

# 鋼製透過型砂防堰堤

水山 高久 監修

田畑 茂清 嶋 丈示 著

# 序

1960年代中頃から、鋼材を主要材料にした「鋼製砂防施設」が開発されはじめました。当時はコンクリートを中心にした重力式不透過型砂防堰堤が主流で、設計方法もマッシブな重力作用による抵抗に期待するのが一般的であり、鋼製砂防施設も形鋼を使った枠堰堤が中心でいわば重力式コンクリートの代用といえるものでした。

その後、鋼管を組み立てて、フレーム構造としたオープンタイプ堰堤が考案され、1985年(昭和60年)に「財団法人砂防・地すべり技術センター」が「鋼製砂防構造物設計便覧」を世に出し、その後幾度かの改訂を加え、1990年(平成元年)建設省(現国土交通省)「土石流対策指針(案)」により、鋼製砂防堰堤の設計手法が確立されました。

それにより、鋼材の靱性を有効に活用した構造により、平常時には土砂を通過させ、土石流流下時には水と土砂・流木を分離させることができる鋼製透過型砂防堰堤が認められ広く普及し、大きな効果が求められてきました。

しかしながら、この鋼製透過型砂防堰堤は、鋼材の形状・寸法の精度がよく、施工においては部材を分割・運搬することが容易である反面、鋼材の摩耗・腐食や鋼材部分や接合箇所への流木・巨礫の直撃等も充分検討していかなければならない課題も残されているでしょう。

本書では「土石流を捕捉する機能」と「土石流に耐えられる構造」の両面から具体的な要求性能を明らかにして、土石流対策の基本構造物としての「鋼製透過型砂防堰堤」の確立を望んでいます。

本書を発刊するにあたり、関係各位のご尽力に深く感謝いたします。

砂防鋼構造物研究会会長 浅田泰男

# 目次

<b>第1章 現行の設計方法とその問題点</b> .....	1
1.1 鋼製透過型砂防堰堤とは .....	1
(1) 鋼製透過型砂防堰堤の特徴 .....	1
(2) 鋼製透過型砂防堰堤の要求性能 .....	2
1.2 鋼製透過型砂防堰堤の現行設計法 .....	5
1.3 土石流捕捉および構造物の安全性の課題 .....	7
(1) 土石流捕捉に関する設計上の問題点 .....	7
(2) 構造物の安全性に関する設計上の問題点 .....	8
<b>第2章 土石流を捕捉する</b> .....	11
2.1 鋼製透過型砂防堰堤の捕捉事例 .....	11
(1) 土石流の捕捉パターン .....	12
(2) 礫捕捉機能による区分 .....	13
2.2 土石流捕捉の実態と閉塞率 .....	15
(1) 最大礫径と最多礫径 .....	16
(2) 一次閉塞と二次閉塞 .....	20
(3) 礫径分布と閉塞率 .....	28
2.3 礫捕捉性能に関する実験的評価法 .....	35
(1) 礫捕捉性能に及ばず要因分析実験 .....	37
(2) 土石流堆積区間における礫捕捉性能実験 .....	51
<b>第3章 土石流に耐える</b> .....	67
3.1 鋼製透過型砂防堰堤の損傷事例 .....	69
(1) 巨礫の衝突で生じた鋼管部材の擦痕 .....	69
(2) 複数の礫衝突による鋼管部材の割れ .....	72
(3) 土石流捕捉後（満砂状態）の天端からの落下礫による損傷 .....	73
(4) 継手部の摩耗 .....	75
3.2 レベルⅡ荷重に対する安全性評価手法の提案 .....	76
(1) 外的安定性と内的安全性 .....	77
(2) 限界状態に対する基本的な考え方 .....	79
3.3 レベルⅡ荷重に対する耐荷性能評価 .....	86
(1) 安定計算による耐荷性能の検討 .....	87

(2) 土石流流体力に対する耐荷性能の検討 .....	9 0
(3) 礫衝突に対する耐荷性能の検討 .....	9 4
(4) 底版コンクリートへの影響を考慮した安定性評価 .....	1 0 3
3.4 破壊事例による安全性への提言 .....	1 1 2
(1) 鋼製透過型砂防堰堤の破壊原因と安全性に関する考察 .....	1 1 2
(2) 動的弾塑性解析による破壊原因の究明と安全性への提言 .....	1 2 2
<b>第 4 章 課題と展望</b> .....	<b>1 2 7</b>
4.1 流木捕捉を取り込んだ設計手法 .....	1 2 8
(1) 流木捕捉による閉塞状況 .....	1 2 8
(2) 流木捕捉による閉塞率の変化 .....	1 2 9
4.2 大規模外力に対応した新たな設計手法 .....	1 3 2
(1) リダンダンシー・ロバストネスの定義 .....	1 3 2
(2) リダンダンシーの定量的評価法 .....	1 3 3
(3) ロバストネスの定量的評価法 .....	1 3 5

# 第1章 現行の設計方法とその問題点

## 1.1 鋼製透過型砂防堰堤とは

### (1) 鋼製透過型砂防堰堤の特徴

従来からある重力式のコンクリート砂防堰堤は、重さにより安定性を確保するという単純な設計手法が採用されています。機能的には不透過型であるため、上流から運搬される土砂の全量を貯留するという、この単純でわかりやすい機能により普及してきました。ただし、土石流のような発生確率の小さい事象が生じるまでに、堰堤の上流ポケットは満砂状態になりやすくもあります。これまでは満砂した後も堰堤の上流堆砂勾配の変化によって土砂を貯留できるものと認識されてきましたが、堆砂勾配は土石流の諸元（ハイドログラフ(流量—時間曲線)、ハイトグラフ(降雨量—時間曲線))により左右されるため、不透過型砂防堰堤の土砂捕捉機能は不確定要素が大きいことも事実です。

このため、土石流を効果的かつ効率的に捕捉するには透過型の砂防堰堤が望ましいわけですが、コンクリート堰堤では開口部を広く取る必要がある透過型には向いていません。そこで、鋼管によりフレームを組み上げた鋼製透過型砂防堰堤が開発されました。この構造物は鋼材の靱性を有効に活用することで開口部を広くとることができます。この開口部に配置された鋼管部材の間隔を工夫することで、平常時や中小出水時には土砂を通過させ、土石流時には水と土砂を分離することで効率良く土砂を捕捉する機能を持たせることができました<sup>1),2),3),4)</sup>。

そして、鋼材は強度が大きく靱性に富んでいることから、土石流の衝撃力にも十分耐えることができます。鋼管部材が巨礫の衝撃力に耐える方法には2つあります。鋼管にコンクリートを充填して強度を高める方法と、鋼管のままでへこみ変形によりエネルギー吸収する方法です。写真-1.1は、コンクリート充填鋼管はりに鉄球を衝突させたものを半割りにして中の状態を観察したものです。中空鋼管の場合は、礫衝突部の鋼管断面がへこんで衝突エネルギーを吸収しますが、鋼管にコンクリートを充填した場合は鋼管断面が拘束されるため引張側の鋼管が破断し、コンクリー

トは扇状に粉碎されます。現在は礫衝突エネルギーに対して、鋼管の特性を活かして中空鋼管のへこみ変形による吸収エネルギーを設計の基本としています。



写真-1.1 コンクリート充填鋼管はりの破断

## (2) 鋼製透過型砂防堰堤の要求性能

土石流の発生は大別して、以下のように分類されます<sup>5)</sup>。

- 1) 外部からの水の供給によって溪床堆積物が浸食され、流水と流砂が高濃度に混合されるようになって土石流となる。
- 2) 崩壊土塊がそれ自身含んでいた水の影響によって、あるいは外部から供給される水と混合して土石流に移行する。
- 3) 豪雨に伴って発生する山腹の崩壊土砂は、河川を堰き止め天然ダムを形成する。その天然ダムが急峻な溪流にできた場合、その決壊によって土石流となる。

土石流区間とは、土石流が発生し、巨礫・流木などが土石流と一体となって流下する、もしくは堆積する可能性のある区間です。土石流区間に設置される砂防施設は、その目的によって、土石流・流木発生防止のための施設、流下する土石流・流

## 第2章 土石流を捕捉する

### 2.1 鋼製透過型砂防堰堤の捕捉事例

自然災害を相手にする砂防事業において、計画時の現象を上回る規模の土石流が発生することは珍しくありませんが、それを理由に施設が機能しなかったではすまされません。特に鋼製透過型砂防堰堤は、実際に土石流を経験して要求性能を満たしているか、その都度検証され改良されていく構造物だと思います。そういう意味でも基準に適合した施設であることをもって要求性能が担保されているわけではありません。

写真-2.1<sup>1)</sup>は、2013年の台風26号の影響により東京都大島町で発生した土石流を捕捉したものです。10月15日から16日にかけての連続雨量が824mm（24時間雨量）、最大時間雨量118.5mm/hrの豪雨であり、伊豆大島北西部では長沢上流域から八重沢上流域、および大金沢上流部で集中して斜面崩壊が発生し、大規模な土石流（流木を含む泥流）によって下流域に甚大な被害をもたらしました。この土石流は浅い基盤上の土砂が滑った盤上崩壊（表層崩壊）であり、谷地形が未発達で尾根を乗り越えて土石流が流下しました。

本川には砂防堰堤などの砂防施設が設置されており、最下流には堆積工が設けられていました。発生前後の写真を比べると堆積工に相当量の土砂が堆積していることがわかります。ここに流下する巨礫を捕捉する目的で鋼製透過型砂防堰堤が堆積工の上流側に設置されていました。通常、鋼製透過型砂防堰堤は流木を全量捕捉しますが、この写真に見られるように水通し部を越流して流木が堆積工内に進入しています。この理由は、土石流が鋼製透過型砂防堰堤を乗り越えたためであり、計画規模を相当超える土石流であったことがわかります。この施設は巨礫の捕捉を目的に設置されていたものですが、今回上流からの流木を捕捉したことで微細な土砂も捕捉され、結果的に下流域への災害を防止・軽減したことが確認されました。



(a)土石流発生前



(b)土石流発生後

写真-2.1 土石流・流木捕捉状況

### (1) 土石流の捕捉パターン

鋼製透過型砂防堰堤の土石流捕捉パターンを捕捉形態から分類すると、①流木＋石礫、②流木＋土砂、③流木のみ、④石礫のみの4パターンに大別されます<sup>2)</sup>。



①流木＋石礫



②流木＋土砂



③流木のみ



④石礫のみ

写真-2.2 土石流の捕捉パターン (捕捉形態による分類)

### 第3章 土石流に耐える

近年、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ます。このような状況の中、砂防堰堤が整備推進されていますが<sup>1),2)</sup>、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す。これまでの鋼製透過型砂防堰堤の損傷事例をみると、局所的な摩耗から補修が必要な変形はありましたが、堰堤の機能が喪失するほど損傷したものはありませんでした。しかし、2014年7月台風8号がもたらした集中豪雨によって長野県南木曾町で発生した大規模な土石流は、梨子沢第一砂防堰堤を直撃し、土石流を捕捉しましたが鋼製透過型砂防堰堤の上部1/3が下流に流出しました<sup>3),4)</sup>。この事例では複数の継手部のボルトが破断し、鋼管も大きくへこんで2枚の板状になるまで変形した珍しい事例です<sup>5)</sup>。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ではどのように対処すべきかについて明確な規定がありません。また、鋼製透過型砂防堰堤は一般にコンクリート重力式堰堤（以後、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ますが、大規模な土石流流体力および巨礫の衝突に対して構造内部の安全性について詳細に検討された例はこれまでありませんでした。



写真-3.1 土石流により上部1/3が流出した堰堤

鋼製透過型砂防堰堤の現行設計法<sup>6)</sup>は、堰堤の剛体安定性に加えて、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ます。しかし、現行設計法の第1の問題点は、計画規模の設計荷重（ここでは、レベルⅠ荷重という）で設計された鋼製透過型砂防堰堤が想定外の外力に対してどれだけ安全性が保持されているかについて、その安全性照査法が確立されていない点です。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）に対して鋼製透過型砂防堰堤の安全性照査法を提示する必要がある点です。また、砂防構造物においてレベルⅡ荷重は設定されていません。第2の問題点は、第1の問題点を解決するための静的または動的弾塑性解析法の開発が必要なことです。鋼製透過型砂防堰堤は、一般に骨組鋼管部材で構成されていますが、鋼管部材の材料特性である靱性が十分に活かされていない点にあります。すなわち、鋼製透過型砂防堰堤は弾性域を超えた塑性域まで予備の負荷能力（リダンタンシー）を十分に持っていますが、そのリダンタンシー（冗長性）の評価法が未だ実用化されていません。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が、片出ら<sup>7)</sup>の研究を除いて未だ十分に検討されていません。これらの問題点を解決するためには、鋼製透過型砂防堰堤の静的および動的弾塑性解析法の開発が必要です。

よって、本章では、まず第1の問題点については、次項で性能設計の観点から安全性照査法について提案しました。次に第2の問題点を解決するため、極めて大きい土石流荷重<sup>9)</sup>に対する鋼製透過型砂防堰堤の動的弾塑性 FEM 解析法<sup>8),9),10),11)</sup>による構造物の動的応答について検討しました。

## 第4章 課題と展望

鋼製透過型砂防堰堤は、土石流から人命・財産を守る使命を目的として、建設技術審査証明制度で認定された構造物を採用しています。しかし、認定にあたって一般的な捕捉性能および安全性能について検討することになっていますが、認定を受けた時点では、計算上もしくは模型実験等により施設の必要最小限の要求性能が確保されていることを確認したにすぎません。つまり、審査証明で認定された段階では土石流を受けているわけではなく、これまで想定していないような災害を経験する可能性もあります。すなわち、鋼材の材料特性から砂防堰堤として未解明な部分もあり、実際の土石流を経験するまで要求性能を満たしていることを証明することはできません。そういう意味では基準に適合した施設であることをもって要求性能が担保されるわけでもありません<sup>1)</sup>。このため、現地に建設された構造物は継続的に調査を行い、礫捕捉性能及び施設の安全性を検証していくことが有用と考えます。以下に、鋼製透過型砂防堰堤の課題と今後の展望について述べます。

## 4.1 流木捕捉を取り込んだ設計手法

鋼製透過型砂防堰堤の採用に二の足を踏む原因は「土砂が抜けるのではないか」という疑念が払拭できないからです。部材間隔は礫径調査の $D_{95}$ の1~2倍であり、「部材間隔>礫径なので土石流が部材をすり抜けるのではないか」というイメージにつながっています。しかし、土石流の捕捉事例の大半をみると開口部は流木で目詰りしていることがわかります。つまり、土石流に先行して流木が捕捉されることによって、開口部は設計で想定している礫径よりかなり小さい礫で目詰まりしています。このため、礫径調査から設定した最大礫径の大きさに関わらず、いっきに一次閉塞から二次閉塞に進むため細粒土砂まで捕捉されることとなります<sup>2)</sup>。この現象を設計に取り込むことができれば、透過型堰堤に対する不安感を払拭できるでしょう。

### (1) 流木捕捉による閉塞状況

鋼製透過型砂防堰堤の部材間隔は、巨礫を対象に設定しています。しかし、これまでの土石流捕捉事例をみると礫のみで開口部が閉塞されている事例は少なく、大半の捕捉事例は流木により開口部が閉塞されています。このため、設計時に想定している巨礫が堰堤に到達しなくても開口部が閉塞され土砂の捕捉機能が発揮されています<sup>2)</sup>。

写真-4.1は、流木混じりの土石流を捕捉している事例ですが、流木や灌木が堰堤に到達すると最上流部材で捕捉され、この流木や灌木が新たな捕捉に寄与する材料となっていることがわかります。この開口部の変化は礫による一次閉塞から二次閉塞の変化より劇的であり、礫のみでは捕捉し得ない小径の礫も捕捉されます。最上流は完全に目詰まりし後続流中の礫も捕捉され、堰堤枠内に落下したであろう礫は小径のみであり流水によって流され枠内に留まることはありません(図-4.1)。流木が無いと開口部を埋める礫がタイミングよく到達しないと通過してしまいます。しかし、流木が多量に存在する場合には、流木の幹だけでなく根や枝葉なども含まれ、これらも捕捉に寄与する材料として機能するため小礫も捕捉されます。流域面積が0.1~0.5km<sup>2</sup>のような土石流危険溪流における流木混じりの捕捉事例は、このような流木捕捉を伴って土石流を捕捉しています<sup>3)</sup>。

## 謝辞

本書は著者の一人、嶋丈示の学位論文をもとに個別の削除や加筆をして作成したものであることをお断りしておく。

嶋の学位論文をまとめるにあたり、ご指導賜りました九州大学大学院工学研究科園田佳巨教授に心より感謝申し上げますとともに、ご助言、ご指導をいただきました防衛大学校石川信隆名誉教授・香月智教授を始め防衛大学校の皆様、砂防鋼構造物研究会の皆様、S T C 鋼製透過型砂防堰堤ワーキングの皆様など、多くの方々の協力をいただきました。あわせて深く感謝申し上げます。

## 監修・著者の主な略歴

水山 高久 京都大学大学院修了 農学博士  
建設省土木研究所 砂防研究室長  
京都大学大学院・政策研究大学院大学 教授  
(財)砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造物委員会委員長

田畑 茂清 京都大学大学院修了 農学博士  
建設省 砂防部長  
(財)砂防フロンティア整備推進機構 理事長  
砂防鋼構造物研究会 顧問

嶋 丈示 九州大学大学院 博士(工)  
技術士(総合技術管理部門、鋼構造、砂防)  
(一財)砂防・地すべり技術センター  
砂防鋼構造物研究会 アドバイザー

書名 **鋼製透過型砂防堰堤**  
発行日 2019年9月18日 初版第1刷発行  
著者 **田畑茂清・嶋丈示**  
監修 **水山高久**  
発行者 **砂防鋼構造物研究会**  
東京千代田区平川町2-7-4 砂防会館別館3F  
印刷所 日本アスペクトコア株式会社