

土石流対策としての透過型砂防えん堤の留意事項

嶋 丈示*

はじめに——不透過型から透過型へ

土石流対策技術指針（案）には、多種の土石流対策工が記載されているが、その数と効果において主力となるのは砂防えん堤である。この砂防えん堤の中心に不透過型砂防えん堤がある。その機能は満砂後に土石流が発生すると、堆砂域に到達した土石流は勾配変化により流下エネルギーが減勢され、堆砂域に土砂を堆積させるものである。この土砂を堆積させる前の平常時堆砂勾配と、堆積後の計画堆砂勾配の差分を貯砂容量として、複数基で土石流全量を捕捉するよう計画されてきた。しかし、いったん貯留された土砂が後続流により再侵食されるなど、土砂を捕捉した砂防えん堤の堆砂勾配が水平に近いケースもある。また、土石流区間は急峻であることから、掃流区間の砂防えん堤に比べて堤高あたりの貯砂容量が少なく、設置基数が増える傾向にある。しかし、溪流に必要な基数を置けない場合も多い。

また、不透過型砂防えん堤は溪流を上下流に分断することから生態系を含む自然環境に影響を及ぼす。

このため、砂防えん堤に求められる機能は、土石流時には災害を引き起こすであろう土砂を保全対象の安全確保のために捕捉し、平常時および中小洪水

時には流砂系を考慮して下流への土砂の供給、生態系の連続性の維持、土砂捕捉容量確保のため無害な土砂は極力通過させるものである。現状でこの性能に最も近い土石流対策工として透過型砂防えん堤がある。流す砂防の推進により近年、急速に不透過型砂防えん堤に替わって透過型砂防えん堤の採用が増えた。

しかし、透過型砂防えん堤の土砂捕捉効果も土砂の流下形態、土砂濃度、粒径分布などにより変化することから、開口部の形状や大きさをどのように設定すればよいのか決定打はない。そこで、今後、土石流対策の主力になるであろう透過型えん堤の機能、および今後の機能アップに必要なと考えられる課題について述べたい。

透過型砂防えん堤の種類

透過型砂防えん堤には、掃流区間に設置し土砂調節を目的とした堰上げタイプと、土石流区間に設置し土砂や流木の捕捉を目的とした閉塞タイプがある。堰上げタイプは、コンクリートスリットえん堤に代表されるように、開口部が狭いことから洪水期にスリット開口部で堰上げを生じさせ、えん堤上流に湛水域をつくる。ここに土砂が流入すると掃流力が落ち、湛水域上流に堆砂する。後続の土砂もこの堆砂を乗り越えて堆砂の下流に肩を形成しながら堆積していく。土砂が供給され続けるとこの堆砂肩はスリット開口部まで到達するが、それ以上の土砂が供給されるとスリット開口部からはき出される。洪水後期になると、上流からの流量が減少し堰上げ水深が下がり、これに合わせて堆砂肩が崩れ、流水と共に土砂がスリット開口部からはき出される。スリット開口部からの流量が小さくなっていることから、土砂を運送する能力は小さく、はき出された土砂はスリット開口部直下流に堆積する¹⁾。

堰上げによる土砂捕捉効果は、洪水期に土砂をえ



写真1 不透過型砂防えん堤

* (財)砂防・地すべり技術センター砂防部課長代理

ん堤上流の湛水域に一時貯留し、洪水後期やその後の中小出水でいったん貯留された土砂を下流に供給することにある。このため、えん堤の貯砂空間が回復し、次の洪水に備えることができる。ただし、完全に空容量を回復させるためには、開口部の位置や大きさを工夫するとともに、時間も要することになる。この堰上げを利用したえん堤は、いったん捕捉された土砂が再び動くため、土石流対策としては問題が残る。したがってコンクリートスリットえん堤は、掃流区間で採用されるものであるが、堰上げ現象による土砂の再流出を考慮せず、土石流区間に数多く設置されている。このため、国土交通省砂防部保全課から事務連絡「透過型砂防えん堤の計画・設計上の留意点について」（平成15年5月7日）と、この事務連絡に関する補足説明資料（平成15年11月20日）において、コンクリートスリットえん堤の改良方法が示された。

土石流対策は、下流域の安全確保のために、土砂を確実に捕捉する必要がある。この要求を満たす透過型砂防えん堤として閉塞タイプがある。閉塞タイプ

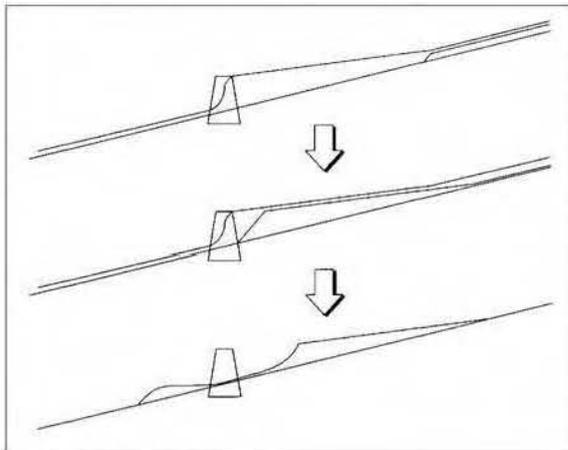


図1 堰上げによる土砂捕捉効果



写真2 鋼製透過型砂防えん堤

はスリット開口部で確実に礫を捕捉し、かつ堤体全体の開口率を多くとることで流水はできるだけ通過させ堰上げを生じさせない形状としている。閉塞タイプの代表的な施設として鋼製スリットがある。堰上げタイプと閉塞タイプを分けるのは開口部の大きさと形状であり材料ではない。鋼製スリット＝閉塞タイプと誤解している例もあるが、これは、鋼材が高強度なため開口率を大きくとれ、開口部の形状を比較的自由にすることができることから、結果的に、閉塞タイプに鋼製透過型砂防えん堤が採用されているわけである。

流下形態と開口部の形状

以下に、土石流区間に設置する閉塞タイプの透過型砂防えん堤が効果を発揮できる開口部形状について述べる。

■縦スリット

閉塞タイプのスリット純間隔は、土石流の先頭部の礫群を効率よく捕捉するよう最大礫径×1.5程度以下に設定している²⁾。縦スリットの機能は、土石流の先頭部に巨礫が集中する性質を利用したものである。礫1個ならスリットを通過してしまうが、礫が集合で流下してくるため、1.5倍程度以下であれば礫が絡み合いスリットを通過することができず捕捉される（図2）。ちょうどラッシュアワーでドアから人が降りられなくなるのを想像すれば分かりやすい。土石流対策技術指針（案）には、礫径と縦スリット純間隔の関係は水理実験をもとに、礫径の1.5倍以下なら土石流中の砂礫をほとんど捕捉し、2.0倍程度なら巨礫は確実に捕捉するとしている。



写真3 縦材を機能部材とした鋼製透過型砂防えん堤の一例

したがって、最大礫径を含む土石流については、透過部の閉塞により確実に捕捉できる。この程度の開口部なら中小出水により流下する土砂が開口部を閉塞することはなく、生態系への影響は最も小さい。ただし、流木が引っ掛かると開口部が閉塞され、そこから堆砂することもある。したがって、中小出水であっても点検は必要であろう。

既存の鋼製透過型砂防えん堤の大半は、この縦スリットを利用して土石流を捕捉しようとするものである。このタイプのえん堤は、溪床勾配1/20以上の土石流区間に設置されている。しかしながら、溪床勾配が約1/15以下の土石流堆積区間や、1/15以上の土石流流下区間であっても谷出口のように流下幅が拡幅する場所では、土石流の先頭部がほぐれてスリット開口部に巨礫が到達しない可能性がある。巨礫が到達しないと、スリットを閉塞させることができない。また、数波でくる土石流に対しては、一波目に最大礫径を含んでいなければえん堤を通過する可能性が高い。

■横スリット

これまでの土石流捕捉を検証する水理実験は、土石流の先頭部を対象としたものであり、捕捉後に通水するといったん捕捉した礫が後続流により再び洗い流される現象が観察される。スリットで完全に捕捉された礫は上流から堆砂により押されており咬み込んで動くことはない。しかし、その上部に堆積した礫は、礫の絡みが緩かったり、礫径がスリット純間隔より小さいことから、後続流により再移動する

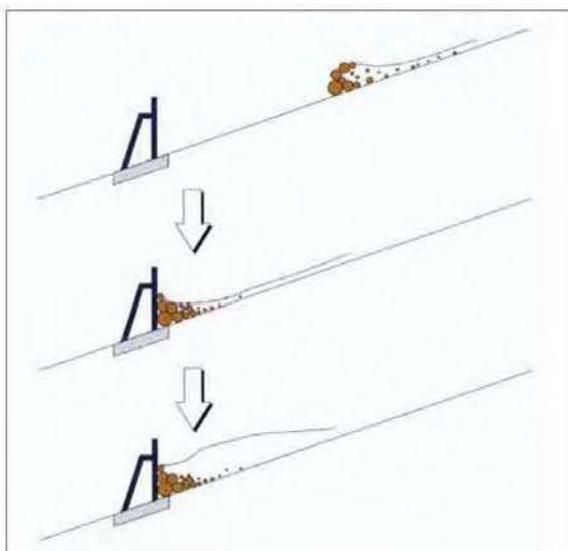


図2 縦材による土砂捕捉効果

可能性がある。

そこで、後続流による土砂の再移動を防止する開口部の研究も進められている³⁾。これは、土石流波高より上方の縦材に横材を配置することで、後続流中の礫を捕捉し、いったん捕捉した土砂の再移動も防止するものである。

横材の位置により捕捉の効果は敏感に変化する。例えば、流木捕捉実験³⁾では、水深が横材位置より下方にある場合、流木は横材に接触しないため全く効かない。ところが水深が横材を超えると、逆にほとんどの流木が引っ掛かることになる。この現象は礫の場合も同様である。この横材の効果を利用して、中小出水では土砂を通過させ、土石流時には土砂を捕捉するといったコントロールも可能となろう。

横材により捕捉された礫は、再移動しないことから捕捉の確実性は高い。しかし、確実に捕捉される礫は横部材間隔より大きい礫であることから、泥流型土石流のように小径礫を中心とした土石流に対しては、部材間隔を相当密にしなければならず、大径の鋼管を部材とした既存の鋼製透過型砂防えん堤では構造に無理がある。今後は、外力を受ける構造部材と、礫を捕捉する機能部材を分けるなどの工夫が必要になってくる。

この横材の位置のルールに確定したものではないが、当センター常設の鋼製砂防構造物委員会において、昨年度、保全対象の直上流に設置する透過型砂防えん堤（以下、最下流タイプ）の留意事項を取りまとめた。これが部材間隔の設定方法の参考となる。以下に概要を記す。

最下流タイプ

最下流タイプは、保全対象が直下流に位置するた



写真4 横材を機能部材とした鋼製透過型砂防えん堤の一例

め、土石流を確実に捕捉し安全を確保する必要がある。

このため、土石流時には、土石流の先頭部の礫群を確実に捕捉するとともに、後続流中の小礫も捕捉できる部材間隔で、平常時および中小洪水時には、平常時および中小洪水時に流下してくる砂礫が十分通過できる部材間隔とする必要がある。

■土石流時

土石流の先頭部を構成する礫群は、最下流部では谷出口に位置する場合が多く、上流にえん堤がある場合も考慮すると先頭部がほぐれてえん堤に到達する可能性がある。このため、礫が単独でえん堤に到達しても捕捉できるように最下流タイプの縦材純間隔を礫径 d_{80} の1.0倍以下に設定する（図3）。

$$b_1 < d_{80} \times 1.0$$

最下流タイプに対しては保全対象の安全性確保のため、礫の捕捉機能向上を念頭に横材純間隔を礫径 d_{80} の半分程度とする。実験によると土石流の後続流中に含まれる礫を捕捉するには、縦横部材間隔を最大礫径程度にとれば、後続流に対しても大半の礫を捕捉できることが確認されている⁴⁾。実験では礫成分を主体として土石流形態を発生させて捕捉しやすい条件のもとで行っていることや、谷出口や土石流堆積区間に最下流部が多いことを考慮して、最大礫径の半分を横部材間隔とした（図3）。

$$b_2 \approx d_{80} \times 0.5$$

■平常時および中小洪水時

平常時に流下する土砂を通過させるため、河床から最下方の横材までの高さを平常時水深（2年超過確率降雨）より高く配置する。これより、上方の横材は、後続流に含まれる小径の礫を効率よく水通し



写真5 部材の目を細かくした鋼製透過型砂防えん堤の一例

天端まで捕捉できるよう配置する（図3）。

平常時水深 $< H <$ 土石流水深

前述した土石流区間に採用されたコンクリートスリットえん堤の改良方法は、スリット開口部に河床から天端まで横材を配置したもので、先行流により堰上げが生じても、横部材間隔よりも大きい礫は確実に捕捉される。この横材の間隔は最下流タイプの横材間隔と同様に最大礫径 $\times 0.5$ である。

透過型砂防えん堤の留意事項と課題

以下に、透過型砂防えん堤の今後の課題をいくつか挙げてみたい。

■捕捉対象礫径の設定

閉塞型の透過型砂防えん堤が機能するためには、えん堤に到達するであろう最大礫径を適切に見積もる必要がある。現行の最大礫径の決め方は、えん堤サイト近傍から上下流の各200mまでの礫径分布を調査し、累加曲線の95%を最大礫径としている。この方法は簡便であるが、河床に礫自体が少ない場合でも、巨礫が6個以上（礫径 d_{95} ）あれば最大礫径

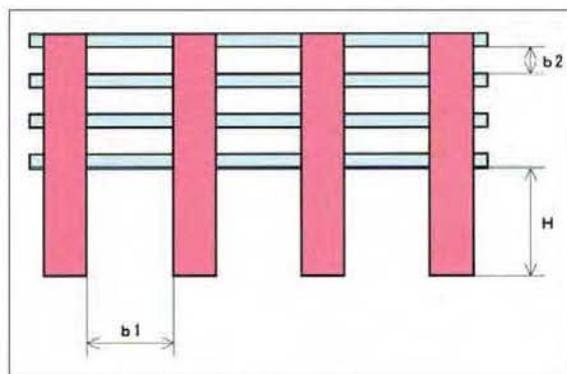


図3 最下流タイプの部材間隔正面図



写真6 コンクリートスリット砂防えん堤に横材を設置した例

が設定できてしまう。このような場合、巨礫が一部のスリットを閉塞しても、他のスリットから後続流がすり抜けたり、いったん捕捉された礫が再移動する可能性がある。また、礫径 d_{95} 近辺は礫の個体数自体が少ない場合もあり、これが動かないと開口部が閉塞されないことも考えられる。

そこで、前述の鋼製砂防構造物委員会において最下流タイプの場合、下流の保全対象の安全確保を念頭に礫捕捉の確実性の向上を狙って、最大礫径をこれまでの礫径調査の実績をもとに個体数が比較的多い礫として80%礫径（礫径 d_{80} ）を採用することとした（累加曲線から求めた礫径の分布状況によっては、礫径 d_{80} に限定するものではない）。「鋼製砂防構造物設計便覧」（平成13年度版）では、巨礫の径は、その横径、縦径、高さの3辺の平均値を礫径としている。しかし、深さ方向は埋もれている場合が多く測定値が曖昧なため、露出している横径と縦径の2辺を測定して、その平均値を礫径とした。また、礫の測定個数も礫径の測定を3辺から2辺に簡略したことと、河床に十分に礫が存在している担保として従来の100個以上から200個以上に改めた。

■連続配置

透過型砂防えん堤を上下流に連続して配置する場合、下流側えん堤に到達する土石流の形態、到達する礫の大きさは、上流側えん堤の機能の仕方に影響される。既存の透過型えん堤の効果を考えると、上流側えん堤が効くほど、下流側えん堤は効きにくいことは容易に想像できる。上流側えん堤の下流側えん堤に及ぼす影響の度合いについて未だ知見を得ていないが、保全対象の安全を確保するためには、下流側のえん堤ほど確実に効いてほしいように思う。この対策として下流側えん堤の開口部の目を細かくし、捕捉対象礫径を小さく見積もることが考えられる。少なくとも両者とも同じ開口部に設定することはないであろう。

えん堤の向きであるが、不透過型えん堤の場合、満砂後を想定して下流に対して直角にえん堤を配置する。しかし、透過型の場合、礫捕捉を考慮すれば上流に対してえん堤を直角に配置した方がよいであろう。

■流木捕捉効果

土石流には流木が含まれている場合が多く、この

流木が被害を大きくしている事例も少なくない。このため、土石流対策としては流木対策もあわせて計画する必要がある。閉塞タイプの透過型えん堤は、水と土砂の分離がよいことから、流木捕捉に威力を発揮する。むしろ流木を流したくても流せない。このため、流木混じりの土石流を捕捉した事例をみると、開口部が流木で確実に閉塞されることから、後続流に含まれる細粒分も確実に捕捉される⁵⁾。

現状では安全を優先してスリット純間隔を礫径をもとに設定しているが、流木混じりの土石流に対しては、流木の絡みによる開口部の閉塞されやすさを考慮する方法もある。例えば、礫個数が少ない場合、えん堤の直上流に根の浅い樹木を置き、土石流時に強制的に流木を発生させるわけである。緑化が恒常的な土砂流出には有効でも、土石流の発生にどの程度有効か定量的に把握できていない今、流木として出てくることを想定し、これを積極的に利用する考えもあってもよいであろう。ただ、災害を引き起こす要因を利用する考えは、現状では無理かも知れない。

また、流木捕捉を目的としていない場合でも、中小出水で流木が引っ掛かるとその上流部に細粒土砂が堆積していく。この状況が進行し、中小出水により流送される土砂が通過できないほど堆積した場合には除石が必要である。したがって、土砂や流木を除去しやすい構造とするなど、維持管理にも配慮する必要がある。

■部分透過型

一般に、鋼製透過型えん堤は、2 m程度の底版コンクリートの上部に鋼管骨組を構築している。底版コンクリート天端は溪床に合わせており、土石流が鋼製部に直撃するようにしている。

しかし、この底版コンクリートを河床より突出させた、いわゆる部分透過型えん堤もある。このえん堤で注意することは、土石流の先頭部が底版コンクリートで捕捉された場合、鋼製部には後続流しか作用せず、土砂を捕捉しない可能性があることである。また、土砂が底版コンクリート天端まで堆積した場合、不透過型えん堤と同様に溪床勾配が緩くなるため、巨礫が透過部に到達しない可能性もある。このため、部分透過型は不透過型えん堤と同じ効果を期待し、かつ流木対策が必要な場合に設置するのが正しい使い方であろう。

■部材の損傷

土石流は、巨礫群の衝突と流体の圧力が同時に継続してえん堤に作用する。現状では両者がどのようにえん堤に作用しているか不明なため、流体力と礫の衝突を分けて設計に織り込んでいる。流体力は静的荷重として安定計算に用い、礫の衝突は袖部や部材の検証に用いている。えん堤を安全で、かつ合理的に設計するためには、土石流の外力をImpact的な荷重ではなく、Impulsive的な荷重として取り扱う必要がある。

また、既存の鋼製えん堤は外力を受ける構造部材と、礫を捕捉する機能部材を明確に分けていない。小径礫の捕捉も念頭に置くと、礫の衝突を受けても喪失しない程度の強度を有していればよい。このため、過度に部材を大きくすることはせず、損傷した場合、取り替えも考慮し不経済な設計とならないようにする必要がある。

おわりに——土砂をコントロールする

透過型えん堤を採用する場合、保全対象の安全を確保するためには、えん堤に到達するであろう土石流の性質を見極め、適切な開口部を設定し、施設規模に応じた量を捕捉する必要がある。また、いったん捕捉した巨礫は再移動しないため、次の土石流に備え、除石する必要がある。このため、えん堤上流にアプローチできる方法も計画時に考えておく必要がある。また、溪流環境の保全のためには、いくら止めていくら流すのかといった量的な検討に加えて、時間的にどのような粒径がコントロールされているのか究明していく必要がある。

【参考資料】

- 1) 例えば、水山高久・大久保駿・井戸清雄・越智英人：掃流区域におけるスリット砂防ダム配置上の留意点、砂防学会誌、Vol.49, No.5, pp49～52, 1997
- 2) 池谷浩・上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実験的研究、新砂防、114号、昭和55.3
- 3) 水野秀明・水山高久：上部の格子間隔が狭い格子型ダムに関する研究、砂防学会誌、Vol.49, No.4, pp.3～8, 1996
- 4) 財団法人砂防・地すべり技術センター、鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧（平成13年度版）、pp.101～102
- 5) 尾崎幸忠・鴨川義宣・水山高久・葛西俊一郎・嶋丈示：流木が混入した土石流の鋼製透過型ダムによる捕捉形態の調査、砂防学会誌、Vol.51, No.2, pp39～44, 1998