

堆砂条件を考慮した不透過型砂防堰堤の 捕捉機能に関する検討

STUDY ON SEDIMENT TRAPFUNCTION OF CLOSED TYPE SABO DAM CONSIDERING INITIAL BED CONDITIONS

中谷 加奈¹・麻野 佑介¹・長谷川 祐治²・里深 好文³

Kana NAKATANI, Yusuke ASANO, Yuji HASEGAWA and Yoshifumi SATOFUKA

¹ 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: nakatani.kana.4z@kyoto-u.ac.jp

² 広島大学大学院先進理工系科学研究科 (〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1)

E-mail: y-hasegawa@hiroshima-u.ac.jp

³ 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Key Words: sabo dam, closed type, sediment trap function, initial bed conditions, laboratory experiments

1. はじめに

近年, 局地的豪雨による土砂災害が頻発傾向にある^{例え1)}。砂防堰堤が設置された溪流では, 土石流発生時に堰堤が土砂を捕捉して下流の被害を防止, 軽減した事例が報告される²⁾。砂防堰堤には種々の形式が存在して, 2016年に改訂された砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)³⁾では流木対策への有効性から「透過構造を有する施設を原則とする」と従来の指針⁴⁾では示されなかった堰堤形式の選定に関する方針が新たに示された。一方, 砂防施設は明治時代以降に整備が進み, 整備された砂防堰堤は60,000基以上に達して, 竣工後30~50年以上経過した施設が多数現存する⁵⁾。これまでに整備された砂防堰堤の中で透過型は少なく, 多くは不透過型である^{6,7)}。近年, 不透過型砂防堰堤も土砂捕捉効果を十分に発揮するためには除石により空の状態を確保することが求められる^{8,9)}。しかし, 設置から長期間経過した堰堤等では, 平常時の土砂流出により堰堤の上流側に土砂が堆積する事例も見られ, 全ての堰堤を常に空の状態に保つことは難しい。また, 不透過型砂防堰堤の土砂捕捉機能は空き容量が十分にある空の状態を対象にして, 無施設の状態と比較した検討が多く^{例え10)}, 初期堆砂の有無や堆砂量の違い

などの堆砂条件を考慮した土砂捕捉効果や土砂流出抑制に関する定量的な検討は十分に行われていない。

本研究では, 不透過型砂防堰堤の堆砂条件が, 堰堤の土砂捕捉量や土砂流出の抑制効果に及ぼす影響を把握することを目的として, 水理実験により検討した。

2. 実験方法

実験には長さ450cm, 幅10cm, の矩形断面水路を用いて(図-1)勾配は15°とした。水路床にほぼ



図-1 実験水路概観。

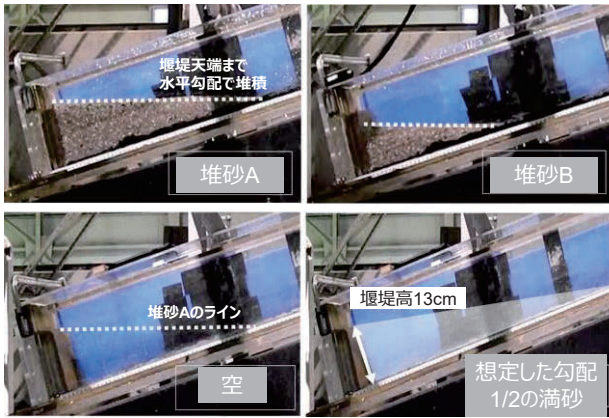


図-2 堰堤高 13cm での堆砂条件（左上：堆砂 A, 右上：堆砂 B, 左下：空）と勾配の 1/2 の満砂（右下）。

一様な粒径 1.4 mm の砂を粗度として貼りつけた。実験砂には平均粒径 2.81 mm, 密度 2.59 g/cm³, 空隙率 0.48 の珪砂を用いた。不透過型砂防堰堤の模型は高さの異なる 3 種類（13cm, 10cm, 7cm）を用いて、水路下流端に設置した。堰堤上流側の堆砂条件（以降、初期堆砂とする）は、堰堤天端まで水平勾配で堆積（堆砂 A, 図-2 左上）、堆砂 A の 0.5 倍の土砂量を水平勾配で堆積（堆砂 B, 図-2 右上）、空の状態（図-2 左下）の 3 種類とした。

本検討では、指針^{3),4)}が示す計画堆砂勾配を参考として、堰堤天端から水路勾配の 1/2 倍の勾配の状態を満砂状態として（図-2 右下）、満砂の土砂量（以降、供給土砂量と呼ぶ）を供給した。供給土砂は、水路下流端から 360-450 cm の区間に台形状に敷き詰めて、電動ポンプにより水路上流端から水を 0.61 l/s で供給し、侵食により土石流を発生させた。水路上流端への供給開始から 15 秒後にポンプを停止して、その後減水しながら 7.5 秒後に水供給が停止した。上流に敷いた土砂は堰堤高 13cm の供給土砂量 6,421cm³ を供給したケースでは、約 10 秒で全て侵食される。

堰堤で捕捉された土砂を捕捉土砂とした。なお、通水開始前に堰堤上流で堆積させた土砂量は除いている。また、堰堤から下流に流出した土砂を流出土砂とした。堰堤無しの条件では、下流端から流出した土砂が流出土砂である。流出土砂は、堰堤を設置した条件では、堰堤の天端から流出が開始した時刻から 3 秒間の採取を連続で 4 回行い、合計 12 秒間採取した。堰堤無しの条件では、下流端に流れが到達した時刻から同様に 12 秒間採取した。12 秒以降の流出では、ポンプ停止後に減水した流れにより堆砂末端部の侵食が顕著にみられた。本研究では、最も堰堤の捕捉機能が発揮する条件を把握するために、

天端の越流開始から 12 秒間で流出した土砂を流出土砂として扱った。

堰堤の空き容量は、空の状態における満砂の土砂量を基本として、初期堆砂を考慮した堆砂 A, B では満砂の土砂量から初期堆砂の量を差し引いた容量である。

表-1 の左に実験ケースを示す。表中の土砂量は全て空隙込みの量である。実験は各条件で 3 回実施することを基本とした。Case 1-30 では上流に敷いた土砂も、堰堤上流側の土砂も、飽和に近い条件となるように実験の開始直前まで水を供給した。それぞれの堰堤高について、比較のため堰堤無しで土砂を供給する条件を 1 回実施した（Case 10, 20, 30）。実際の初期堆砂は、土石流発生前に水が十分流下した飽和、あるいは堰堤上流で降雨流出がなく比較的乾いた不飽和の両方の状態が想定される。そこで、堰堤高 13cm は上流に敷く土砂は飽和、堰堤上流の初期堆砂は不飽和（浸潤面が土砂厚の半分の高さ）とした堆砂 A, B の条件を各 1 回試行した（Case 31-32）。

堰堤の捕捉効果を検討するため、以下のように、 R_c と R_f を定義した。

$$R_c(\%) = \frac{\text{捕捉土砂量}}{\text{供給土砂量}} \times 100 \quad (1)$$

$$R_f(\%) = \frac{\text{捕捉土砂量}}{\text{空き容量}} \times 100 \quad (2)$$

3. 実験結果

実験結果の捕捉土砂量, R_c , R_f を表-1 の右に示す。実験観察より、土石流の土砂濃度が時間とともに低下して、通水後半では堆砂末端部が侵食されて流出することを確認した。飽和の条件では、 R_c , R_f が 100% を超えるケースはなく、堰堤の元河床勾配 1/2 として設定した満砂の範囲内に、堆積が収まっていた。 R_c は Case 9 で最大 77.8% を、 R_f は Case 2 で最大 94.4% を示した。不飽和の条件では、飽和の条件と比較して R_c , R_f とも大きくなり、特に Case 31 と Case 1-3 では差が大きく、 R_f は全ケースで最大の 137.6% だった。

Case 1, 31 について流れが水平堆砂の上流端部（堆砂の末端と呼ぶ）に到達した時刻を 0s としたときの 1~6s での 1 秒毎、並びに 8s の側面から撮影した様子を図-3 に示す。飽和の Case 1 では堆砂の末端に流れが到達した後、初期堆砂上を流れが進んで堰堤に到達後（1~2s）、堆積が末端部から上流側に進行する様子が 4s 以降で顕著にみられる。一方、不飽和の

表-1 実験ケースと実験結果.

Case	実験条件				実験結果			
	堰堤高 cm	供給 土砂量 cm ³	初期 堆砂量 cm ³	堆砂 条件	空き 容量 cm ³	捕捉 土砂量 cm ³	<i>R_c</i> %	<i>R_f</i> %
1	13	6421	3154	堆砂 A	3267	3000	46.7	91.8
2						3085	48.0	94.4
3						2836	44.2	86.8
4			1578	堆砂 B	4843	4261	66.4	88.0
5						4039	62.9	83.4
6						4048	63.0	83.6
7			0	空	6421	4823	75.1	75.1
8						4804	74.8	74.8
9						4993	77.8	77.8
10	No dam	-	-	-	-	-	-	
11	10	3799	1866	堆砂 A	1933	1568	41.3	81.1
12						1455	38.3	75.3
13						1422	37.4	73.6
14			933	堆砂 B	2866	2302	60.6	80.3
15						2301	60.6	80.3
16						2378	62.6	83.0
17			0	空	3799	2641	69.5	69.5
18						2681	70.6	70.6
19						2697	71.0	71.0
20	No dam	-	-	-	-	-	-	
21	7	1862	914	堆砂 A	948	480	25.8	50.7
22						462	24.8	48.8
23						443	23.8	46.8
24			457	堆砂 B	1405	505	27.1	35.9
25						858	46.1	61.1
26						822	44.1	58.5
27			0	空	1862	1111	59.7	59.7
28						1207	64.8	64.8
29						1154	62.0	62.0
30	No dam	-	-	-	-	-	-	
31	13	6421	3154	堆砂 A	3267	4497	70.0	137.6
32	初期堆砂不飽和		1578	堆砂 B	4843	4383	68.3	90.5

Case 31 では、初期堆砂上に流れが到達すると、堆砂の末端部から下流側に流れが進むときに、初期堆砂上で急減に減速する。減速する際、流れがスムーズに初期堆砂上を流動せず、小さく盛り上がる様子が1sで確認できる。その後も、初期堆砂上で減速しながら流下するため、堆砂上の流れが下流端の堰堤まで到達するのは3~4sでCase 1と比較して遅い。初期堆砂上での減速は浸透によるものと推測される。

また、堆砂の末端からは、2~3sでも上流側への堆砂の進行が見られ、上流側への堆積はCase 1よりも早く進む。8sでの堆砂形状はCase 31の方が上流まで進行して堆積土砂も多く、Case 1の8sはCase 31

の4sの堆砂形状と近かった。このように、Case 31や32では不飽和の初期堆砂に土石流が到達すると、水が初期堆砂に浸透することで減速して堆積が進行して、飽和の条件よりも捕捉土砂量が多くなったと推測される。

飽和の条件のCase 1-30について得られた*R_c*、*R_f*の対応を図-4に示す。以降は、飽和のCase 1-30について述べる。供給土砂に対する捕捉土砂を表す*R_c*は、全ての堰堤高で初期堆砂が少ない空、堆砂B、堆砂Aの順で小さくなる。一方で、堰堤の空き容量に対する捕捉土砂を表す*R_f*は、堰堤高13cmでは初期堆砂が多い堆砂A、堆砂B、空の順で小さくなった。



図-3 堰堤高 13 cm, 堆砂 A の Case 1 (左: 初期堆砂, 飽和) と Case 31 (右: 初期堆砂, 不飽和) に土石流が堆砂の上流端部に到達した時刻 (0s) から 8s 後までの挙動.

堰堤高 10cm の R_f は, 3 ケースの平均値は堆砂 B が 81.2%, 堆砂 A が 76.7%, 空が 70.4% の順で小さくなった. 堰堤高 7cm の R_f は, 3 ケースの平均値は空が 62.2%, 堆砂 B が 51.8%, 堆砂 A が 48.7% の順で小さくなり, R_c と同様に初期堆砂が少ない方 R_f が大きい. R_f は堰堤高が高いと, 初期堆砂が多い方が大きくなるが, 堰堤高が低いと初期堆砂が多い方が小さくなった. また, 初期堆砂が同じ条件では, 堰堤高が高い方が R_c , R_f とも大きくなった.

通常, 空き容量に対して供給量が多い堆砂 A が R_f は最も大きくなると考えられ, 堰堤高が高い 13cm ではこの傾向を示す. 堰堤が高いと堆砂敷が長くなり, 土石流が堆砂敷に到達後, 堰堤天端から流出するまでの時間が長くなることで, 堆積が発生しやすくなるためである. 一方, 堰堤高 7cm では堆砂敷が短くなり, 土石流が堆砂敷に到達後, 堰堤天端から流出するまでの時間が短くなるため下流へ流出しやすくなり, 堆砂 A で R_f が最小になったと推測される. 堰堤高 10cm では, 堆砂 A と B の R_f が平均値では堆砂 B の方が A より大きくなるが, 堆砂 A の最大値 (Case 11 の 81.1%) は堆砂 B の 2 ケース (Case 14,15 の 80.2%) より大きくなったことから, 堰堤高 13cm と堰堤高 7cm の中間的な現象が発生したことが推測される.

飽和の条件の Case 1-30 について, 水路下流で 12 秒間採取した土砂の結果を図-5 に示す. 全ケースで先頭部の 0-3 秒間の流出土砂量が最大で, 時間の経過に従って小さくなる傾向を示した. 堆砂 A, 堆砂

B, 空の順に先頭部のピーク時の流出土砂量が多い. 堰堤無しの条件の Case 10, 20, 30 では, 下流端に到達してから 6 秒で全ての土砂が流出した. また, 実験観察から流出土砂の殆どは上流に敷いた供給土砂で, 供給土砂と堰堤の初期堆砂の河床交換は見られなかった.

流れの先頭部の 0-3 秒の土砂流出ピークの比較を表-2 に示す. ここでは, 堰堤無しを 1 としたときの, 堰堤有りの同条件の 3 ケースの平均値の対応を示す. 堰堤の高さに関係なく, 空が最小, 次いで堆砂 B, 堆砂 A の順に大きくなり, 土砂流出ピークの抑制においても空き容量が大きいほど堰堤の効果大きい

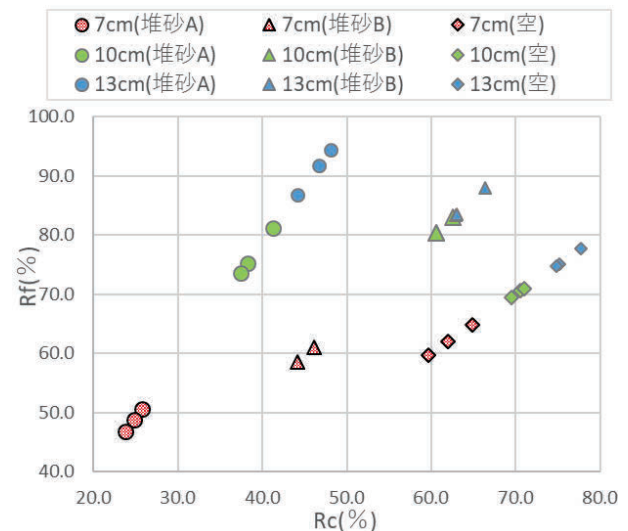


図-4 Case 1-30 の R_c と R_f の対応.

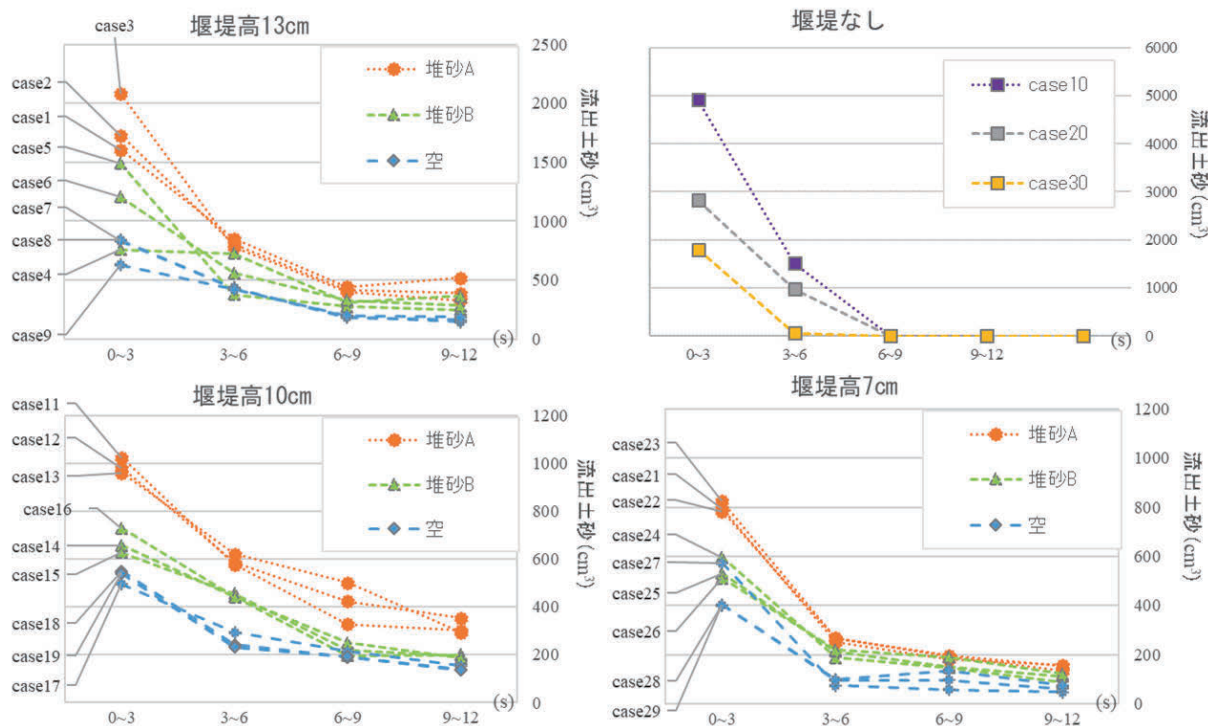


図-5 Case 1-30 の下流端からの土砂流出.

表-2 土砂流出ピークの比較 (堰堤無しを1としたときの、堰堤有りの同条件の3ケースの平均値).

堰堤高 (cm)	堰堤無しと 堆砂 A	堰堤無しと 堆砂 B	堰堤無しと 空
13	0.37	0.23	0.16
10	0.35	0.24	0.19
7	0.44	0.30	0.25

ことが示された. 初期堆砂が同じ条件でのピークの低減率は, 堰堤が高い方が効果大きい. 土石流のピークは流れの先頭部に現れるため, 堰堤高が低いと堰堤を越流するまでの時間が短くなり, ピークを低減させる効果が小さくなる. 堰堤は高い方がピーク抑制効果が見られる. 堰堤の高さと堆砂敷の距離は比例関係となり, 堆砂の水平区間の距離が長くなることで, ピークが低減されたと考えられる. 堆砂 A, B の両条件とも堰堤無しの場合より小さくなり, 初期堆砂が存在する条件でも土砂流出ピークの抑制効果は確認された.

4. おわりに

本研究では, 不透過型砂防堰堤の初期堆砂の条件が, 堰堤の土砂捕捉量や土砂流出の抑制効果に及ぼす影響を把握することを目的として, 水理実験により検討した.

結果から, 初期堆砂のある条件でも堰堤の土砂捕捉効果を確認した. 堰堤の空き容量に対しての捕捉土砂量を示す R_f は, 堰堤高が高いと初期堆砂が多い方が大きくなるが, 堰堤高が低くなると初期堆砂が多い方が小さくなり, これは堆砂敷の長さによる影響と推測される. 一方で, 供給土砂量に対しての捕捉土砂量を示す R_c は, 空の条件で最大で, 次いで初期堆砂が少ない堆砂 B であり, 初期堆砂の多い堆砂 A は堰堤を設置した条件の中で最小だった. 堰堤は高い方が, 同じ初期堆砂の条件で R_f, R_c とも大きかった. 土砂流出のピーク抑制効果は, 初期堆砂のある条件でも見られたが, R_c と同様に空の条件が最も抑制効果が高く, 初期堆砂の土砂が多くなるほど抑制効果は低下する.

初期堆砂がある条件について, 堰堤上流の堆積土砂を飽和と不飽和の条件で比較すると, 不飽和の条件の方が捕捉土砂量や R_f, R_c とも大きい. これは, 不飽和の初期堆砂上に土石流が到達した際, 流れが急激に減速して, 堆積が飽和の条件よりも進行したことで, 捕捉土砂量が多くなった. 初期堆砂上での急激な減速は浸透によるものと推測される. 実際の初期堆砂は, 土石流発生前に降雨流出により水が十分に流下した飽和の状態, あるいは堰堤上流では降雨流出がなく比較的乾いた状態で土石流が流下してくる, どちらの条件も想定される. 今後もより詳細な検討を実施する.

本研究から、初期堆砂がある条件でも土砂捕捉や土砂流出ピークの抑制は期待できるものの、空き容量が大きいほど土砂捕捉ならびに土砂流出のピーク抑制の効果が大きく、可能な限り除石を実施する対策の有効性が改めて示された。

一方で、実験後半の侵食をどのように評価するかに課題が残る。本研究では、最も堰堤の捕捉機能が発揮する条件を把握するために後続流による顕著な侵食は検討しなかった。実災害において、2018年7月豪雨により広島県では後続流が長く続いたことで、不透過型砂防堰堤で捕捉した土砂が再侵食により下流に流出して被害が生じた事例がある。堰堤が捕捉可能な土砂量は、流れの条件で大きく変わるため、実現象に照らし合わせて効果を検討することが今後必要である。また、本検討では指針が示す元河床の勾配の1/2倍を基に満砂の土砂量を設定したが、設置点の地形や土石流の構成材料などで堆砂状況や土砂流出も変わることから、堰堤の満砂の評価方法も今後の課題として残される。

謝辞：本研究には京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの実験施設を利用しました。ここに記して感謝致します。

参考文献

1) 海堀正博, 長谷川祐治, 山下祐一, 他 16 名 : 平成 30 年 7 月豪雨により広島県で発生した土砂災害, 砂防学会

誌, Vol.71, No.4, pp.49-60, 2018.

2) 広島県 : 平成 30 年 7 月豪雨災害における砂防堰堤の施設効果事例, 平成 30 年 7 月豪雨災害を踏まえた今後の水害・土砂災害対策のあり方検討会 (第 1 回砂防部会) 資料 3, <https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/330357.pdf>, 参照 2020-6-28, 2018.

3) 国土交通省 砂防部 : 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, 2016.

4) 国土交通省 砂防部 : 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, 2007.

5) 砂防フロンティア整備推進機構 : 砂防関係施設の長寿命化計画, <https://www.sff.or.jp/biz/1-4/>, 参照 2020-6-28.

6) 國領ひろし, 石川信隆, 嶋丈示, 水山高久 : 既設鋼製透過型砂防堰堤の機能性および安全性の向上事例について, 平成 27 年度砂防学会研究発表会概要集 A, pp.90-91, 2015.

7) 全国砂防治水協会 : 砂防便覧平成 26 年版, pp.468-505, 2015.

8) 水山高久 : 管理型の砂防堰堤, 砂防学会誌, Vol.69, No.1, p.57, 2016.

9) 南哲行, 小山内信智 編著 : 現代砂防学概論, 古今書院, p.83, 2014.

10) 里深好文, 水山高久 : 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, pp.14-19, 2005.

(2020.7.1 受付)