粒径分布特性を考慮した透過型砂防えん堤の 土砂流出調節機能に関する研究

DEBRIS FLOW CONTROLLED BY STEEL-GRID SABO DAMS ACCORDING TO
GRAIN-SIZE FREQUENCY

原田 紹臣¹・里深 好文²

Norio HARADA and Yoshifumi SATOFUKA

¹正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社（〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号）

²正会員 工博 立命館大学教授（〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1）

Debris flow can be trapped in a steel-grid sabo dam, due to the blockade of coarse woody debris without large stones. In addition, the permeable width of the barricade is not determined by the grain-size accumulation rate, but rather by the grain-size frequency. Information on the grain-size distribution characteristics in mountain streams is needed before construction of the dam. In this study, to identify the ideal structure for controlling sediment runoff, we experimented with the structure of the dam to show how the capture rate is affected under different conditions. The capture effect was evaluated for several grain-size distributions of real mountain stream beds to determine the relationship between grain size and the capture rate.

Key Words : Capture rate, debris flow, experiment, grain size, steel-grid sabo dams

1. はじめに

近年、技術開発等に伴い、土石流対策として鋼製の透過型砂防えん堤が多く設置されている。一方、透過型砂防えん堤の透過部における閉塞メカニズムに関して、さらに解明していく必要があると指摘されている¹⁾。

現在、透過部断面において計画される格子間隔（部材間の純間隔）は、現地調査結果で得られた最大礫径（ D_{95} ：200個以上の巨礫の粒径を測定して作成された頻度分布に基づく累積値95%に相当する粒径）の1.0程度²⁾とされている。これより、現在、 D_{95} 礫径未満の粒径分布特性がほとんど考慮されずに格子間隔が検討されている。これは、粒径加積曲線（各粒径と通過重量百分率との関係）ではなく、技術指針²⁾ に準じて粒径頻度分布曲線（各粒径と個数との関係）を用いた検討によるためである。一方、旧指針³⁾ においては、格子間隔は最大礫径の1.5倍～2.0倍とされており、現在の指針²⁾ の格子間隔に比べて広く設定されている。これらの技術指針の変遷に伴い、現在、土砂流出調節機能（捕捉効果）が不足している既設透過型構造物が多数存在している可能性がある。これより、砂防施設の管理者は、旧指針³⁾ に準じて計画された既設の透過型砂防えん堤の土砂流出調節機能（捕

捉効果）について早急に把握しておく必要がある。

透過部における土砂流出調節機能（捕捉効果）に関して、透過部の瞬間閉塞確率を考慮したモデル⁴⁾、砂防ダムと土石流の特性値を考慮したモデル⁵⁾、個別要素法を用いて個々の砂礫の挙動を追跡するモデル⁶⁾ および土砂通過を確率的に決定するモデル⁷⁾ が提案されている。また、透過型砂防えん堤の閉塞メカニズムを参考に格子部材を流路底面に配置し、土砂と水とを分離して土石流を制御する工法⁸⁾が提案されている。なお、高橋ら⁴⁾は格子型砂防えん堤の閉塞メカニズムとして、図-1に示されるアーチ形成による閉塞モデルを用いて説明し、礫径の違いと格子間隔との関係を示している。しかしながら、透過部材の断面形状や透過部の河床に対する傾斜角度の違いと格子間隔との関係に関する詳細な検討、技術指針^{2),3)} に準じて計画された格子間隔の決定手法に関する妥当性について検討した研究は、筆者らが知る限り存在しない。

図-1 透過部におけるアーチ形成による閉塞メカニズム⁴⁾

本研究は、石礫型土石流を対象に、土砂流出調節機能において最も有効な透過部構造について把握するため、格子間隔、透過部材の断面形状ならびに透過部の河床に対する傾斜角度等を変化させて実験し、それぞれの捕捉効果について比較した。そして、透過部の格子間隔を決定するために必要な礫径を有する大径礫が土石流中において必要な量（土砂濃度）について、実験により検討した。最後に、礫の粒径分布特性の違いが捕捉効果に与える影響に関して、実際の渓流に存在する礫の粒径頻度分布曲線を用いて、現指針²⁾および旧指針³⁾に準じて計画された格子間隔について考察した。

2. 捕捉効果に影響を与える透過部構造の把握

透過型砂防えん堤における透過部構造等の違いが土砂流出調節機能（捕捉効果）に与える影響に関して把握するため、条件をそれぞれ変化させて実験する。

(1) 実験概要

実験に用いた水路は、図-2に示す水路長1mおよび幅10cmの矩形断面を持つ直線水路で、下流端付近に格子型構造物の模型を配置した。まず、ふるい分け試験より抽出された一様砂礫（ $d \approx 7\text{mm}$ ）を水路底面に敷き詰め、上部からの水の供給により石礫型土石流を発生させた。そして、下流端付近に設置した格子型構造物により閉塞された礫の重量および格子型構造物を通過して下流に流出した礫の重量を計測した。なお、捕捉効果に有効な透過型砂防えん堤の透過部構造を把握するため、図-3に示す透過部の形状（垂直部材、水平部材および格子部材）、透過部材の断面形状（円型部材、角型部材：図-3左上）、格子間隔、図-4に示す透過部の河床に対する傾斜角度および格子部材の配置（土石流側に配置する縦部材と横部材との捕捉効果の違い：図-3右上）をそれぞれ変化させて、捕捉率（格子型構造物により捕捉された礫量と全礫量との重量比率）を比較した。最後に、混合砂礫（ $d \approx 3.5\text{mm}$, 7mm 等）の重量（存在）割合をそれぞれ変化させて敷き詰め、透過部において閉塞に必要な大径礫の土石流中における存在割合（土砂濃度）について考察した。

図-2 実験装置の概要

図-3 透過部の形状（鉛直部材、水平部材、格子部材）および透過部材の断面形状（円型部材、角型部材）

図-4 透過部の傾斜設置概要

実験条件を、表-1に示す。ここに、 θ_l は透過部の河床に対する傾斜角度（図-4）、 L は格子間隔（ d は格子間隔と礫径 $d \approx 7\text{mm}$ との比率）、Dam type は透過部の形状（図-3）、Grill type は透過部材の断面形状（図-3左上）、Front bar type は格子部材の配置（格子部材における土石流側に配置された部材：縦あるいは横部材；図-3右上）である。また、 V_l/V_s は河床に敷き詰めた大径礫（ V_l ）と小径礫（ V_s ）の重量割合および Q は上部からの水の供給流量である。なお、Case 3-13 においては、四種類の礫径（ $d \approx 1\text{mm}$, 3.5mm , 7mm および 10mm ）を同じ重量割合（全礫中においてそれぞれ1/4の割合）で混合させている。実験の様子に関して、2台のビデオカメラを用いて捕捉状況を録画している。また、捕捉後の状況を把握することを目的に、礫が完全に捕捉されてから3秒後まで水の供給を続けている。

(4) 実験結果および考察

実験は発生する土石流の流動層中における礫分布の不均一性を考慮して、それぞれの条件に対して3回実施した。各実験で得られたそれぞれの捕捉率を、表-2に示す。また、透過部の形状や構造等の違いが捕捉率に与える影響を明らかにするため、各実験ケースの捕捉率を整理し

表-1 実験ケース

Case	θ_l (deg)	L (*d)	Dam type	Grill type	Front bar type	V_l/V_s (kg/kg)	Q (ℓ/s)						
1-1	90	1.5	Gr.	□	Ver.	1.0/0.0	0.72						
1-2					Hor.								
1-3			Hor.	○	Ver.								
1-4				□	-								
1-5								○					
1-6		Ver.											
1-7		2.0	Gr.		Ver.								
1-8			Ver.	□	-								
1-9			Hor.										
1-10			Ver.					○					
1-11		2.5	Gr.	□	Ver.								
1-12								1.0					
1-13								2.5					
1-14								2.0					
1-15								2.0					
2-1	45	1.5	Ver.	○	Ver.	0.72							
2-2							-						
2-3			Hor.										
2-4		2.0	Gr.		Ver.								
2-5			Ver.		-								
2-6			1.0	Hor.									
2-7		1.5	Gr.		Ver.								
2-8													
2-9		90	2.0	Hor.			-	0.95					
2-10	45	1.5											
2-11													
2-12	90	2.0	Gr.	□	Ver.	0.8/0.2	0.72						
3-1								0.6/0.4					
3-2								0.4/0.6					
3-3								0.2/0.8					
3-4								0.3/0.7					
3-5						45		1.5			0.5/0.5	0.50	
3-6													0.95
3-7													0.72
3-8													0.95
3-9													0.50
3-10						90		2.0				Mix ^{*1}	0.72
3-11													
3-12													
3-13													

*1: $d=1, 3.5, 7$ & 10 mm

Gr.: Mesh grid, Hor.: Horizontal (grid), Ver.: Vertical (grid) □: Square & ○: Circle

た結果を図-5 から図-10までに示す。なお、図中には各実験の捕捉率とそれぞれ平均化した捕捉率を示すとともに、それぞれの図中における最大の捕捉率で除した（無次元した）値を（ ）の数字にて示している。

透過部形状の違いが捕捉率に与える影響に関して、部材を河床に対して垂直に設置した場合の捕捉率を図-5に示す。また、部材を斜め（45度）に設置した場合の捕捉率を図-6に示す。図-5に示されるとおり、格子間隔が礫径に対して約1.5倍（1.5d）の場合、透過部の形状の違い（図-3）が捕捉率に対してあまり影響を与えないことがわかった。一方、格子間隔が2.0dの場合、水平部材だけでは全く捕捉されず、鉛直部材が土砂の捕捉に大きな役割を果たすことがわかった。また、図-6に示されるとお

表-2 実験結果（捕捉率：%）

Case	1 st	2 nd	3 rd	Case	1 st	2 nd	3 rd
1-1	96	96	96	2-6	0	0	0
1-2	94	94	96	2-7	96	95	95
1-3	96	96	96	2-8	6	2	4
1-4	82	86	86	2-9	88	88	88
1-5	92	90	90	2-10	8	38	8
1-6	90	90	94	2-11	76	88	82
1-7	90	86	90	2-12	94	94	94
1-8	72	74	82	3-1	74	74	72
1-9	0	0	0	3-2	58	70	60
1-10	24	52	32	3-3	50	0	34
1-11	38	36	42	3-4	0	0	0
1-12	96	96	98	3-5	0	0	0
1-13	62	58	44	3-6	60	58	60
1-14	4	30	16	3-7	60	60	56
1-15	56	54	62	3-8	52	56	54
2-1	94	94	96	3-9	62	48	60
2-2	80	44	82	3-10	6	16	16
2-3	62	74	58	3-11	52	46	56
2-4	10	70	22	3-12	68	58	68
2-5	90	90	76	3-13	61	54	63

図-5 透過部形状の違いによる捕捉率の変化（垂直設置の場合）

図-6 透過部形状の違いによる捕捉率の変化（傾斜設置の場合）

り、格子部材を河床に対して斜め（45度）に設置した場合、垂直に設置した場合（図-5）に比べて捕捉率が低下した。特に、格子間隔が2.0dの場合、格子部材以外の形状（水平部材のみあるいは垂直部材のみの構造：図-3）では、全く捕捉されなかった。

透過部における格子間隔の違いと捕捉率との関係を、図-7に示す。図-7に示されるとおり格子間隔が2.0d以下の場、約8割程度以上の捕捉率であった。

図-7 格子間隔の違いによる捕捉率の変化（格子形状の場合）

図-8 透過部材の断面形状の違いによる捕捉率の変化

しかしながら、格子間隔が $2.5d$ の場合、 $2.0d$ 以下の場合に比べて約半分以下の捕捉率（捕捉率39%）であった。

透過部における透過部材の断面形状の違いと捕捉率との関係について、図-8に示す。図-8に示されるとおり格子間隔が $1.5d$ の場合、透過部材の断面形状の違いによる捕捉率の違いはほとんど確認されなかった。しかしながら、格子間隔が $2.0d$ の場合、丸部材の捕捉率は角部材に比べて約半分以下であった。この要因は、図-1に示される閉塞メカニズムに関して、角部材を中心とした礫の回転において、丸部材と比べて礫が滑り流れずに確実に回転することにより早期にアーチが形成され、結果として閉塞する確率が向上したことによるものと推測される。

上部から供給する水の供給流量の違いが捕捉率に与える影響に関して、格子形状の場合における流量の違いと捕捉率との関係を図-9に示す。図-9に示されるとおり格子間隔が $2.0d$ の場合、流量の違いが捕捉率にあまり影響を与えないことがわかった。また、流量の増加に伴い、捕捉率が減少する傾向を示した。この要因に関して、捕捉状況の観察結果に基づき考察する。格子間隔が $2.0d$ 以下の幅で流量がある一定以上の場合には、ほとんど捕捉できる。しかしながら、透過部において捕捉された礫が後続流により再侵食を受けることにより、一部の礫が透過部から越流により下流に流出してしまい、結果として捕捉率（透過部において捕捉されている礫の割合）が低下した。一方、格子間隔が $2.5d$ の場合、流量の増加に伴い

捕捉率が大幅に増加した（約三倍程度）。この要因として、次の点が考えられる。流速の増加に伴い礫の移動速度が増加し、図-1に示される鉛直部材を軸に礫が回転する速度が大きくなることによって早期に閉塞が始まり、閉塞までに透過部から流出する礫の量が減少したことによるものと推測される。なお、より詳細な検討は今回の実験装置では困難であるため、今後の課題とする。

透過部における格子部材配置（図-3右上）の違いと捕捉率との関係を、図-10に示す。なお、図-10に示されるとおり格子間隔が $1.5d$ の場合、水平部材と鉛直部材の配置の違いによる捕捉率の違いはほとんど確認されなかった。しかしながら、格子間隔が $2.0d$ の場合、格子部材の鉛直部材を土石流側（上流側）に配置した捕捉率は、上流側に水平部材配置した場合の捕捉率に比べて約1.5倍程度の捕捉効果になることがわかった。

次に、表-1におけるCase 3-1からCase 3-12までに示す二種類の混合砂礫（ $d \approx 3.5\text{mm}$ および 7mm ）の存在割合をそれぞれ変化させた実験と、Case 3-13に示す同じ存在割合で混合した四種類の砂礫（ $d \approx 1\text{mm}$, 3.5mm , 7mm および 10mm ）での実験結果を用いて検討した。土石流中における大径礫（ $d \approx 7\text{mm}$ 以上）の存在割合（土砂濃度）の違いと捕捉率との関係について整理した結果を、図-11に示す。なお、図-11の横軸は土石流中における大径礫の存在割合（土砂濃度）を、縦軸は捕捉率（3回の実験結果とそれぞれの平均値）を示す。ここで、図中で

図-9 流量の違いによる捕捉率の変化

図-10 格子部材配置の違いによる捕捉率の変化

図-11 大径礫の土砂濃度の違いによる捕捉率の変化
(格子間隔 $L=2.0d$ の場合)

図-12 検討に用いる礫の粒径頻度分布曲線

採用している格子間隔は流量の違いにおいてほとんど差が確認されなかった最大格子間隔の $2.0d$ (図-9) としている。また、図-11において、それぞれの土砂濃度における捕捉率 (ただし、最小値) を用いた回帰曲線を示す。本回帰曲線の重相関係数は、 0.8772 であった。今後、更なる実験を増やした本回帰式の精査が望まれる。

本研究では、透過型砂防えん堤の土砂調節機能として期待する捕捉効果を捕捉率70%以上 (土石流中における大径礫の土砂濃度 C_L が約0.4以上: 図-11) として、以降に議論を展開する。

3. 礫の粒径分布特性を考慮した捕捉効果の評価

透過型砂防えん堤の土砂流出調節機能において礫の粒径分布特性の違いが捕捉効果に与える影響に関して、実渓流に存在する礫の粒径頻度分布曲線を用いて、旧指針³⁾および現指針²⁾に準じて計画された透過型砂防えん堤の土砂流出機能 (捕捉効果) について検討する。なお、実験で明らかになった知見がそのまま現地に適用できるものと仮定して、以降に考察を加える。

(1) 検討方法

検討に用いる礫の粒径頻度分布曲線を、図-12に示す。図-12に示される粒径分布は、筆者らが調査した一般的

図-13 各粒径の通過重量百分率を示した礫の粒径加積曲線

表-3 各渓流を対象に指針^{2), 3)}に準じて計画した場合の格子間隔と旧指針³⁾に準じて計画された格子間隔における捕捉率 (%)

	$1.5D_{95}^{(3)}$ (cm)	$1.0D_{95}^{(2)}$ (cm)	$2.0D_{CL}$ (cm)	Capture rate : $1.5D_{95}$ (%)
Torrent A	120	80	90	52
Torrent B	210	140	150	41
Torrent C	60	40	50	63
Test case	210	140	270	78

な土石流危険渓流 (A渓流, B渓流およびC渓流) において実際に存在する礫の粒径頻度分布と、粒径分布特性の違いによる影響を明確にするため任意に仮定した粒径頻度分布 (Test case渓流) である。ここで、各渓流における粒径の存在割合を明確にするため、図-12に示される各粒径より算出した体積に各個数に乗じて、礫の粒径加積曲線として図-13に示した。なお、検討に際して、各渓流の透過型砂防えん堤付近における河床勾配 (ただし、土石流発生勾配以上) は変化しないものとし、発生する土石流内の全土砂濃度 (ただし、 $C_* = 0.54$ ²⁾) は一定としている。また、礫の比重は一定としている。

(2) 検討結果

各渓流 (A, B, C渓流およびTest case渓流) を対象に、図-12に示される粒径頻度分布を用いて算出した旧指針³⁾および現指針²⁾に準じて計画された場合のそれぞれの格子間隔 ($1.5D_{95}$ および $1.0D_{95}$) を表-3に示す。

また、各渓流において捕捉効果 (捕捉率70%) に必要な土石流中における大径礫の土砂濃度 ($C_L=0.4$: 図-11) を土石流中の全土砂濃度 ($C_* = 0.54$) で除した全礫中における大径礫の存在割合 f_{bl} は、約76%となる。これより、算出された全礫中における大径礫の存在割合 f_{bl} を用いて、図-13に示される各粒径加積曲線により設定されるそれぞれの格子間隔 ($2.0D_{cl}$: ただし、 $2.0d$ の格子間隔として取り扱うため、礫の存在率 f 24%に相当する礫径 d に対して2倍の礫径) を表-3に示す。この格子間隔 ($2.0D_{cl}$) は、本研究において提案する粒度分布特性を考慮した有効な格子間隔である。なお、実在する3渓流 (A, BおよびC渓流) の場合、筆者らが提案する粒径分布特性を考慮した格子間隔 ($2.0D_{cl}$) の値が、旧基準³⁾ $1.5D_{95}$ に準じて計画された格子間隔の値と新基準²⁾

($1.0D_{95}$) に準じて計画された格子間隔の値の間であった。一方、任意に設定した粒径加積曲線 (Case Test 溪流) の場合、筆者らが提案する粒径分布特性を考慮した格子間隔 ($2.0D_{50}$) は、旧基準³⁾ ($1.5D_{95}$) および新基準²⁾ ($1.0D_{95}$) に準じて計画された格子間隔よりも広い結果であった。これより、粒径分布特性によっては、旧基準³⁾ に準じて計画された格子間隔においても十分な捕捉効果が期待できる場合があることがわかった。

次に、各溪流を対象に旧指針³⁾ (格子間隔が $1.5D_{95}$) に準じて計画された場合の透過型砂防えん堤におけるそれぞれの捕捉率を推定する。まず、それぞれの格子間隔 ($1.5D_{95}$) の値を同様に 2.0 ($2.0d$) で除して算出した値 (粒径) を用いて、図-13に示される粒径加積曲線よりそれぞれの全礫中における大径礫の存在割合を算出した。そして、算出された全礫中における大径礫の存在割合を、土石流中の全土砂濃度 ($C_s=0.54$) で乗じて、それぞれの土石流中における大径礫の土砂濃度を算出した。最終的に、算出された土石流中における大径礫の土砂濃度を用いて、図-11により求めたそれぞれの捕捉率 (Capture rate: $1.5D_{95}$) を表-3に示す。表-3に示されるとおり、各溪流 (A, BおよびC溪流) の捕捉率において最大で約1.5倍の捕捉率の違いが確認され、粒径分布特性の違いが捕捉率に影響を与えることがわかった。特に、旧基準³⁾ で計画された透過型砂防えん堤の捕捉率が7割未満である可能性があることが示唆された。

今後、透過型砂防えん堤に期待される捕捉効果に関して、定量的な議論 (捕捉率等) が望まれる。なお、本研究では土石流中における土砂濃度等を一定として検討している。しかしながら、透過型砂防えん堤の直上流部の河床において勾配がほとんどない平坦な河床が存在した場合、その平坦地の直上流部において大径礫が堆積および停止し、閉塞に必要な大径礫が透過型砂防えん堤まで到達せず、結果として透過部で閉塞されていないことが懸念される。今後、透過部直上流の河床勾配と捕捉率との関係等について明らかにしていくことが望まれる。

4. おわりに

本研究では、透過型砂防えん堤の土砂流出調節機能 (捕捉効果) に関して、実験により有効な透過部構造に関して詳細に検討するとともに、基準の変遷に伴う捕捉効果の違いについて考察した。

本研究により得られた成果を、以下に要約する。

- 1) 透過型砂防えん堤における透過部の形状の違いと捕捉効果との関係に関して、格子間隔が礫径に対して比較的に広い場合 (約2.5倍以上) には水平部材だけでは全く捕捉できず、鉛直部材が土砂捕捉に大きな役割を果たしていることが明らかになった。
- 2) 格子間隔の違いと捕捉効果との関係に関して、期待

する捕捉効果に対して必要な格子間隔は、一様砂礫の場合、礫径に対して約2倍程度 ($2.0d$) までが望ましいことが確認された。

- 3) 透過部材の断面形状の違いと捕捉効果との関係に関して、角部材は丸部材に比べて捕捉効果において有効であることが明らかになった。
- 4) 透過部の河床に対する設置角度の違いと捕捉効果との関係に関して、河床に垂直に透過部を接した場合は斜めに設置した場合に比べて、捕捉効果において有効であることが明らかになった。
- 5) 格子部材の土石流側における部材の配置の違いと捕捉効果との関係に関して、土石流側に縦部材を配置した場合は横部材を配置した場合に比べて捕捉効果において有効であることが明らかになった。
- 6) 実験で得られた知見をそのまま現地に適用できると仮定した場合、格子間隔が大径礫に対して約2.0倍で計画された透過型砂防えん堤において約70%以上の捕捉率を期待するには、大径礫が土石流中において約0.4以上の土砂濃度を有する量が必要であることが示唆された。
- 7) 実溪流に存在する礫の粒径分頻度分布特性を用いて検討した結果、粒径分布特性の違いが捕捉率に影響を与えることがわかった。特に、実溪流に存在する粒径分布特性を用いて検討した結果、旧基準で計画された透過型砂防えん堤の捕捉率が7割未満である可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) 橋村京介, 橋本晴行, 三好朋宏, 池松伸也, 蓮尾斉彦, Farouk Maricar, 坂田賢亮: 透過型砂防えん堤による流木・土砂・水混相流の捕捉効果に関する水路実験, 砂防学会研究発表会概要集, pp.72-73, 2012.
- 2) 国土交通省 砂防部: 土石流対策・流木対策設計技術指針および同解説, 2007.
- 3) 建設省 河川局: 土石流対策技術指針, 2000.
- 4) 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.
- 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率に関する研究, 新砂防, vol.47, NO.5, pp.8-13, 1995.
- 6) 水野秀明, 小橋澄治, 南 哲行, 倉岡千朗: 個別要素法を用いた鋼管製透過性砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析, 砂防学会誌, Vol.52, No.6, pp.4-11, 2000.
- 7) 芦田和男, 江頭進治, 栗田三津夫, 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, Vol.30, B-2, pp.441-456, 1987.
- 8) 矢澤昭夫, 水山高久, 森田昭宏: 土石流ブレイカー (底面水抜きスクリーン) に関する実験的研究, 土木研究所資料, vol.2374, 1986.

(2013. 9. 30受付)