

## シリーズ「土石流中の礫衝突を受ける砂防堰堤の動的応答解析」

## 礫衝突を受ける鋼製透過型砂防堰堤の現行設計法の問題点と衝撃解析

## Current design problems and impact analysis of steel open type Sabo dam under rock impact

嶋 文 示\*<sup>1</sup>

Joji SHIMA

武 田 一 平\*<sup>3</sup>

Ippei TAKEDA

松 澤 遼\*<sup>2</sup>

Ryo MATSUZAWA

石 川 信 隆\*<sup>3</sup>

Nobutaka ISHIKAWA

山 口 聖 勝\*<sup>3</sup>

Masakatsu YAMAGUCHI

水 山 高 久\*<sup>4</sup>

Takahisa MIZUYAMA

## 1. はじめに

近年の異常気象により、局地的な短時間豪雨が原因で計画規模を上回る土石流の発生リスクが高まっている。このような状況の中、砂防堰堤が整備推進されている<sup>1),2)</sup>が、計画規模を上回る土石流を砂防堰堤で捕捉する場合、砂防堰堤が耐力的にどの程度余裕を有しているか不明である。2014年7月9日に計画規模を上回る土石流が発生し<sup>3)</sup>、鋼製透過型砂防堰堤（以後、鋼製堰堤という）が写真-1<sup>4)</sup>のように土石流を捕捉したが、一部の部材が破壊された事例があった。このように、計画規模を上回る土石流荷重に対して、現行設計法<sup>5)</sup>ではどのように対処すべきかについて明確な規定がない。また鋼製堰堤は、一般にコンクリート重力式堰堤（以下、コンクリート堰堤という）と比較して、重量が軽いので安定計算上は不利とされているが、巨礫の衝突に対しての構造内部の安全性と底板コンクリートの安定性について検討された例はない。

よって、本研究では、まず鋼製堰堤の現行設計上の問題点について言及する。次に計画規模の土石流に対してコンクリート堰堤と鋼製堰堤を対象に、堰堤全体を剛体と仮定して安定計算を行い、堰堤の断面形状を決定する。その断面形状に対して安定計算における極限状態を設定して「極めて大きな土石流荷重」を求める<sup>6)</sup>。ここで得



写真-1 鋼製堰堤の土石流捕捉事例（一部部材が破壊）

Photo 1 An example of capturing debris flow by steel open dam (A few members were partially collapsed)

られた最大流速と、極めて大きな礫<sup>7)</sup>に対して、鋼製堰堤（底板コンクリートを考慮）に対して衝突解析<sup>8)</sup>を行い、鋼製内部の安全性と底板コンクリートの破壊状況について検討する。なお、比較のため同じ条件でコンクリート堰堤<sup>9)</sup>に対しても検討した。計算に際しては衝撃解析コード ANSYS AUTODYN<sup>10)</sup>を用いた。

## 2. 鋼製堰堤の設計上の問題点

鋼製堰堤の現行設計法<sup>5)</sup>は、堰堤の剛体安定性に加え、部材設計では①巨礫衝突に対してエネルギー照査を行うとともに、②堆砂圧と③土石流流体力に対して許容応力度設計法に基づいて各部材強度を照査している。しかし、現行設計法の第1の問題点は、鋼製堰堤が計画規模の設計荷重（ここでは、レベルI荷重という）に対してどれだけの余裕があるかについて、その終局限界耐力を解明する方法が存在していない点である。すなわち、「極めて大きな土石流荷重」（ここでは、レベルII荷重という）に対してどこまで耐えられるか、という鋼製堰堤に対する表-1のような安全性照査法の体系を開発する必要がある。

第2の問題点は、第1の問題点とはほぼ同じであるが、鋼製の特徴である延性を十分に活かす設計体系になっていない点である。鋼製堰堤は、一般に骨組鋼管部材で構成されており、想定外の土石流に対しても予備の負荷能力（リダンタンシー）を十分に持っているが、そのリダンタンシー（冗長性）の評価法<sup>11)</sup>がまだ十分に活用されていない点である。また一部の部材が破壊しても、どれだけのロバストネス（頑強性）を持っているか、についての評価法についても同様に開発する必要がある。

これらの問題点を解決するためには、鋼製堰堤の静的または動的弾塑性解析法の開発が必要である。よって、本稿では、まず極めて大きい土石流荷重（レベルII荷重）の設定法を一案として述べ、次に、鋼製堰堤の終局安全性照査の一つとして、礫衝突解析法<sup>8),9),12)</sup>について提案するものである。

\*1 正会員 (一財)砂防・地すべり技術センター Member, Sabo & Landslide Technical Center (E-mail: j-shima@stc.or.jp) \*2 正会員 伊藤忠テクノソリューションズ(株) Member, Itochu Techno-Solutions Corporation \*3 正会員 砂防鋼構造物研究会 Member, Research Association for Steel Sabo Structures \*4 正会員 政策研究大学院大学 Member, National Graduate Institute for Policy Studies

表一 砂防堰堤の安全性照査法  
Table 1 Safety check method of Sabo dam

レベルⅠ荷重 (100年再現確率)	土石流作用時：安定性照査 満砂時：安定性照査	礫衝突時：礫衝突に対するエネルギー照査 土石流作用時：部材の応力照査 満砂時：部材の応力照査
レベルⅡ荷重 (200年再現確率： 大規模深層崩壊など)	土石流作用時：安定性照査 損傷後：安定性照査	礫衝突時：礫衝突に対して部材の応力および変形照査 土石流作用時：部材の応力照査 損傷後：部材の応力照査

これまで、礫衝突を受ける鋼管部材や鋼製堰堤に関する研究は、星川ら<sup>13),14)</sup>によって動的終局実験や弾塑性衝撃応答解析が行われてきたが、底板コンクリートまで考慮した詳細な安全性照査法は開発されていない。

### 3. 極めて大きい土石流荷重の設定法

「極めて大きい土石流荷重」の設定法には、以下の方法が考えられる。

- 1) 国内で似たような流域で発生したことがある最大クラスの巨礫を参考に礫衝突荷重を採用する。
- 2) 過去に似たような地形で発生した大規模崩壊を対象に流体力を想定する。
- 3) 今後新たに発生する土石流荷重に対して、土石流シミュレーション解析手法<sup>15),16)</sup>（個別要素法+粒子法、または個別要素法のみ）などを開発してレベルⅡ荷重を設定する。
- 4) 砂防堰堤の安定計算の限界条件から極限流体力を逆算して、これをレベルⅡ荷重の流体力とする<sup>6)</sup>。

ここでは、レベルⅡ荷重として4)の方法により極限流体力および流速を、また1)の方法から大規模な礫衝突荷重を採用する。つまり、レベルⅠ荷重に対して決定した断面形状に対して土石流ピーク流量を極限状態の安定条件を満足させるまで増加させて極限流体力を求め、これをレベルⅡ荷重の流体力および流速とした。また礫の大きさは、災害現地調査から最大クラスの礫径を選定した。

#### 3.1 安定条件

「極めて大きい土石流荷重」を以下のようにして求める<sup>6)</sup>。

① 計画規模の土石流荷重（ここでは、レベルⅠ荷重と呼ぶ）に対して、安定計算により砂防堰堤の断面形状を決定する。

② ①で決定した断面形状に対して土石流ピーク流量を変化させて土石流荷重を算出し、安定限界となる極限状態の土石流荷重（ここでは、レベルⅡ荷重と呼ぶ）を求める。

レベルⅠ荷重に対する安定条件は現行どおりである。レベルⅡ荷重の安定条件は、レベルⅠ荷重で求めた断面形状の砂防堰堤が、どの程度までの土石流荷重で安定条件の中で極限状態となるかを調べるため、以下の条件を設定した。すなわち、滑動の安全率は $F_s \geq 1.0$ 、転倒は合力の作用位置が底面外に出なければ転倒しないので、

外力による転倒モーメント  $M_o$  に対する自重の抵抗モーメント  $M_r$  の安全率を  $Fr = M_r/M_o \geq 1.0$  とした。また、基礎地盤に対しては地盤反力度を極限支持力度以下とし、上流側のコンクリートの内部応力度については引張応力度を許容した。

#### 3.2 検討条件

##### 3.2.1 設計諸元

表-2に土石流、基礎地盤、コンクリート、砂防堰堤の各諸元を示す。コンクリートの許容圧縮応力度および許容引張応力度は設計基準強度の1/4および1/80とし、レベルⅡ荷重に対する極限応力度は、極限状態の土石流荷重について検討するため、レベルⅠ荷重の場合の1.5倍とした。またレベルⅡ荷重の基礎地盤（軟岩Ⅰ（CM級）と想定）については極限状態を検討するため、レベルⅠ荷重の許容支持力度の3倍の極限支持力度とした。

##### 3.2.2 砂防堰堤モデルと荷重モデル

図-1にコンクリート堰堤モデル、図-2に鋼製堰堤モデルを示し、それぞれに荷重図（レベルⅠ荷重もレベルⅡ荷重も同じパターン）を示す。荷重は砂防堰堤に対して最も危険な状態となるように土石流流体力を上部に

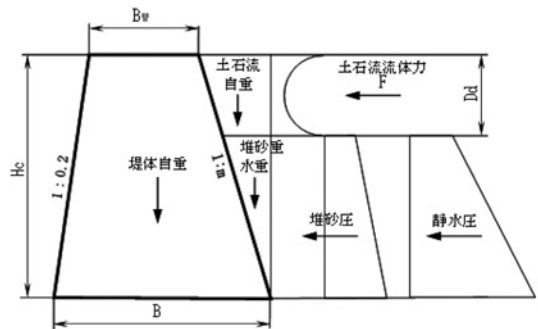


図-1 コンクリート砂防堰堤モデル  
Fig.1 Concrete dam model

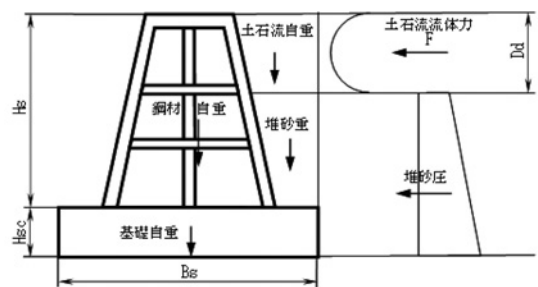


図-2 鋼製透過型砂防堰堤モデル  
Fig.2 Steel open type dam model

表-2 土石流，基礎地盤，コンクリート，砂防堰堤の諸元  
Table 2 Dimensions of debris flow, foundation, concrete and Sabo dam

土石流の諸元		コンクリートの諸元	
流域面積	A = 0.32 km <sup>2</sup>	設計基準強度	$\sigma_{ck} = 18000 \text{ kN/m}^2$
24時間雨量 (既往最大)	P <sub>24</sub> = 371 mm/24 hr	許容圧縮応力度 (レベル I)	$\sigma_{ca} = 4500 \text{ kN/m}^2 (\sigma_{ck}/4)$
河床勾配	I = 1/6	極限圧縮応力度 (レベル II)	$\sigma_{ca}' = 6750 \text{ kN/m}^2 (\sigma_{ck}/4 \times 1.5)$
土石流ピーク流量	Q <sub>sp</sub> = 73.50 m <sup>3</sup> /s	極限引張応力度 (レベル II)	$\sigma_{ta}' = -337.5 \text{ kN/m}^2 (-\sigma_{ck}/80 \times 1.5)$
土石流の流れの幅	B <sub>da</sub> = 15.00 m	コンクリート砂防堰堤の諸元	
土石流の水深	D <sub>d</sub> = 1.12 m	堤高	H <sub>c</sub> = 10.00 m
土石流の流速	U = 4.37 m/s	下流法勾配	n = 0.20
土石流流体力	F = 34.68 kN/m	水通し天端幅	B <sub>w</sub> = 3.00 m
基礎地盤の諸元 (軟岩 I (CM 級))		鋼製透過型砂防堰堤の諸元	
堤体底面の摩擦係数	f = 0.7	鋼製部高さ	H <sub>s</sub> = 8.00 m
許容支持力度 (レベル I 荷重)	Q <sub>a</sub> = 1200 kN/m <sup>2</sup>		
極限支持力度 (レベル II 荷重)	Q <sub>a}' = 3600 kN/m<sup>2</sup> (1200 × 3)</sub>	底版コンクリート厚さ	H <sub>sc</sub> = 2.00 m
せん断強度	$\tau_o = 600 \text{ kN/m}^2$		

表-3 レベル I 荷重およびレベル II 荷重に対する安定計算結果  
Table 3 Computational results of stability conditions against Level I and Level II loads

項 目	コンクリート砂防堰堤				鋼製透過型砂防堰堤		
	レベル I 荷重により決定した断面形状 下流法勾配 n=0.2, 上流法勾配 m=0.3, 底面幅 B=8.00 m				レベル I 荷重により決定した断面形状 底面幅 B <sub>s</sub> =8.40 m		
	レベル I 荷重		レベル II 荷重		レベル I 荷重	レベル II 荷重	
土石流の諸元		土石流荷重検討結果					
土石流のピーク流量	Q <sub>sp</sub> = m <sup>3</sup> /s	73.5	754.0	73.5	638.0		
土石流の径深	D <sub>r</sub> = m	-	3.23	-	3.01		
土石流の水深	D <sub>d</sub> = m	1.12	5.68	1.12	5.04		
土石流の流速	U = m/s	4.37	8.86	4.37	8.45		
土石流流体力	F = kN/m	34.68	722.96	34.68	583.50		
安定条件		安定計算結果					
滑動に対する安定	F <sub>s</sub> =	8.09 ≥ 4.0	4.97 ≥ 1.0	21.52 ≥ 4.0	7.47 ≥ 1.0		
転倒に対する安定	e  = m	1.28 ≤ 1.33	-	0.09 ≤ 1.40	-		
	Fr =	-	1.07 ≥ 1.0	-	1.00 ≥ 1.0		
基礎地盤に対する安定	Q1 = kN/m <sup>2</sup>	374.24 ≤ 1200	707.78 ≤ 3600	112.23 ≤ 1200	425.08 ≤ 3600		
	Q2 = kN/m <sup>2</sup>	7.64 ≤ 1200	-	98.67 ≤ 1200	-		
コンクリートの内部応力度	$\sigma_1 = \text{kN/m}^2$	374.24 ≤ 4500	707.78 ≤ 6750	112.23 ≤ 4500	425.08 ≤ 6750		
	$\sigma_2 = \text{kN/m}^2$	7.64 ≤ 4500	-335.02 ≥ -337.5	98.67 ≤ 4500	-211.78 ≥ -337.5		

作用させ、その下に堆砂圧または静水圧を作用させた<sup>2),5)</sup>。

### 3.2.3 安定計算結果

表-3に検討結果を示す。その結果、断面形状はレベル I 荷重に対して、コンクリート堰堤では上流法勾配 m=0.3, 底面幅 B=8.00 m, 鋼製堰堤では基礎コンクリート幅 B<sub>s</sub>=8.40 m となった。

次に、この断面形状に対しレベル II 荷重を検討した結果、コンクリート堰堤では内部応力が、鋼製堰堤では転倒の安全性が限界となり、レベル II 荷重の土石流流体力は、コンクリート堰堤で F=722.96 kN/m, 鋼製堰堤で F=583.50 kN/m となり、鋼製堰堤の方がコンクリート堰堤に比べ約 80% の流体力で終局安定限界に達した。この原因は、安定計算において砂防堰堤を剛体と仮定したこと起因し、鋼製堰堤の自重がコンクリート堰堤の自重に比べて小さいためと思われる。これは両者の構成

材料 (鋼製とコンクリートの構造) の違いによるので、以下に構造計算 (礫衝突解析) によって構造内部の安全性を検討する。

## 4. 鋼製透過型砂防堰堤の礫衝突解析

ここでは、極めて大きな礫衝突を受ける場合について、底版コンクリートを考慮した鋼製透過型堰堤の礫衝突解析を行う。

### 4.1 極めて大きな礫衝突荷重の設定

安定計算により「極めて大きな土石流荷重」のうち、土石流の流速を 8.45 m/s と設定した。また礫径については、2014 年の南木曾土砂災害を受けて示された事務連絡<sup>7)</sup>に基づいて、「極めて大きい礫の目安」として「2 辺平均の径が概ね 3.0 m 以上の礫」を参考に礫径 3.0 m を採用した。

## 4.2 鋼製透過型砂防堰堤モデル

解析の対象とした鋼製堰堤は、図-3のように底版コンクリートを考慮した鋼製堰堤<sup>8)</sup>とした。上部の鋼製堰堤は直径508mmと直径318.5mmの鋼管を接合した形状である。堰堤の高さは8.0mで、解析を簡素化するために鋼管同士の接合部は詳細にモデル化していないが、鋼管の直径、肉厚等はすべてシェル要素により忠実にモデル化した。底版コンクリートは、図-3のように側面幅8.40m×正面幅7.0m×高さ2.0mの直方体形状であり、鋼管の底版コンクリートへの埋込み深さは1.0mである。鋼製堰堤の底面には厚さ22mmのベースプレートを模擬した。鋼材はSTK490とし、コンクリートの圧縮強度は18MPaで、礫は完全弾性体とした。鋼材、コンクリートおよび礫体の諸諸条件を表-4、5および6に示す。

### 4.3 解析条件

本研究では、衝突位置の影響を調べるため、図-4のように鋼製堰堤の上部と下部に礫を衝突させた。鋼製堰堤の根入れ部と底版コンクリートは剛結合し、底版コンクリートの底面は固定条件を設定した。

### 4.4 鋼製堰堤の解析結果

#### 4.4.1 上部衝突

図-5は、礫が上部に衝突した場合の鋼製堰堤の塑性ひずみ分布を示したもので、礫の衝突位置を中心として中央の上流側鋼管および鋼管同士の接合部に局所的な塑

性変形が生じた。最終的に礫体は反跳し、堰堤は倒壊に至っていない。図-6は底版コンクリートの損傷状態図である。中央列鋼管①のベースプレートを中心に破壊が生じたが、版全体に及ぶ損傷ではなかった。また底面の固定位置で破壊は生じていない。

図-7は底版コンクリートの3次元的な中央列上流側の破壊状態図である。鋼管ベースプレートを中心に破壊が生じているが、版全体に及ぶ破壊ではないことがこの図からもわかる。

#### 4.4.2 下部衝突

図-8に下部衝突の場合の塑性ひずみ分布を示す。礫の衝突位置近傍に塑性変形が集中したが、最終的に礫体は反跳し、堰堤は倒壊に至っていない。図-9は底版コンクリートの破壊状態図である。上流側のベースプレートを中心に破壊が生じ、上部衝突に比べ破壊の範囲は大

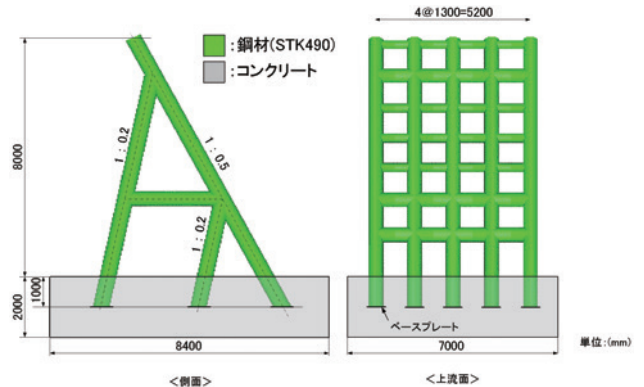


図-3 底版コンクリートを考慮した鋼製堰堤モデル  
Fig.3 Steel open type dam model with concrete foundation

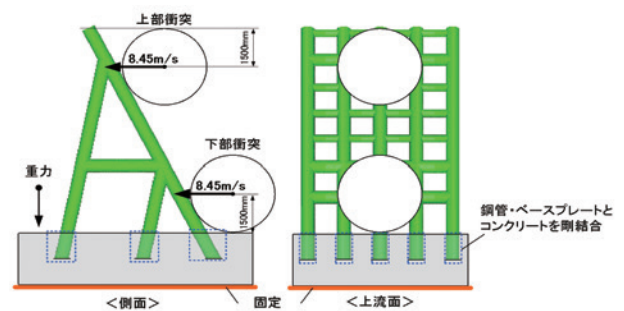


図-4 礫の上部および下部への衝突位置  
Fig.4 Rock impact onto the upper and lower points

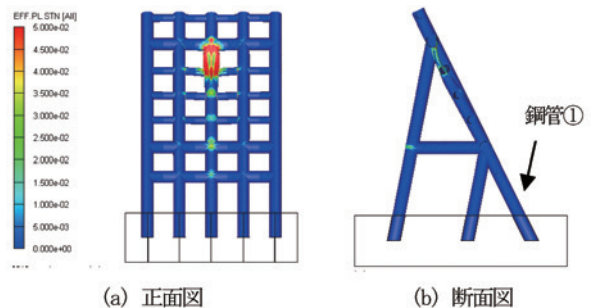


図-5 塑性ひずみ分布 (上部衝突)  
Fig.5 Plastic strain distribution (upper impact)

表-4 鋼材の物性値

Table 4 Properties of steel member

項目	値
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	7850
ヤング率 (GPa)	200
ポアソン比 (-)	0.3
降伏応力 (MPa)	315
引張強度 (MPa)	593

表-5 基礎底版コンクリートの物性値

Table 5 Properties of concrete foundation

項目	値
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2300
ヤング率 (GPa)	22
ポアソン比 (-)	0.2
圧縮強度 (MPa)	18.0
引張強度 (MPa)	1.58

表-6 礫体の物性値

Table 6 Properties of rock

項目	値
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2598
ヤング率 (GPa)	49.0
ポアソン比 (-)	0.23

きいが、下部衝突についても版全体に及ぶ破壊には至っておらず、また底面の固定位置においては破壊が生じなかった。

4.4.3 衝突荷重—時間曲線

図-10は、礫による衝突荷重の時刻歴である。高周波成分が含まれるため、移動平均処理を施した線を併記

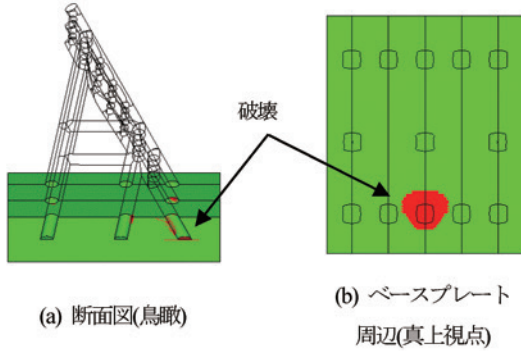


図-6 コンクリートの破壊状態 (上部衝突)  
Fig.6 Failure state of foundation concrete (upper impact)

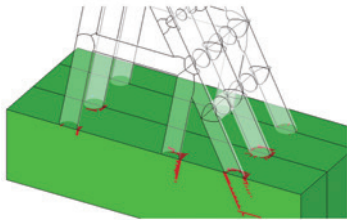


図-7 3次元的コンクリートの破壊状態 (上部衝突)  
Fig.7 3D failure state of foundation concrete (upper impact)

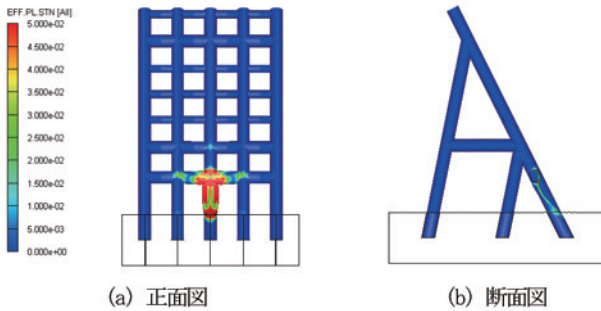


図-8 塑性ひずみ分布 (下部衝突)  
Fig.8 Plastic strain distribution (lower impact)

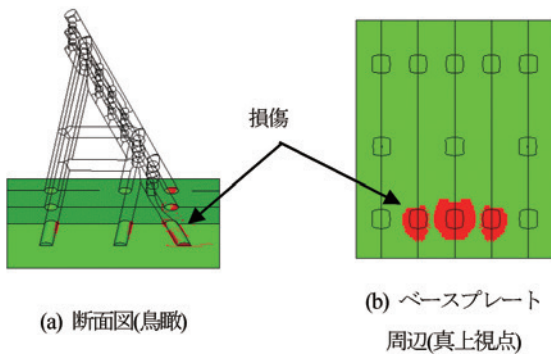


図-9 底板コンクリートの破壊状態 (下部衝突)  
Fig.9 Failure state of foundation concrete (lower impact)

している。上部衝突では衝突後 80 ms で約 5 MN の最大荷重が発生した。一方、下部衝突では上部衝突に対して荷重の立ち上がりが早く、衝突後 60 ms で約 6 MN の最大荷重が生じ、上部衝突に対して下部衝突では堅い応答を示しており、衝突位置による応答の違いが認められた。これは、下部の衝突位置の方が構造体としての剛性が大きいため、上部衝突より大きい衝突荷重が得られたと考えられる。

図-11は礫の衝突エネルギーと鋼製堰堤および底板コンクリートの吸収エネルギーの時刻歴を示している。比較のため礫の初期運動エネルギー ( $mv^2/2$ ) で除した比率としている。上部衝突、下部衝突ともに礫体の持つ衝突エネルギーのほとんどが鋼製堰堤に伝達していることがわかる。最終的に、底板コンクリートへの影響は、上部衝突で 0.1%、下部衝突で 1.3% と下部衝突の方が大きい、いずれも系全体のエネルギーに対してはわずかである。エネルギー伝達の観点から、衝突位置によらず底板コンクリートへの影響は少ないことがわかった。

解析結果より、今回想定した条件においては、衝突荷重や底板コンクリートの破壊状態等、局所的な応答に関して衝突位置による影響が認められたものの、エネルギー伝達の観点からは、底板コンクリートへの影響は少なく、衝突エネルギーのほとんどが鋼製堰堤本体に吸収されることがわかった。つまり、本解析結果から、安定性を損なうような巨礫の衝突に対しても、鋼製堰堤は鋼管フレームによって衝突エネルギーを吸収し、転倒・滑動といった安定性にまで影響することはないことが確認された。

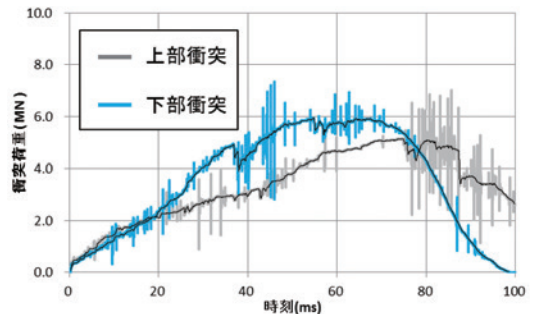


図-10 衝突荷重の時刻歴  
Fig.10 Time history of impact load

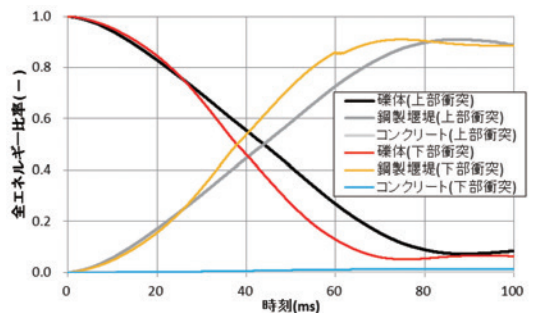


図-11 衝突および吸収エネルギーの時刻歴  
Fig.11 Time history of impact and absorbed energies



## 5. コンクリート砂防堰堤の礫衝突解析

比較のために、同じ条件のもとで図-12に示すような2次元のコンクリート堰堤（高さ10.0m、基礎幅8.0m、天端幅3.0m）に対して、衝突解析を行った。コンクリートの物性値、礫の物性値および荷重条件は、鋼製堰堤の場合と同じである。

図-13に堰堤内部の破壊状態図を示す。衝突開始後5msで衝突部近傍からせん断破壊が生じ、堰堤内部に進展した。同時に、固定部上流側からも引張破壊が生じた。最終的に内部の破壊は堰堤を横断して下流側まで達しており、固定部も全域で引張破壊に至った。

## 5. 結論

本研究の成果として、以下のことが認められた。

- 1) まず鋼製堰堤の現行設計法上の問題点として、鋼製堰堤の安全性照査法を開発する必要性を強調した。
- 2) レベルⅡ荷重の設定は、本来過去の最大クラスの土砂災害などから設定すべきであるが、今回は災害調査からレベルⅡの礫径を、流体力と流速は、便宜上、極限状態の安定計算によって決定した。
- 3) レベルⅡの巨礫の衝突に対して、鋼製堰堤では鋼管フレームによって衝突エネルギーを吸収し、底板コンクリートには影響がないことがわかった。
- 4) 同じ条件でコンクリート堰堤に対して衝突解析を行ったところ、堰堤内のせん断破壊が顕著となり、同時に底面の引張破壊によって堰堤が転倒する傾向を示した。

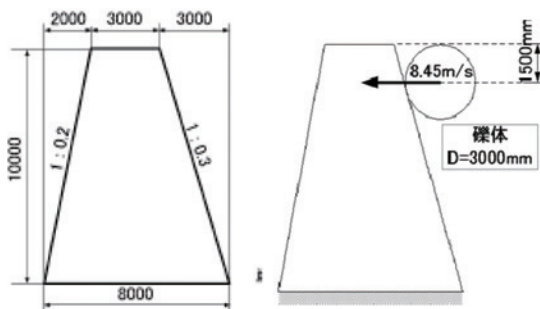


図-12 コンクリート砂防堰堤モデルと礫衝突位置  
Fig. 12 Concrete Sabo dam model and rock impact point

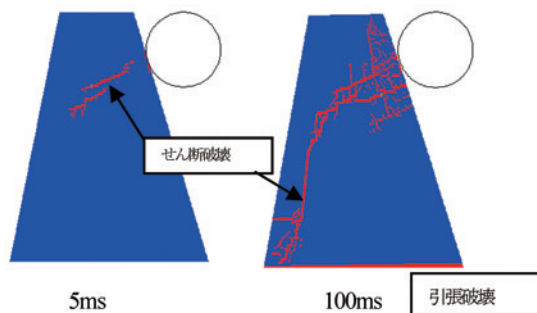


図-13 コンクリート堰堤の破壊  
Fig. 13 Collapse of concrete Sabo dam

- 5) 今回は、礫1個の衝突解析であったが、今後は後続流による礫の繰り返し衝突現象<sup>15),16)</sup>に対しても検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究を進めるに際し、防衛大学校香月智教授および別府万寿博教授のご支援を得たことを付記し、ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 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）：国土技術政策総合研究所資料，第904号資料，2016
- 2) 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及び同解説，国土技術政策総合研究所資料，第905号資料，2016
- 3) 国土交通省中部地方整備局：長野県南木曾町梨子沢土石流速報，2014
- 4) 香月智・堀口俊行・立石龍平：長野県南木曾町で発生した土砂災害調査報告，内部資料，2014
- 5) 鋼製砂防構造物委員会編集：鋼製砂防構造物設計便覧，（財）砂防・地すべり技術センター，平成21年度版，2009
- 6) 山口聖勝・石川信隆・田村毅・嶋丈示・水山高久：極めて大きな土石流流体力を受ける砂防堰堤の極限状態における安定計算法，平成27年度砂防学会研究発表概要集，2015
- 7) 国土交通省水管理・国土保全局砂防課：事務連絡，2014
- 8) 松澤遼・嶋丈示・武田一平・別府万寿博・山口聖勝・石川信隆・水山高久：底板コンクリートを考慮した鋼製透過型砂防堰堤への礫衝突応答解析，平成28年度砂防学会研究発表概要集，p.B 200-201，2016
- 9) 松澤遼・別府万寿博・嶋丈示・石川信隆・水山高久：極めて大きな土石流荷重を受けるコンクリート砂防堰堤の耐衝撃性に関する解析的検討，平成27年度砂防学会研究発表概要集，p. B 220-221，2015
- 10) Itoh, M., Beppu, M. and Matsuzawa, R. : Numerical simulation of RC slabs subject to impact loadings by using the improved Caprous constitutive model, 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Shock & Impact Loads on Structures, Singapore, 2013
- 11) 片出亮・香月智・嶋丈示：鋼製砂防堰堤のリダンダンシー向上手法に関する一提案，砂防学会誌，Vol. 62, No. 6, p. 3-14, 2010
- 12) 別府万寿博・松澤遼・嶋丈示・石川信隆・水山高久：極めて大きな土石流荷重を受ける鋼製透過型堰堤の耐衝撃性に関する解析的検討，平成27年度砂防学会研究発表概要集，p.A 82-83，2015
- 13) 星川辰雄・石川信隆・彦坂熙・阿部宗平：鋼管はり部材の動的終局に関する一考察，土木学会論文集，No. 525/I-33, p. 139-152, 1995
- 14) 星川辰雄・石川信隆・彦坂熙・水山高久・阿部宗平：鋼製透過型砂防構造物の弾塑性衝撃応答解析と耐衝撃設計法，土木学会論文集，No. 549/I-37, p. 159-173, 1996
- 15) 別府万寿博・松澤遼・嶋丈示・石川信隆・水山高久：DEM-MPS法による土石流荷重評価と砂防堰堤の耐荷性能に関する一考察，平成28年度砂防学会研究発表概要集，p.B-222-223，2016
- 16) 堀口俊行・辻佳成・香月智・嶋丈示・石川信隆・水山高久：鋼製透過型砂防堰堤への土石流衝突時に作用する土石流荷重の推定に関する研究，平成28年度砂防学会研究発表概要集，p.B 202-203，2016

(Received 23 February 2017)