

# 河川砂防技術研究開発

## 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>		氏名 (ふりがな)	所属	役職	
		石川 芳治 (いしかわ よしはる)		東京農工大学	名誉教授
<b>②研究テーマ</b>	名称	大規模外力に対してレジリエントな砂防施設の設計手法の開発			
	政策領域	[分野] 砂防技術分野	融合技術	(リモートセンシング、非破壊検査、認知行動学 等)	
		[公募課題] 大規模外力に対する破壊プロセスを踏まえた、より合理的かつ効果的な砂防施設の設計手法に関する技術研究開発			
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)		平成29年度	平成30年度	平成 年度	総合計
		1,544万円	1,404万円	万円	2,948万円
<b>④研究者氏名</b>		(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名		所属・役職 (※平成31年3月31日現在)			
石川 信隆		防衛大学校・名誉教授			
大野 宏之		前 (一財) 砂防・地すべり技術センター砂防技術研究所・所長			
松村 和樹		京都府立大学・名誉教授			
香月 智		防衛大学校・教授			
別府 万寿博		防衛大学校・教授			
里深 好文		立命館大学・教授			
水野 秀明		九州大学・准教授			
嶋 丈示		(一財) 砂防・地すべり技術センター砂防技術研究所・次長			
富田 陽子		(一財) 砂防・地すべり技術センター砂防技術研究所・技術部長			
藤村 直樹		国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ・主任研究員			
武澤 永純		国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ・研究員			
赤澤 史顕		前 国立研究開発法人土木研究所土砂管理研究グループ・研究員			
若原 妙子		(公益社団法人) 砂防学会・研究員			
<b>⑤研究の目的・目標</b>		(申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>研究対象とする砂防施設としてはコンクリート不透過型、鋼製透過型、ハイブリッド型などの砂防堰堤とする。研究対象とする大規模な土砂移動現象としては、100年超過確率を超えるような大きな豪雨により発生する大規模な土石流・流木、ならびに降雨および地震等に起因する深層崩壊による土砂移動 (土石流・流木および崩壊土砂の移動現象) とする。過去の大規模外力等を発生させた豪雨や土砂移動現象等について統計解析を行うことにより大規模外力の設定手法および予測法を開発する。さらに過去に発生した大規模な土砂移動現象等による既設の砂防施設等の被災実態を基に、数値シミュレーション等を用いて砂防施設等の破壊プロセスおよび破壊メカニズムを解明し、大規模外力に耐えうるリダンダンシー (冗長性) が高く、ロバストネス (頑健性) が大きく、レジリエントな (粘り強い) 材料、構造を持つ砂防施設の設計手法ならびに既設砂防施設の補強法を開発する。さらに、これらの成果を現場の技術者が利用し易いように体系的にまとめた実用的なガイドライン (案) を作成する。</p>					

## ⑥研究成果

(様式 C-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### (1)大規模外力による既設の砂防施設の被災実態の解明

#### ①砂防堰堤の損傷事例収集および損傷形態の分析

砂防堰堤に損傷を生じさせた外力の大きさを推定するため、砂防堰堤の被災実態を調査した。調査は文献調査を基本とし、最近の事例のうちいくつかの施設については現地調査を行った。調査を行った被災事例53事例について事例毎に、(i)土砂移動の誘因となった雨量、(ii)流域の諸元(勾配、粒径等)、(iii)損傷形態との関係について考察を行った。なお、損傷形態としては水通し部および袖部の損傷が多く、コンクリート堰堤では水平打継目での破損の事例が多かった。

#### ②年超過確率と被災形態

砂防施設(堰堤)の被災が発生した日の日雨量と最大1時間雨量についてさらに日雨量については年超過確率と施設の被災形態(被災度)の関係を調査した。年超過確率雨量と被災形態(被災度)には明確な関係は認められなかった。

#### ③空中写真を用いた礫径調査と衝撃力算定に用いる最大礫径の設定法

本堤部、袖部が損傷した砂防堰堤について、礫の衝撃力、流体力を推定した結果、礫の衝撃力が流体力の約2倍であった事例を確認した。これより、想定を上回る外力に対する砂防施設の設計手法を検討する上で、礫の衝撃力を適切に設定することが重要であると考えられた。なお、衝撃力を算定するための最大礫径 $D_{95}$ は透過型堰堤の開口部の鋼材の純間隔の設定にも用いられてきたが、両者は目的が異なるため、開口部の鋼材の純間隔の設定には最大礫径 $D_{95}$ とは異なる礫径を用いることが考えられる。長野県南木曾町の梨子沢流域における2014年の土石流災害後の堆砂域内部の除石時に判明した礫径分布と災害後の現地計測による堆砂域表面調査による礫径分布では、大きな違いがあることが判明した。このため、より適切に最大礫径を設定する手法として空中写真から河床の礫径を調査することを試みた。図-1に現地計測で求めた礫径分布(A)と空中写真判読(B)で求めた礫径分布を示す。空中写真判読による礫径の方が大きな値を示した。また図-2には空中写真判読による礫径について確率密度関数として対数正規分布を用いて最大礫径 $D_{95}$ を推定する手法を示す。このような確率密度関数を用いることにより、従来よりも合理的に任意の確率の礫径分布を推定できる。

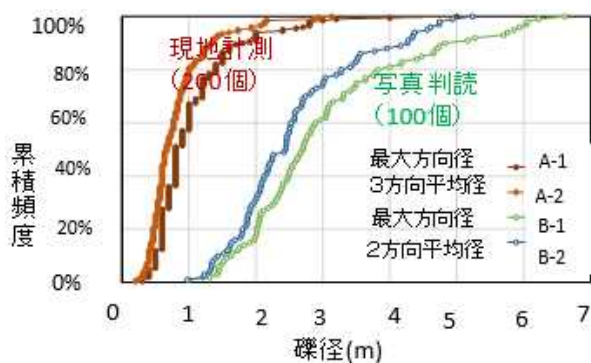


図-1 現地計測で求めた礫径分布(A)と  
写真判読による礫径分布(B)

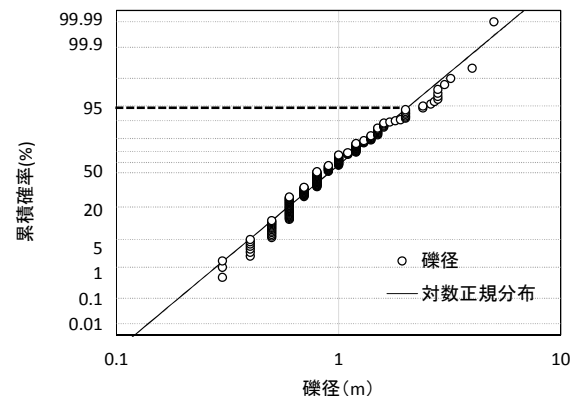


図-2 対数正規分布による  $D_{95}$  の推定

### (2)大規模外力の設定手法の開発

#### ①年超過確率降雨量と大規模土砂災害発生の関係の検討

過去に大規模な土砂災害が発生した6事例について、100年超過確率の最大24時間雨量と最大1時間雨量を求め、実測された最大24時間雨量と最大1時間雨量との比較を行った。その結果実測の最大24時間雨量、最大1時間雨量が100年超過確率降雨量を超えるケースはほとんどなく、100年超過確率を超える希な降雨が大規模な土砂災害を引き起こしたとは必ずしも言えないことが分かった。

#### ②既往の土石流による土砂量の実績からレベルII外力を推定する手法の検討

「砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説」(国総研資料第904号)においては100年超過確率降雨量および現地調査により土石流の計画流出土砂量(以下ではレベルIとする)を求め、これからピーク流量、流速、水深、流体力、衝撃力等を算定している。このように、土石流の規模を設定する上で、流出土砂量の設定が極めて重要である。砂防便覧・平成26年版に掲載されている、平成

8～24年に発生した流域面積5km<sup>2</sup>以下の土石流のデータ約440個について最大日雨量および流域面積と流出土砂量の関係を調査した結果を図-3、図-4に示す。図-3より最大日雨量と流出土砂量には相関は認められなかった。また、前述したように100年超過確率を超える希な降雨が過去の大規模な土砂災害を引き起こしたとは必ずしも言えないことから、年超過確率降雨量から大規模土砂流の土砂量を設定する根拠は得られなかった。一方、図-4より流域面積と単位流域面積当たりの土砂量にはある程度の相関があることから、流域面積と単位流域面積当たりの関係から流出土砂量を設定することとし、土砂量がある値を超えない確率が99%である値(99%値)を大規模な土砂流の土砂量(以下ではレベルⅡとする)とすることを提案した。

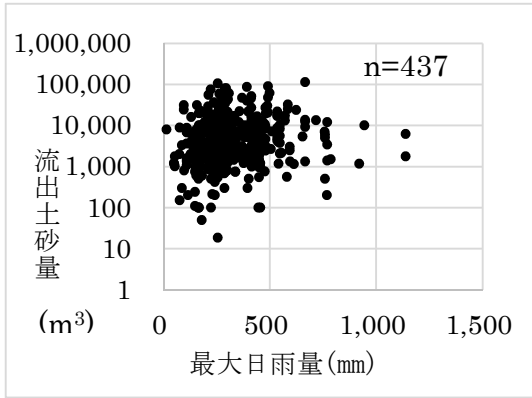


図-3 最大日雨量と流出土砂量

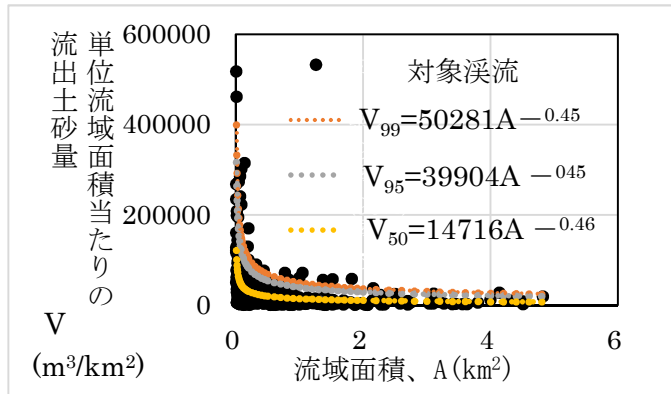


図-4 流域面積と単位流域面積当たり流出土砂量の99%,95%,50%値の曲線

### ③土石流の規模と土石流の氾濫範囲と被害範囲

南木曾町の梨子沢流域を対象としてレベルⅠ相当の土砂量を9,513m<sup>3</sup>とし、レベルⅡ相当の土砂量を約5倍の56,581m<sup>3</sup>として土石流の氾濫シミュレーション計算を行った。レベルⅡのピーク流量はレベルⅠの約6倍となり、氾濫範囲、流動深、流動深+堆積深ともに増大しており、レベルⅡにおいては土石流による被害範囲も拡大することが分かった。

### (3)大規模外力による砂防施設の破壊プロセスおよびメカニズムの解明

#### ①鋼製透過型堰堤に関する弾塑性解析法による計算

鋼製透過型堰堤(高さ10.5m、幅10.9m)のFEM解析モデルを作成して(a)土石流流体力を上段に作用させた場合と(b)中段に作用させた場合を想定して弾塑性解析を行った。土石流水深はD<sub>a</sub>=1.99mで、堆砂圧P<sub>1</sub>および土石流自重P<sub>2</sub>はそれぞれ一定とし、堰堤が破壊するまで土石流流体力の荷重を増加させた。各鋼管の断面径および厚さを考慮し、鋼管の継手部もモデル化し、ボルトの応答ひずみが破断ひずみに達したときを継手部の破断と見做した。その結果、図-5(a)に示すように土石流流体力が上段に作用した場合は流体力F=491.6kN/m、図-5(b)に示すように中段に作用した場合は流体力F=983.1kN/mで堰堤が破壊に至った。これは、設計時の流体力F=163.85kN/mのそれぞれ3倍および6倍に相当している。災害後の調査でも継手部の破断が目立ったが、解析においても継手部の破断が生じた。さらに2列目柱鋼管に水平鋼管部材が押し込む(へこむ)事例が発生した。このような破壊の対策としてはボルトに対する耐力を調べ、

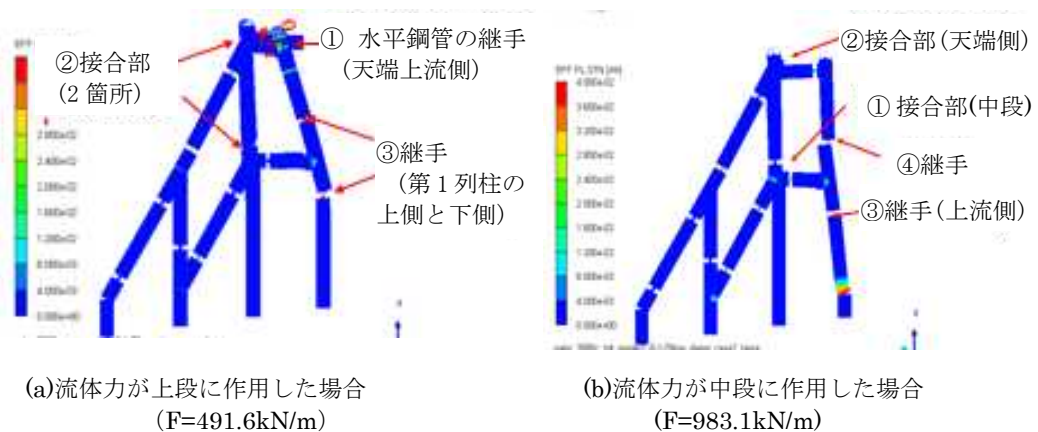


図-5 鋼製透過型堰堤の破壊状態と損傷部位

必要本数と材質および継手部の補強対策を検討する必要がある。また、上流側と下流側の部材接合部における鋼管同士は、なるべく同等の径厚比を使用する必要がある。

②鋼製透過型堰堤に関する個別要素法による解析

図-6 に示すような河川に設置した鋼製透過型堰堤（高さ 12m、幅 10m）の計算モデルを作成し石礫型土石流を流下させて礫の衝突による衝撃力が連続して作用する場合の鋼製堰堤の挙動を個別要素法により解析した。礫径は南木曾災害後の調査で得られた粒径分布（ $D_{50}=100\text{cm}$ 、 $D_{95}=210\text{cm}$ ）を用いた。計算の結果、図-7 に示すように 2 列目の柱部材でへこみ変形が見られ、破壊のプロセスを推定できた。変形した 2 列目柱への押し込み荷重を算定した結果、最大荷重は 6245kN となり、単位幅当りの荷重は、 $F=520.4\text{kN/m}$  となった。

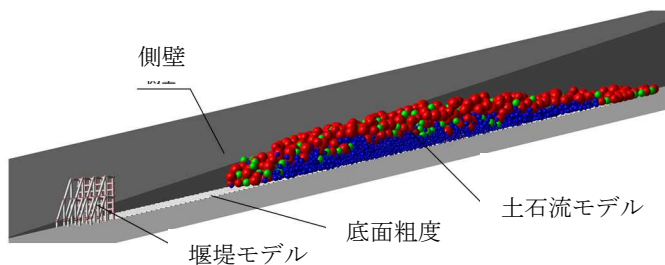


図-6 個別要素法(DEM)による解析モデル

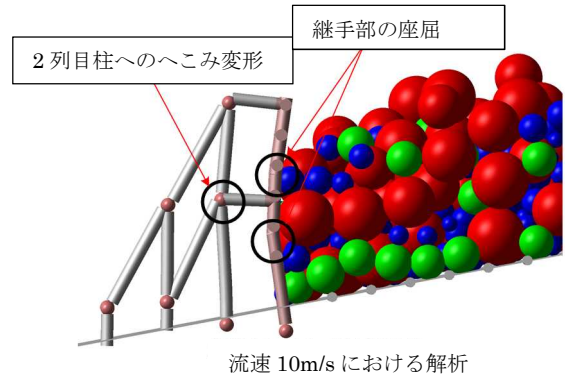
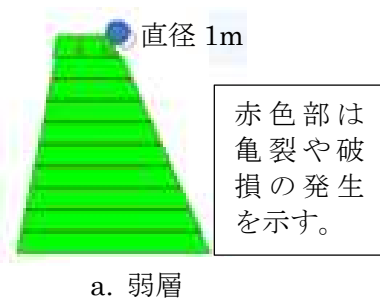


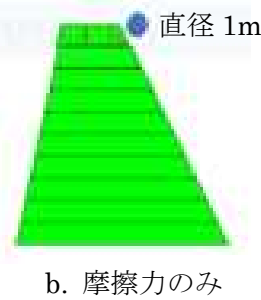
図-7 DEM によるレベル II 荷重の推定と損傷部位

③コンクリート不透過型堰堤に関する検討

コンクリート不透過型堰堤の越流部、非越流部が土石流の衝突により破壊した事例について現地調査と静的安定計算ならびにFEM衝撃解析を基に破壊プロセスとメカニズムを検討した。これらの内、FEM衝撃解析は高さ12.5mのコンクリート堰堤に直径1mおよび3mの礫を速度8.45m/sで衝突させて行った。水平打継目の引張強度がコンクリート強度の約半分の「a. 弱層」条件および引張強度がなく摩擦力のみが作用する「b. 摩擦力のみ」条件で直径1mの礫を衝突させた場合の結果を図-8に示す。堰堤は打継目で破壊が生じており、打継目の強度と礫径がコンクリート堰堤の破壊を左右する主要な要因であることが分かった。なお、図-9には堰堤上流側に厚さ3mのソイルセメントを緩衝材として設置した場合の損傷状況を示す。本体部には亀裂等の損傷は発生していない。



a. 弱層



b. 摩擦力のみ

図-8 FEM 衝撃解析によるコンクリート堰堤の被災形状

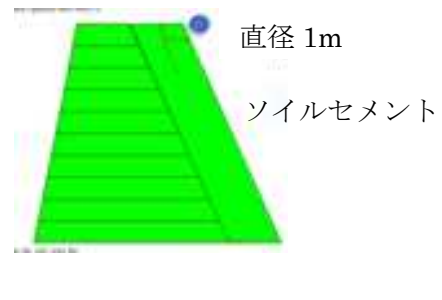


図-9 ソイルセメントの設置

(4)大規模外力に対する合理的な砂防施設の設計手法の開発

①鋼製透過型砂防堰堤の骨組構造の弾塑性解析による照査法と静的解析による 2 段階照査法の提示

鋼製透過型砂防堰堤の損傷の主な要因の一つは継手部・接合部の強度が母材の鋼管の強度に比べて低いことにあることが分かった。このため、損傷を抑制する対策として継手部・接合部の強度を高めた場合について骨組構造の弾塑性解析による照査法と静的解析による鋼製砂防堰堤の 2 段階照査法について検討し、照査法を提示した。

②FEM 衝撃解析による照査法と静的安定解析によるコンクリート重力式砂防堰堤の照査法の提示

コンクリート重力式砂防堰堤の損傷の主要な要因の一つは水平打継目の強度が他のコンクリート部と比較して低いことにあることがわかった。このため、損傷を抑制する対策として水平打継目の強度を高めた場合について FEM 衝撃解析による照査法と許容応力度を用いた静的安定解析による照査法について検討し、照査法を提示した。

③レベルⅡ外力に対応する砂防堰堤の要求性能と限界状態

レベルⅡ外力に対応する砂防堰堤の要求性能と限界状態を表-1のように提示した。レベルⅠおよびレベルⅡに対応する砂防堰堤の設計作業として表-2のように、レベルⅡにおいては従来の仕様規定型設計法に加えて性能規定型設計法を加えることを提案した。また、砂防堰堤の外的安定性と内的安全性の両方についての性能照査法を提示した。

表-1 レベルⅠおよびレベルⅡに対応する砂防堰堤の要求性能と限界状態

土石流規模	要求性能Ⅰ（弾性限界、使用限界）	要求性能Ⅱ（塑性限界、終局限界）
レベルⅠ	機能を保持している。 安全性は損なわれない。 損傷を受けない。	
レベルⅡ		損傷（亀裂、破損など）を受け、安全性は一部失っていても、基本的な機能は保持している（堰堤の高さが保持されている）。

注）基本的な機能（性能）：土砂（流木も含む）捕捉機能、土砂堆積機能、土砂発生抑制機能

表-2 レベルⅠおよびレベルⅡに対応する砂防堰堤の設計作業

重要度	設計作業	安全性要求性能（限界状態）	照査法
レベルⅠ	仕様規定型（慣用設計）	弾性限界（使用限界）	許容応力度法
レベルⅡ	仕様規定型（慣用設計）	塑性限界（終局限界）	許容応力度法
	性能規定型（限界状態設計法）		弾塑性解析、エネルギー設計法、実物大実験

④砂防堰堤のロバストネス、リダンダンシーについて検討し、その評価方法を提示した。

⑤目標信頼性指標を用いたコストとリスクの検討

目標信頼性指標を用いたコストとリスクの評価手法<sup>1)</sup>を検討した。図-10において、作用荷重（S）として巨礫の礫径分布に基づく衝撃力の確率分布、抵抗力（R）として打継目の強度の確率分布を用いて標準正規確率変数場において目標信頼性指標（β）を算定する。一方、破壊に伴う波及損失費用と初期建設費用の比を求め、最適な信頼性指標β<sub>T</sub>求めてβ > β<sub>T</sub>とすることにより供用期間中の総費用を最小化することができる。

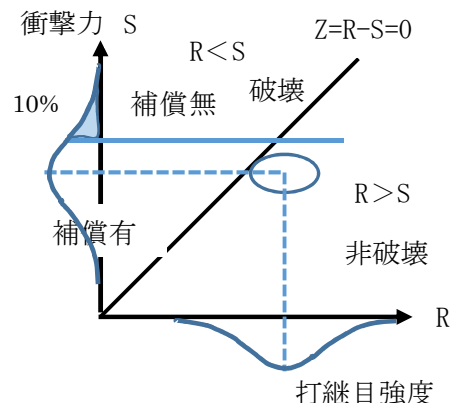


図-10 作用力(S)と抵抗力(R)の確率分布、限界状態およびリスク

(5)砂防施設の補強法の開発

砂防堰堤の被災実態調査および弾塑性解析等の結果を基に、既設の砂防堰堤の補強方法を提案した。鋼製透過型堰堤の補強法としては、(i)鋼製部とコンクリート部を連結する、(ii)継手部および接合部をラバーまたは鋼板巻きで補強する、(iii)鋼製堰堤の上流側に補助の構造物（減勢工）を設置する方法など、コンクリート重力式砂防堰堤の補強法としては(iv)鉄筋、ロックボルト挿入により補強する、(v)コンクリートで増厚する、(vi)アンカーで引っ張る、(vii)堰堤上流側に緩衝材（ソイルセメント等）を設置する方法（図-9）などを提案した。さらに信頼性指標および部分安全係数法を用いたコンクリート重力式砂防堰堤の補強法の安定性の照査法を提示した。

(6)大規模外力に対してレジリエントな砂防施設の合理的で実用的な設計・補強法ガイドライン（案）の作成

本研究の成果を有効に行政および現場の技術者に利活用していただくために、「大規模外力に対してレジリエントな砂防施設の合理的で実用的な設計・補強法ガイドライン（案）」を作成した。

参考文献；1)片出亮(2011)、リダンダンシーとリスク分担の確率的評価に基づく砂防堰堤の設計法に関する研究、防衛大学校博士学位論文

## ⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。)

(論文、学会発表など)

- 2017年8月に福岡市で開催した土木学会第72回年次学術講演会での発表
  - ① 「鋼製砂防堰堤が受ける土石流の衝撃力評価に関する検討」  
発表者：堀口俊行、香月智
- 2018年3月に山梨大学で開催した第45回土木学会関東支部技術研究発表会での発表
  - ② 「個別要素法による鋼製砂防堰堤が受ける土石流の衝突荷重解析」  
発表者：堀口俊行、小松喜治、香月智、石川信隆
  - ③ 「鋼製透過型砂防堰堤の肩部補強に関する実験的検討」  
発表者：小林耀、小松喜治、香月智
  - ④ 「個別要素法を用いた鋼製透過型砂防堰堤の破壊再現シミュレーション」  
発表者：小泉香那子、堀口俊行、香月智
- 2018年4月に東京工業大学で開催した第64回構造工学シンポジウムでの発表
  - ⑤ 「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」  
発表者：小松喜治、堀口俊行、香月智、石川信隆、水山高久
- 2018年5月に米子市で開催した平成30年度砂防学会研究発表会での発表
  - ⑥ 「大規模土石流(レベルII荷重)の検討の必要性和設定方法に関する一考察」  
発表者：石川信隆、嶋丈示、堀口俊行、石川芳治
  - ⑦ 「土石流による上載荷重変化に関する実験的研究」  
発表者：嶋丈示
  - ⑧ 「砂防施設破壊時における降雨と外力に関する調査」  
発表者：赤澤史顕、藤村直樹、劉詩雨、武澤永純、石井靖雄、秋山怜子
  - ⑨ 「鋼製透過型砂防堰堤の肩部補強の影響に関する実験的検討」  
発表者：小松喜治、堀口俊行、香月智、國領ひろし
  - ⑩ 「個別要素法を用いた鋼製砂防堰堤が受ける土石流の荷重評価法」  
発表者：堀口俊行、小松喜治、香月智、石川信隆、水山高久
- 2018年8月に札幌市で開催した土木学会第73回年次学術講演会での発表
  - ⑪ 「鋼製透過型砂防堰堤の肩部補強の影響に関する基礎検討」  
発表者：小松喜治、香月智、堀口俊行
  - ⑫ 「個別要素法による実災害における透過型砂防堰堤の再現シミュレーション」  
発表者：嶋川理、堀口俊行、香月智
  - ⑬ 「回転円筒装置による水・砂・流木の分離形態の検討」  
発表者：松村健太郎、堀口俊行、香月智
- 2018年10月に富山で開催した Interpretvent 2018 での発表
  - ⑭ 「Load Evaluation of Debris Flow against Steel Open Sabo Dam using DEM」  
発表者：堀口俊行、小松喜治、香月智、石川信隆
  - ⑮ 「Safety Verification of Sabo Dams against Large Scale Debris Flow」  
発表者：石川信隆、嶋丈示、松澤遼、水山高久
- 2019年3月に前橋工科大学で開催した第45回土木学会関東支部技術研究発表会での発表
  - ⑯ 「鋼製透過型砂防堰堤の補強法に関する解析的検討」  
発表者：小松喜治、堀口俊行、香月智
  - ⑰ 「個別要素法を用いた鋼製透過型砂防堰堤に作用する荷重評価法」  
発表者：嶋川理、小松喜治、堀口俊行、別府万寿博
  - ⑱ 「直線水路実験における分級現象の円筒実験との比較」  
発表者：松村健太郎、斉藤和樹、香月智
  - ⑲ 「回転円筒実験による分級現象への底面粗度の影響」  
発表者：斉藤和樹、松村健太郎、香月智、堀口俊行
  - ⑳ 「火砕流を受ける鋼製砂防堰堤の構造耐力変化に関する考察」  
発表者：宮原邑太、香月智、堀口俊行、嶋丈二

- 2019年4月に関東学院大学で開催した第64回構造工学シンポジウムでの発表
  - ⑲ 「前置減勢工による土石流衝撃荷重低減効果に関する実験」  
発表者：小松喜治、堀口俊行、香月智、石川信隆
  - ⑳ 「回転円筒実験における土石流中の流木偏析現象に対する個別要素法解析」  
発表者：立石龍平、堀口俊行、園田佳巨、嶋川理
  - ㉑ 「回転円筒実験における水と礫の分級現象に及ぼす底面粗度の影響」  
発表者：松村健太郎、斉藤和樹、堀口俊行、香月智
- 2019年5月に盛岡市で開催した平成31年度砂防学会研究発表会での発表
  - ⑳ 「空中写真を活用した礫径調査手法の検討」  
発表者：武澤永純、水野秀明
  - ㉒ 「既往の土石流のデータを用いた土石流の土砂量の確率的な評価の試み」  
発表者：石川芳治、松村和樹
  - ㉓ 「南木曾における大規模土石流時の氾濫解析」  
発表者：山本歩、SHAO Nanwai、中谷加奈、里深好文
  - ㉔ 「弾塑性解析を用いた鋼製透過型砂防堰堤の挙動に関する一考察」  
発表者：石川信隆、香月智、浅田泰男
  - ㉕ 「既設鋼製砂防堰堤の上流側に配置する減勢工に関する実験的考察」  
発表者：小松喜治、堀口俊行、香月智、石川信隆
  - ㉖ 「個別要素法による鋼製透過型砂防堰堤に作用する荷重評価法」  
発表者：嶋川理、小松喜治、堀口俊行、別府万寿博
  - ㉗ 「直線水路実験と円筒実験における分級現象の比較」  
発表者：松村健太郎、堀口俊行、香月智
- 2019年12月に中国広州で開催予定の第13回衝撃国際会議での発表予定
  - ㉘ 「Safety Assessment Method of Steel Open Dam by Two-Step Analyses against Impulsive Debris Flow」  
発表者：Nobutaka Ishikawa、Toshiyuki Horiguch、Ryo Matsuzawa、Masuhiro Beppu and Yoshiharu Ishikawa

### ⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

特になし。

## ⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)  
特になし。

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

既往砂防施設の被災実態調査から砂防堰堤(鋼製透過型砂防堰堤、コンクリート不透過型砂防堰堤)の被災には土石流の流体力とともに礫の衝突による衝撃力が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。今後は、巨礫の衝突による衝撃力を考慮した実用的で精度の高い砂防堰堤の設計法についてさらに研究を進める必要がある。巨礫の最大礫径を設定する手法として、空中写真を用いた調査法とそのデータを確率的に評価する手法を示した。今後はさらに簡便で施設の設計に適した礫径の調査法、評価手法を開発する必要がある。過去に発生した土石流の流域面積と土砂量を解析することにより、大規模外力であるレベルⅡの土石流の規模(土砂量等)を設定する手法を提示することができた。一方で、年超過確率降雨量と土砂量との相関は認められなかったが、この原因について検討を進める必要がある。既往砂防堰堤の被災実態調査から砂防堰堤の被災プロセスとメカニズムを明らかにすることができた。その結果、被災の主な原因は、設計値を上回る大規模な外力が作用したことであるが、鋼製堰堤については継手部および接合部が、コンクリート堰堤については水平打継目が弱点となっていたことも原因であると考えられた。今後はこれらの知見を基に継手部、接合部、水平打継目の強度を向上させる手法についてさらに検討する必要がある。また、レベルⅡの外力による流体力や衝撃力に対してリダンダンシーとロバストネスの高い、効果的で合理的な新工法の開発が必要である。さらに、既設の堰堤については水平打継目の強度についての適切な点検・調査法を開発する必要がある。目標信頼性指標を用いた合理的な砂防堰堤の設計法・補強法を提示できた。今後はこのような手法をさらに発展させて、ソフト対策も含めた砂防施設の計画法、設計法、補強法、維持管理法を開発する必要がある。

## ⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

既往砂防施設の被災実態調査から砂防堰堤の被災には土石流の流体力とともに礫の衝突による衝撃力が大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。今後は、流体力のみならず巨礫の衝突による衝撃力も設計において考慮することにより、被災を減少させることが可能となる。巨礫の最大礫径を設定する手法として、空中写真を用いた調査法とそのデータを確率的に評価する手法を示した。今後はこのような手法も用いることにより、簡便で合理的な最大礫径の設定が可能となる。また、現在は、鋼管の純間隔の設定にも同じ最大礫径を用いているが、今後は、衝撃力の算定と純間隔の設定には目的に合った、異なる礫径を用いるのが良いと考える。大規模外力であるレベルⅡの土石流の規模(土砂量等)を設定する手法を提示することができた。これにより合理的なレベルⅡに対応する土石流の対策を検討することができる。既往の砂防堰堤の被災の主な原因は、設計値を上回る大規模な外力が作用したことであるが、鋼製堰堤については継手部および接合部が、コンクリート堰堤については水平打継目が弱点となっていたことも原因であると考えられた。今後は継手部、接合部、水平打継目の強度を向上させることにより経費を抑えて堰堤の被災を減少させることができる。また、レベルⅡの外力に対してリダンダンシーとロバストネスの高い、効果的で合理的な新工法の開発が可能となる。目標信頼性指標を用いた合理的な砂防堰堤の設計法・補強法を提示できた。今後はこの手法を用いることにより、経費を抑えて効果を最大にする砂防施設の設計、補強が可能となる。本研究の成果は、一般の砂防技術者、砂防行政担当者が容易に利用できるように、ガイドライン(案)の形でまとめた。このことにより、大規模外力による土砂災害に対する砂防技術者、砂防行政担当者の理解が深まることが期待できる。以上より、大規模な土石流等に対するハード対策が進み、保全対象の被害が軽減され、施設の点検・維持管理も容易になると考えられる。さらに、住民の砂防施設(砂防堰堤)に対する信頼感も増し、地域の民生安定にも効果があがると期待できる。本研究の最終成果であるガイドライン(案)には慣用設計(許容応力度法)、と共に、将来の砂防施設の設計の主流になると考えられる性能設計の考え方も取り入れた。新たに性能設計の考え方を取り入れることにより、将来、新しい発想による砂防施設(砂防堰堤)の開発が促進され、より効率的かつ効果的にハード対策を進めることができるようになることが期待できる。