

押し込み変形が作用する透過型砂防堰堤の破壊再現シミュレーション

防衛大学校 学生会員 ○嶋川 理 正会員 堀口 俊行
正会員 別府 万寿博 正会員 香月 智

1. 緒言

平成 26 年長野県南木曾町読書地区で発生した土石流により、梨子沢第 1 砂防堰堤の上部が損壊したり。この際、堰堤残存部分の水平材の押し込みにより、柱部材が変形を生じていた。梨子沢流域砂防堰堤に関する検討会の報告書²⁾(以下、報告書)では、継手部の損傷と越流礫によって堰堤の水平材および上支保斜材の一部が損傷し、堰堤上部流出に至った。しかし、この推定メカニズムの信頼性は未検討のままである。

そこで著者ら³⁾は、報告書の破壊メカニズムに基づき、鋼製堰堤の上支保斜材を除去した縮小モデルを作製して土石流衝突実験を行い、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。しかし、現地で発生した押し込み変形の影響が顕著に出ておらず詳細な再現に至っていない。

そこで本研究は、押し込み変形を考慮した模型実験と個別要素法による再現解析によって、破壊メカニズムを検証するものである。

2. 直線水路実験

土石流モデルは、現地の礫径調査を参考にし、3 種類の礫径を用いた。それぞれ $D_{95} : 40 \text{ mm}$ (25.5 kg), $D_{80} : 30 \text{ mm}$ (31.5 kg), $D_{60} : 20 \text{ mm}$ (18.0 kg) である。その礫量は総量 75 kg とした。土石流は、実験水路は長さ 4.3 m の可変勾配型直線水路を用いて、上流に礫を高さ 20 cm、水路方向に 80 cm に渡り配置して水を溜め、一気に開放するというダムブレイク方式で行った。写真-1 に堰堤モデルを示す。堰堤モデルは、写真-1(a)に示すように、継手部の強度を母材と同一強度とした母材強度比 100%モデル、写真-1(b)に示すように、実堰堤の継手位置を参考に、強度が母材の 70%となるように切り欠きを与えている母材強度比 70%モデル、お

よび写真-1(c)に示すように、継手の強度を母材の 70%の強度にしたうえで下部水平材結合部に母材直径 1 本分である空隙 15 mm を設けた押し込み変形が生起するモデルの 3 種類を作製した。さらに、報告書で推定された破壊メカニズムでは先行堆積礫の存在が示唆されていた。本実験では、事前に堰堤前に礫を堆積させない場合、堰堤高 30%まで堆積させた場合、50%まで堆積させた場合の 3 種類を比較した。

実験ケースは、堰堤モデル 3 種類と先行堆積礫 3 種類の組み合わせで 9 ケースの実験を行った。各ケース名は先行堆積礫高をそれぞれ S0, S30, S50 とし、堰堤モデルをそれぞれ M100, M70, M70d として S0-M100 のように呼称する。

写真-2 に S30-M70d の実験結果を示す。写真-2(a)の $t = t_0 \text{ s}$ 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-2(b)の $t = t_0 + 0.1 \text{ s}$ 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-2(c)の $t = t_0 + 0.5 \text{ s}$ 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、上支保斜材の中央の継手部分が曲げ変形し始めている。写真-2(d)の $t = t_0 + 0.6 \text{ s}$ は、水平部の押し込みと上流側柱材の継手の変形は、 $t = t_0 + 0.5 \text{ s}$ 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曲げ変形している。この



(a) 母材強度比 100% (b) 母材強度比 70% (c) 押し込み変形

写真-1 堰堤モデル



(a) $t = t_0 \text{ s}$

(b) $t = t_0 + 0.1 \text{ s}$

(c) $t = t_0 + 0.5 \text{ s}$

(d) $t = t_0 + 0.6 \text{ s}$

(e) $t = t_0 + 3.0 \text{ s}$

写真-2 S30-M70d 衝突過程 (実験)

キーワード 石礫型土石流、個別要素法、鋼製透過型砂防堰堤、押し込み変形

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL : 046-841-3810 E-mail : em57045@nda.ac.jp

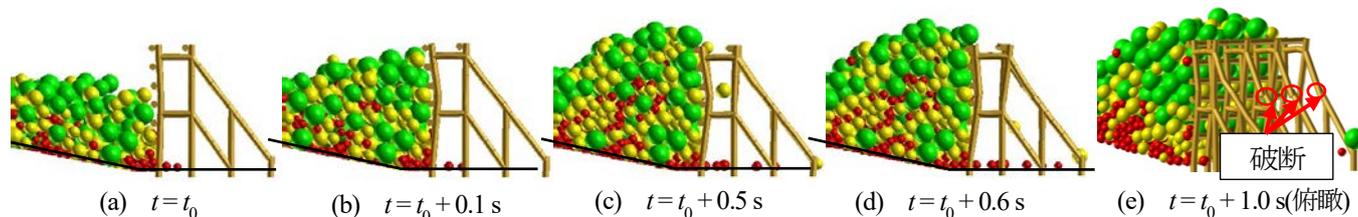


図-1 S30-M70d 衝突過程 (解析)

表-1 連結ばねの諸元

項目	鋼管部	継手部
軸剛性 EA (N)	1.89×10^5	1.25×10^5
降伏軸力 (N)	2132	1360
破断ひずみ	0.032	0.032
曲げ剛性 EI ($N \cdot m^2$)	0.114	0.095
降伏モーメント M_f ($N \cdot m$)	1.0	0.7
破断回転角 θ_f (rad)	0.231	0.206
せん断剛性 GA (N/m)	1079	712
破断変形 (mm)	3.75	3.75

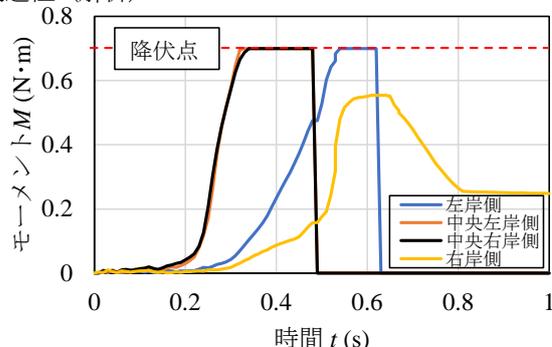


図-2 上支保斜材継手部の曲げ応答

時点で上流側柱材継手部と上支保斜材の変形は最大となり以後は堰堤形状に大きな変化はなかった。写真-2(e)の $t = t_0 + 3.0$ s は、衝突が終了し流水が治まっている。屈曲している上流側柱材継手部と上支保斜材の継手部は破断には至っていないがやや毛羽立っており、損傷が生じている。また水平材は結合部の空隙に約 7 mm ほど押し込まれていた。

同様に押し込み変形モデルで行った S0-M70d と S50-M70d のケースでは、押し込み変形が約 2-3 mm 生じたが、継手部に損傷および破断は生じなかった。

3. 解析結果

3.1 解析諸元

礫モデルは、球形要素、水路は三角形の平面要素を使用した。堰堤モデルは、円柱形要素を連結ばねで結合しモデル化した。

表-1に円柱形要素間の連結ばねの諸元を示す。ばね係数はバルサ材の引張、曲げ、せん断試験から決定した。実験で切り欠き部には継手部のばねを与え、その他の部分は鋼管部のばねを与えた。また、実験の連結部材を再現するため、円柱形要素を複数結合した集合体要素を用いた。

初期配置は、堰堤上流側の堆積部と後方の礫群に分けて行った。上流から流速分布モデルを用いて礫群を流下させた。実験映像から、流速 $v = 3.0$ m/s で与えた。なお、堆積礫に後方の礫群が流下するまで堆積礫には流体力は作用しない。

解析は実験同様9ケース行ったが、そのうち損傷が生じた S30-M70d の解析結果を示す。

3.2 解析結果

図-1に S30-M70d の衝突過程を示す。図-1(a)の先頭部衝突時に約6割の高さまで礫が到達している。図-1(b)の

$t = t_0 + 0.1$ s では堰堤天端まで礫が到達している。この際、水平材の押し込み量は 9.8 mm となっており、以降もこの押し込み量から大きく増減していない。図-1(c)の $t = t_0 + 0.5$ s で中央上支保斜材2本が2列目の継手部で破断した。図-1(d)の $t = t_0 + 0.6$ s で左岸側の上支保斜材が同様に2列目の継手部で1本破断した。図-1(e)に堆積が完了した $t = t_0 + 1.0$ s の後方から俯瞰した図を示す。上支保斜材の継手部で以外の損傷部位はなかった。また、図-2に上支保斜材継手部の曲げ応答を示す。4本中3本の継手部は、降伏モーメントに達しており曲げで破断している。

4. 結言

本研究は、堰堤モデルの破壊実験とその再現解析により、破壊メカニズムを検討したものである。以下に成果を示す。

- 1) 継手部の強度が母材より低下していても、押し込み変形が生起しない場合、堰堤に損傷は生じなかった。
- 2) 押し込み変形を生起させた場合、下部水平材の直下まで先行堆積礫が存在した場合には上支保斜材が損傷した。
- 3) 個別要素法による再現解析によって上支保斜材の継手部は曲げによって破断したことを示した。

参考文献

- 1) 平松晋也ら：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，Vol67，No.4，pp.61-82，2014。
- 2) 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。
- 3) 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，S03B-02，2021。