

ハイドログラフの違いが砂防堰堤の土砂捕捉効果 や流量低減効果に与える影響に関する水路実験

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF HYDROGRAPH ON THE EFFECTIVENESS OF SABO DAM

松本 直樹¹・内田 太郎¹・桜井 亘¹・

松原 智生²・西口 幸希²・日名 純也²

Naoki MATSUMOTO, Taro UCHIDA, Wataru SAKURAI,

Tomoo MATSUBARA, Yuki NISHIGUCHI and Junya HINA

¹国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

E-mail: matsumoto-n92ta@nilim.go.jp

²株式会社建設技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

Key Words: experimental study, hydrograph, sabo dam type, facility effect

1. はじめに

砂防堰堤の土砂捕捉機能に関する研究は、水路実験や数値解析等によりこれまで数多く実施されてきており、透過型砂防堰堤や不透過型砂防堰堤等砂防堰堤の型式によらず土石流に対する砂防堰堤の土砂捕捉効果についての知見は多く得られている^{1)~3)}。しかし、既往の研究では、比較的急勾配な土石流区間(10°以上)を流下する土砂濃度が高い土石流を対象にした、砂防堰堤による土砂の捕捉に関する検討が多く、比較的緩勾配な土石流区間(5°程度)を流下する土砂濃度が低い土石流に対する検討は少なく、松本ら⁴⁾の検討により、土砂は捕捉するものの、堰堤下流への流出流量は大きく低下しない可能性があることが指摘されている。また、松本ら⁴⁾の検討を含む既往の検討の多くが、流量一定の矩形のハイドログラフで検討されているため、立ち上がりの傾きが急で、継続時間が短いハイドログラフをもつ山地流域で発生する土石流に対する砂防堰堤の施設効果の検討が必要である。また、砂防堰堤の型式の違いは、水及び土砂の挙動に大きな影響を及ぼすことが示されてきている^{例えば、5)}ことから、現在土石流対策

で広く建設されている不透過型砂防堰堤や透過型えん堤等堰堤の型式の違いによる効果の検討も必要であると考えられる。そこで、本報告は、土砂濃度が低い土石流に対する緩勾配区間に設置した砂防堰堤の施設効果に関して、ハイドログラフの違いと砂防堰堤の型式の違いが砂防堰堤の土砂の捕捉効果や流量低減効果等の施設効果にどのような影響を与えるか検討するために水路実験を実施した。

2. 実験の概要

(1) 実験方法

実験は1/30程度の縮尺を想定し、実験装置は、図-1に示す長さ10m、幅30cm、高さ50cmの変勾配式水路を用いた。勾配は、5°とした。実験砂は、過去の既往災害等を考慮し、図-2に示すとおり95%粒径32mm、50%粒径8mmの混合砂を用いた。また、実験は、固定床とし、粗度として実験砂を水路床に貼り付けた。水は水路上流端から供給し、電動バルブの開閉をプログラミングし、供給水量を制御した。土砂の供給は、設定したハイドログラフを元に、芦田・高橋・水山の緩勾配式⁶⁾で計算した平衡流砂量

を水路上流部より人力により供給した。

計測項目は、土石流の水深4点（堰堤設置地点より下流側1m地点、上流側25cm、50cm、1m地点）及び水路末端（堰堤下流2.25m）における水及び土砂の流出量の時系列変化を計測した。水深は、超音波式水位計を各地点に設置し計測した。流量は、予備実験で堰堤から1m下流側の地点の水位-流量の関係を無施設時及び後述する各砂防堰堤の設置時のそれぞれで求めておき、水位から流量に換算して求めた。また、土砂の流出量については、水路下流端で、人力により1分ごとに水及び土砂を直接採取し計測した。また、実験状況は、水路側壁及び鉛直方向からビデオで撮影した。



図-1 実験水路

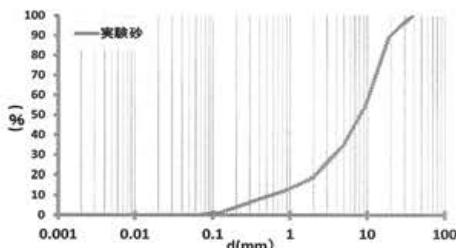


図-2 実験砂の粒径加積曲線

(2) 実験条件

a) ハイドログラフの設定

本実験では、ハイドログラフの違いが砂防堰堤の施設効果に与える影響を検討するために、検討の基本となるハイドログラフを、山地流域で発生する土石流のように、立ち上がりが急で、継続時間が短いハイドログラフとして1通り設定し、それを基準としてピーク流量や継続時間を変えたハイドログラフを3通り設定した。基本となるハイドログラフの設定に関しては、土石流の発生頻度が高い信濃川水系梓川流域に位置する焼岳上々堀沢（流域面積0.8km²）や姫川水系浦川流域に位置する金山沢（流域面積1.8km²）で観測された流量波形⁷⁾を参考に、立ち上がりの傾きが135 l/sec²、ピーク流量18 l/sec（フルードの相似則を用いて現地流量換算した場合の流量88700 l/sec）、継続時間が13.45分（フルードの相似則を用いて現地時間換算した場合の時間73分）とした。以下では、この基本ケースのハイドログラフをハイドロ1のケースと呼ぶ。ハイドロ1のケースの供給土砂量は、堰堤高は25cm（根入れを考慮すると

現地で堤高9.5~10.5m）とし、堆砂勾配が元河床の2/3勾配で堆積する場合の容量（以下、「堰堤容量」と等しくなるようにした。その他、ハイドロ1のケースのピーク流量と供給土砂量と同じになるように矩形のハイドログラフとしたケース（以下、「ハイドロ2のケース」）、ピーク流量がハイドロ1のケースのピーク流量の半分（9 l/sec）で供給土砂量がハイドロ1のケースと同じ条件の台形のハイドログラフのケース（以下、「ハイドロ3のケース」）、ハイドロ1のケースのピーク流量と同じで供給土砂量がハイドロ1のケースの1.5倍の台形のハイドログラフのケース（以下、「ハイドロ4のケース」という。）を設定した。各ハイドログラフは図-3に示す。なお、供給地点での土砂濃度は、2.2~3.3%である。

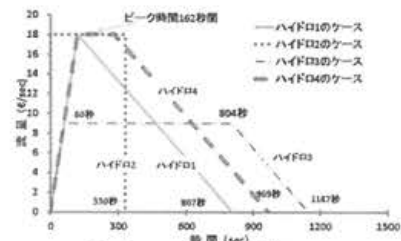


図-3 ハイドログラフ

b) 堰堤の型式

堰堤の型式は、図-4(a)~(c)に示す、不透過型1種類（図4(a)）、透過型2種類（図4(b), (c)）を設定した。透過型は、鋼製スリットタイプで透過部の幅を、水平・鉛直純間隔ともに95%礫径の1.0倍とし、開口幅は、堰上げが発生しにくい透過部が広い型（開口部の幅/水路幅1.0倍）と堰上げが発生しやすい透過部が狭い型（開口部の幅/水路幅0.5倍）の2種類とした。

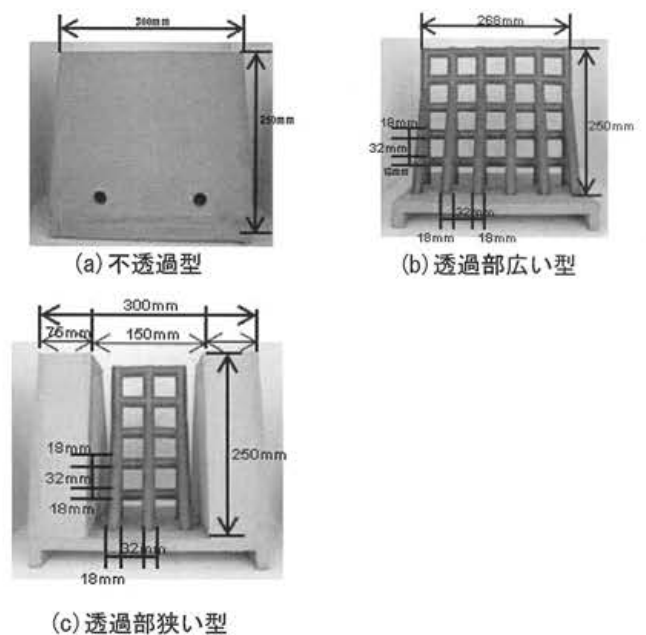


図-4 砂防堰堤

(3) 実験ケース

表-1 に示すとおり、2.(2)(a)に示した 4 パターンのハイドログラフと2.(2)(b)に示した3種類の堰堤に堰堤が無い場合の条件を加えた 4 パターンを組み合わせた計 16 ケース実施した。

表-1 実験ケース

ケース	堰堤型式	ハイドログラフ
1	なし	ハイドロ1
2		ハイドロ2
3		ハイドロ3
4		ハイドロ4
5	不透過	ハイドロ1
6		ハイドロ2
7		ハイドロ3
8		ハイドロ4
9	透過 (透過部広い型)	ハイドロ1
10		ハイドロ2
11		ハイドロ3
12		ハイドロ4
13	透過 (透過部狭い型)	ハイドロ1
14		ハイドロ2
15		ハイドロ3
16		ハイドロ4

3. 実験結果

図-5(a)~(c)は、ハイドロ 1 のケースにおける各堰堤の土砂の堆積過程をビデオから 1 分ごとに抜き出したものである。また、図-6(a)~(c)は、堰堤の型式毎の、堰堤下流への流出流量、水路下流端における流出土砂量及び堰堤上流側 25cm 地点で計測した水位観測結果を示す。

(1) 土砂の堆積過程

図-5 から、不透過型のケースは、土砂・水の供給開始直後から、堰堤上流で湛水が始まり、供給開始

1 分後には越流が始まっていた。また、土砂は、湛水の上流端付近で堆砂肩を形成し、上流から下流へ堆砂肩が移動した。供給開始後 8~9 分頃に堆砂肩が堰堤地点に達し、11~12 分頃に堰堤地点において堰堤天端まで土砂が堆積した。

透過部が広い型の場合、水・土砂の供給開始直後は、水は透過部から流出し、土砂も供給開始直後に堰堤まで到達した。土砂は、供給開始 1 分 30 秒後には、先頭部により透過部が閉塞され土砂の堆積が始まった。その後、堆砂域は上流に遡上し、供給開始 6~7 分頃に堰堤地点において、堰堤天端まで土砂が堆積した。水は、2 分 30 秒~3 分頃に透過部からの流出に加え、堰堤天端から越流も始まった。

一方、透過部が狭い型の場合、水・土砂の供給開始直後は、水だけが堰堤に到達し、透過部から下流へ流出し、供給開始 1~2 分頃に顕著な堰き上げを起こした。土砂は、不透過型と同様に堆砂肩を形成しながら上流から下流へ移動した。供給開始 2 分頃に堆砂肩が堰堤地点に達し、7~8 分頃に堰堤地点において、天端まで土砂が堆積した。水は、3~4 分頃に透過部からの流出に加え、堰堤天端から越流も始まった。

その他のハイドログラフのケースについても、堰堤に土砂が到達する時間や満砂する時間に違いがあったものの、不透過型、透過部が広い型及び透過部が狭い型それぞれハイドロ 1 のケースと同様の堆積過程を示した。以上のことから、土砂の堆積過程は、ハイドログラフの違いに関わらず、堰堤の型式によって異なることが分かった。

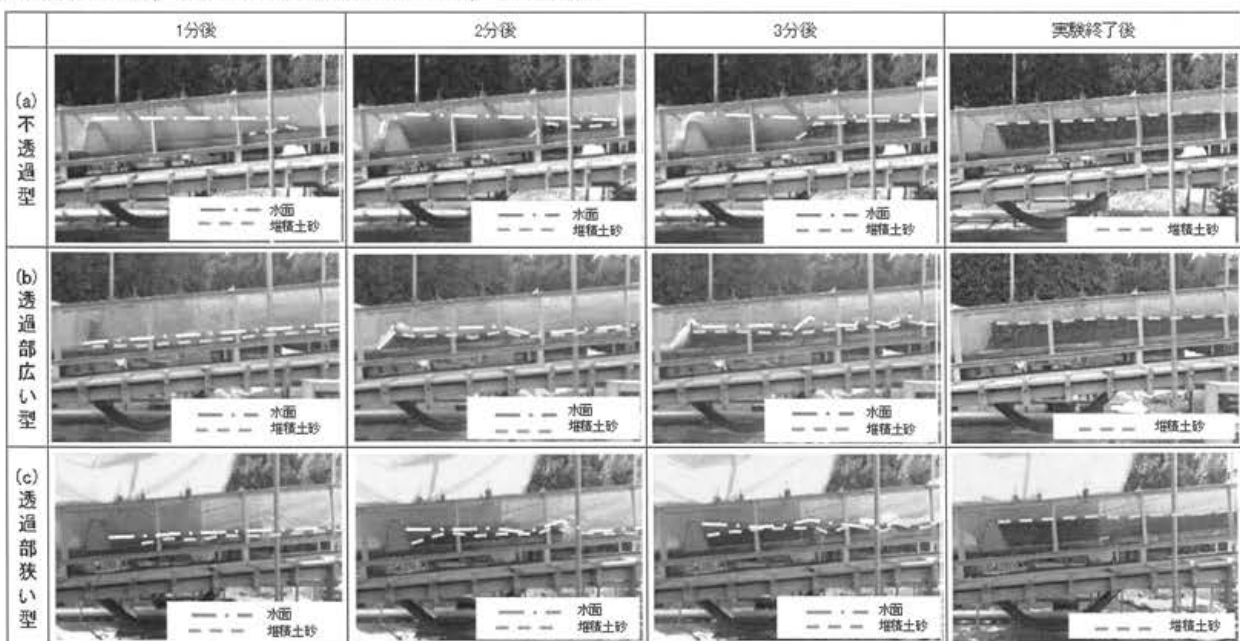


図-5 土砂の堆積過程 (a)不透過型 (ケース 5), (b)透過部広い型 (ケース 9), (c)透過部狭い型 (ケース 13)

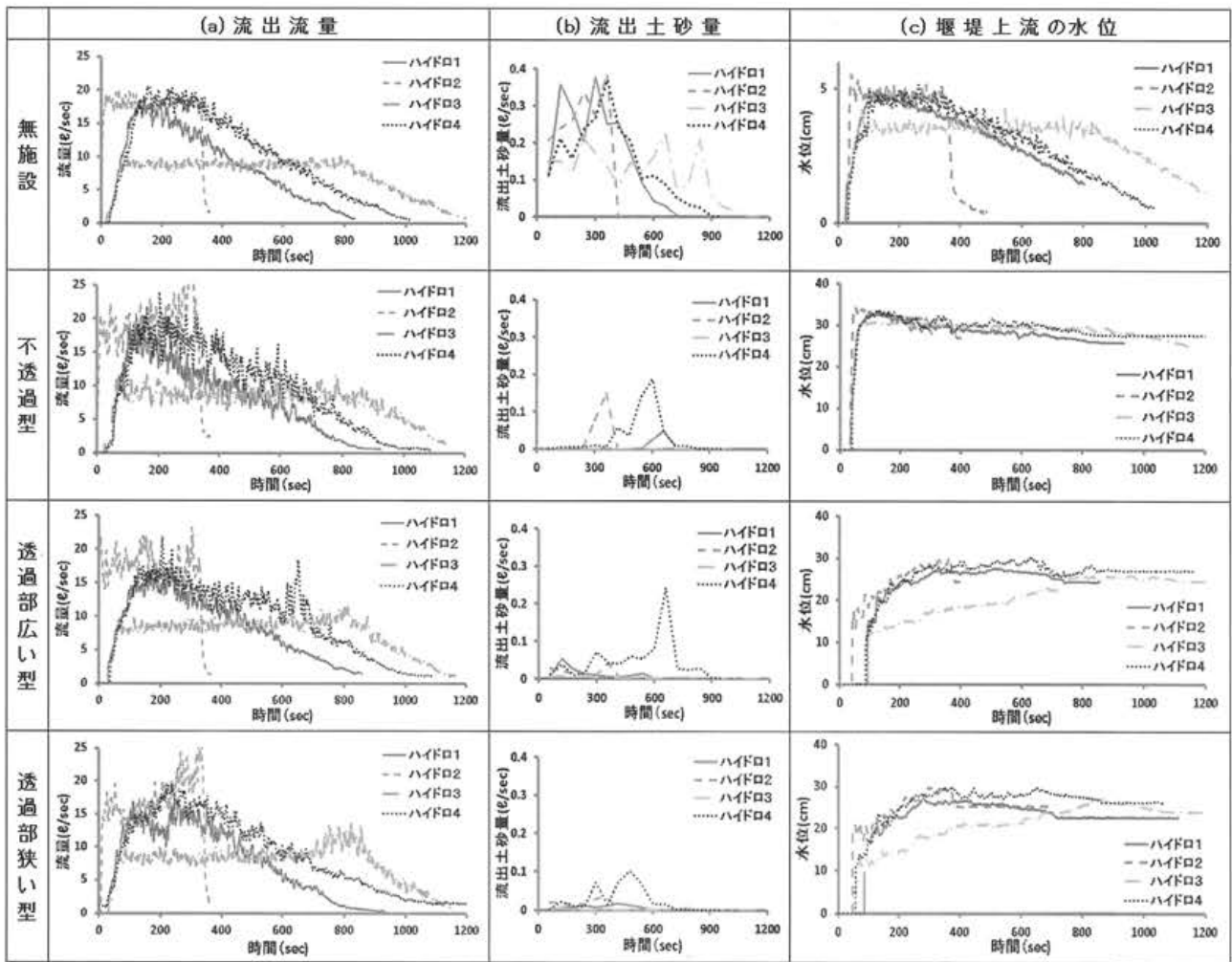


図-6 堰堤型式ごとの計測値 (a) 流出流量, (b) 流出土砂量, (c) 堰堤上流の水位

(2) 流出土砂量

図-6(b)は、水路下流端で1分ごとに直接採取した流出土砂量の計測結果である。不透過型のケースは、水・土砂の供給開始からしばらくは、下流への土砂の流出はほとんどなかったが、供給後半下流への土砂の流出が生じる場合があった。特に、ハイドロ2及び4のケースの土砂流出が多かった。透過型のケースは、ハイドログラフの違いに関係なく水・土砂の供給開始から少量ではあるが下流への土砂の流出が確認できる。また、供給土砂量が多いハイドロ4のケースでは、比較的多くの土砂流出が生じた。

a) 総流出土砂量

表-2は、各実験ケースにおける通水終了後の砂防堰堤による土砂捕捉量を示している。供給土砂量が、堰堤容量と同じであるハイドロ1~3のいずれのケースにおいても、堰堤の型式、ハイドログラフの違いによらず堰堤容量に対する捕捉量の割合は90%以上となった。すなわち、堰堤から下流への総流出土砂量は、いずれの条件においても、総供給土砂量の10%未満となった。また、堰堤容量の1.5倍の土

砂量を給砂したハイドロ4のケースにおいては、型式によらず堰堤容量以上の土砂量を捕捉した。

表-2 土砂捕捉量

ケース	堰堤形式	堰堤容量 (ℓ)	供給土砂量 (ℓ)	捕捉量 (ℓ)	捕捉率	
5	不透過	321	321	302	0.94	
6				316	0.98	
7				319	0.99	
8	透過 (透過部広い型)		321	321	479	1.27
9					303	0.94
10					294	0.91
11	透過 (透過部狭い型)		321	321	313	0.97
12					383	1.19
13					307	0.96
14	透過 (透過部狭い型)		321	321	296	0.92
15					316	0.98
16					479	1.28

b) 最大流出土砂量とピーク時付近の流出土砂量

図-7は、単位時間あたりの最大流出土砂量と供給流量ピーク時付近(ハイドロ1のケース:供給開始2~3分,ハイドロ2のケース:供給開始5~6分,ハイドロ3のケース:供給開始11~12分,ハイドロ4のケース:供給開始4~5分)の単位時間あたりの流出土砂量について、堰堤無しのケース(ケース1~4)の流出土砂量に対する割合を示したグラフである。すなわち、割合が0に近いほど、下流への流出

が少ないことを示している。なお、ピークが一定時間続くハイドロ 2~4 のケースは、ピーク後半に設定している。

図-7 から、ハイドロ 2 と 3 のケースは、供給流量ピーク時に下流への土砂流出が最大となり、ハイドロ 1 と 4 のケースは、ハイドロ 1 の透過幅が広いケース 9 を除き供給流量ピーク時から遅れて流出していることがわかる。また、ハイドロ 4 のケースは、供給土砂量が大きいため堰堤満砂後に土砂が多く流出している。ただし、ハイドロ 4 のケースの場合であっても、無施設時の 0.65 倍以下であり、透過幅の狭いケースが最小となった。

供給流量ピーク時付近の流出土砂量に関しては、不透過型のケースは、ハイドロ 2 のケース 6 においては、下流への土砂の流出が大きい結果となったものの、その他のハイドロ 1, 3, 4 のケースは、供給流量ピーク時においては、ほとんど下流へ流出しなかった。一方、透過型のケースは、透過部が広い型は、0.04~0.16 の間を示し、透過部が狭い型は、0.03~0.10 を示したことから、やや透過部が狭い型の方が、供給流量ピーク時における堰堤下流への流出土砂量が少ない結果となった。特に、ハイドロ 1 のケースについては、透過部が狭い型の方が広い型に比して 20% になった。

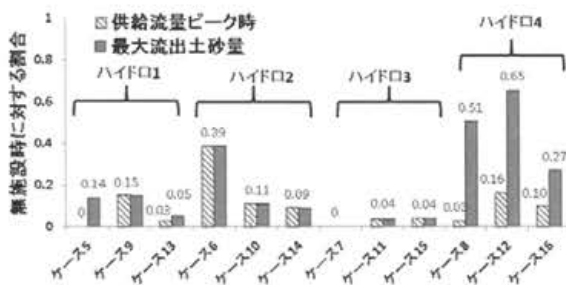


図-7 無施設時の実験ケースに対する最大流出土砂量及び供給流量ピーク時の流出土砂量の割合

(3) 流出流量

図-6(a)に示す堰堤下流への流出流量は、不透過型のケースでは、堰堤無しのケースと比較して、大きな違いは見られず、ピーク流量の大きさ及びピーク時間ともに、ほぼ差はなかった。

一方、透過型のケースは、透過幅によらずハイドロ 1 のケースにおいて、ピーク流量が無施設時や不透過型堰堤設置時に比べて 20% 程度少なかった。その他のハイドログラフのケースは、ハイドロ 4 のケースにおいて供給流量ピーク時の始めの方でやや減少する傾向が見られるものの、ピーク流量の大きさ及びピーク時間ともに、顕著な違いは見られなかった。

(4) 堰堤上流の水位変動

図-6(c)は、堰堤上流側 25cm 地点で計測した水位観測結果である。不透過型のケースは、ハイドログラフの違いに関係なく、水位のピーク時刻は、無施設時と同様に大きな差はない。一方、透過型のケースは、いずれのハイドログラフにおいて、水位のピーク時間が遅れていることがわかる。特に、ピーク流量が小さいハイドロ 3 のケースは、顕著に遅れていることがわかる。

4. 考察とまとめ

(1) 砂防堰堤の型式とハイドログラフの違いが流出土砂量に与える影響

ハイドロ 1~3 のケースは、ハイドログラフの形、砂防堰堤の型式によらず、いずれも総供給土砂量の 90% 以上が堰堤に捕捉され、捕捉機能は型式によって差は見られなかった。

供給流量ピーク時付近における下流への流出土砂量は、不透過型については、ハイドロ 2 のケースを除き、堰堤により土砂が捕捉されたため下流へはほとんど流出しなかった。ビデオ画像とあわせて考えると、供給流量ピーク時付近においては、堆砂肩が堰堤地点に到達しておらず、堰堤容量に堆砂が進行していない空間があるため、下流への流出がなかったと考えられる。また、ハイドロ 2 のケース 6 においても、供給流量ピーク時付近の流出土砂量が多いのは、ピークが継続している時間の後半（供給開始 5~6 分頃）に堰堤を乗り越えるような現象が生じたためであり、このように堰堤を乗り越えるような現象はその他のハイドログラフのケースでも生じているが、供給流量ピーク時付近からは遅れて生じている。

一方、透過型については、ハイドロ 1 のケースにおいて、透過部の幅が広い型のケース 9 と透過部の幅が狭い型のケース 13 を比較した場合、透過部の幅が狭い型のケース 13 の方がピーク時の流出土砂量が小さくなった。この理由として、ビデオ画像に基づき土砂の堆積過程から考察してみると、透過部が広い型の場合、図-5(b)に示すように、土砂は堆砂肩を形成することなく、土石流が堰堤まで一気に到達し、供給流量ピーク時には、土石流の先頭部により透過部を閉塞し土砂が堆積しており、堰堤まで到達した土砂の一部が透過部から流出したものと考えられる。一方、透過部が狭い型の場合、図-5(c)に示すように、堰上げにより土砂が堆砂肩を形成しながら堆積しており、供給流量ピーク時に堰堤まで堆積土

砂が到達していないことから、透過部からの土砂の流出が小さくなったと考えられる。このように堆積過程の違いから、供給流量ピーク時の流出土砂量の差が生じたと考えられる。

(2) 砂防堰堤の型式とハイドログラフの違いが流出流量及び堰堤上流の水位に与える影響

不透過型に関して、図-5(a)の堆積過程からわかるように、堆砂肩を形成しながら堆積しているものの、流量供給開始後すぐに堰堤上流側は満水し堰堤を乗り越えて水が流出し、また、堰堤上流の水位変動は貯留変化が小さいため、下流への流出流量は、供給流量とほぼ同等の値となったと考えられる。

一方、透過型に関しては、ハイドロ1のケースにおいて、ピーク流出水量が少ない結果となった。図-8に供給流量ピーク時前後の堰堤上流の水位と堰堤下流の流出水量を拡大した。

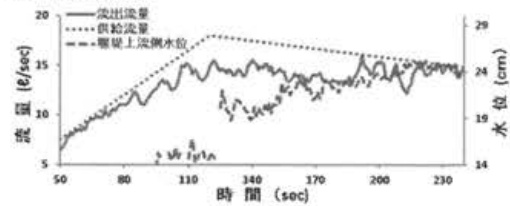
透過型の透過部の幅が広い型の堆積過程を示した図-5(b)から、供給流量ピーク時には、土砂が堰堤まで到達し堆積しており、ビデオ映像から図-8に示した120~130秒付近で生じた水位上昇は主に土砂の堆積によるものであることが確認された。流出流量の低下が生じた要因として、流下している水の一部が堆積土砂に浸透し、浸透流を形成したことにより平均的な流速が遅くなった結果、下流への流出が一時的に遅れ、流出流量が低下した可能性が考えられる。さらに、表-2で示したようにハイドロ4のケースにおいても、透過型で多くの土砂が捕捉されたことにもこの浸透流が寄与している可能性が考えられる。ただし、浸透流と表面流ではスケール依存性が異なるため、本実験では、浸透流の影響が過大に評価されている可能性が考えられる。

また、透過型の透過部の幅が狭い型の堆積過程を示した図-5(c)から、供給流量ピーク時には土砂が堰堤に到達していないことから、堰堤直上流の水位の上昇は堰堤による堰上げによって生じたものと考えられる。実際、図-8に示したように110~180秒辺りでは、堆砂は堰堤地点で天端まで到達していないが水位は上昇し続けていた。すなわち、堰堤上流側に堰上げによる水の貯留が、流出流量の低下につながったものと考えられる。

(3) まとめ

土砂濃度が低い土石流に対する緩勾配区間に設置した砂防堰堤の施設効果に関して、ハイドログラフの違いと砂防堰堤の型式の違いが砂防堰堤の施設効果にどのような影響を与えるか検討するために水路

(a) 透過部広い型



(b) 透過部狭い型

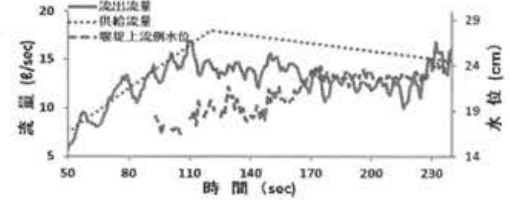


図-8 ハイドロ1のケースの透過型砂防堰堤の供給流量と流出流量及び堰堤上流の水位

実験を実施した結果、堰堤型式により総流出土砂量に違いは見られなかったが、ハイドロ1のケースのように、立ち上がりが急で、継続時間が短い現象に関しては、堰堤型式により土砂の堆積過程や水の流出過程が異なるため、水・土砂の流出量の時間変化に違いが見られた。今後は出水のピーク流量や継続時間の予測精度を高めるとともに、堰堤の型式の違いを定量的に評価できる技術開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 瀬尾克美, 水山高久, 上原信司: 砂防ダムによる土石流の制御に関する実験的研究, 新砂防, Vol. 36, No. 2, pp. 17-23, 1983.
- 2) 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, Vol. 47, No. 5, pp. 8-13, 1995.
- 3) 堀内成朗, 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, pp. 29-36, 2009.
- 4) 松本直樹, 内田太郎, 蒲原潤一, 長山孝彦, 伊藤隆郭, 渡部春樹: 砂防堰堤上下流における土石流の流量・水深の変化に関する水路実験, 砂防学会研究発表会概要集 B, 256-257, 2015.
- 5) 渡辺正幸, 水山高久, 上原信司: 土石流対策砂防施設に関する検討, 新砂防, Vol. 32, No. 4, pp. 40-45, 1980.
- 6) 芦田和男, 高橋保, 水山高久: 山地河川の掃流砂量に関する研究, Vol. 30, No. 3, pp. 9-17, 1978
- 7) 神野忠広, 長谷川達也, 石田哲也: VTR 判読による土石流流動特性について, 砂防学会研究発表会概要集, 336-337, 2009

(2016. 5. 31 受付)