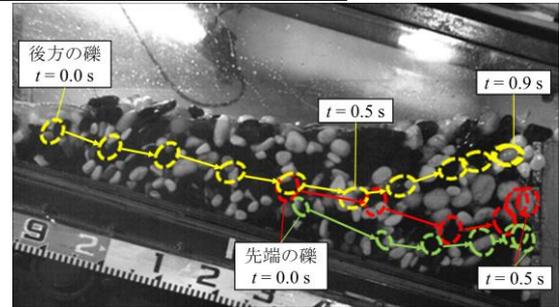


図-7 土石流内部の礫移動のトレース (B型)

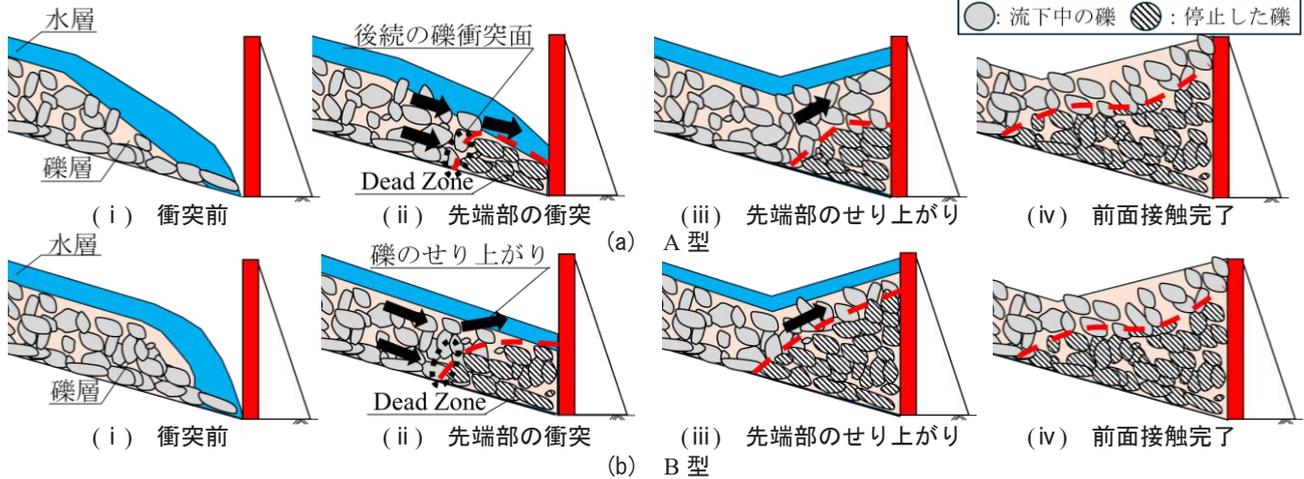


図-8 先端形状の違いによる土石流荷重低減メカニズム

赤と緑色の破線で示した礫は、堰堤の3段目と5段目に衝突する軌跡であり、衝突直前まで0.1sごとの移動量が変化していないことから、速度が低下せずに衝突したと考えられる。一方、黄色の破線で示した土石流の先端部から見て後方にある礫は、堰堤捕捉前の $t = t_0 + 0.5$ s から移動量が少なくなっているため、底面の制動力によって速度低下が生じたと考えられる。この結果、先端部の土石流が衝突後、停止した礫の上部を後続の礫が衝突しながら堰堤上部に向かって流下するため速度が低下し、先端部が堰堤モデルに衝突した箇所から上部に作用する荷重が低下したと推測できる。

(5) 先端形状の違いによる荷重低減

図-8 に先端形状の違いによる荷重低減メカニズムを示す。図-8(a)(i)に示すA型の土石流先端部は薄く伸びて堰堤に衝突する。図-8(a)(ii)は、土石

流の先端部の鋭角に流下する礫が堰堤に衝突し、礫が停止する。なお、このとき礫がせり上がりせず、後続の土石流下層の礫と衝突している。この停止した礫の領域をデッドゾーン¹⁷⁾と呼称する。図-8(a)(iii)に示す、衝突した後に山なりに堆積した礫をせり上げるように後続の土石流が堆積する。この際、停止した礫と流下中の礫が細かい衝突を繰り返すことにより制動力が生起することで、礫の速度が遅くなり作用荷重も低下する。最終的に、図-8(a)(iv)に示すように堰堤前面全体に礫が接触し、後続の礫が捕捉される。一方、図-8(b)(i)に示すようにB型の土石流先端部は、先端部の伸びが少なく礫が集中しているため、図-8(b)(ii)に示すように、先端部の礫が一举に衝突し停止することでA型に比し、堰堤の1~3段目に比較的大きな荷重が生起する。そのため、デッドゾーンを先端部衝突から早期に形成し、図-8(b)(iii)に示すようにデッドゾーン

が形成されていき、先頭部衝突後から早期に礫のせり上がりや衝突による速度低下が生じ、先頭部の衝突部より上部の荷重が低減される。最終的に、図-8(b)(iv)に示すように、A型と同様に堰堤前面全体に礫が接触し後続の礫が捕捉されていく。

この先端形状の違いによる荷重低減のメカニズムにおける、A型がB型に比して荷重の低減量が多いと推測したことは、表-2に示す各段荷重の計測開始時刻がA型はB型に比して遅いため、A型が堰堤上段付近での個々の礫の速度低下が大きいことと一致する。

以上から、流下条件が同条件においても土石流の先端の礫の集中によって荷重が大きく変わることが分かった。水を多く含み段波が生じている景況でも巨礫の集中がなされないと衝撃的な荷重は生じないことが示唆される。

5. 結 言

本研究は、移動床を配置した直線水路を用いて2種類の土石流の荷重を検討したものである。以下に得られた成果を示す。

- 1) 土石流の先端部が衝突する1~3段目付近に局所的な荷重が作用することを確認した。この荷重は、先端部の礫が集中することで大きくなると示唆される。
- 2) 堰堤上部に作用する土石流荷重は、堰堤下部に比して小さいことが確認できた。これは、土石流先頭部の礫が捕捉されて停止した礫と本体部の流下している礫が衝突することで制動力が生起する。よって速度が低下し、荷重が低減すると示唆される。
- 3) 荷重低減効果は、礫の先端形状が薄く伸びている場合、初期に捕捉される礫堆積高さが低く、デッドゾーンが早期に形成されることで、先端の礫が集中している場合に比して大きく作用すると推定される。

今後は、流量の違いや、実際のスケールにおける作用荷重における影響について検討する予定である。

参考文献

- 1) Toshiyuki H and Vincent R : Post-analysis simulation of the collapse of an open sabo dam of steel pipes subject-ed to boulder laden debris flow. International Journal of Sediment Research 35(6), pp.621-635, 2020.
- 2) 国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務：梨沢流域砂防堰堤に関する検討会，2014.
- 3) 新潟県土木部砂防課：根知川第10砂防堰堤対策検討会，第3回討議資料，2018.

- 4) 嶋川理，堀口俊行，別府万寿博，國領ひろし：個別要素法を用いた補強された鋼製堰堤の補強効果に関する解析的検討，構造工学論文集，Vol.70A，pp.1004-1016，2024.
- 5) 橋本晴行，椿東一郎：土石流における逆グレイディング機構，土木学会論文報告集，No.336，pp.78-84，1983.
- 6) 和田孝志，古谷智彦，中谷加奈，水山高久，里深好文：土石流先頭部における大粒子集積に影響を及ぼす要素に関する実験的研究，砂防学会誌，Vol.67，pp.56-63，2015.
- 7) 山野邦明，大同淳之：2粒径からなる混合粒径粒子流の流動機構，土木学会論文報告集，No.336，第357/II-3，pp.25-34，1985.
- 8) 堀口俊行，香月智，小松喜治：異なる2種類の土石流接近形状が与える動的な土石流荷重に関する研究，令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，I-224，2021.
- 9) 堀口俊行：砂防構造物に作用する土石流衝突荷重の計測要領について，シリーズ「はかる」実験・室内試験(16)水理模型実験<その2>，砂防学会誌，Vol.75，No.2，pp.23-28，2022.
- 10) 小松喜治，堀口俊行，香月智，石川信隆，水山高久：鋼製透過型砂防堰堤の前面傾斜角が土石流衝撃荷重に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.64A，pp.779-788，2018.
- 11) 水山高久，下東久巳，中西宏，松村和樹：鋼管製透過型砂防ダムに対する土石流荷重に関する実験的研究，新砂防，Vol.37，No.5，pp.30-34，1985.
- 12) 三好岩生，鈴木雅：土石流の衝撃力に関する実験的研究，新砂防，Vol.43，No.2，pp.11-19，1990.
- 13) 石川信隆，井上隆太，林健二郎，長谷川祐治，水山高久：土石流モデルを用いた衝撃的流体力の測定実験について，第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.199-204，2006.
- 14) 小松善治，堀口俊行，香月智：透過型砂防堰堤の転倒限界における土石流衝突荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.67A，pp.838-848，2021.
- 15) 土木学会 構造工学委員会 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：構造工学シリーズ15 衝撃実験・解析の基礎と応用，pp.23-50，2004.
- 16) 嶋川理，堀口俊行，別府万寿博，香月智：鋼製透過型砂防堰堤の先行部材損傷が構造頑健性に及ぼす影響，材料，Vol.71，No.8，pp.691-698，2022.
- 17) D.Song, C.W.W.Ng, C.E.Choi and G.G.D.Zhou, J.S.H Kwan and R.C.H.Koo : Influence of debris flow solid fraction on rigid barrier impact. Canadian Geotechnical Journal, Vol.54, No.10, pp.1-14, 2017.

(2024.5.31 受付)