

土石流堆積区間における砂防堰堤の 土砂捕捉等施設効果に関する水路実験

松本直樹・内田太郎・桜井 亘

1. はじめに

近年、直轄砂防事務所において、CCTV等による土石流の映像取得が積極的に行われた結果、映像データの蓄積が進み、山地流域において、継続時間が非常に短く、流量が急激に上昇する土石流の実態が明らかとなった。図-1は、CCTV等の映像データから変換した流量を示す。このように、CCTV等の映像データを活用した土石流発生時のハイドログラフの想定手法の検討^{例えば、1)}が進められている。また、土石流荷重計を用いた土砂濃度の計測が行われ、土砂濃度の実態についても徐々に明らかになっている。

一方で、これらの知見は、土石流対策施設の計画・設計に十分活用されているとはいえない。そこで、本稿では、土石流の動態を踏まえた土石流対策施設の計画及び設計の課題を整理した上で、現在国総研が取り組んでいる水路実験及び数値計算について紹介する。

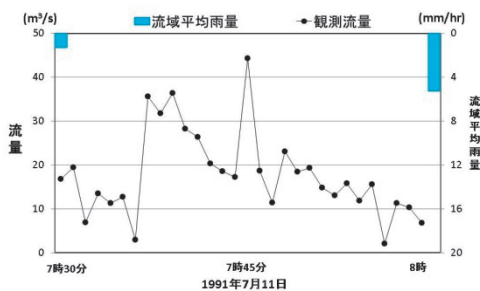


図-1 観測された土石流のハイドログラフの一例

2. 土石流及び砂防施設の研究経緯と課題

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、土石流に対する砂防堰堤の土砂捕捉効果について多くの知見が得られている^{例えば、2)}。これらの結果は、砂防基本計画策定指針等に反映され、指針に基づき、土砂災害対策が実施されている。一方、土石流に対する砂防堰堤の土砂捕捉等施設効果に関する既往検討を踏まえた課題は以

下のとおりである。

(課題1)

図-1に示したピーク継続時間が短いハイドログラフをもつ土石流が観測されているが、実験上の制約等から、既往の研究の多くが流量一定の矩形ハイドログラフで検討されており、ハイドログラフの違いが砂防堰堤の土砂捕捉に与える影響に関する検討が必要である。

(課題2)

土石流堆積区間(5°程度)を流下する土砂流出現象は、土石流発生・流下区間(10°以上)を流下する土石流と異なり、土砂濃度が低下するなど土砂動態が異なると考えられる。一方、既往の研究の多くが土石流発生・流下区間で検討されており、土石流堆積区間を流下する土砂流出現象に対する、砂防堰堤の土砂捕捉効果に関する検討が必要である。

そこで、本稿は、上記課題を踏まえ、土石流堆積区間(5°)を流下する土砂流出現象を対象に、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明らかにすることを目的に実施した水路実験及び数値シミュレーションによる再現計算について報告する。

3. 水路実験

3.1 実験方法

実験は1/30程度の縮尺を想定し、図-2に示す長さ10m、幅30cm、高さ50cmの矩形水路を用いた。勾配は、5°とした。実験砂は、過去の既往災害等を考慮し、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・土砂は水路上流端から供給した。水は、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³⁾で計算した平衡流砂量を供給した。また、超音波式水位計を用いて土石流の水深を4点計測した。流量は、予備実験で堰堤から堰堤下流側の水位-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、水・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。

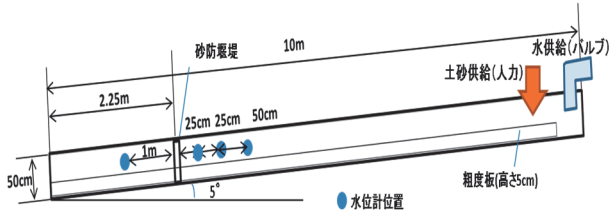


図-2 実験水路

3.2 ハイドログラフの設定及び砂防堰堤の型式

水路実験において、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に関して検討するため、検討の基本となるハイドログラフ（以下「ハイドロ1」という。）を、図-1を参考にして、立ち上がりの傾きが $0.15\text{l}/\text{sec}^2$ 、ピーク流量 $18\text{l}/\text{sec}$ （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 $88700\text{ l}/\text{sec}$ ）、継続時間が13.45分（現地時間換算した場合の時間73分）に設定した。その他、ハイドロ1のピーク流量が同量で矩形のハイドログラフ（以下「ハイドロ2」という。）、ピーク流量がハイドロ1の半分（ $9\text{l}/\text{sec}$ ）の台形のハイドログラフ（以下「ハイドロ3」という。）を設定した。各ハイドログラフを図-3に示す。供給土砂量は、堤高 25cm （根入れを考慮すると現地で堤高 $9.5\sim 10.5\text{m}$ ）の堰堤における堆砂勾配が元河床の $2/3$ 勾配で堆積する場合の容量と等しくなるようにした。供給地点における土砂濃度は、 $2.2\sim 3.3\%$ である。

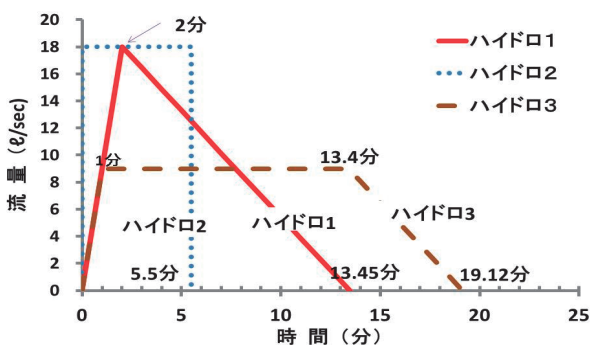


図-3 ハイドログラフ

堰堤の型式は、現在土石流対策で広く用いられている不透過型1種類、透過型2種類（図-4(a)、(b)）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、開口幅の違いによる施設効果発現の変化を確認するため透過部が広い型（開口部の幅/水路幅1.0倍）と透過部が狭い型（開口部の幅/水路幅0.5倍）の2種類とした。

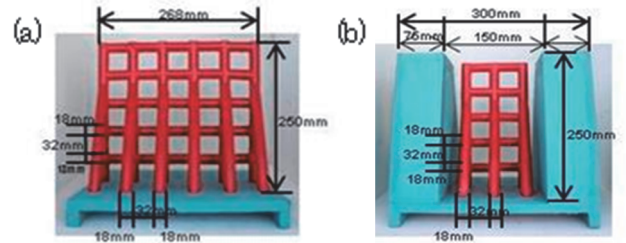


図-4 砂防堰堤 (a)透過部広い型 (b) 透過部狭い型

3.3 実験ケース

実験ケース数は、表-1に示すとおり、3.2に示した3パターンのハイドログラフと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12ケース実施した。

表-1 実験ケース

ケース	堰堤型式	ハイドロケース	ケース	堰堤型式	ハイドロケース
1	なし	ハイドロ1	7	透過 (透過部広い型)	ハイドロ1
2		ハイドロ2	8		ハイドロ2
3		ハイドロ3	9		ハイドロ3
4	不透過	ハイドロ1	10	透過 (透過部狭い型)	ハイドロ1
5		ハイドロ2	11		ハイドロ2
6		ハイドロ3	12		ハイドロ3

4. 実験結果

4.1 土砂の堆積過程

図-5は、ハイドロ1の堆積過程である。不透過型は、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分後には堰堤天端から越流が始まった。一方、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分頃に堰堤天端まで堆積した。

透過部が広いケース7の場合、土砂・水の供給開始直後に、土砂は堰堤まで到達し、水は透過部から流出した。供給開始1分30秒後に、土砂の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、透過部が狭いケース10の場合、土砂・水の供給開始直後は、水だけが堰堤に到達した後、供給開始1～2分頃に堰堤上流で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、ハイドロ1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、堰堤の型式によって異なることが分かった。

4.2 流出土砂量

表-2は、通水終了後の砂防堰堤による土砂捕捉量及び供給流量ピーク時付近（ハイドロ1：供給開始2～3分，ハイドロ2：供給開始5～6分，ハイドロ3：供給開始11～12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1～3の流出土砂量に対する割合を示した。即ち、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、3のケースは、流出土砂量が最大となるピーク後半の流出土砂量を基に算出した。

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（捕捉率）は90%以上となった。

また、供給流量ピーク時付近の流出土砂量は、不透過型のケースは、ハイドロ2のケース5においては、土砂が均一に堆積しなかった影響で、供給後半に土砂が堰堤を乗り越えて流出したため、流出割合が大きい結果となったものの、その他のハイドロ1、3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。なお、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、透過型のケースは、透過部が広い型は、0.04～0.15の間を示し、透過部が狭い型は、0.03～0.09を示したことから、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やや少ない結果となった。特に、ハイドロ1については、透過部が狭い型(0.03)の方が広い型(0.15)に比して20%になった。これは、図5に示すように、透過部が狭い型の場合、堰上げにより土砂が堆砂肩を形成しながら堆積し、ピーク時に堰堤まで到達した土砂が透過部が広い型に比べ少なく堰堤の空き容量が多かったため、透過部からの土砂の流出が少なかったものと考えられる。

表-2 土砂捕捉量

ケース	堰堤形式	ハイドロケース	捕捉量 (t)	全時間の捕捉率	供給流量ピーク時付近の無施設時に対する流出割合
4	不透過	ハイドロ1	302	0.94	0
5		ハイドロ2	316	0.98	0.39
6		ハイドロ3	319	0.99	0
7	透過 (透過部広い型)	ハイドロ1	303	0.94	0.15
8		ハイドロ2	294	0.91	0.11
9		ハイドロ3	313	0.97	0.04
10	透過 (透過部狭い型)	ハイドロ1	307	0.96	0.03
11		ハイドロ2	296	0.92	0.09
12		ハイドロ3	316	0.98	0.04

5. 一次元河床変動解析による再現計算

続いて、ハイドロ1の3ケースを対象に、一次元河床変動解析による再現計算を実施し、実験結果の比較を行った。使用した数値計算プログラムは、混合粒径を対象に土石流から掃流砂及び浮遊砂まで連続的に解析でき、掃流砂及び浮遊砂の流下・堆積・侵食の計算が可能で、浮遊砂の非平衡計算ができるプログラムである。また、砂防堰堤

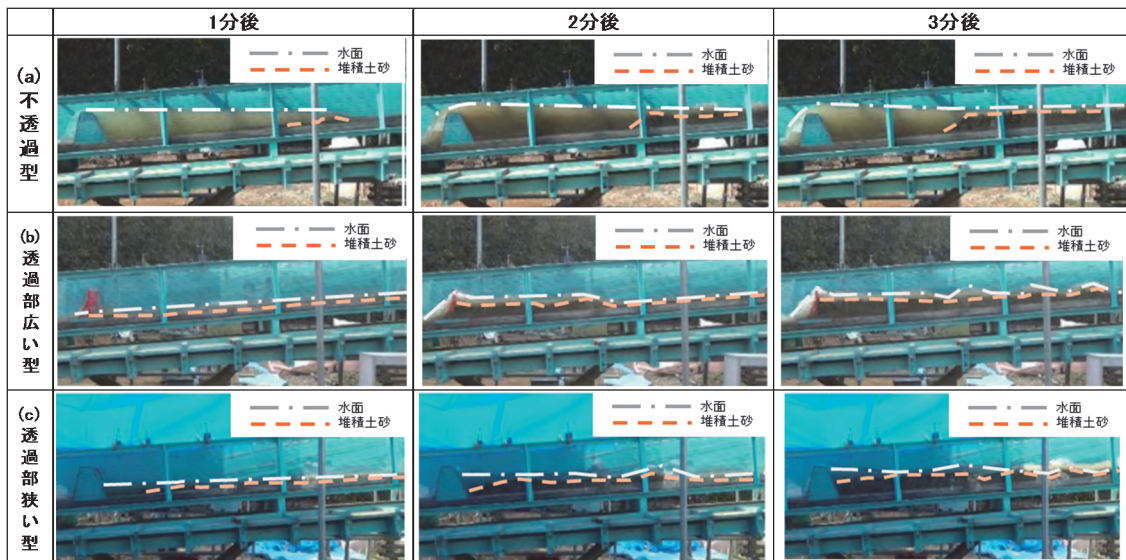


図-5 土砂の堆積過程 (a) ケース4 (b) ケース7 (c) ケース10

の評価方法を(I)堰の公式と運動方程式を組み合わせた流出量の算出、(II)粒径と格子サイズを考慮した、水通部・透過部の捕捉土砂量の算出、(III)里深ら⁴⁾の手法による堆砂域の土砂量の算出を組み合わせ、堰堤周辺の水・土砂の挙動を評価する数値計算プログラムを新たに作成した。

土砂の堆積結果を、図-6に示す。不透過型及び透過部狭い型に関しては、土砂が堆砂肩を形成しながら堆積する過程は概ね実験値と同様に再現できていると言える。また、透過閉塞型の透過幅が広い型に関しては、土砂の供給直後に堰堤に到達し、堰堤を閉塞する過程は概ね再現できている。

6. まとめ

課題2に示した土石流堆積区間を流下する土砂流出現象に対する堰堤による土砂の捕捉については、堰堤の型式により土砂の堆積過程や水の流出過程が異なるものの、総供給土砂量に対して、いずれの堰堤の型式においても、90%以上の捕捉率を示した。なお、堰き上げが生じる透過部が狭い型式においては、出水後半に透過部から土砂が流出することが懸念されたが、水平・鉛直純間隔を現指針に則り設定したところ、出水後半の土砂の流出は見られなかった。

また、課題1に示したハイドログラフの違いによる砂防堰堤の施設効果に与える影響に関しては、供給流量一定の矩形ハイドログラフ（ハイドロ2）の場合、特に不透過型において、供給流量ピーク時に堰堤下流へ流出する土砂が他の型式と比較すると多くなる場合が見られた。一方、立ち上がり急で、継続時間が短いハイドログラフ（ハイドロ1）に対する砂防堰堤の施設効果は、堰堤の型式により、供給流量ピーク時の土砂流出量が異なった。特に、透過型砂防堰堤の透過部の幅を狭くすると、同じ透過型でも広い型に比べて効果の発現プロセスが異なることがわかった。以上の結

果から、ハイドログラフの設定は、砂防堰堤の施設効果を検討する上で、重要な条件であることが示唆された。また、得られた実験結果は、数値計算によって再現できることを確認した。

今後、土砂濃度や粒径の違いが土石流堆積区間に設置した砂防堰堤の施設効果に与える影響に関して引き続き水路実験や数値解析を実施していく予定である。

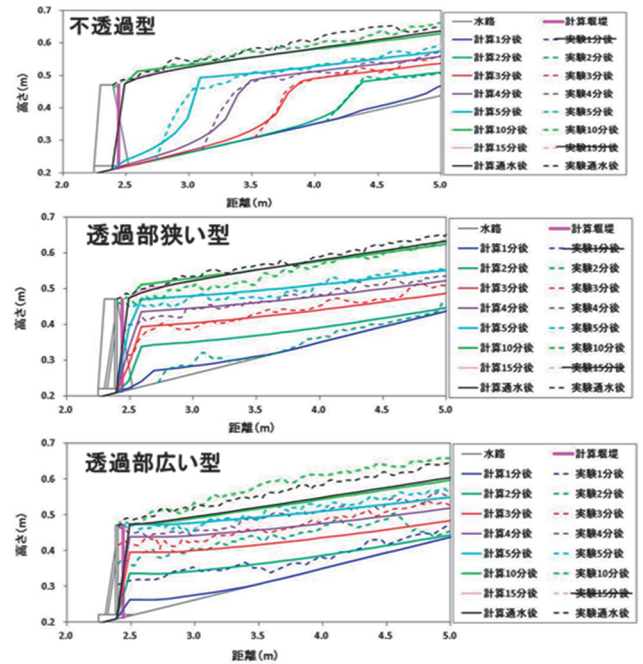


図-6 計算結果

参考文献

- 1) 友村光秀、坂井大作、桜井亘、内田太郎、松本直樹：CCTV等の映像データを活用した山地流域の洪水流出特性の把握、砂防学会研究発表会概要集B、4～5、2016
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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計算、砂防学会誌、Vol.57、No.6、pp.21～27

松本直樹



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 研究官
Naoki MATSUMOTO

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 主任研究官
Taro UCHIDA

桜井 亘



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室長
Wataru SAKURAI