

格子型砂防堰堤の格子上方から流出する土砂の制御に関する実験的研究*

Experimental study on runoff control for sediment passing through upper parts of a grid-type high dam

堀内 成 郎^{*1}

Shigeo HORIUCHI

伊 藤 隆 郭^{*3}

Takahiro ITOH

田 畑 茂 清^{*1}

Shigekiyo TABATA

水 山 高 久^{*4}

Takahisa MIZUYAMA

小 野 慎 吾^{*2}

Shingo ONO

Abstract

In Japan, many of the recent sabo dam constructions have been of the open-type in consideration of the continuity of sediment routing from upstream to downstream reach in a river basin. A lot of experimental and numerical research has been conducted on sediment control using concrete slit dam, slit dam with steel grids and so on. However, there are a few researches which discuss sediment runoff and its control near upper parts of the grids, while channel shifting and bars movements can be active due to deposition after huge volume of sediment is captured in the storage area of sabo dam.

In the present study, the sediment control function of the “grid-type sabo high dam (GHD)”, which is defined as a grid-type sabo dam with a height over 15 m, was examined preliminarily using experimental data sets such as dimensionless sediment runoff volume passing through the check dam. Flume experiments for sediment control using a kind of “steel wire-nets” near the vertically upper parts of the grid were conducted focusing on the simple and the effective countermeasures for the sediment storage in a sabo dam, and sediment control in present easy way, in which steel wire nets could be flexible and removable, was confirmed.

Key words : grid-type check dam, steel nets, debris flow, flume experiment

1. はじめに

透過型砂防堰堤の土砂捕捉に関する研究は、古くから現地施工後の捕捉調査、水路実験および数値解析によって数多く行われてきている^{1)~3)}。透過型の形状は、スリットや格子など幾つかの形状が対象とされているが、透過部の閉塞に関連する支配的パラメータには、透過部の代表長さと巨礫成分の粒径の比、石礫の体積濃度や流速などが指摘されている。しかしながら、混合砂の土石流の流れについては、粒度偏析や流速など、未だ解決されていないものが多く、幾何学的に評価がしやすい透過部の代表長さと巨礫成分の粒径の比に着目して、透過型砂防堰堤による土石流の土砂捕捉や流砂量の減少に関する研究成果がまとめられている。

さて、格子型砂防堰堤についてみると、格子群の最小格子間隔が d_{95} の約1.5倍よりも大きくなると、格子による土砂捕捉能力が小さくなることが明らかにされており、この知見をもとにして、土石流・流木対策設計技術指針解説⁴⁾においては、最小格子間隔の目安が95%粒径の1.0倍とされた。しかしながら、土石流の流動形態、土石流本体の体積濃度、粒度分布および格子に捕捉され

る巨礫成分と格子との関係などの土石流の特性や堰堤堆砂域の勾配変化、河床状態および流砂特性を考慮した格子間隔に関する関係など検討すべき研究課題が残されている。

既往の透過型砂防堰堤による土砂捕捉に関する実験では、水路勾配が 5° 程度の小さい勾配における土砂流を対象とした実験⁷⁾があるが、主として、河床勾配が大きい 12° 以上の急な勾配上での砂粒子が水面まで分散した土石流や飽和土塊が急激に移動する流れを想定したものが多く、さらに、格子直上流での混合砂の土石流に含まれる巨礫群が格子の鉛直部材とアーチを形成する可能性⁸⁾や格子周辺での巨礫の噛み合いも指摘⁹⁾されている。

しかしながら、勾配の小さい河床上での土石流・掃流砂を伴う流れでは、平均粒径群の挙動に対する平均粒径よりも粒子径が大きい礫群や巨礫群の移動性は活発ではなく、格子堰堤の格子閉塞に及ぼす全粒径の粒度偏析の機構と土砂移動形態の影響が大きいと考えられる。

一方、土石流・流木対策設計技術指針解説の改訂⁶⁾に伴い、堰堤の建設コスト、土砂の計画捕捉量および土砂の扞止を考慮して、透過型砂防堰堤で、堤高が15 m以上のものも計画されつつあり、筆者らは、前報^{10), 11)}にお

* 本発表の一部は、平成22年度砂防学会研究発表会にて発表した。 *1 正会員 財団法人砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation *2 正会員 日本工営株式会社 Member, Nippon Koei Co. Ltd. *3 正会員 日本工営株式会社中央研究所 Member, Research and Development Center, Nippon Koei Co. Ltd. (a.6556@n-koei.co.jp) *4 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

いて、ハイダム形式の鋼製格子型砂防堰堤を格子型砂防ハイダム (grid-type sabo high dam) と称し、これを想定した土砂捕捉や土砂調節機能に関する水路・水理模型実験を行った。

これらによれば、流砂成分のうち、河床材料の80% 粒径から最大粒径が活発に移動するような流量を大出水流量とし、これらの粒径が殆ど移動しないが、ほぼ移動限界状態にある流量を中規模出水流量とすれば、大出水により、格子型砂防堰堤の格子がある程度閉塞した後、中規模出水流量が発生すると、堰堤堆砂域には上流からの流砂量に対応した河床縦断分布が形成され、堆砂前の河床勾配よりも河床勾配が小さくなる。堰堤の設置位置が計画上的土石流区間であっても、堰堤堆砂域は、土石流から掃流砂流にまたがる流砂形態をとり、特に、堰堤堆砂域域内の堆積土砂の河床における流砂形態は、掃流砂流となる。一方、流れを平面的に見ると、堰堤堆砂域に土砂が堆積すると、掃流力が巨礫や礫成分の移動限界に近い状態となり、巨礫成分が移動し難くなる。さらに、堰堤堆砂域では、土砂の堆積により川幅が広がることが多く、河床上に形成される砂州の発生・形成に起因した主流の偏流や水みちが見られるようになる。これらの影響により、巨礫成分の移動性がさらに低下し、巨礫成分が堰堤に到達し難くなる。

格子堰堤の格子の鉛直上方部分の格子間隔は、通常、鉛直下方部分の格子間隔と等しいことが多く、堰堤堆砂域がある程度堆砂して、格子の鉛直下方部分が礫および巨礫成分で閉塞している場合には、巨礫成分が閉塞状態になっていない格子堰堤の格子の鉛直上方部分からの細粒成分を主体とした土砂流出が大きくなる。

しかしながら、水みちの変動や砂州の移動による土砂輸送は、現象のケイオティック性が強く、予測が困難であるため、これらの対策の一例として、機能部材の設置¹²⁾などが考えられる。そこで、簡易的な取り外し可能なリングネット状の鋼製柔構造物 (以下、ネットと略称) の設置などの極力簡易な方法により行われることが、維持・管理からみて必要となる。これまで、ネットを主体的に用いた河床勾配の大きい場において、土石流捕捉に関する現地実験^{13)~16)}や水路・大型模型実験¹⁷⁾が行われているものの、土塊移動や高濃度の土石流を対象としたものが多く、土砂濃度の小さい土石流や掃流を対象としていない。

本実験においては、このような背景のもとに、格子型砂防堰堤を対象として、次のような現象を想定した。すなわち、大出水によって堰堤堆砂域に土砂が供給され、ある程度の土砂が堆砂して格子の鉛直下方の一部が閉塞した状態の後に、中規模出水 (小規模出水も含む) が発生して掃流砂が移動するか、あるいは、それが再移動するような状況である。水路実験によって、出水により堰堤堆砂域を流下する土砂が格子を通過することによって生じる掃流砂流が主体の流出土砂がネットを用いて容易

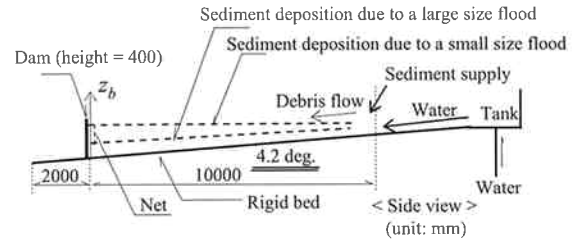


図-1 実験水路の模式図

Fig. 1 Schematics of experimental channel

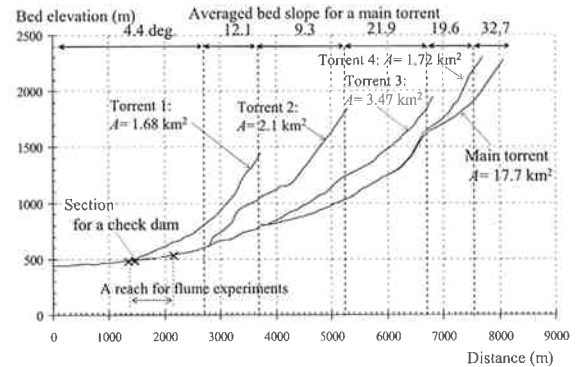


図-2 対象とした現地支溪の河床縦断分布

Fig. 2 Longitudinal bed profiles

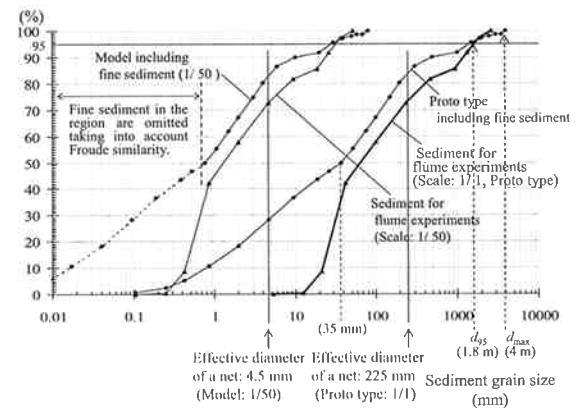


図-3 実験に用いた河床材料の粒度分布

Fig. 3 Grain size distribution of bed sediment

に制御される手法の提案がなされ、並びに、本実験で示されるような土砂流出の制御の必要性が示される。

2. 水路実験

幾何学的相似における模型縮尺 λ_L は、前報^{10), 11)}と同様に、1/50として諸元を設定した。これ以降の水理量は原型値で示す。使用する水路は、図-1に示すように、左岸側壁がアクリル製の矩形断面開水路で、長さ20 m、幅30 cmである。本実験では10 mの区間を使用した。水路の河床勾配は、図-2に示すように、堰堤設置断面周辺の平均河床勾配を参考にすると、 $4.2^\circ (=1/13.5)$ であり、下流端より2 mの位置に格子堰堤模型を設置した。格子堰堤の格子は、鉛直部材間隔が $1.0 \times d_{95}$ 、かつ、水平部材間隔が $1.0 \times d_{95}$ (最下段のみ $1.5 \times d_{95}$) である^{10), 11)}。ここに、 d_{95} は、対象とする土砂の粒度分布の通

過質量百分率における 95% 粒径である。

上流から土石流を定常的に流下させ、水路下流端において、堰堤通過後の流量・流砂量の時間変化および総流出土砂量の計測を行った。堰堤堆砂域の上流域では、土石流の流下速度や流心での河床縦断分布（堆砂形状）を測定した。なお、後に示す図-7および図-8のように、格子の各水平部材の天端が満砂する時刻で通水を停止させて、河床位を計測した。堰堤堆砂域の堰堤近傍と水路全体（左岸側の側面）においては、ビデオカメラを用いて流況を撮影した。

河床材料は、図-3に示すように、 d_{95} が 1,800 mm、最小粒径が 0.1 mm 以下、平均粒径が 258 mm の幅広い粒度分布をもつ。図において、原型として示された粒度分布は、現地河床材料調査で得られたものである。参考のため、模型縮尺（=1/50）によって縮小された模型の粒度分布も図中に示している。前報¹⁰⁾と同様に、実験に用いる土砂の粒度分布は、流砂が土石流から掃流砂としての取り扱いが可能で、かつ、浮遊砂が卓越しないようにするために、原型値の細粒成分（約 35 mm 以下）を除去して設定を行い、図-3においては、太線で示している。

既往最大相当規模の降雨強度を用いて算定される清水ピーク流量は 185 m³/s であり、これをもとに、堰堤水通し部に対する計画ハイドログラフが得られている¹¹⁾。ここで、冒頭に示した大出水流量と中規模出水流量を流砂の移動性と関連させて定義する。ここでは、ピーク流量に相当する流量（185 m³/s）を大出水流量とし、95% 粒径の混合砂による移動限界流量（約 60 m³/s (57.7 m³/s)）を中規模出水流量と呼ぶものとする。

大出水流量により形成された土石流によって堰堤の堆砂域に土砂を堆積させ、その後、中規模出水流量によって掃流砂流を形成させた。図-4に示す清水流量の時間変化に関する図を用いると、大出水流量を定常的に 1.75 時間通水し、通水を停止後に、格子上方からの土砂流出をみるために、中規模出水流量を定常的に 4.16 時間通水した。総通水時間は 5.91 時間である。図中に幾つかの原型時間が示されているが、これらは、後に示す図-7および図-8に示すように、格子の水平部材の天端に土砂の河床面が到達する時の（原型）時刻であり、通水開始時刻を 0 時とした時の経過時間であって、目安のために示した。ここに示す通水時間は、後に示すように、格子部を約 75% 閉塞させることによって、河床勾配の小さい堰堤堆砂域を形成させるとともに、その後の掃流砂流によって、堰堤堆砂域が満砂状態になるまでの過程を再現させるための時間であって、通水時間に対する物理的な意味合いを持たず、水理実験の相似性には関与しない。

図-5は、実験における水理条件を用いて、川幅水深比と水深粒径比を求め、村本らの中規模河床形態の形成領域¹²⁾内にプロットしたものである。大出水流量（185

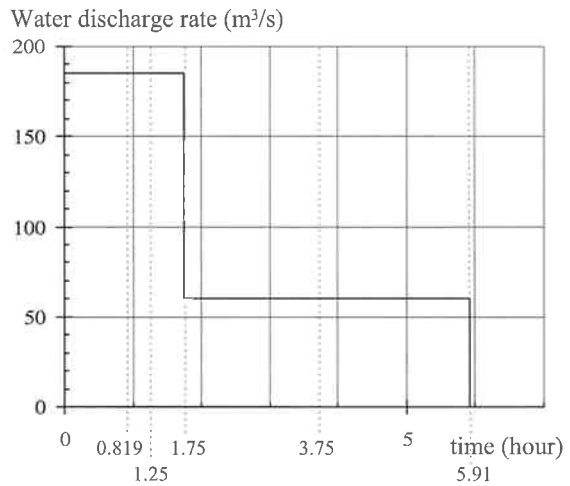


図-4 水路実験に用いた清水流量
Fig. 4 Clear water discharge rate in flume experiments

m³/s) の時には、砂州が形成されにくい水理条件にあり、中規模出水流量の時には、交互砂州の形成領域にある。写真-1は、中規模出水流量を通水途中に堰堤堆砂域に形成された交互砂州と偏流の形成の一例である。主流の偏流は見られるが、浮州の形成には至っていない。

土砂輸送濃度 c_f は、初期河床勾配（4.2°）に対する平衡濃度に近い値とし、ここでは、 $c_f=0.02$ とした。なお、大出水時の水理条件では、混合砂の全粒子が活発に移動するが、中規模出水流量時には、大粒径の粒子の移動性が小さいため、流砂成分の粒径は河床材料と比べて小さい。従って、大出水時の堰堤堆砂域における砂州半波長の一部が移動する程度の時間内での輸送濃度は、上流から与える輸送濃度（ $c_f=0.02$ ）と比べて、出水時の堆積域での輸送濃度はかなり小さくなる。

ネットは、図-6に示すように、格子上方での土砂流出の違いをみるために、格子の鉛直上方部に設置している。円形ネットの空間の有効径は、流砂成分の最大平均値に相当する河床材料の 80% 粒径（ d_{80} ）の大きさに設定した。ネットの内径サイズは、規格品の最小スケール（300 mm）ものを用い、ネット同士の重なりを考慮した有効内径は 240 mm となり、これを一辺の内径が 225 mm の金網で正方形近似した。図-3においては、現地の河床材料、水路実験に用いる土砂の粒度分布およびネット径を比較するために、これらの値を比較している。実験では、大出水流量を通水後に通水を停止し、格子上方の部分にネット模型を設置した後、中規模出水流量を通水して、ネット設置の有無に伴う土砂捕捉効果についてみた。

3. ネットを用いた堰堤流出土砂の制御

図-7および図-8は、ネットの有無による河床縦断分布の違いである。横軸は堰堤位置から上流への距離、縦軸 z_b は河床の堆積土砂の高さ（初期河床位からみた堆積厚）であり、横軸に直交する成分（ z_b' ）ではなく、水平軸に直交する成分を示した。これらの図によると、

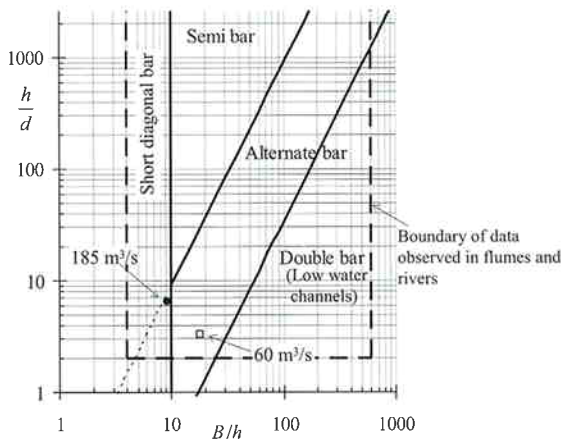
図-5 中規模河床形態の形成条件と水理条件¹⁸⁾

Fig. 5 Formations of sand bars in hydraulic conditions

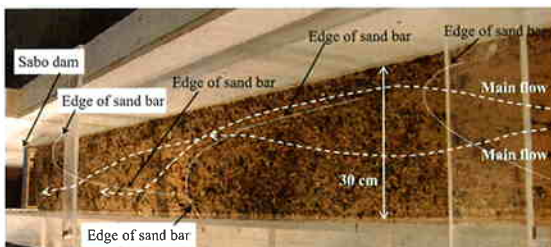


写真-1 中規模流量の通水時における砂州の形成と偏流形成跡の一例 (60 m³/s)

Photo 1 One example for formations of sand bars and channel shifting after flowing middle size of flood (60 m³/s)

大出水流量 (185 m³/s) 通水後の河床上へ中規模出水流量 (約 60 m³/s) を通水すると、格子堰堤からの土砂流出が徐々に大きくなる。これは、中規模出水流量と河床勾配の減少に伴う掃流力の減少により、巨礫成分が堰堤に到達し難く細砂成分が移動しやすいため、巨礫以外の土砂が格子を通過しやすくなるためである。例えば、堰堤堆砂域の最上流域 (約 300~370 m 区間) において、給砂濃度が、堰堤堆砂域に過大な堆積が生じない輸送濃度であるにも関わらず土砂の堆積が見られる。これは、この区間から既に、礫成分や巨礫成分の移動し難い状態が形成されていることを示している。

これに対し、格子上方にネットを設置した場合には、ネット内径 (有効径) よりも小さい粒径の土砂は若干通過させるものの、ネットの設置によって、堰堤が満砂状態になるまで、土砂が捕捉されていることが分かる。

堰堤の土砂捕捉率および土砂通過率についてみる。これらの定義は文献¹⁰⁾に示されているが、それぞれ、供給土砂量に対する捕捉および通過土砂量の時間積分値である。図-9は、ネット設置の有無による土砂捕捉率および通過率の時間積分値の違いを示したデータである。同図によれば、ネットの設置により、中規模出水流量通水後の格子堰堤からの土砂通過率は、約 7~8% になり、ネットを設置しないもの (土砂通過率約 20%) と比べて、流出土砂量が約 12~13% 低減しており、ネットによる土砂捕捉効果がみられる。今回対象としたネットの

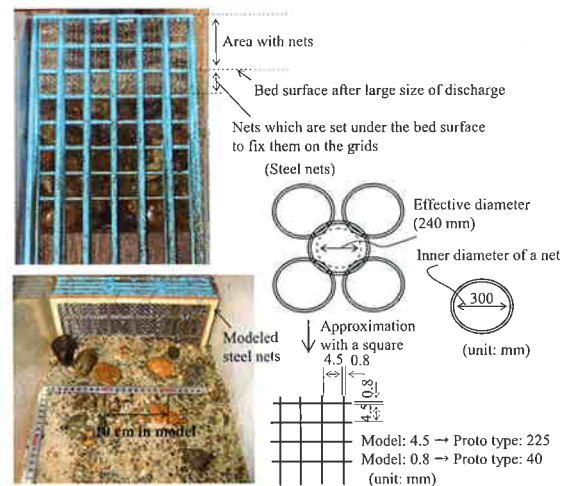


図-6 格子に設置したネットの模型と設置位置

Fig. 6 Schematics of steel nets model and setting for steel nets on the grids

内径は、規格品で最小サイズ程度のものを想定したものである。従って、中規模出水流量による土砂流出を更に抑制することや小出水による土砂流出の抑制が必要な場合には、ネットの2重構造、格子の上流側の堰堤堆砂域の河床上への巨礫の配置¹¹⁾やそれらの組み合わせ等の工夫が必要である。また、本実験は水路実験であり、水理模型実験において顕著となる現象、すなわち、土砂堆積に伴う谷地形溪流の川幅の拡幅や弯曲流れが流砂移動・土砂堆積に及ぼす影響を考慮していない。しかしながら、ネット設置による堰堤内の土砂堆積に関する検討や対策に対する立場から見れば、この種の水路実験は有効な手法の一つである。

本実験では、土石流によって輸送された土砂が堰堤堆砂域にある程度堆積した状態において、中規模出水流量を流下させる実験を行った。大出水による土石流が発生した場合、堰堤内の堆積土砂に対して除石が行われることが多いが、ここでは、そのような除石等のタイミングは考慮していない。しかしながら、本実験で対象とした堰堤堆砂域の河床勾配は比較的小さいため、河床勾配の小さい砂防区間の下流側に設置される透過型砂防堰堤の土砂捕捉に対しても有用な情報を与えると思われる。

格子上方付近では、流木の流動に伴うその集積・捕捉の問題も考慮する必要があるが、これについては、今後の検討すべき課題としたい。

4. 結論

本実験は、格子堰堤の格子に簡易的な機能部材を設置することによる堆積土砂のコントロールに焦点を絞って実施した。ここでは、堆砂区域内の土砂堆積が進んだ時点で、中規模出水流量による土砂移動を制御するためにネットを選択し、その土砂捕捉機能を検討したところ、ネットの設置による格子上方からの土砂流出抑制効果があることが明らかとなった。

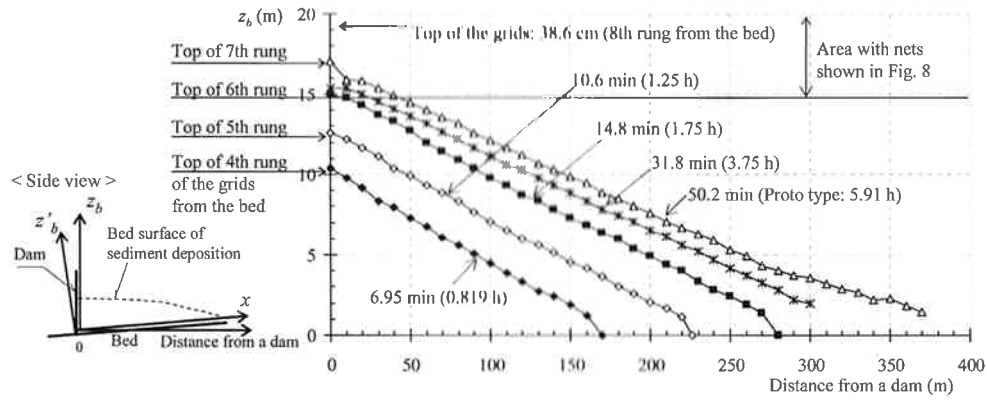


図-7 堰堤堆砂域における堆積土砂の河床縦断分布の時間変化（ネットなし）
Fig.7 Temporal changes of longitudinal bed profiles in a storage area of sabo dam without nets

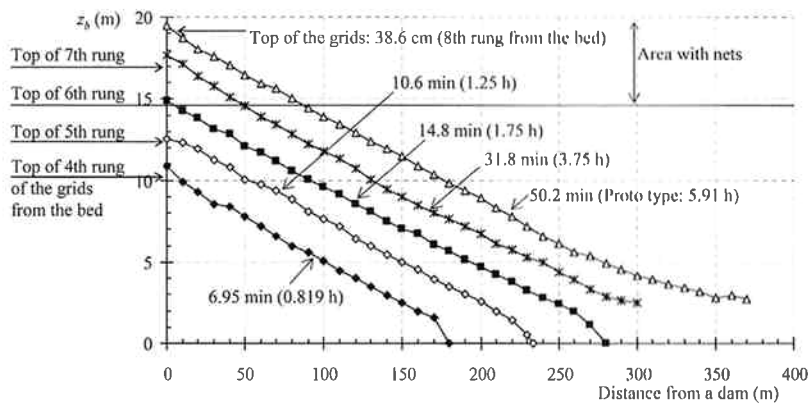


図-8 堰堤堆砂域における堆積土砂の河床縦断分布の時間変化（ネットあり）
Fig.8 Temporal changes of longitudinal bed profiles in a storage area of sabo dam with nets

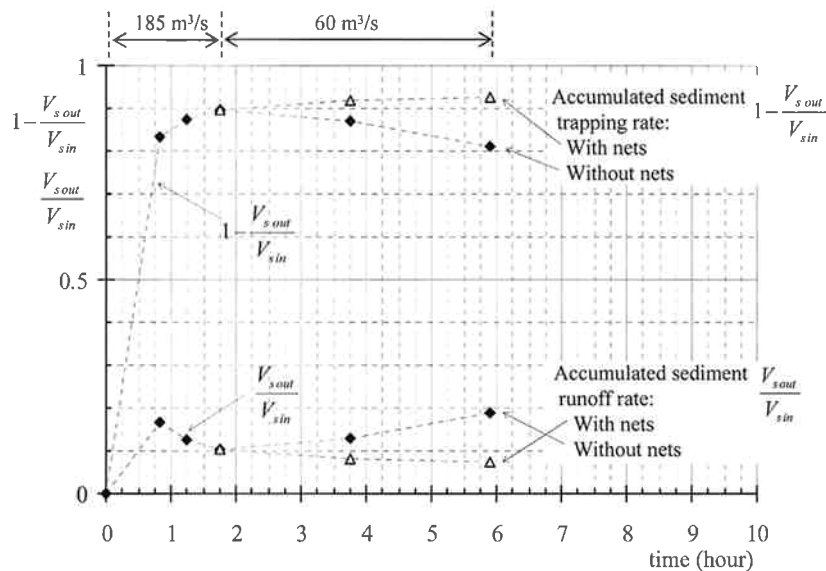


図-9 格子堰堤による土砂捕捉率および格子からの土砂通過率の時間変化
Fig.9 Temporal changes of accumulated trapping rate in a storage area of sabo dam and sediment runoff rate passing through a dam

著者らの水理模型実験¹³⁾によれば、堰堤にある程度の土砂が捕捉された後、中規模出水流量が給水されると、堰堤内の土砂堆積域において、土砂堆積に伴う砂州の形成とそれによる主流の偏流によって、巨礫成分以外の細砂成分が移動して、格子堰堤の格子の鉛直上方部からの土砂流出が大きくなることが分かっている。本実験では、川幅拡幅や弯曲などの実地形の再現を行っていないが、前報¹¹⁾で定性的に示した結果と同様に、格子部の鉛直上方部に位置する格子からの細粒成分の土砂流出が見られ、しかも、細粒成分の土砂流出が大きいと云った結果が得られた。これは、格子を閉塞する巨礫成分が移動し難くなるために生じる現象であることを示している。このような土砂流出の制御法としては、格子堰堤の格子間内に水平・鉛直部材を機能部材として設置するよりも、ネット等の鋼製柔構造物の設置による手法が簡便であると思われる。

なお、本研究の成果は、次のような状況にも拡張ができると考える。例えば、流砂が活発な流域において、格子間隔が d_{95} の1倍よりも大きい格子が設置された場合、格子下段の土砂捕捉を促進するために、ネットを設置すれば、格子堰堤による土砂捕捉機能が向上する。

現在、格子堰堤を計画するにあたって d_{95} を算出する際に、土砂捕捉に対する安全側を想定して、河床巨礫の95%粒径(d_{95})の1倍というよりは、むしろ、中規模出水流量による流砂成分の d_{95} の1倍程度と見られるような狭い格子間隔を設定する傾向も見受けられる。この場合、格子間隔は必要以上に狭く設計されることとなり、実際の格子による土砂捕捉効果に比べて、過大設計・過大積算となる可能性がある。

実験結果にも見られるように、格子堰堤による堆砂は、河床に最も近い最下段の格子の閉塞が始まると、一気に進みやすくなる。従って、必要に応じて最下段の格子付近にネットを設置することにすれば、計画時に、必要以上に水平・鉛直部材間隔を調整して格子間隔を小さくする必要もないし、鋼製格子が建設されてからでも、格子にネット等の機能部材の設置により、万一、実際の河床材料の d_{95} に比べて格子間隔が広く設計された場合でも、土砂捕捉機能を確保することができる。

さらに、ネットを取り外し可能な設置方法にすれば、堆砂高さに応じた柔軟な対策が行えたとともに、繰り返し使用が可能となれば経済的である。これらは、特に、計画上の土石流区間でも、掃流や土砂濃度の小さい土砂流が発生する領域で、格子間隔と流砂の最大径との関係がアンバランスになる際の土砂捕捉を行う時には有効な方法と思われる。

謝 辞

本研究で利用したデータのほとんどは、筆者らが国土交通省富士川砂防事務所の業務で実施した水路実験・水理模型実験(日本工営(株)中央研究所にて実施)により

得られたものである。データの使用と発表を快諾して頂いた富士川砂防事務所の皆様方に感謝致します。

参考文献

- 1) 柿徳市：砂防水理試験(3種)の概要報告, 新砂防, 27, p. 21-30, 1958
- 2) 池谷浩・上原信司：スリット砂防ダムの土砂調節効果, 土木技術資料, 22-7, p. 365-370, 1980
- 3) 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, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 32, No. 3, p. 37-44, 1980
- 4) 芦田和男・江頭進治・栗田三津雄・荒牧浩：透過性砂防ダムの土石流調節機構, 京都大学防災研究所年報, 30 B-2, p. 441-456, 1987
- 5) 水山高久・小橋澄治・水野秀明：格子型ダムのピーク流砂量減少率に関する研究, 砂防学会誌(新砂防), Vol. 47, No. 5, p. 8-13, 1995
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術センター砂防研究室：土石流・流木対策設計技術指針解説, 国土技術政策総合研究所資料, 第365号, 73 pp., 2007
- 7) 水山高久・小田晃：土石流渓流におけるスリット砂防ダムの土砂捕捉機能, 砂防学会誌, Vol. 52, No. 6, p. 56-60, 2000
- 8) 高橋保・中川一・里深好文・王浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル, 水工学論文集, Vol. 45, p. 703-708, 2001
- 9) 里深好文・水山高久：格子型ダムによる土石流の調節に関する数値解析, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 6, p. 21-27, 2007
- 10) 堀内成郎・赤沼隼一・小川和彦・倉岡千郎・杉山実・森田威孝・伊藤隆郭・水山高久：直線水路を用いた格子型ハイダムの土砂捕捉機能に関する模型実験, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 2, p. 29-36, 2009
- 11) 堀内成郎・赤沼隼一・小川和彦・倉岡千郎・杉山実・森田威孝・伊藤隆郭・水山高久：格子型ハイダムの土砂コントロール機能を評価するための水理模型実験, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 2, p. 37-44, 2009
- 12) 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, p. 3-8, 1996
- 13) 田畑茂清・渡正昭・守山浩史・下条和史：改良式ワイヤネット工の改良と捕捉実績, 平成16年度砂防学会研究発表会発表要集, p. 120-121, 2004
- 14) 今井一之・樋口順・葛西俊一郎・門間敬一・下条和史：上々堀沢ワイヤネット工の変形と設計に関する調査, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 4, p. 22-29, 2005
- 15) Graf, C. et al.: Field observation in barrier systems against debris flows, S. S. Chernomoretz (ed.), Proc. of the International Conference DEBRIS FLOWS-Disasters, Risk, Forecast, Protection, Pyatigorsk, Russia, 22-29 September 2008, p. 339-342, 2008
- 16) Wendeler, C. et al.: Hazard prevention using flexible multi-level debris flow barriers, Interpret 2008, Conference Proceedings, Vol. 1, p. 547-554, 2008
- 17) Denatale, J. S. et al.: Response of flexibility wire rope barriers to debris-flow loading, C. L. Chen (ed.), Proc. of 1st Int. Conf. of Debris-Flow Hazards Mitigation, San Francisco, California, U. S. A., August 7-9, ASCE, p. 616-625, 1997
- 18) 村本嘉雄・藤田裕一郎：中規模河床形態の分類と形成条件, 第22回水理講演会論文集, p. 275-282, 1978

(Received 10 August 2010 ; Accepted 25 January 2011)