

無流水溪流対策における透過型施設の構造 に関する基礎的な実験

EXPERIMENTS ON THE STRUCTURE OF A PERMEATION TYPE DAM IN A NON-FLOWING MOUNTAIN STREAM

原田 紹臣¹・里深 好文²・水山 高久³

Norio HARADA, Yoshifumi SATOFUKA and Takahisa MIZUYAMA

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: harada3@kais.kyoto-u.ac.jp

² 立命館大学理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

E-mail: satofuka@se.ritsumei.ac.jp

³ 京都大学名誉教授 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: mizuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

Key Words: Countermeasure work, experiment, debris flow, debris wood, small mountain stream

1. はじめに

平成 30 年 7 月に発生した豪雨災害によると、土石流により人的被害があった溪流の約 7 割は、流域面積 0.05km² 以下の急峻な小規模溪流であった¹⁾。一般的に、谷出口が住家や道路等に近接している溪流の多くは常時の流水が無い小規模な溪流であり、土石流発生時に人的被害等のリスクが高いことが知られている^{2),3),4)}。さらに、従来のコンクリートによる砂防堰堤の施工に際しては、下流側の人家密集や工事用道路の確保等の地形的な制約を受けることが多い。そのため、これらの溪流では、施工性において有意な二次製品等による土石流対策施設整備の推進が有効であると考えられる。

近年、新たに無流水溪流対策⁵⁾が提議され、透過部構造(二次製品)を基本とする対策の推進が示された。なお、無流水溪流は、「流路が不明瞭で常時流水がなく、平常時の土砂移動が想定されない溪流」且つ「基準点上流の溪床勾配が 10° 程度以上で流域全体が土石流発生・流下区間である溪流」と定義されている⁵⁾。また、対策に際して、中小出水時の土砂流出の頻度や規模が小さいとともに、一般的な土

石流よりも土砂移動や洪水の継続時間が短く、土石流先頭部への巨礫が集中せず下流まで到達⁶⁾するため、透過部が閉塞されずに捕捉機能が低下することが懸念されており、留意する必要がある。一方、これらの溪流における透過型施設の側方からの偏流に伴う下流への土砂の流出が指摘されており、透過型施設の側方端部と地山との隙間において、付属施設(土砂流出防止対策:金網や不透過構造、例えば写真-1)による対策の必要性が示されている⁵⁾。ただし、この偏流に伴う側方からの土砂流出メカニズムやその具体的な対策の構造については、更なる議論が必要である。なお、側方からの流出防止対策を講じる場合、施工性より透過構造をそのまま側方まで延伸させて全幅を透過部構造とする代替案も考えられ、これらの構造も含めた更なる議論が望まれる。

そこで、本研究では、小規模な溪流⁵⁾における透過型施設の側方からの土砂流出リスク等に関して、その流出メカニズムや施設側方に存在する隙間幅の変化が土砂の捕捉機能に与える影響等について、基礎的な実験により把握する。さらに、側方からの土砂流出防止対策の高度化を目的に、有効な流出防止対策構造について、基礎的な実験により考察する。



写真-1 小規模な溪流等における二次製品(透過型施設)および側方からの土砂流出防止対策(金網付)の例⁷⁾

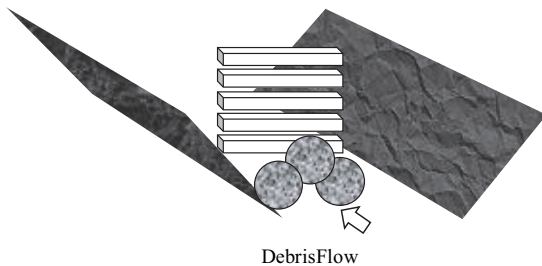


図-1 これまでの小規模な溪流における鋼製砂防堰堤の設置例

2. 透過型施設の側方端部からの土砂流出リスク

これまでの一般的な小規模溪流における透過型施設(側方の流出防止対策無)の概要を図-1に示す。図-1に示すとおり、上流から段波状で直進性を有して流下する石礫型土石流⁸⁾等に対して、構造安定上において有意な小規模な鋼製砂防堰堤(二次製品ユニット)等が採用されてきた。そして、本施設を据付けが可能な範囲まで溪岸に近接させて単独で配置(流出防止対策無)されることが多かった。ただし、これらの溪流における対策工は人家や道路の直上流に設置されることが多く、対策施設と地山との隙間からの下流への土砂流出に伴う影響が懸念される⁵⁾。

そこで、図-2に示すように、従来の小規模な鋼製砂防堰堤を想定した透過型施設の構造を対象に、全流下幅 W_0 に対する透過型施設の対策幅 W_1 の違いが土砂の捕捉に与える影響(捕捉メカニズムや捕捉機能の変化)について、基礎的な水路実験によりそれらの傾向を把握し、留意点について考察する。

実験水路の概要を図-3に示す。水路条件は、底部に一樣砂礫(硅砂⁹⁾、直径 $d=7\text{mm}$ または 4mm を敷き詰めて傾斜($\theta_w=15^\circ$)させた水路(長さ $1,000\text{mm}$ 、幅 100mm 、縮尺 $1/20$ 想定)に、上流から水を供給 q_{in} (1.1L/s :河床砂礫が全て侵食された土石流発生完了時点まで、または、対策施設により捕捉された土

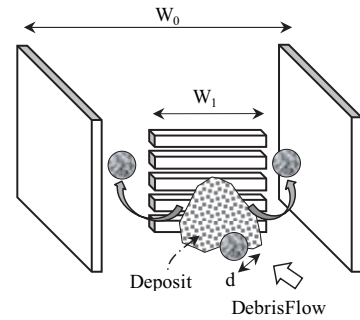


図-2 実験における構造物の設置条件

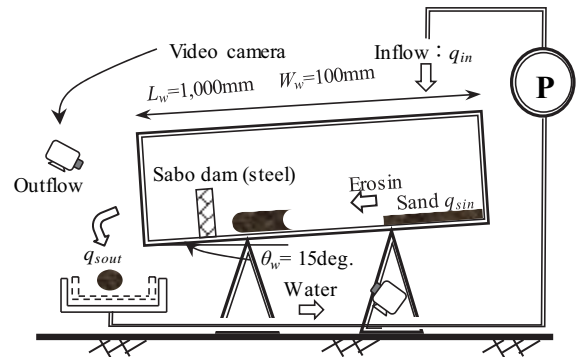


図-3 実験水路の概略図

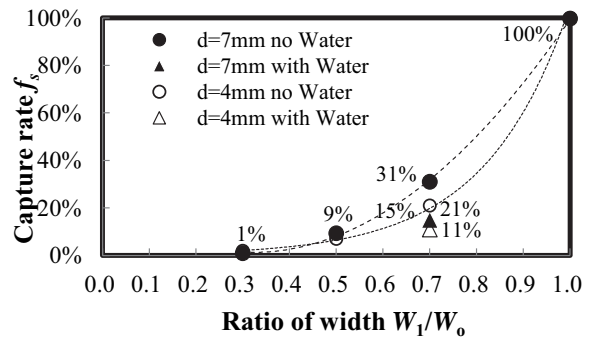


図-4 透過型施設の対策幅の違いが捕捉機能に与える影響

砂の再侵食が安定するまで給水)して、透過型施設側方の隙間から下流へ流出した土砂(砂礫)の重量を計測する。なお、透過型施設は河床に対して垂直に設置して、角部材($2\times 2\text{mm}$)を等間隔(純間隔 3.5mm)で水平に配置している。その際、対策幅 W_1 等を変化させて、それぞれ3回実施して平均化している。

実験より得られた全流下幅 W_0 に対する対策幅 W_1 の割合(W_1/W_0 :図-2)等の違いによる捕捉率 f_s の変化を図-4に示す。なお、土砂の捕捉率 f_s は、

$$f_s = (q_{sin} - q_{sout}) / q_{sin} \quad (1)$$

で表される。ここで、 q_{sout} は対策施設で捕捉されずに下流へ流出した土砂の重量、 q_{sin} は河床に敷き詰めた土砂の重量(ただし、全て侵食)である。図-4に示されるように、土砂($d=7\text{mm}$)を用いて土石流発

生完了まで給水した場合（捕捉後の再侵食無：no Water），施設側方の隙間からの回り込みによる土砂流出が見られるとともに，全流下幅 W_0 に対して半分程度の対策幅 W_1 の場合における捕捉率 f_s は 10% 未満であり，顕著に捕捉機能が低下した．また，対策幅 W_1 が全流下幅 W_0 の 7 割程度の場合における捕捉率 f_s は 30% 程度であった．一方，捕捉されて堆積していた土砂の再侵食が安定するまで給水した場合（捕捉後の再侵食有：with Water），土砂の堆砂形状による影響を受けた外側への偏流の発生に伴って堆積した土砂の再侵食が見られ，最終的に捕捉率 f_s が 15% まで低下した．なお，細粒礫（ $d=4\text{mm}$ ）の場合は，更に捕捉率 f_s が低下することが分かった．この要因の一つとして，粒径が小さくなるに伴って偏流等の流れの影響を受けやすく，流水とともに下流へ流出したものと考えられる．

これらの結果より，透過型施設と地山との間の小さな隙間においても捕捉機能が顕著に低下することが明らかとなり，側方における確実な流出防止対策の必要性が示された．なお，これらの流出メカニズムとしては，土石流の流下時における直接的な回り込み等による流出と，対策施設により捕捉された後の土砂の堆砂形状に影響を受けた偏流の発生に伴う再侵食によるものであることが分かった．

3. 透過型施設の側方端部における土砂流出防止対策構造の高度化

無流水溪流対策時の透過型施設の側方端部における土砂流出防止対策の更なる構造の高度化を目的に，捕捉効果の高い有効な構造について，基礎的な実験に基づいて考察する．

水路の概要を図-5 に示す．水路条件は，底部に砂礫（珪砂⁹⁾：直径 $d=7\text{mm}$ ， 4mm ， 0.6mm をそれぞれ一様又は同配分で混合）を敷き詰めて傾斜（ $\theta_w=10^\circ\sim 15^\circ$ ）させた水路（長さ $500\sim 2,000\text{mm}$ ，幅 200mm ，縮尺 1/10 想定）に上流から水を供給 q_{in} ($0.7\sim 1.5\text{L/s}$) させて土石流を発生させ，水路下流部に設置された透過型施設（ただし，ネット式構造物，Countermeasure type: net）で捕捉されずに，ネットの格子内を通過して下流へ流出した土砂（砂礫）の重量を計測する．ここで，中央に設置する透過型施設については，無流水溪流の特徴（例えば，土石流先頭部への巨礫集中が見られない場合や，十分な水の供給が期待できない場合における土砂の捕捉等）や施工性を考慮して，捕捉効果の高いフェンスネット式を活

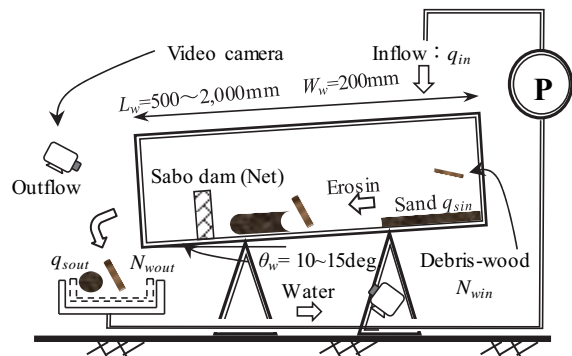


図-5 実験水路の概略図

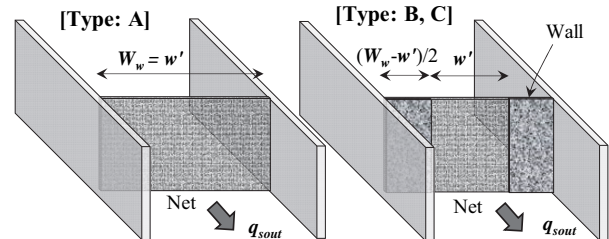


図-6 実験に用いた透過型施設の概略図

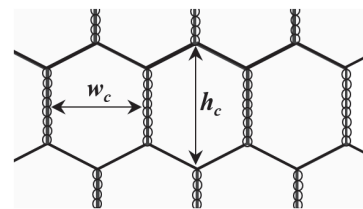


図-7 実験に用いた透過型施設におけるネット式構造物

用した土石流対策工（例えば，10）を想定している．なお，これらの構造は，急傾斜地対策等で施工条件が厳しい地形条件においても形状等を柔軟に変化させることが可能である．なお，透過型施設及び側方からの土砂流出防止対策は，図-6 に示すように，側方の不透過部の有無（左：不透過部無の透過部のみ—Type A，右：不透過部有—Type B/C）の違いにおける捕捉機能の変化について把握する（Type A：不透過部無—透過幅 $w'=200\text{mm}$ ，Type B：不透過部有—透過幅 $w'=134\text{mm}$ ，Type C：不透過部有—透過幅 $w'=66\text{mm}$ ）．

中央部に設置する透過型施設のネット式構造（図-7）については，捕捉時の応力が鉛直多方向へ分散することを期待した六角形（ $w_c=10\text{mm}$ ， $h_c=12\text{mm}$ ；純間隔）とする．ここで，格子間隔については，流出防止対策の構造の違いによる捕捉効果の変化を把握するため，アーチアクション効果¹¹⁾を期待した幅の広い間隔（土砂の粒径と同程度以上）とする．さらに，土石流と同時に流下してくると想定される流木⁹⁾についても着眼し，水路上流から併せて投入（ただし，円形支柱，直径 $\phi=3\text{mm}$ ，流木長 $L_w=50\text{mm}$ ，乾燥状態での比重が約 0.75）し，土砂の捕捉機能に

表-1 実験条件

CASE	q_{in} (L/s)	Particle size d (mm)	Length L_w (mm)	Opening width w' (mm)	Debris-wood N_{win} (number)	Counter measure: net	
1-1	1.2	Mix	1,000	200	-	Exist	
1-2	1.5						
1-3	0.7						
2-1	1.2	7	500	-	-		
2-2		4					
3-1		2,000					
3-2	1.2	Mix	1,000	-	-		
4-1							20
4-2							40
4-3	-	-	-	134	-		No
5-1	1.2	Mix	1,000	-	-		
5-2						66	
6-1						200	
7-1	1.2	Mix	1,000	-	-		
7-2						134	
7-3						66	

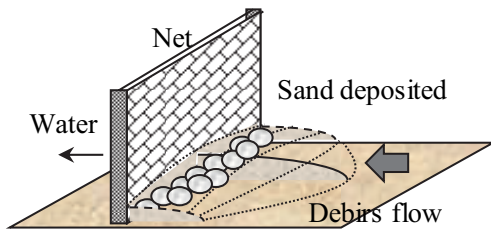


図-8 透過型施設(ネット式構造物)で捕捉した堆砂の概要

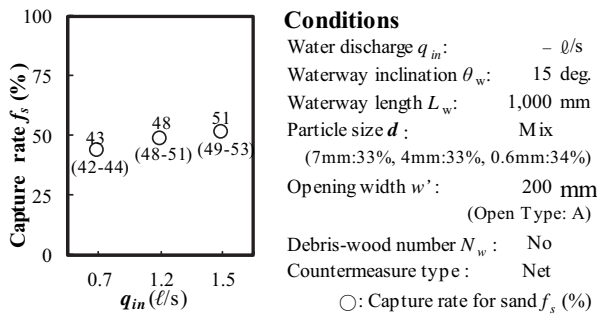


図-9 供給流量の違いが捕捉機能に与える影響 (Type A)

与える影響について把握する。また、給水については、河床の土砂が全て侵食された土石流発生完了時点までの供給 (no Water) としている。さらに、側方の不透過部 (壁構造) のみの構造 (中央部の透過型無し: Case7-1~7-3) についても、参考として実施している。

各条件の違いが透過型施設における捕捉機能や土砂の堆砂形状に与える影響を把握するため、上部からの供給水量 q_{in} や流木混入の有無、不透過部の有無及び透過幅 (w' : 図-6) 等を変化 (16 ケース: 表-1) させて、それぞれの条件での捕捉機能や捕捉後の堆砂形状 (例えば、図-8) について把握している。また、実験結果におけるバラツキを考慮するため、

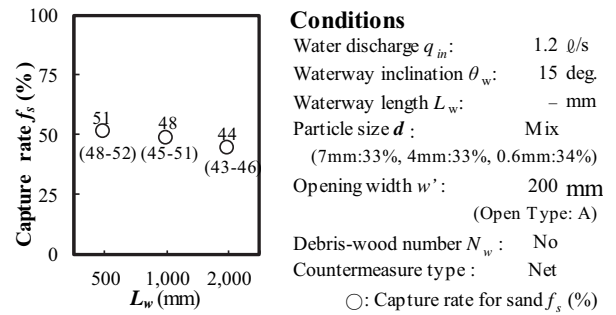


図-10 流路延長の違いが捕捉機能に与える影響 (Type A)

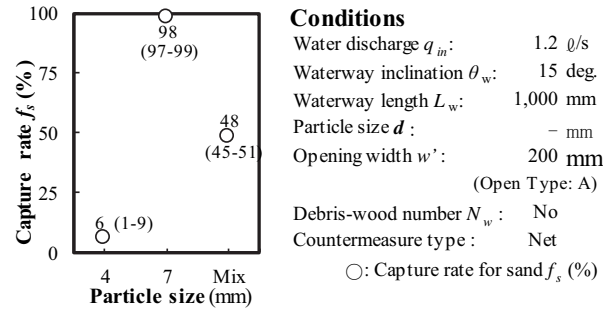


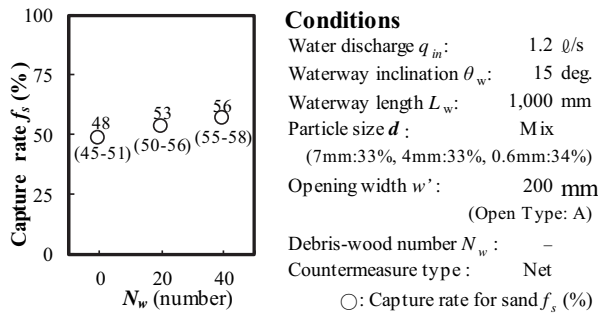
図-11 給砂条件の違いが捕捉機能に与える影響 (Type A)

同じ条件にて3回実施し、平均化している。

実験より得られた透過型施設における捕捉率 f_s は、同様に式(1)で表される。以降に、得られた実験結果の中から、特徴的な結果に対して考察する。

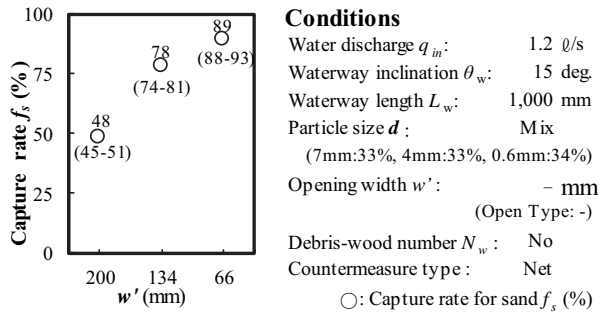
供給流量 q_{in} の違いによる透過型施設 (全幅透過型, Type A) における捕捉率 f_s の変化を図-9 に示す。なお、図中の数字は平均値及び3回の結果範囲 (括弧) を示している。図-9 に示すように、供給流量 q_{in} が増加するに伴って捕捉機能が向上することが分かった。この要因の一つとして、流量増加に伴って多くの河床における土砂が一度に急激に侵食されて土石流化し、土石流先頭部の土石流濃度が増加したため閉塞しやすい状態だったものと考えられる。

流路延長 L_w の違いによる透過型施設 (Type A) における捕捉率 f_s の変化を図-10 に示す。図-10 に示すように、流路延長 L_w が短くなるに伴って捕捉機能が向上する興味深い結果⁶⁾を得た。なお、本実験での距離は巨礫を集積させるのに十分な距離ではなかったため、実験中の観測によると、一般的な土石流先頭部への巨礫の集積が見られず、逆に、流れに伴って土石流中の土砂が上下流に分散されていく傾向が見られた。このため、距離が長くなるに伴って土石流先頭部における土砂の量が減り、最終的に十分なアーチアクションが形成されずに捕捉機能が低下したものと考えられる。これらの結果より、小規模な溪流においては一般的な土石流溪流と比較して十分に狭い格子間隔の設定が重要であることが分かった。



Conditions
 Water discharge q_m : 1.2 ℓ/s
 Waterway inclination θ_w : 15 deg.
 Waterway length L_w : 1,000 mm
 Particle size d : Mix
 (7mm:33%, 4mm:33%, 0.6mm:34%)
 Opening width w' : 200 mm
 (Open Type: A)
 Debris-wood number N_w : -
 Countermeasure type: Net
 ○: Capture rate for sand f_s (%)

図-12 流木混入の違いが捕捉機能に与える影響 (Type A)



Conditions
 Water discharge q_m : 1.2 ℓ/s
 Waterway inclination θ_w : 15 deg.
 Waterway length L_w : 1,000 mm
 Particle size d : Mix
 (7mm:33%, 4mm:33%, 0.6mm:34%)
 Opening width w' : - mm
 (Open Type: -)
 Debris-wood number N_w : No
 Countermeasure type: Net
 ○: Capture rate for sand f_s (%)

図-13 側方の不透過型部有無の違いが捕捉機能に与える影響 (Type A- w' :200mm, Type B:134mm, Type C:66mm)

今後更なる検証が望まれる。

給砂条件 (一様粒径, 混合粒径等) の違いによる透過型施設 (Type A) における捕捉率 f_s の変化を図-11に示す。図-11に示すように, 一様粒径 ($d=7\text{mm}$) では殆どの土砂が捕捉される一方で, 一様粒径 ($d=4\text{mm}$) では殆どの土砂が十分なアーチアクションが形成されずにネット格子内 (図-7) を通過して, 下流へ流出した。なお, 粒径 ($d=7, 4\text{mm}$) に細粒の砂 ($d=0.6\text{mm}$) を加えて同じ割合 (三等分) で配合させた混合粒形の場合は, 透過型施設における捕捉率 f_s が概ね 50%程度であった。ここで, 実験中の観察結果によると, 土石流先頭部中の大径礫 ($d=7\text{mm}$) によるアーチアクションの形成が確認された。

流木混入の有無及び流木本数の違いによる透過型施設 (Type A) における捕捉率 f_s の変化を図-12に示す。図-12に示すように, 流木の混入割合が増加するに伴って捕捉機能が向上する傾向であることが分かった。ここで, 実験中の観察結果によると, 比重の小さい流木が流れの先頭部に集積してネット式構造物において捕捉されて閉塞し, その後の後続流の土砂が効果的に捕捉されるのが確認された。その際, 透過型施設における流木の捕捉率 f_s は概ね 80%以上であり, 顕著に土砂の捕捉機能が向上した。

側方における不透過部の有無及び透過幅 w' の違い (Type A, Type B/C) による透過型施設における土砂の捕捉率 f_s の変化を図-13に示す。図-13に示すよ

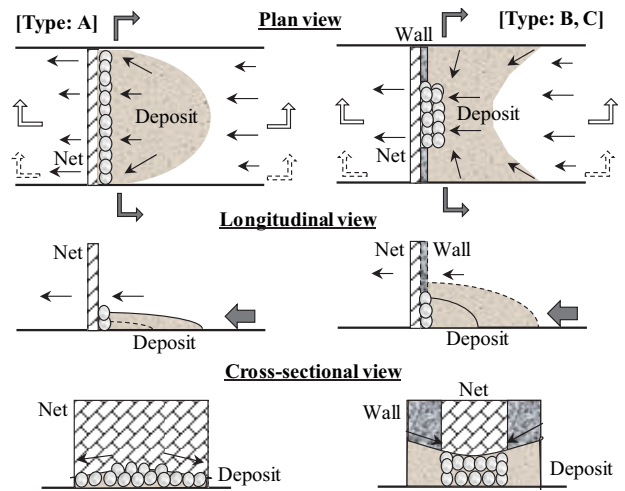
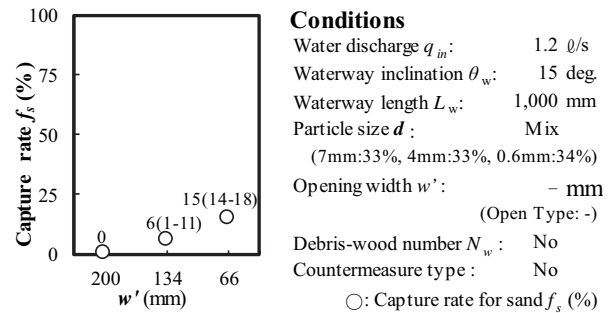


図-14 側方不透過型施設有無の違いによる捕捉 (堆砂) 形状の変化 (上: 平面図, 中: 縦断面図, 下: 横断面図)



Conditions
 Water discharge q_{in} : 1.2 ℓ/s
 Waterway inclination θ_w : 15 deg.
 Waterway length L_w : 1,000 mm
 Particle size d : Mix
 (7mm:33%, 4mm:33%, 0.6mm:34%)
 Opening width w' : - mm
 (Open Type: -)
 Debris-wood number N_w : No
 Countermeasure type: No
 ○: Capture rate for sand f_s (%)

図-15 不透過型施設 (単独) が捕捉機能に与える影響 (側方不透過型構造のみ; ネット式構造物無)

うに, 不透過部を併設した場合 (Type B/C), 不透過部を併設しない場合と比較して捕捉率が約 1.5~2倍となり, 顕著に捕捉機能が向上することが分かった。ここで, 図-14に実験中の観察結果において見られた不透過部の有無の違いによる捕捉 (堆砂) 形状を示す。平面的な堆砂形状に関して, 不透過部が無い場合 (Type A-図-14: 左上) は, 不透過部有の場合 (Type B/C-図-14: 右上) と比較して土砂が中央部に多く集積して捕捉され, その堆砂形状の影響を受けた偏流発生に伴って側方へ土砂が流出する傾向であった。一方, 縦断的な堆砂形状及び横断的な堆砂形状に関して, 不透過部有の場合 (図-14: 右中, 右下, Type B/C) は, 不透過部無の場合 (図-14: 左中, 左下, Type A) と比較して顕著に捕捉高が高くなり, 多くの土砂が捕捉された。これらの要因の一つとして, 両側方の不透過部 (壁構造) による大径礫の中央部への集積による早期のアーチアクション形成に伴って, 後続からの細粒の土砂が効果的に捕捉されたものと考えられる。

一方、不透過部のみ（中央の透過型施設：ネット式構造物無，Counter-measure net: no）における透過幅 w の違いによる捕捉率 f_s の変化を図-15 に示す。

図-15 に示すように、側方の不透過部のみ（中央部透過部無）においても一部の土砂が捕捉されることが分かった。ここで、実験中の観察結果によると、不透過部（壁構造）の直上流に発生した平面的な渦流の影響を受けて一部の土砂が堆砂（残存）することが分かった。なお、これらの現象は一般的な水制工¹²⁾に見られる効果と同じであった。これより、側方に不透過部を有する場合、溪岸の側部にも土砂が捕捉されて、対策施設の側方周辺における河岸侵食を防止する機能も期待できることが分かった。

今回の検討では、基礎的な直線水路で実施したため、今後、平面的な屈曲水路による流れの影響や、水路横断形状の変化、格子形状（六角形以外）等の違いについても、更なる検証が望まれる。

4. おわりに

本研究では、常時の流水が殆ど存在しない小規模な溪流（無流水溪流）を対象に、施工性に優れた二次製品（透過型施設^{例えば、10)}）の活用による土石流対策（砂防事業や道路事業）の推進を目的に、透過型施設と地山との隙間からの土砂流出の機構、それらの予防対策の必要性や有効な構造について、基礎的な実験結果に基づいて考察したものである。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 透過型施設側方の地山との隙間が存在する場合、顕著に捕捉機能が低下することが分かった。なお、その主な要因の一つとして、土石流流動時の回り込み等による直接的な下流への土砂の流出と、施設により捕捉された土砂（砂礫）の堆砂形状に影響を受けた側方への偏流の発生に伴う捕捉した土砂の再侵食によるものであることが分かった。
- 2) 透過型施設側方の両端部において不透過型構造による土砂流出防止対策を併設した場合、透過型施設のみ（全幅を透過型施設）の場合と比較して、捕捉機能が顕著に向上することが分かった。この要因の一つとして、一般的な水制工に見られる効果により大径礫が中央部に集積して土砂のアーチアクション効果により閉塞され、後続からの細粒

の土砂を効果的に捕捉させることが分かった。

- 3) さらに、側方に不透過部を有する場合、側部にも土砂が捕捉されて、対策施設の両端における河岸侵食を防止する機能も期待できることが分かった。

謝辞：本実験の実施に際し、防衛大学校 堀口俊行准教授や京都大学の中谷加奈助教から助言を得た。また、一般社団法人 災害科学研究、ベルテクス株式会社および三井共同建設コンサルタント株式会社からの援助、ならびに、静岡大学 高山翔揮氏の協力を得た。末筆ながら記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部： http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/renkei/activities/20181211/04-1_kunitomo.pdf, 2022年5月15日閲覧。
- 2) 石川芳治, 前田昭浩, 草野慎：山岳道路の土石流発生危険度判定手法, 新砂防, Vol. 49, No.1, 1996.
- 3) 矢澤昭夫, 水山高久, 鈴木浩之：山岳道路の土石流発生過程, 土木技術資料, Vol. 29-11, pp.9-14, 1987.
- 4) JH 日本道路公団：土石流対策の手引き, 2003.
- 5) 国土交通省砂防部：無流水溪流対策に関わる技術的留意事項, 2022.
- 6) 原田紹臣, 和田孝志, 古谷智彦, 中谷加奈, 水山高久, 里深好文：土石流先頭部における大粒子の集積過程に関する基礎的な実験, 砂防学会誌, Vol. 68, No.1, pp. 39-43, 2015.
- 7) プロテックエンジニアリング：アーバンガード (<https://www.proteng.co.jp/>), 2022年5月15日閲覧。
- 8) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究, 京大防災研究所年報, Vol.20, No.B-2, 1976.
- 9) 三河珪石株式会社：珪砂 (<http://www.mikawakeiseki.co.jp/silica.htm>), 2022年5月15日閲覧
- 10) ベルテクス：ループフェンス (https://vertexgrp.co.jp/products/products_category/pc04/pc0404/), 2022年5月15日閲覧。
- 11) 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, pp.697-702, 2001.
- 12) 福岡捷二, 西村達也, 高橋晃, 川口昭人, 岡信昌利：越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, Vol. 1998, NO.593, 1998, pp. 51-67.

(2022. 5. 30 受付)