

鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題

History and futures assignment of technology for open type steel SABO dams

田畑茂清^{*1}守山浩史^{*2}

Shigekiyo TABATA

Hiroshi MORIYAMA

1. はじめに

土石流に対する本格的な研究は、1970年代の初めに、上高地・上々堀沢における観測からスタートした。そして、1986年には、それらの研究成果が反映された初版の土石流対策指針¹⁾が発行された。指針は、土石流対策構造物の計画・設計に活用され、土砂災害の防止に大きく貢献した。その後、土石流対策指針は三度の改訂を通じて新たな知見が加えられ、2007年には現行の指針²⁾(以下「最新版の指針」と呼ぶ)が発行されている。

一方、鋼製透過型えん堤の開発も、土石流の観測とほぼ時を同じくして開始されている。上々堀沢の観測では、土石流の先端部には巨礫が集中することが解明された。そして、観測結果を基に水理実験が行われ、開口部を最大礫径(D95)の1.5~2.0倍程度に設定することで、土石流先端部の巨礫を絡め取り、土石流全体を捕捉できることが判明した³⁾。そこで、大きな開口部を持ち、常時および中小出水時の土砂は下流に流し、土石流中の巨礫や土砂を捕捉するえん堤が提案された。この大きな開口部を実現するために、強度特性に優れた鉄がその素材として採用され、鋼製透過型えん堤が誕生したのである。

それ以来、30有余年にわたり鋼製透過型えん堤は、各地で施工され、土石流捕捉の実績も多数報告されるようになった。それらの実フィールドからのデータや、実験や研究で得られた新たな知見は、随時新たな土石流対策指針に反映されてきた。それに伴い鋼製透過型えん堤の工法も日々改良が重ねられ、今日に至っている。

本説は、土石流対策指針の改定を背景にして、鋼製透過型えん堤工法・設計法の変遷と課題について、述べるものである。

2. 鋼製透過型えん堤の特長

最新版の指針における最も重要な変更点は、従来の土石流対策指針と流木対策指針が一つに統合されたことである。その結果、土石流・流木対策施設の基本が、透過型えん堤であると位置づけられた。

改定された指針には、土石流・流木対策施設に求められる重要な機能として、“溪流環境の保全”、“流木の捕捉”、“ポケットの維持”の3点が挙げられている。鋼製

透過型えん堤は、これら全ての機能を有していることから、土石流・流木対策の基本となりえたのである。実際にそれらの機能を発揮した事例について、以下に紹介する。

2.1 溪流環境の保全

写真-1は、鋼製透過型えん堤の設置事例を示す。透過型えん堤の底版は、原則として現況河床に合わせて設置される。そのため、水棲生物の往来が自由で、生態系への影響も最小限に抑えられる。また、数年間土石流が発生しなかったえん堤の上流には自然に瀬と淵が形成されて、魚が生息している例も報告されている⁴⁾。さらに鋼製透過型えん堤は、CO₂の削減にも大きな効果を発揮する。国土交通省によれば、鋼製透過型えん堤のCO₂排出量はコンクリートのえん堤に比べ1/3程度となることが試算されている。

2.2 流木の捕捉

写真-2は、鋼製透過型えん堤により多量の流木が捕捉された事例である。本えん堤の上流には数基の不透過型えん堤が設置されており、礫・土砂は捕捉されたが、流木はほとんど捕捉されず下流の鋼製透過型えん堤により捕捉されていた。

2.3 ポケットの維持

写真-3は、竣工後数年が経過した鋼製透過型えん堤を下流側から撮影したものであるが、ポケットが維持されていることが確認できる。常時における土砂を通過させ、長期間ポケットの維持が可能のため、定期的な除石は不要である。その結果、鋼製透過型えん堤1基あたりの計画捕捉量は通常の不透過型えん堤の2~3倍程度見



堤内に棲息する魚

写真-1 溪流環境の保全

Photo 1 Conservation of mountain stream environment

*1 正会員 (財)砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation (syochi@sff.or.jp)

*2 正会員 (株)神戸製鋼所鉄構・砂防部 Member, Steel Structures & Sabo Dept., Kobe Steel Ltd.



写真-2 流木の捕捉
Photo 2 Trapping of drift wood



写真-3 ポケットの維持
Photo 3 Maintenance of entrapment function

込めるため、非常に高いコストパフォーマンスが実現できる。

3. 工法・設計方法の変遷

土石流の研究が進み、その特性が明らかになるにつれ、土石流流体力の算定方法や、透過型えん堤の設計方法が確立されていった。それに伴い、土石流対策指針においても、新たな設計方法が提案されてきた。例えば、土石流ピーク流量の算定方法が降雨量に基づく方法から流出土砂量に基づく方法へ変更されたり、また土石流の流体力を算出する際に用いる土石流の幅が、平均溪床幅の3倍から、平均溪床幅へ、そして土石流の流れの幅へと改定されている。ここでは、鋼製透過型えん堤の土石流捕捉機能の要となる、鋼管間隔の設定方法の変遷と、今回新たに導入されたりダンダンシー(冗長性)について述べる。

3.1 鋼管間隔の設定方法の変遷

前述したとおり、水理実験による鋼製透過型えん堤の捕捉機能に関する実験により、鋼管の間隔を最大礫径(D95)の1.5~2.0倍に設定すると、礫同士がアーチアク

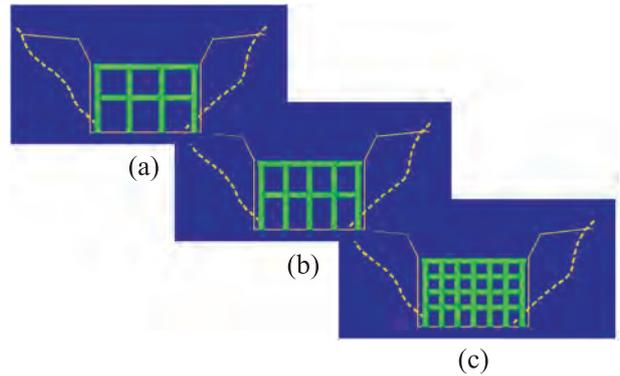


図-1 透過部断面形状の変遷
Fig.1 Transition of opening section

ションを起こして開口部が閉塞されることが確認された。えん堤を通過する土石流ピーク流量についても、鋼管の間隔を最大礫径の2.0倍にすると半減、さらに1.5倍にするとほぼ全量が捕捉されることが、実験より明らかとなった。そこで、1986年に発行された初版の土石流対策指針では、鋼管の間隔を最大礫径(D95)の2.0倍以下とすることが規定された。それを受けて、当時に設計・施工された鋼製透過型えん堤は、図-1(a)に示すように、縦材の鋼管純間隔が最大礫径の2倍に設定されていた。

次いで、2000年に改定された第3版の土石流対策指針において、初めて鋼管の間隔に関する規定が改定された。第3版の指針では、透過型えん堤の計画捕捉量について、不透過型えん堤とは異なり、ポケットを含めた全空間を見込めることが明記された。それに伴い、えん堤を通過する土石流ピーク流量を 0 m^3 とすることが、鋼製透過型えん堤に求められた。そこで、本指針において鋼管の間隔を最大礫径(D95)の1.5倍以下とすることが規定された。本改定以降の鋼製透過型えん堤は、図-1(b)に示すように、縦材の鋼管純間隔が最大礫径の1.5倍で、計画・設計されることになった。

そして、2007年に改定された最新版の土石流対策指針では、鋼管間隔の設計方法に関して、これまでの中で最も大きな変更が行われた。新しい指針ではこれまでと異なり、縦材と横材の組み合わせにより、土石流を捕捉することとされた。そして、図-1(c)に示すように、縦材・横材ともに、鋼管の間隔を最大礫径(D95)の1.0倍程度とすることが規定された。また、最下段の横材の位置は、確実な捕捉機能を満足しつつ、ポケットの維持を実現するために、最大礫径の1.5倍程度とされている。新指針により、今後は最下流えん堤も含めて透過型えん堤が主流となると予測される中、えん堤からの礫の抜けだし等によるトラブルを最小限に抑え、より捕捉の確実性を向上させることを目的としたものである。

縦材と横材を組み合わせた格子形状の透過部断面が、高い土石流捕捉機能を有していることは、水理実験による研究⁵⁾からも確認されていた。研究では、縦材が礫によるアーチの形成に、横材が形成されたアーチの安定、

つまり後続流による抜けだし防止や後続流に含まれる小礫の捕捉に効果があると報告されている。また、鋼管の間隔が最大礫径の1.0倍程度とした格子形状の透過断面を持つ鋼製透過型えん堤は、既に最下流えん堤として多くの施工実績があり、良好な捕捉実績も報告されている⁶⁾(写真-4)。これらの鋼製透過型えん堤における工法の改良や、積み上げられた捕捉実績が、最新版の指針の改訂に考慮・反映されたものと思われる。

鋼製透過型えん堤の捕捉機能をより確実にするために、2007年に最新版の土石流対策指針の改定が行われた。ここで重要なことは、土石流が発生した際に、直ちに現地調査を行いえん堤の機能および下流側の被災状況を確認し、その目的が達成されているか否かを検証することである。一方で、捕捉機能を向上させたことにより、通常時の流木やゴミ詰まり等により、ポケットの維持が不十分となることも考えられる。調査により得られた情報を、収集・分析し、鋼製透過型えん堤の機能を検証し、必要に応じて指針の補強・改定を今後とも実施していくことが重要であろう。

3.2 リダンダンシーの導入

最新版の指針において、砂防構造物に求められる重要な性能としてリダンダンシー（冗長性）が定義された。新しく留意点として加えられたリダンダンシーにつき、以下に述べる。

リダンダンシーは、電気や宇宙・航空の世界においては一般的に用いられてきた考え方である。例えば航空機の場合、一つの部品が故障しても他の部品がその機能を肩代わりし、飛行機能に支障をきたさないようにされているが、これをリダンダンシーの確保された設計と呼ぶ。航空機において、墜落を防ぎ乗客の生命を守ることは最も重要な機能であり、設計において高いリダンダンシーが要求されている。しかし、9.11同時多発テロによるWTCビルの崩落や、アメリカミネソタ州におけるトラス橋の崩落事故以来、建設部門においてもリダンダンシーへの関心が急速に高まってきた。これまでのコストを重視した最適設計を見直し、地震や事故・テロ等の不確定な災害に対する安全性を高めるために、構造物のリダ

ンダンシーに関する研究が活発に行われている。

さて、リダンダンシーの高い砂防えん堤とは、どのような構造を意味するのであろうか。新しい土石流対策指針において、一部の部材が破損しても砂防えん堤全体が崩壊につながらない構造であることが定義されている。また、えん堤全体の崩壊に至らなくとも、捕捉機能がほとんど失われれば、砂防えん堤として本来の目的が達成できなくなる。従って、最上流の部材は機能材であっても構造材と同等の強度を与えることも、広義の意味で、リダンダンシーを確保するために重要である。

ここで、このリダンダンシーを数値的に評価する手法の一つとして、不静定次数を紹介する。本来不静定次数は、骨組構造解析を実施する際に釣り合い条件式では求められない条件の数を意味しており、構造物の部材の数と、地盤へ力を伝達している接点数の合計で表わされる。従ってこの数が大きければ、一部の部材の破損が構造全体の崩壊に繋がり難くなり、リダンダンシーが高い構造と評価できる。実際に、不静定次数は耐震性評価の一つの指標とされており、また英語でも“Degrees of redundancy”と呼ばれている。なお、一部の部材が破損した際に、他の部材へ力を伝えるためには、部材と部材が溶接等によりしっかりと剛結されていることが重要である。従って、部材同士が剛結されていない場合は、剛結されていない接点数だけ不静定次数を減算する必要がある。

以上述べてきたように、鋼製透過型えん堤のように土石流という不確定な荷重に対する構造物を計画・設計する場合は、今回新たな指標として追加されたリダンダンシーについて、その内容および目的に十分に留意し、えん堤の種別や工法を選定することが重要である。

4. 今後の課題

鋼製透過型えん堤の採用が増え、その重要性が非常に高くなる中、今後の課題を以下に述べる。

4.1 品質管理

これまでに述べたように、鋼製透過型えん堤は土石流・流木捕捉工として、優れた特長を有している。さらに、工場製作によるプレファブ化を進め、また工場仮組による精度の確認を行なうことで、現地での架設が容易かつ短期間でできることも、多くの工法が特長の一つとして挙げている。しかし、これら鋼製透過型えん堤の持つ特長は、管理の行き届いた工場で作製され、さらにその品質が保証されていなければ、十分発揮することができない。一方、厳しい財政状況が続く中、砂防事業においても公共事業費の縮減が進んでいる。しかし、この流れが行きすぎたダンピング受注を生み出し、結果として品質問題の発生が増加しているのが現実である。従って、鋼製透過型えん堤の品質をいかに確保していくかが、大きな課題の一つとなっている。

解決方策の一つとして、ISO 9001品質マネジメント



写真-4 最下流えん堤による土石流の捕捉状況
Photo 4 Trapping of debris flow

システムの導入が考えられる。ISO 9001は、各製作工程における品質管理を、漏れなくかつ合理的に実施できるシステムであり、さまざまな分野で活用されている。鋼製透過型えん堤が、計画・設計されたその性能をフルに発揮するためにも、えん堤製作工場へのISO 9001品質マネジメントシステムの導入が有効であろう。

4.2 高いリダンダンシーを有する構造

リダンダンシーについては、まだ十分に理解され計画・設計に適用されているとは言い難い状況にある。従って、鋼製透過型えん堤の計画・設計に際しては、各構造形式の持つ特徴を良く理解することが重要である。鋼製透過型えん堤は、立体構造による形式と平面構造による形式の2つに分類される。一般的に、立体構造はその形状から高いリダンダンシーや、捕捉機能を有した優れた構造形式であり、その特長を以下に述べる。

写真-5は、実フィールドにおいて、立体構造の鋼製透過型えん堤が、高いリダンダンシーを有することを証明した事例である。写真のえん堤は土石流を確実に捕捉したが、流出土砂量がえん堤の捕捉量をはるかに上回ったため、後続の巨礫を伴った土砂が天端から落下した。その結果、複数の部材が破損や損傷を受けたが、えん堤全体は土砂を捕捉した状態で構造・機能を維持し続けた⁷⁾。

このえん堤は、河川軸方向ではラーメン構造とトラス構造を組み合わせたフレーム構造が採用され、かつ複数の柱で地盤に力が伝達されている。また、左右岸方向においては各フレームが横梁で剛結された立体構造が採用されている。そのため、今回のように部材の一部が破損・損傷した際にも他の部材に力が分散され、えん堤全体の崩壊には繋がらなかった。立体構造の鋼製透過型えん堤が高いリダンダンシーを持つことが、実際に確認された一例といえる。

一方、平面構造のえん堤は、3.2章で述べた不静定次数が極端に小さくなり、リダンダンシーの低下が懸念される。すなわち、リダンダンシーとは一部の部材が破損した場合に、冗長部材がその機能を補完することにより確保されるものである。従って、冗長材をほとんど有していない平面構造のえん堤は、例えば板厚を大きくするなど一部材の強度を上げて、リダンダンシーを確保す

ることはできない。したがって、その計画には十分な留意が必要である。

立体構造のえん堤が有するもう一つの効果として、高い捕捉機能が挙げられる。立体構造の場合、最上流のスクリーン面で捕捉しきれなかった土砂を、2列目以降の柱で捕捉することが可能である。立体構造の透過型えん堤が高い土石流捕捉機能を有していることは、前述した水理実験による研究⁹⁾からも確認されている。また、最上流の部材が破損した際にも、下流の部材に土砂捕捉機能を期待することもできる。

以上、立体構造の特徴を述べたが、高いリダンダンシーを有する構造を選択するためには、各構造形式の持つ特徴を良く理解し、鋼製砂防構造物の計画・設計を行う必要がある。

4.3 維持・管理

鋼製透過型えん堤は、通常時の土砂を下流に流すため、長期間ポケットの維持が可能であるが、土石流や流木を捕捉した際には、ポケットの容積回復のために除石が必要となる。今後、鋼製透過型えん堤の採用が増える中、維持・管理の件数も増大すると予測される。しかし、現状ではコンクリートえん堤に対する維持・管理のガイドラインがあるだけである。従って、鋼製透過型えん堤の維持・管理に関するガイドラインを早急に整備する必要がある。

維持・管理においては、鋼製透過型えん堤が土石流・流木の捕捉に十分な機能を発揮できるように点検を実施し、必要に応じて、除石・除木およびえん堤の補修を実施することが第一の目的である。さらに、施設の耐用年数を延長するために腐食・摩耗の対策を合わせて実施することが重要である。そのためには、通常時の点検方法、損傷が発見された際の健全性の照査方法、そして補修が必要となった場合の対策工法の3つを整理し、ライフサイクルコストを意識しつつ、維持・管理を実施して行くことが肝要である。

4.4 開口部の幅

最新版の指針において鋼製透過型えん堤の開口部の幅は、透過型えん堤の機能を十分に生かせるようにできるだけ広くとることが明記された。また、せき上げを発生させないためにも、少なくとも開口部の幅は土石流の幅以上に設定する必要がある。その土石流幅について今回の指針では、流れの幅を考慮して、以前より広く定義されている。しかしながら、実際の設計において未だこの考え方は浸透しておらず、長大な非越流部を持つ鋼製透過型えん堤の計画が散見される。透過部を広く取ることは、土石流や流木の捕捉機能を高めるだけでなく、溪流環境の保護やCO₂排出量の削減にも繋がる。また、鋼管の間隔を狭めることで、非越流部にも透過型えん堤を採用することも可能である。今後、広い開口部を設けることで、機能・環境両面に優れた鋼製透過型えん堤の計画を推進していくことが重要である。



写真-5 一部の部材が破損したが問題無く土石流を捕捉した事例

Photo 5 Trapping of debris flow where the parts were broken

5. おわりに

最新版の指針は、土石流対策に関してこれまでに研究されてきた内容の集大成としてまとめられたものである。その知見に基づいて、今後の土石流対策は鋼製透過型えん堤を基本として計画されていくこととなろう。

ただし、決して指針に定義された細かい数字や規程を満足することに盲目的にとらわれて、砂防施設の計画・設計を実施することのないようせねばならない。ここで最も大切なことは、現場に向き、それぞれの場所に適合した効果の高い施設を計画・設計することである。そして、実フィールドにおける実績やその調査を積み重ね、照査・改良を継続していくことが重要であろう。

今後とも、鋼製透過型えん堤に対する研究・調査が継続され、工法や設計法が改良されることで、土砂災害による犠牲者が一人でも少なくなることを期待する。

引用文献

- 1) 総合土石流対策強化手法検討会第3部会：土石流対策指針（案）昭和61年3月，1986
- 2) 国土交通省：砂防基本計画策定指針（土石流・流木対策編）及び同解説，土石流・流木対策設計技術指針及び同解説，2007
- 3) 渡辺正幸，水山高久，上原信司：土石流対策施設に関する検討，砂防学会誌 Vol.32, No.4, pp.40-45, 1980.
- 4) 鋼製砂防構造物研究会：進化を続ける鋼製砂防構造物の現在，土木で鋼 Vol.46, No.6, pp.66-71, 2005.
- 5) 高橋保：土石流の機構と対策，近未来社，pp.360-363
- 6) 葛西俊一郎，水山高久，稲垣暁：最下流に設置した鋼製透過型えん堤の土石流捕捉機能に関する調査，砂防学会誌 Vol.59, No.4, pp.48-53, 2006.
- 7) 佐藤一幸，上原信司，水山高久，葛西俊一郎：鋼製透過型ダムによる石礫型土石流の捕捉状況と構造応答，砂防学会誌 Vol.53, No.6, pp.61-65, 2001.

(Received 31 July 2009 ; Accepted 26 January 2010)