

鋼製砂防構造物 設計便覧改定のポイント

しま じょうじ
嶋 丈示

(一財)砂防・地すべり技術センター
砂防技術研究所 技術部 次長

はじめに

当センターは、鋼製砂防構造物の適切な計画・設計と効果的利用を図ることを目的として、昭和57年以降、鋼製砂防構造物に関する委員会を設け、学識経験者の助言と指導を受けつつ研究活動を続けています。これらの成果は昭和58年に「鋼製砂防構造物に関する研究」として発表し、更に昭和60年には「鋼製砂防構造物設計便覧」（以下、「鋼製便覧」という。）初版を刊行しました。そして最新版である平成21年度の鋼製便覧刊行から10年以上が経過しました。その間、各地で計画規模を超える豪雨による災害が頻発しており、部材が損傷する事例が発生するなど、鋼製砂防構造物としての新たな課題も顕在化されるようになってきました。

鋼製砂防構造物を設計するに当たっては、今後も鋼製便覧を活用されるものと考えます。新たな課題に対してもできるだけ対応するよう、内容を大幅に見直し『新編・鋼製砂防構造物設計便覧』（以下、「新鋼製便覧」という。）として発刊致しました。新鋼製便覧には、鋼製砂防構造物における設計の考え方をできるだけ解説し、解説に書きにくい項目はQ&Aとして記述しました。また、当センターの研究開発として行ってきた鋼製砂防構造物に関する研究成果も積極的に盛り込みました。

1. 鋼製堰堤の安全性の向上と合理的な設計

南木曾（礫径と勾配）、根知川（本川と支川）、大武川（越流礫）における鋼製透過型砂防堰堤の損傷事例に対して国土交通省砂防部発出の事務連絡より対応方針を追

加しました。これら損傷事例は、計画規模を遙かに上回る土石流によるものと、従来の設計には考慮されなかった構造上の課題で生じたものがあります。また、間接的な理由として、コスト低減を目的に鋼材重量を減らす代わりに安全性を削ってきたことがあります。そこで、リダンダンシーやロバストネスを無視して安全性を削ってまでコストを下げることをないよう、損傷事例を参考に設計諸元並びに照査方法を見直しました。今回の改定は目次も含めて大きく内容を加筆しています。本稿では特に鋼製透過型砂防堰堤の土砂捕捉性能と耐荷性能に関する項目について解説します。

リダンダンシー

冗長性のこと。設計荷重で配慮されなかった荷重（大きさ、幾何形状、種類）によって、構造物の一部（部材など）が損傷・破壊しても、構造物全体の致命的な破壊に至らない余裕度。鋼製砂防構造物においては、構造物の一部が損傷・破壊しても堤体の安全性・安定性を維持し続けることで土砂捕捉機能を喪失しない余裕度のことであり、部材破断後の耐荷性能を指す。

ロバストネス

頑健性のこと。外力の不確定性や変動に対しても安全性・安定性を保持しようとする性能。鋼製砂防構造物においては、設計荷重にばらつき（変動幅）があっても、内的安全性に大きな偏りがなく耐荷性能を保持し続けることのできる構造及び材料。



写真-1 レベル1荷重による損傷(大武川)



写真-2 レベル2荷重による損傷(梨子沢)

2. 土砂捕捉性能に関わる項目

2.1 最大礫径と最多礫径

(1) 最大礫径

鋼製透過型砂防堰堤は、平常時や中小出水時に流下してくる土砂は通過させ、土石流発生時には確実に土砂及び流木を捕捉します。この機能を発揮させるには、部材間隔と礫径の関係が重要です。部材間隔の設定に用いる最大礫径を D_{100} ではなく D_{95} としている理由は、 D_{100} 近辺の礫は現地に点在していても絶対数が少なく、この礫径を対象に部材間隔を設定すると、部材間隔が広くなり過ぎ、アーチアクションが発揮されにくく透過部が閉塞しない可能性があるからです。また、絶対数も少ないことから透過部全体を目詰まりさせるだけの礫個数が足りない可能性もあります。このため、礫径加積曲線の上位5%を除き、 D_{95} を最大礫径としています。

(2) 最多礫径

最大礫径を D_{95} としている理由は、上述の通りですが、 D_{95} 前後の礫個数も流域全体に分布しているわけではありません。つまり、 D_{95} を対象礫径に部材間隔を設定しても、 D_{100} と同様の理由で土石流フロント部を形成しない場合には、透過部でアーチアクションが発揮せず礫がそのまま通過してしまう可能性があります。このため、河床に広く分布している礫径を対象に部材間隔を設定した方が、土砂捕捉機能を確実に発揮させることができます。そこで、土石流中の代表礫径として礫径加積曲線の最多礫径帯の最大値を最大礫径 D_{95} と区別しました。ただし、礫径加積曲線は不連続な曲線であるため、個々の礫径加積曲線から最多礫径帯の最大値を設定すると個人差も生じます。したがって、礫径加積曲線における最多礫径帯の最大値を客観的に設定するために、①頻度の少ない範囲として D_{100} と D_{95} を結んだ直線、②最多礫径帯である D_{30} と D_{70} を結んだ直線の交点を最多礫径帯の最大値として、これを最多礫径と定義しました。

2.2 土石流捕捉性能を規定するために用いる礫径

このように、鋼製透過型砂防堰堤の礫捕捉機能を規定

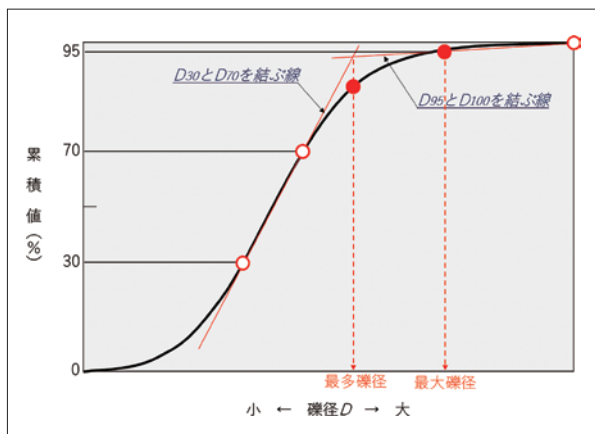


図-1 最多礫径の設定

する礫径を最大礫径 D_{95} と最多礫径 D_{80} とし、土砂の流下形態によって使い分けました。

表-1 部材間隔に用いる礫径

溪床勾配の目安	礫径
$1/3 (20^\circ) \leq 1$	最大礫径 D_{95}
$1/6 (10^\circ) \leq 1 < 1/3 (20^\circ)$	最大礫径 D_{95}
$1/30 (2^\circ) \leq 1 < 1/6 (10^\circ)$	最多礫径 D_{80}

(1) 土石流流下区間における礫径の設定

土石流の流下区間は、土石流フロント部が形成されるため、先行して巨礫が捕捉され、後続の小礫により透過部が目詰まりし、多量の土砂が捕捉されます。このため、土石流の捕捉を目的に部材間隔を設定する場合は D_{95} の1倍以下にします。 D_{95} は200個測定した場合大きい方から11番目であり、その近辺の個数も少なく隣り合う礫径に開きがある場合が多く、この礫径1個の寸法に部材間隔が左右され、調査担当者によって差が生じやすいという特徴があります。これに対して、 D_{80} は礫径分布の最多礫径帯の最大値であり、礫個数が多いことから礫選定によるばらつきが小さくなります。また、これまでの礫径調査結果から $D_{95} \leq D_{80} \times 2$ の場合が多いこともわかっています。そこで、 D_{95} の1倍で設定すれば、 D_{80} の2倍以下になっている可能性がありアーチアクションの発揮が期待できます。

鋼製透過型砂防堰堤を連続配置する場合、上流側の堰堤は、満砂した後も後続流や2波3波の土石流が水通し部から越流します。したがって、土石流の流下区間において下流にも堰堤が配置される場合には、透過部を完全閉塞させる必要はなく、部材間隔を D_{95} の1.5倍まで広げてもよいでしょう。また、礫径調査の対象礫径200個が容易に選定できるような箇所、すなわち巨礫が多数存在する場合には土石流中の巨礫によるアーチアクションで透過部が閉塞されやすいため、土石流のピークカットを目的に D_{95} の2倍まで広げることも考えられます。

(2) 土石流堆積区間における礫径の設定

土石流が流下区間から堆積区間に移行するとき、土石流フロント部が維持されず各個運搬で流下する可能性があります。特に、谷出口のような川幅が広がる場所では、水と土砂が分離しやすくフロント部の巨礫が停止しやすくなります。また、堆積区間は下流域になるため流量が大きくなる傾向があり、フロント部に巨礫群が集中しにくい状態となり、石礫が各個運搬されることが想定されます。

各個運搬される礫により透過部を閉塞するためには、多量に分布する礫をもとに部材間隔を設定する必要があります。そこで、部材間隔は現地に多数存在する礫群の代表礫径として D_{80} の1倍以下に設定することにしました。

3. 耐荷性能に関わる項目

3.1 鋼管の最小板厚

(1) 礫衝突する鋼管

これまで、礫衝突に対する鋼管の板厚は、骨組み構造解析で径厚比 $D/t < 40$ となる板厚を求め、これに腐食しろと余裕しろを加えた板厚に最も近い板厚を市場性のある鋼管から選択していました。このように鋼管は径厚比のみ規定していたことから、コスト低減を目的に鋼材重量を減らすため、鋼管径を小さくして鋼管板厚を薄くする傾向にありました。しかし、板厚が薄くなったことで礫衝突により鋼管が容易にへこむようになってきたことも事実です。このように、リダグダンシーやロバストネスを無視して安全性を削ってまでコストを下げるのではないよう、礫衝突を想定する構造部材に対して径厚比に加えて板厚の規定と、鋼管のへこみ変形の許容値を設けることとしました。

また、最上流面を構成する鋼管部材は、礫が衝突するものとして、弾性範囲を超えてへこみとたわみを許容しています。この最上流面を支えるため下流に配置された鋼管部材は、礫の直撃を受けないものとして、骨組解析において弾性範囲内に収まるよう設計しているのですが、土石流による損傷事例を見ると、礫は必ずしも最上流面を構成する鋼管部材にだけ衝突するわけではないことがわかってきました。これまでの捕捉事例及び損傷事例をみると、鋼管板厚が22mm以上になると設計時に想定していた礫衝突によるへこみは見受けられません。鋼管板厚の減厚は礫衝突後の摩耗や擦痕によるものです。つまり、これまで腐食しろと余裕しろを見込まない径厚比 $D/t < 40$ は、実際には径厚比 $D/t < 30$ となります。

そこで、堰堤高を保持することを目的に配置された構造部材で、礫衝突を想定する鋼管の板厚は22mm以上で、かつ腐食しろと余裕しろを見込んだ径厚比 $D/t <$

30が妥当と考えられます。

当初、土石流捕捉を目的とした鋼製透過型砂防堰堤は、 $\phi 500$ もしくは $\phi 600$ の鋼管が採用されていました。最近ではコスト削減の観点から $\phi 400$ も使用されていますが、市場性から板厚22mmがありません。このため、 $\phi 400$ 以下の鋼管については、礫衝突に対してへこみ変形を鋼管径の10%まで許容することで径厚比を $D/t < 30$ であれば、板厚22mm以下であってもよいことにしました。10%までとした理由は、維持管理において鋼管径の10%までは健全と見なすからです。

土石流対策及び流木対策に関わらず小礫を捕捉する目的で配置した機能部材は、取り替えを前提にすれば鋼管のへこみ率40%以上になっても構いません。そこで、鋼管のへこみを許容するため、礫捕捉を目的としていること及び板厚が薄くなりすぎないように、従来通り腐食しろと余裕しろを見込まない板厚として径厚比を $D/t < 80$ としました。この径厚比は腐食しろと余裕しろを見込めば $D/t < 60$ となります。

礫衝突エネルギーを吸収する目的で配置した機能部材は、腐食しろと余裕しろを見込まず板厚を計算し、後から腐食しろを加えるとへこみ量が変わってしまい、想定しているエネルギー吸収能が得られません。このため、小礫を捕捉する目的で配置した機能部材と同様に、腐食しろと余裕しろを見込んだ径厚比 $D/t < 60$ としました。

3.2 安全性能を照査するために用いる礫径

これまで、部材間隔の設定と礫衝突の照査にはどちらも最大礫径 D_{95} を用いていましたが、今回部材間隔の設定とは別に新たに礫衝突に用いる礫径の設定方法を追加しました。

表-2 安全性照査に用いる礫径

溪床勾配の目安	最上流堰堤	2基目以降	越流礫
$1/3 (20^\circ) \leq 1$	D_{100}		D_{95}
$1/6 (10^\circ) \leq 1 < 1/3 (20^\circ)$	D_{100}	D_{95}	D_{80}
$1/30 (2^\circ) \leq 1 < 1/6 (10^\circ)$	D_{95}		D_{80}

(1) 土石流発生区間

土石流発生区間については、礫径調査対象の最大の巨礫が到達する可能性を考慮して D_{100} としました。ただし、土石流発生区間に鋼製透過型砂防堰堤を設置する場合、除石の容易さなどを十分考慮して、選定に無理がないか検討する必要があります。

連続配置された砂防堰堤のうち、土石流発生区間に配置される鋼製透過型砂防堰堤は、満砂後越流することが前提になります。土石流の発生源に近いことから満砂後も最大礫径相当の巨礫が越流する可能性もあるため、越流礫は D_{95} を用いて安全性を照査します。



写真-3 鋼管板厚の違いによる損傷の差

(2) 土石流流下区間

土石流流下区間については、最上流堰堤に衝突する礫は礫径調査対象の最大礫径が衝突する可能性があるため D_{100} とします。ただし、上流から2基目以降の堰堤においては、従来通り D_{95} を用いるものとしました。このとき、最上流の堰堤から200m以上離れている場合には、礫径調査の範囲が異なるので、2基目とはせず、その区間の礫径調査対象の最大礫径である D_{100} を選定します。

連続配置された砂防堰堤の上流側の堰堤が鋼製透過型砂防堰堤の場合、満砂後越流することを前提としていますから、複数の礫が衝突することを想定して、越流礫は D_{80} を用いて安全性の照査を追加しました。

(3) 土石流堆積区間

土石流堆積区間については、従来通り礫径調査対象の D_{95} としています。ただし、連続配置された砂防堰堤の上流側の堰堤が鋼製透過型砂防堰堤の場合、流下区間と同様に越流礫は D_{80} を用いて安全性を照査します。

3.3 礫が衝突する部材

計画規模を大きく上回るような荷重でなくても、満砂後天端から越流する礫によって、部材が破損すれば構造全体としての安全性にも影響があります。そこで、衝突する部材の限界衝突回数の計算方法及び計算事例を追加しました。

(1) 土石流が直撃する最上流の部材

土石流は鋼製透過型砂防堰堤の最上流面で捕捉します。このため、礫の衝突に対しては、最上流の鋼管部材に土石流フロント部の巨礫が直撃するとして、鋼管部材のへこみ量とたわみ量による吸収エネルギーを計算しています。このとき、部材中央部に衝突するものとし、構造物のエネルギー吸収は、衝突点付近の局部変形と構造体全体の変形の総和で成されるものとします。

一旦捕捉された巨礫は再移動しないため同じ箇所には礫が当たらないので、原則として最大礫径 D_{95} が1回分の衝撃力に対して修正エリナス式により、へこみ変形が鋼管径の10%以下になるときの板厚を、その部材の最小板厚とします。このとき、礫の衝突速度は土石流の流速です。

D_{100} を対象に衝突荷重を算定する場合、土石流の流速では流下しない可能性はありますが、ここでは土石流の流速を用いることとしました。

.....
【構造部材】 土石流が直撃するものとして、最大礫径1回の衝突でへこみ率10%以下になる板厚とする。へこみ率10%以下は健全と見なす。

【機能部材】 土石流が直撃するものとして、最大礫径1回の衝突でへこみ率40%以下になる板厚とする。ただし、取り替えを前提としている場合、へこみ率40%を越えても良い。

.....

(2) 越流落下礫が直撃する部材

越流礫は複数回衝突するので、最多礫径 D_{80} を対象とし、変形が弾性範囲を超える状態に至った場合には、その変形が累積していくものとしてエネルギー吸収を算定します。

最下流に設置される堰堤のように計画上整備率100%の堰堤は、満砂後土砂の越流はないものとしています。しかし、連続配置された鋼製透過型砂防堰堤においては、上流側の堰堤は満砂すると水通し天端から越流する前提なので、捕捉面より下流に配置された鋼管フレームに礫が直撃する可能性があります。小径の礫でもへこみ変形が累積されれば、いつかは所定のへこみ変形量を超えることとなります。

そこで、衝突頻度の高い礫として最多礫径を越流礫とする。この礫が複数回衝突するものとして、その累積値が鋼管部材の取り替えの目安である鋼管径の40%まで許容するものとします。ただし、実際には何回衝突するのか確定することはできないので、最多礫径1回の衝撃力によるへこみ変形が、鋼管径の2%以下になるときの板厚を最小板厚としました。衝突速度は、水平方向を土石流の流速、鉛直方向を天端からの落下速度として、両者を比較し、大きい方の値を用います。

ただし、部材の配置により、礫衝突が分力として作用する場合、梁部材としてたわみによるエネルギー吸収が見込める場合、あきらかに衝突頻度が少ないと判断される場合には、これらの条件を考慮してエネルギー吸収の算定を行って良いことにしました。

.....
【構造部材】 満砂後、天端から越流するものとして、最多礫径1回の衝突でへこみ率2%以下になる板厚とする。へこみ率2%を礫衝突の繰り返し限界とする。

【機能部材】 満砂後、天端から越流するものとして、最多礫径1回の衝突でへこみ率10%以下になる板厚とする。ただし、取り替えを前提としている場合、へこみ率10%を越えても良い。

.....

おわりに

本稿は、主に鋼製透過型砂防堰堤について述べました。このため、今回の改定内容すべてにお答えしているわけではないので、ここに記載のない項目でも、もっと説明が欲しいといったものもあるかも知れません。また、今回の解説は絶対こうではなくてはならないものでもありません。掲載するには知見の足りないものもあります。これらについては引き続き当センターの研究開発で解決していきたいと考えています。