

## 鋼製堰堤の破壊に及ぼす接合部の押し込み変形の影響

Effect of a pushing deformation due to fracture of steel pipe open sabo dam

嶋川理\*, 堀口俊行\*\*, 別府万寿博\*\*\*, 香月智\*\*\*\*

Osamu Shimakawa, Toshiyuki Horiguchi, Masuhiro Beppu, Satoshi Katsuki,

\*防衛大学校, 理工学研究科後期課程 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*博 (工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*博 (工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*工博, 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード: 石礫型土石流, 鋼製透過型砂防堰堤, 破壊

Keywords: debris flow, steel pipe open sabo dam, failure

### 1. 緒言

近年の異常気象によって, 局所的な豪雨が発生して土石流災害が多発している<sup>1)</sup>。土石流は巨礫や流木が先頭部に集中して流下するものであり, 主に鋼製透過型砂防堰堤 (以下, 鋼製堰堤) がその対策構造物として設置されている<sup>2)</sup>。土石流による鋼製堰堤の損傷事例としては, 写真-1 のように平成 26 年長野県南木曾町読書地区で発生した土石流<sup>3)</sup>により, 梨子沢第 1 砂防堰堤の上部が破壊した。この際, 堰堤残存部分の柱材が水平材により押し込み変形を生じている。この被災事例に関して, 梨子沢流域砂防堰堤に関する検討会の報告書<sup>4)</sup> (以下, 報告書) では, 図-1 に示すように, ①先行して堰堤に衝突・堆積した礫が先行堆積礫となった。②その上部に衝突した土石流により堰堤の上流側である捕捉面の継手部が破断した。③その後, 越流した礫により堰堤上部の水平材が破壊し, ④堰堤上流面が下流側に倒れこみ上部が流下したと推定されている。しかし, この推定の妥当性は詳細な分析が行われていない。

土石流の設計荷重に関する既往研究として, 大同ら<sup>5)</sup>, 水山<sup>6)</sup>は, 巨礫成分を取り除いた土石流の流体力の評価式を提案しており, 現行設計に用いられている<sup>7)</sup>。一方, 巨礫の衝突は, ヘルツの式を準用して球体間の接触力を荷重として適用している<sup>7)</sup>。嶋ら<sup>8)</sup>は, 大規模土石流に対して荷重レベル II の設計法を提案し, 鋼製堰堤の安全性照査について検討した。そこでは, 性能設計荷重の観点から構造物の性能について検証している。部材レベルの評価として, 國領ら<sup>9)</sup> <sup>10)</sup>は鋼管はりへの動的載荷実験および有限要素法解析によって, 礫の衝突位置および荷重方法の違いによる耐荷性能を解析的に検討した。また, 園田ら<sup>11)</sup>, フランジ継手を有する鋼管を対象に礫の衝突



写真-1 被災後の梨子沢第 1 砂防堰堤

解析を行い, 鋼管の破壊メカニズムについて検討している。また, 不透過型砂防堰堤の破壊事例を扱った研究として, 下田ら<sup>12)</sup>は, 大型のコンクリート製片持ち梁模型に対して鋼球を衝突させて得た衝撃解析モデルから, 被災事例のシミュレーションを行い, コンクリート堰堤の袖部破壊が土石流の動水圧ではなく, 巨礫の衝突によりもたらされたものと明らかにした。松澤ら<sup>13)</sup>は巨礫がコンクリート砂防堰堤に衝突した際, 巨礫の直径を変化させた場合の堰堤内部の破壊状態をシミュレーションした。

著者ら<sup>14)</sup>も, 鋼製堰堤の支保斜材を除去した縮小模型を作製して土石流衝突実験を行った。その結果, 継手部の強度が鋼管より小さいこと, また, 上支保斜材を除去することの 2 つが, 堰堤上部が流出する要因であることを示した<sup>14)</sup>。しかし, 上支保斜材が先行して破壊するためには, 満砂状態となり土石流の越流が生起する必要があるが, 上支保斜材が損傷した後は, 満砂状態なので

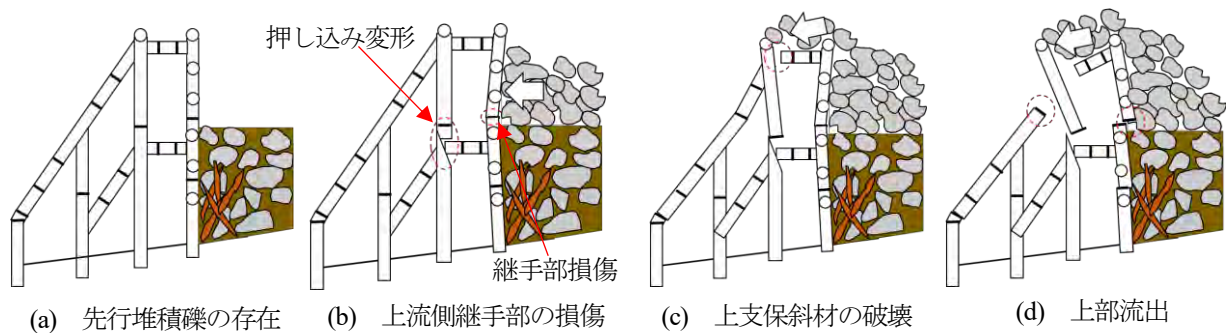


図-1 検討会<sup>4)</sup>での破壊メカニズム推定

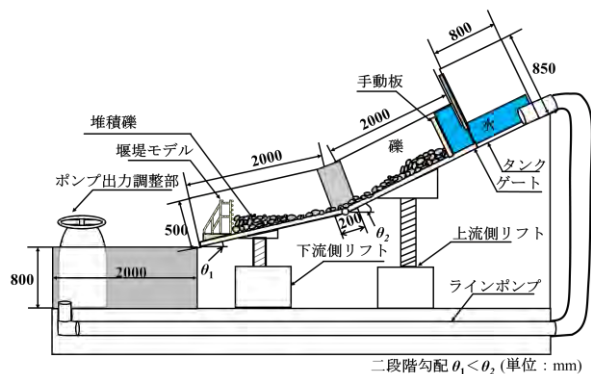


図-2 2段階可変勾配型直線水路



写真-2 礫モデル

堰堤上流面に土石流が衝突できず、堰堤上部が破壊するメカニズムのシナリオに矛盾がある。

一方、被災事例では、写真-1 に示すように水平材と柱材の接合部で柱材が凹み、(以下、押し込み変形と呼ぶ)その押し込み変形の影響は未だ実験で再現できていない。

そこで本研究は、堰堤部材の接合部に直角空隙を設け、押し込み変形を作為した堰堤模型を用いた水路実験を行い、強制的に押し込み変形を生起させた場合に、構造全体の頑健性に与える影響を堰堤の損傷の有無に基づいて検討するものである。

## 2. 実験の概要

### 2.1 実験水路

図-2 に、実験水路の概要図を示す。水路の全長は420cm、幅30cm、深さ50cmである。上流端から200cmのところ勾配を変えて、堰堤モデルの衝突時に段波形状になるように工夫した。この段波形状とは、土石流の先頭部が切り立ち、礫が先頭部に集中する形状である。被災事例においても段波による衝撃力が堰堤の破壊につながったと推測されている。なお、上流側 $\theta_u = 20^\circ$ 、下流側 $\theta_l = 11.3^\circ$ とし、上流側は発生区間の勾配、下流側は流下区間の勾配を参考とした<sup>13)</sup>。底面は礫塊の加速を得るためにアクリル板とした。

### 2.2 土石流モデル

土石流モデルは、図-2 に示す水路上の礫塊に上流から水流を流して発生させる。写真-2 に示す礫は、短径から長径が40-60mm(黒)、24-40mm(白)、15mm-

24mm(灰)の角の取れたやや丸みのある小礫である、これを25.5kg、31.5kg、18.0kgを混合して計75kgとした。これを水路の最上流に長さ80cm、高さ20cmに盛って設置した。その上流に約150ℓの水を高さ40cmに貯めておき、一気に開放するダムブレイク式で水を流し土石流を発生させた。その後、ポンプで流量100ℓ/sの水を3.0s間にわたり与えて押し流す。この際、ビデオ解析により礫の移動速度を求めると、土石流先頭部が堰堤に衝突した時の流速は約2.5m/sであった。

### 2.3 堰堤モデル

写真-3 に示すように堰堤モデルは、バルサ材を用いて継手部の強度を母材鋼管と同一強度とした母材強度比100%モデル、継手の強度を母材鋼管の70%の強度とした母材強度比70%モデル、および継手の強度を母材鋼管の70%の強度にしたうえで押し込み変形を作為した押し込み変形モデルの3種類を作製した。それぞれの寸法は、堰堤高28.8cmであり、主部材は直径15mmのバルサ材の円管である。これをプラスチックで連結した。なお、プラスチックの連結材はバルサ部材に比して十分大きな剛性を有している。主要部を占める円管部材は $\phi = 15\text{mm}$ の円柱材の中心部に旋盤機械を用いて12.5mmの穴を開けて作製した。

南木曾の被災事例では、継手部が破断しており、後述する継手部の強度減少効果をモデル化するために、写真-3の堰堤モデルの健全な部材に幅5mmで切り欠きを入れたモデルを加えた。切り欠きを入れた箇所は赤く着色している。切り欠き量を決定するために、実部材の断

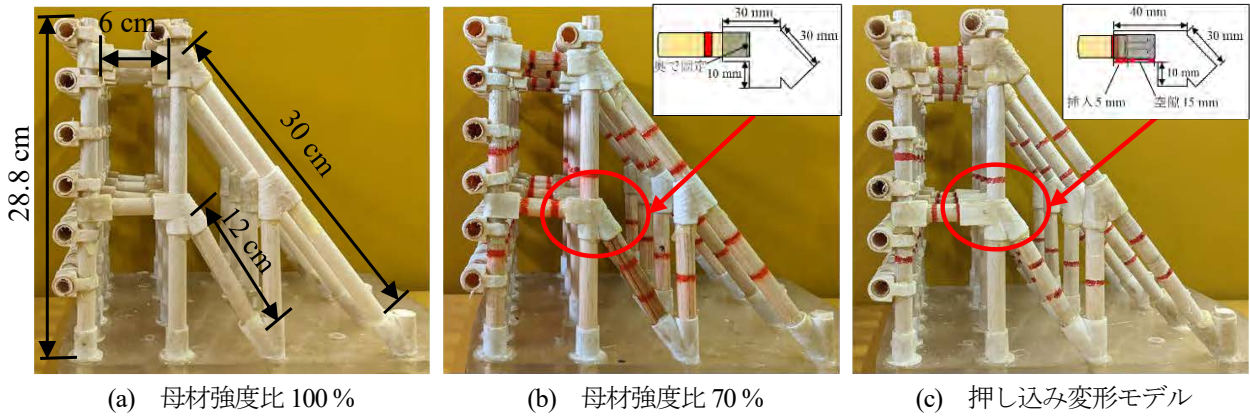


写真-3 堰堤モデル

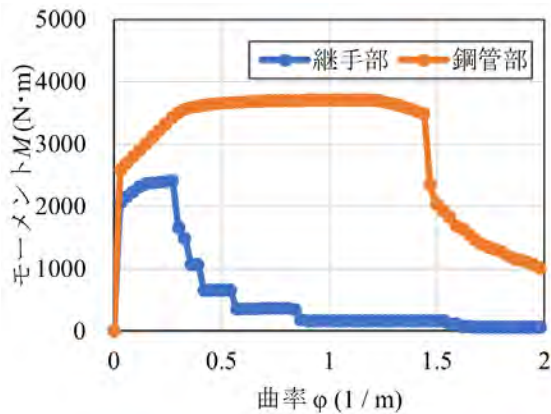


図-3 モーメント～曲率関係

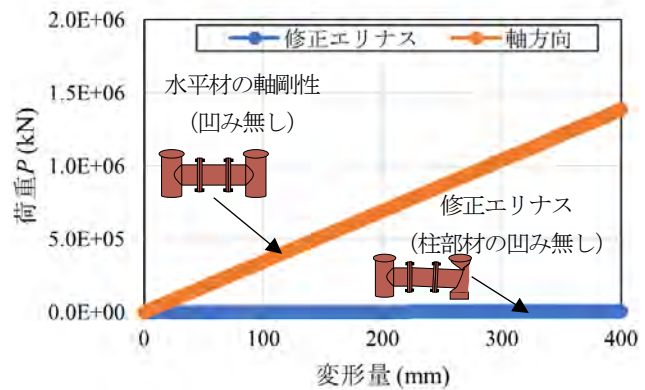


図-4 鋼管の軸力と押し込み変形の比較

面の鋼管母材については全断面を有効とし、継手部の引張側は高力ボルトのみが有効とする断面分割法により、曲げモーメント～曲率関係を求めた<sup>15)</sup>。この結果、図-3に示すように継手部断面の曲げ強度は鋼管母材比約70%となる。事前実験によりバルサ材の最大曲げモーメント～切り欠き関係を求め、健全部材の70%強度になる切り欠き量を $\delta_n = 0.4 \text{ mm}$ と決定した。写真-3(c)に示す押し込み変形モデルは、下部の水平材と2列目の柱材をつなぐ直交接合部に20 mmの穴を設け、水平部を5 mm挿入した。つまり水平部は直交接合部に最大で15 mm押し込まれる可能性がある。この押し込み量15 mmは、現地に残存する609 mmの鋼管に最大で535 mmの押し込み変形を生じていたことを反映している。この直交接合部の穴は全周に遊びを設けており、壁面との摩擦は無視でき、柱材が湾曲した場合でも押し込みが生起するように工夫している。なお、柱材の凹みに伴う剛性を接合部の直交空隙としたのは、図-4に示す水平部の鋼管の軸力剛性(凹まない仮定)と柱材鋼管の凹み変形の剛性を比較して、実物鋼管の水平材軸力による剛性に比して、柱材鋼管の凹み変形剛性は極めて小さいことを鑑みためのである。

## 2.4 先行堆積礫塊

著者ら<sup>16) 17)</sup>の研究により、土石流の衝突において、堰堤上流面に堆積した先行堆積礫塊が土石流の衝突力に影響

することがわかった。また、図-1の報告書で推定された破壊メカニズムにおいて、幾分かの時間間隔で土石流が衝突したことが示唆されている。よって、写真-4に示すように本実験でも衝突する土石流塊とは別に設置しない場合を先行堆積礫無、先行堆積礫塊を設置した場合を先行堆積礫高比30%、先行堆積礫高比50%、として比較した。これは、先行堆積礫が無い場合(0%)と既往の研究<sup>14)</sup>において堰堤が破壊した高さ(50%)と押し込み変形を作為するために、堰堤モデルの水平部付近に土石流モデルが衝突する高さ(30%)を実験ケースとした。

## 2.5 実験ケース

以上の条件を組み合わせ、表-2に示すように先行堆積礫高さ3種類、堰堤モデル3種類の組み合わせで計9ケースについて実験を行った。表-2に示す様に各ケース名は例えば堆積礫高さはS0, S30, S50とし、堰堤モデルは継手の母材強度比および押し込み変形を作為した名前をM100, M70, M70dとした。例えば、堆積礫高さ30%、継手の母材強度比70%はS30-M70と表記する。

## 3. 作用荷重に関する予備実験

本番の実験に先立ち、土石流モデルによる作用の特徴を調べるため、土石流の接近形状と高さ方向の荷重分布を計測した。本来の堰堤設置位置に写真-5に示す荷重計



(a) 先行堆積礫無 (0%)



(b) 先行堆積礫高比 30%



(c) 先行堆積礫高比 50%

写真-4 先行堆積礫の初期配置

表-2 実験ケース

ケース名	堆積礫高さ	堰堤モデル
S0 - 100	0%	母材強度比 100%
S0 - 70		母材強度比 70%
S0 - 70d		押し込み変形
S30 - 100	30%	母材強度比 100%
S30 - 70		母材強度比 70%
S30 - 70d		押し込み変形
S50 - 100	50%	母材強度比 100%
S50 - 70		母材強度比 70%
S50 - 70d		押し込み変形

測装置を設置し、土石流の衝突荷重を計測した。荷重計測装置は高さ 3.5 cm、幅 1.5 cm の受圧板を、堰堤高と同じ 28.8 cm の側板に 7 段、計 14 個のロードセルを配置したものである。なお、この 2~7 段目は堰堤モデルの横部材の高さと対応している。

図-5 に、総荷重～時間関係を示す。ここで、総荷重とは 14 個のロードセルの値を積算したものである。まず、先行堆積礫無では土石流衝突直後 0.32 s で最大の 384 N に達する。その後は、徐々に低下し 2.0 s 後では 250 N となっている。一方、先行堆積礫高比 30% の場合は、0.34 s で最大荷重 363 N に達し、以後は徐々に低下し 2.0 s における荷重は 232 N になっている。先行堆積礫高比 50% の場合は、0.36 s で最大荷重 339 N に達し、以後 2.0 s における荷重は 200 N になっている。概して先行堆積礫高さが高くなるほど最大荷重が低減され、最大荷重が生起する時間は若干遅くなっている。

図-6 は、各先行堆積礫無、先行堆積礫高比 30%、先行堆積礫高比 50% における荷重について、下段 (1~2 段小計)、中段 (3~4 段小計)、上段 (5~7 段小計) に分けて示す。これより、上段の最大荷重を見ると、先行堆積礫無、30%、50% の順に 121 N、148 N、212 N となっており、堆積礫高さが高いほど荷重が大きくなっている。中段の最大荷重は、先行堆積礫無、先行堆積礫高比 30%、先行堆積礫高比 50% の順に 112 N、131 N、93 N となっており、先行堆積礫高比 30% が最も荷重が大きく、先行堆積礫高比 50% が最も小さくなっている。下段の荷重は、先行堆積礫無、先行堆積礫高比 30%、先行堆積礫高比 50% の順に 193 N、98 N、69 N となっている。概して、

先行堆積礫の上面よりも少し上の領域に大きな衝撃荷重が生起することがわかった。

## 4. 実験結果

### 4.1 母材強度比 70% の堰堤モデル

写真-6 に、S30-M70 の衝突過程を示す。以降の写真には、堰堤モデルの外枠を赤線で囲んで表示している。これは、流水中の堰堤形状を明瞭にするための処置である。写真-6(a) の  $t=t_0$  s では、土石流モデルの礫は堰堤に衝突しておらず、写真-6(b) の  $t=t_0+0.1$  s で堰堤高の 6 割程度の位置まで礫が到達している。しかし、堰堤に初期形状から変形は見られない。以降は荷重計測時に最大荷重に達した、写真-6(d) の  $t=t_0+0.34$  s から堆積する写真-6(e) の  $t=t_0+3.0$  s に至るまで部分的損傷も無く破壊しなかった。また、同様にその他の先行停止礫高でも損傷・破壊は生起しなかった。

### 4.3 押し込み変形の影響

#### (1) S0-M70d

写真-7 に S0-M70d の衝突過程を示す。写真-7(a) の  $t=t_0$  s は、土石流の礫は堰堤に衝突しており、先行している流水は堰堤下部を通り抜けている。写真-7(c) の  $t=t_0+0.3$  s は荷重計測時に最大荷重に達する時間のものである。この時点でやや押し込みが生起し、堰堤上流の柱材に湾曲している。写真-7(e) の  $t=t_0+3.0$  s は、衝突が終了し、流水が治まっている。衝突後の堰堤は接合部に約 3 mm の押し込みが生起していた。しかし、堰堤上流面に湾曲が見られたほか継手部や柱材に損傷は見られず、破壊は生じなかった。

#### (2) S30-M70d

写真-8 に、S30-M70d の衝突過程を示す。写真-8(a) の  $t=t_0$  s は、土石流の礫は堰堤に衝突しておらず、先行している流水は、堰堤下部を通り抜けている。写真-8(b) の  $t=t_0+0.1$  s は、水平材が押し込まれたことにより、上流側の柱材継手部を中心として、湾曲を生じている。写真-8(c) の  $t=t_0+0.2$  s は水平材がさらに押し込まれ、堰堤上流側の湾曲は明瞭となる。この柱材の継手部分が水平材直上に下流側に屈曲している。加えて、2 列目柱材の上部が下流側に変位することにより、上支保斜材の中

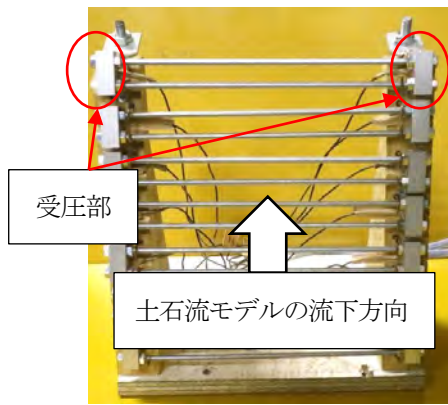


写真-5 荷重計測器

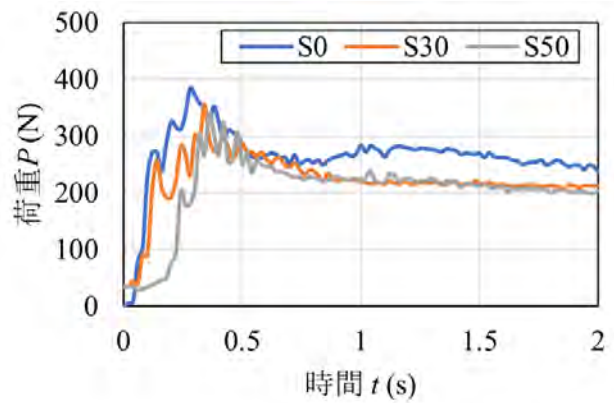


図-5 総荷重～時間関係

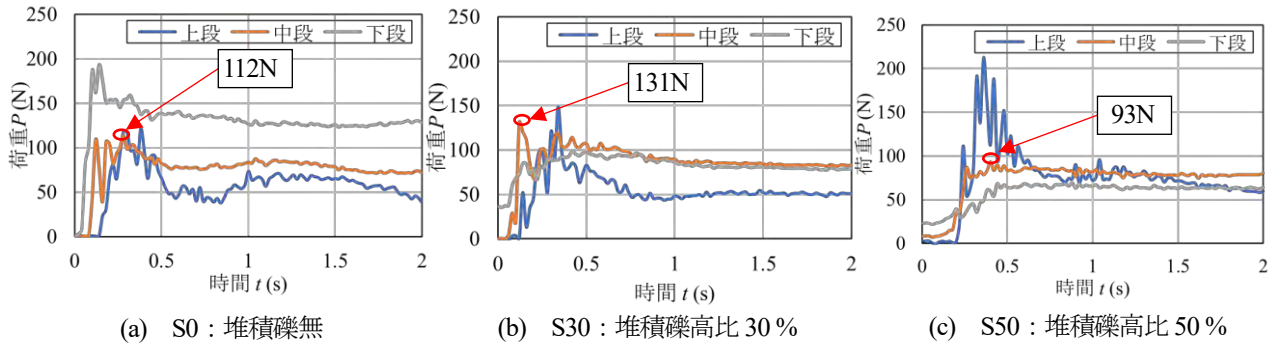


図-6 上中下段の荷重～時間関係

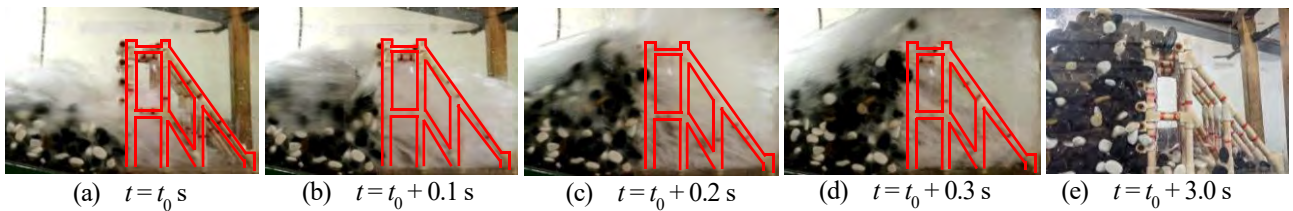


写真-6 S30-M70 衝突過程

央の継手部が曲げ変形し始めている。写真-8(d)の  $t = t_0 + 0.30$  s は最大荷重に達した時間のものである。水平部の押し込みと上流側柱材の継手の変形は  $t = t_0 + 0.2$  s とほぼ同じであるが、上支保斜材の継手部は上流側下部に向けて明らかに曲げ変形している。写真-8(e)の  $t = t_0 + 3.0$  s は、衝突が終了し、流水も治まっているが、多数の損傷箇所が生じたので、写真-9 に衝突後の堰堤の損傷状況を示す。写真-9(a)は堰堤を後方から俯瞰で撮影したものである。この時、押し込み変形を作用させた部分は初期状態から約 7 mm 押し込まれており、柱材の継手部は曲げによる損傷が生じているが破断はしていない。写真-9(b)に、上支保斜材を俯瞰撮影したものを示す。上支保斜材は、4 本のうち 3 本で継手部が上流側下部に向けて潰れるように曲げが生じているが破断はしていない。写真-9(c)に損傷した柱材継手部を示す。損傷を生じ下流側に曲げ変形している。写真-9(d)には除礫後の堰堤を示す。南木曾のように堰堤は破壊に至らなかったが、支保斜材が水平材の押し込みに連動して損傷することが判る。

### (3) S50-M70d

写真-10 に、S50-M70d の衝突過程を示す。写真-10(a)の  $t = t_0$  s は、土石流の礫は堰堤に衝突しておらず、先行している流水が堰堤下部を通り抜けている。写真-10(d)の  $t = t_0 + 0.36$  s は最大荷重に達する時間のものである。この時点でやや押し込みが生じ、堰堤上流側に湾曲を生じている。写真-10(d)の  $t = t_0 + 3.0$  s は、衝突が終了し、流水も治まっている。衝突後の堰堤は押し込み変形を考慮した部位に押し込みが約 2 mm ほど生じていた。堰堤上流面に湾曲が見られたほか継手部や柱材に損傷は見られず、破壊は生じなかった。

## 4.4 実験の総括

表-3 に、全ケースの破壊生起状況を分類して示す。まず、押し込み変形を考慮していない場合は、継手部の母材強度比 70%モデルであっても全てのケースで損傷していない。押し込み変形を考慮したケースでは、先行堆積礫無、先行堆積礫高比 50%では押し込み量が 2-3 mm となり、継手部の母材強度比 70%であっても損傷が生起していない。一方、先行堆積礫高比 30%では、押し

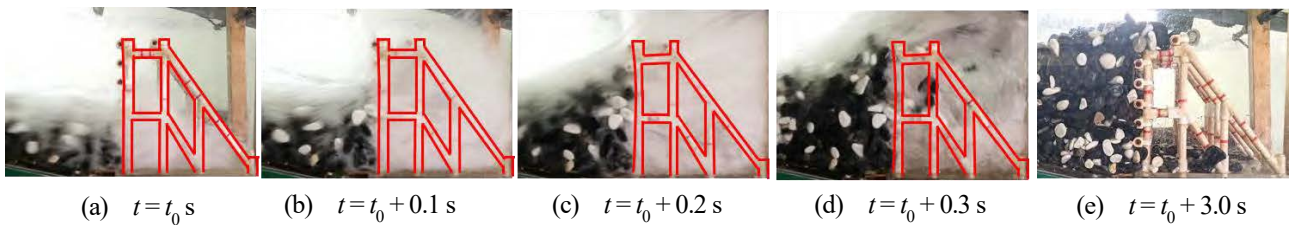


写真-7 S0-M70d 衝突過程

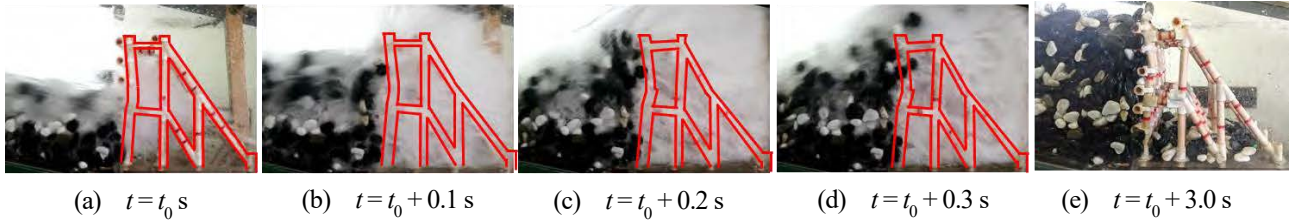


写真-8 S30-M70d 衝突過程

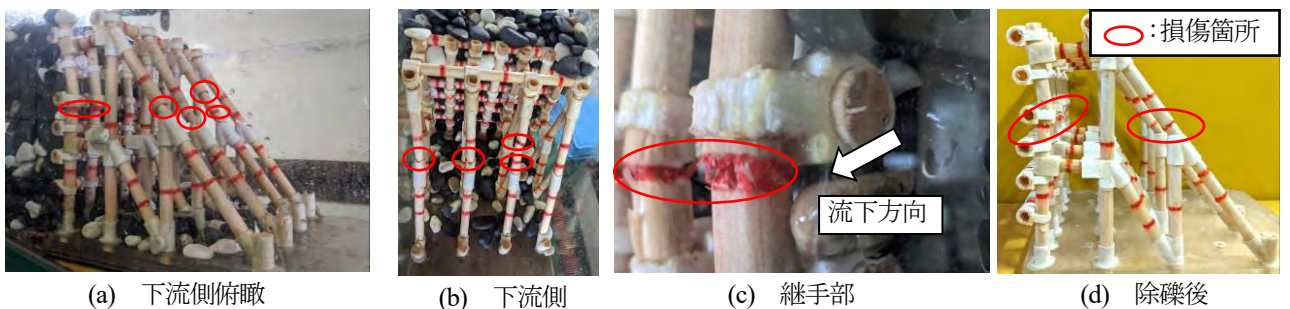


写真-9 損傷状況

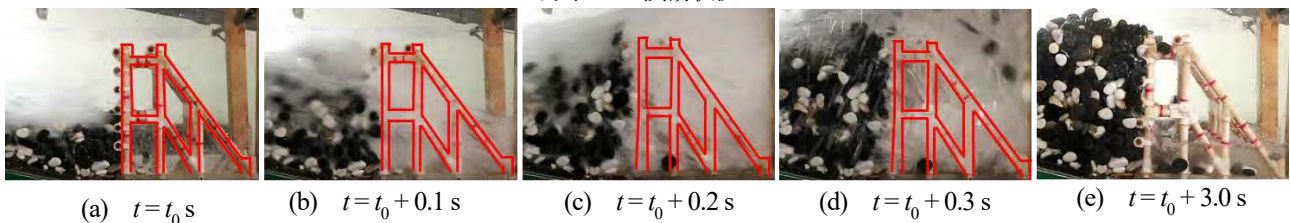


写真-10 S50-M70d 衝突過程

表-3 実験後の状況

ケース名	損傷の有無
S0-100	○：部材損傷無し
S30-100	○：部材損傷無し
S50-100	○：部材損傷無し
S0-70	○：部材損傷無し
S30-70	○：部材損傷無し
S50-70	○：部材損傷無し
S0-70d	△：部材損傷無し (押し込み 3 mm)
S30-70d	▲：継手部損傷 (押し込み 7 mm)
S50-70d	△：部材損傷無し (押し込み 2 mm)

込み量が 7 mm となり、継手部損傷が生じる。つまり、先行堆積礫の上面の位置が押し込み変形の生じる水平材の位置より高くても低くても押し込み量は小さくなり、損傷に至らない。これは、図-6 で考察した先行堆積礫高比 30% の場合が中段の衝撃荷重が最も大きくなるこ

とに起因するものである。また、押し込み変形が生じ、下部の水平材が土石流荷重に対し抵抗できなくなることにより、上部の水平材が土石流荷重を下流側に伝えることにより、2 列目の柱材上部が下流側に変位し、上支保斜材が継手部で変形を生じるものと考えられる。

著者らの先行研究<sup>12)</sup>では、上支保斜材が失われた状態で土石流を衝突させると、写真-1 と同様の破壊状態を再現できることが示されている。今回の実験結果では、堰堤の大規模な破壊には至らなかったが、押し込み変形が生じた際に、上支保斜材の継手部に損傷が生じ、上支保斜材が破壊し失われる可能性があることを示している。もしも上支保斜材が失われるほどになれば、現地のような破壊状況になり得ることを示している。

## 5. 結 言

本研究は、透過型の被災事例をもとに、土石流の堰堤衝突によって押し込み変形を生じることが、堰堤全体の破壊・損傷に与える影響を模型実験により検討したものである。

- 1) 上支保斜材が健全に保たれている限り、継手部の強度が母材の断面強度比 70%に低下していたとしても、先行堆積礫の大小に関わらず、砂防堰堤に破壊や損傷に至る兆候は見られなかった。
- 2) 水平材の取付け部における押し込み変形を可能にしたモデルでは、水平材直下の高さまで先行堆積礫が貯まった状態で土石流を受けると、土石流衝突を受ける上流側柱材の継手部が破壊するだけでなく、一部の上支保斜材の継手部に損傷が生じ、現地の破壊状況に至る兆しが見受けられた。
- 3) 継手部の押し込み変形が大きくなる先行堆積礫の上面高さの条件が、水平材付近の土石流衝突荷重が最も大きくなる条件と一致している。
- 4) 相似則の制約からバルサ材を使用したことや、部材相互の接合にプラスチックを用いたことなど、実験のモデル化上の課題がある。これらの点について詳細な分析のために解析検討が必要である。
- 9) 國領ひろし, 堀口俊行, 別府万寿博, 園田佳巨, 石川信隆: フランジ継手を有する鋼管はり部材の動的載荷性能実験, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.779-793, 2021.
- 10) 國領ひろし, 堀口俊行, 別府万寿博, 園田佳巨, 石川信隆: 礫の衝突位置の違いによるフランジ継手付き鋼管はりの耐荷性能, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.76, No.2, I\_289-I\_300, 2020.
- 11) 園田佳巨, 土屋羊平, 玉井宏樹, 嶋丈二: 鋼製透過型砂防堰堤の耐荷性能に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1019-1030, 2016.
- 12) 下田義文, 水山高久, 石川信隆, 古川浩平: 巨礫を受けるコンクリート製砂防ダム袖部の衝撃模型実験と被災例シミュレーション, 土木学会論文集, No.450, I-20, pp.131-140, 1992.
- 13) 松澤遼, 嶋丈示, 武田一平, 石川信隆, 水山高久: 礫衝突に対するコンクリート砂防堰堤の現行設計法の問題点と衝撃解析, 砂防学会誌, Vol.69, No.5, pp.59-65, 2017
- 14) 嶋川理, 堀口俊行, 別府万寿博, 香月智: 個別要素法による透過型砂防堰堤の破壊検証シミュレーション, 第 24 回応用力学シンポジウム概要集, 2021.
- 15) T. Horiguchi., V. Richefeu : Post-analysis simulation of the collapse of an open sabo dam of steel pipes subjected to boulder laden debris flow. International Journal of Sediment Research 35(6), pp.621-635, 2020.
- 16) 嶋川理, 小松喜治, 堀口俊行, 香月智: 前面傾斜角有する透過型砂防堰堤に作用した土石流荷重の検討, 土木学会論文集A2 (応用力学) , Vol.75, No.2, I\_175-I\_185, 2019.
- 17) 嶋川理, 小松喜治, 堀口俊行, 香月智, 別府万寿博: 個別要素法による前置減勢工の荷重低減メカニズムの分析, 構造工学論文集, Vol.66A pp.941-945, 2020.
- 18) 手嶋良祐, 別府万寿博, 市野宏嘉, 福永一基: 重力場における縮小模型実験に対する相似則の提案と検証, 構造工学論文集, Vol.67A pp.826-837, 2021

#### 参考文献

- 1) 国土交通省: 令和二年の土砂災害, <https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/r2dosha/r2doshasaigai.pdf>
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国土技術政策総合研究所資料 No.904, 2016.
- 3) 平松ら: 平成 26 年 7 月 9 日長野県南木曾町で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.3, pp.38-48, 2014.
- 4) 国土交通省中部地方整備局多治見砂防国道事務所: 梨子沢流域砂防堰堤に関する検討会, 2014.
- 5) 大同淳之, 吉栖雅人, 中嶋健太: 土石流による衝撃力, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.557 - 562, 1994.
- 6) 水山高久: 砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点, 新砂防, Vol.112, pp.40-43, 1979.
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 土石流・流木対策設計技術指針 No905, 2016.
- 8) 嶋丈示, 松澤遼, 石川信隆, 水山高久: 大規模土石流に対する鋼製透過型砂防堰堤の安全性照査法, 砂防学会誌, 第 71 巻, 第 1 号, pp.15-21, 2018.