

# 砂防えん堤による土石流の制御効果の評価に関する研究

橋本晴行

## 1. はじめに

2011年9月紀伊半島における台風12号災害など土石流災害が頻発しており、有効な対策の立案が緊急課題となっている。土石流の代表的な対策工に砂防えん堤がある。例えば、2009年7月の防府市土石流災害においては、同市内の剣川、八幡谷川に設置されていた砂防えん堤が土石流をくい止め下流の被害を軽減したと言われている。また2010年7月鹿児島県南大隅町船石川で発生した土石流に対しても、既設の砂防えん堤が被害軽減の効果を発揮した。

剣川の砂防えん堤はコンクリート製の不透過型、八幡谷川のそれは鋼製の透過型である。また、船石川では、鋼製スリットと不透過型コンクリート製の砂防えん堤が連続的に設置されていた。

一般に土石流は流木を伴っており、土砂・水・流木の3相流である。しかしながら、砂防えん堤による土石流制御効果に関する研究は数多く存在するが、流木を伴った土石流については若干の実験的研究があるだけである。砂防えん堤による土砂・流木の捕捉率と流木スケールやえん堤開口部との関係など、定量的な関係までは解明されていない。

有効な対策立案のためには砂防えん堤における各相の挙動を解明し、土砂・流木の捕捉過程の定量的な評価法を構築することが必要である。

本研究は、流木を伴った土石流の砂防えん堤による制御効果について検討したものである。まず、(1) 砂防えん堤によって捕捉された土石流の事例調査を行い、その結果をもとに、(2) 流木を伴った土石流の砂防えん堤による捕捉効果に関する水路実験を実施した。

土石流は通常流木を伴っており、土砂・水・流木の3相流である。それぞれ様態と比重が異なっており、砂防えん堤などの構造物に遭遇すると、異なった挙動をする。本研究の特色は、砂防えん堤における土石流の挙動を土砂・水・流木の3相流に着目して解明したことである。

また、砂防えん堤には透過型と不透過型がある。最近では、洪水流など通常の小規模な出水時にはそれを流し、土石流など稀に発生する大規模な出水の場合には、それを捕捉することを目的として透過型砂防えん堤が設置されている。本研究は、これらの砂防えん堤の施設効果について評価の基礎資料を提供しようとするものである。

## 2. 砂防えん堤によって捕捉された土石流の事例調査 - 山口県防府市の場合 -

2009年7月21日、防府市の剣川、八幡谷川など多くの溪流において土石流が発生した。剣川、八幡谷川では設置されていた砂防えん堤が下流の被害を軽減したと言われている。剣川の砂防えん堤はコンクリート製の不透過型、八幡谷川のそれは鋼製の透過型である。

表1に調査結果の概要を示す。同表には、3章で述べる鹿児島県南大隅町の調査結果も示している。砂防えん堤設置の河道の湾曲状態、側方からの土石流の流入の有無、河道内の植生状況などは、砂防えん堤における堆砂地形の形成に対する大きな変動要因となっていた。

剣川では、上流（不透過型）砂防えん堤において河道の湾曲が湾曲部外岸側に河床高の増大を引き起こした。一方、八幡谷川では、（透過型）砂防えん堤堆砂地内に繁茂している樹林帯が堆砂地形を平坦化させた。砂防えん堤の土砂堆積区間には、両岸からの土石流の横流入も河道の湾曲もないため、剣川のような堆砂地形の変化はなかった。

砂防えん堤設置の河道区間において、災害前の河床勾配は、剣川と八幡谷川でそれぞれ大きく異なるが、災害後の堆砂勾配は上流側、下流側それぞれの砂防えん堤において河川に関係なくほぼ同じ値であった。上流側砂防えん堤での堆砂勾配は約  $2^\circ$ 、下流側砂防えん堤での堆砂勾配は約  $1.3^\circ$  であった。

流木は、剣川では湾曲部や横流入付近の堆砂表面に集積していたが、八幡谷川では砂防えん堤開口部に集積していた。しかしながら巨礫は開口部には観察されなかった。流木の開口部における集積は、下流への土砂流出を完全にくい止めていた。

土石流の堆積土砂には通常、巨礫が多く混在する。剣川では特に上流側の砂防えん堤においてそれが顕著であったが、八幡谷川では巨礫はほとんど観察されなかった。採取した資料の粒度分析によると、いずれの河川も上流側砂防えん堤において  $d_{50} \doteq 1.4\text{mm}$ 、下流側砂防えん堤において  $d_{50} \doteq 1\text{mm}$  であった。これは八幡谷川では堆積土砂の‘質’を概ね代表していた。

剣川と八幡谷川それぞれの上流砂防えん堤に捕捉された土量はほぼ同じであった。同様にそれぞれの下流側砂防えん堤に捕捉された土量もほぼ同じ量であった。上流側砂防えん堤の土砂捕捉量は下流側砂防えん堤のそれより3倍～4倍多かった。連続する二つの砂防えん堤によって捕捉された全土量は両溪流とも  $9500\text{m}^3$  程度であった。これは、山間部から住宅地域への土砂流出を減少させ、より甚大な被害の発生を防いだと考えられる。

表 1 調査結果の概要

	剣川		八幡谷川		船石川右支川	
	上流砂防えん堤	下流砂防えん堤	上流砂防えん堤	下流砂防えん堤	2号(上流)砂防えん堤	1号(下流)砂防えん堤
災害前の河床勾配	3.32°	4.45°	6.28°	7.12°	20°	0°
災害後の堆砂勾配 (直接測量)	1.89°	3.43° ( $0 \leq X \leq 50$ ) 1.42° ( $X \geq 50$ )	2.02°	1.25°	8.30°	7.55°
堆砂地形	湾曲部外岸側に多く堆積	合流付近に盛り上がり	堆砂地中央部に盛り上がり	起伏が少ない	縦断方向に盛り上がり	縦断方向に盛り上がり
流木集積位置	湾曲部中央	合流付近	えん堤開口部	えん堤開口部		
巨礫の有無	合流付近を中心に多数存在	合流付近を中心に点在	見られない	見られない	巨礫が顕著	巨礫が顕著
採取堆積土砂の50%粒径	1.42mm	0.96mm	1.38mm	0.99mm	0.4mm	0.5mm
堆砂幅	15～35m	15～35m	15～45m	20～35m	約10m	
土砂捕捉量	7400m <sup>3</sup>	2200m <sup>3</sup>	7300m <sup>3</sup>	2200m <sup>3</sup>	21,000m <sup>3</sup>	69,000m <sup>3</sup>

### 3. 砂防えん堤によって捕捉された土石流の事例調査 - 鹿児島県南大隅町の場合 -

2010年7月4日から8日にかけて、鹿児島県南大隅町根占山本地区の船石川右支川において崩壊が発生し、それに伴って土石流が断続的に7回発生した。船石川では、1号鋼製スリット（下流）と2号不透過型コンクリート製（上流）の砂防えん堤が連続的に設置されていた。発生した土石流に対して、既設の砂防えん堤は被害軽減の効果を発揮したと言われている。

表 1 に調査結果の概要を示している。

船石川の河床勾配は、災害前は、上流（2号）・下流（1号）砂防えん堤のそれぞれにおいて大きく異なるが、災害後の堆砂勾配は上流側・下流側砂防えん堤ともほぼ同じ約 $8^\circ$ となった。

また、巨礫が、砂防えん堤の堆砂地に多く観察された。1号（透過型鋼性スリット）えん堤では、スリット開口部を巨礫が閉塞していた。一方、2号（不透過型コンクリート製）えん堤では巨礫が堤体の上に多数乗り上げていた。

巨礫を除いた堆積物については、上流側砂防えん堤において  $d_{50} \approx 0.4\text{mm}$ 、下流側砂防えん堤において  $d_{50} \approx 0.5\text{mm}$  であった。防府市の事例に比べて細粒であった。

二つの砂防えん堤によって捕捉された全土量は船石川において  $90,000\text{m}^3$  程度であった。貯砂容量の倍以上の土砂が捕捉された。

防府市の事例に比べ、船石川の砂防えん堤は崩壊地からの距離が短かった。前者が、流動の過程で巨礫など粗粒な粒子を堆積させながら流下してきた結果、砂防えん堤では堆砂勾配は緩やかで、巨礫もあまり見られなかった。それに対して、後者は、崩壊地からの距離が短いため、流動の過程で巨礫など粗粒な粒子を堆積させるほどの十分な流送距離をもたなかった。その結果、砂防えん堤では堆砂勾配は急になり、巨礫も顕著となった。実際の貯砂容量以上に堆積したのは、流動性が低かったためと考えられる。

#### 4. 流木を伴った土石流の透過型砂防えん堤による捕捉効果に関する水路実験

近年、スリット状や格子状の透過型砂防えん堤が注目されるようになった。透過型砂防えん堤は、洪水などの中小規模の出水時には土砂を通過させ、土石流のような大規模な出水時には巨礫群を開口部に詰まらせ、後続流の土砂を捕捉させる効果が期待されている。しかしながら、防府市の事例などではえん堤開口部を大量の流木が閉塞し、下流への土砂流出を防いでいた。このことは、大量の流木が、透過型砂防えん堤による土石流捕捉効果に大きな役割を果たしていることを示している。しかしながら、透過型砂防えん堤による、流木を伴った土石流の捕捉効果についての定量的な研究はあまりない。本章では、流木の流下量やスケールなど種々のパラメータが砂防えん堤の流木・土砂捕捉に及ぼす効果について調べた。

水路を流下する流木本数が多いほど、砂防えん堤に捕捉される流木数は多くなる。またスケールの小さな流木については、設置本数が多くても、捕捉量は少なかった。捕捉されるためには十分な数量の流木の流下が必要であった。

流木の長さが大きくなると流木の捕捉数、捕捉量も大きくなった。

砂防えん堤に捕捉された流木の堆積高が増加すると、捕捉土砂量は線型的に増大した。

図 1 は、水路に流木を初期本数  $N=120, 180$  本配置した初期条件のもとで、砂防えん堤による流木捕捉率とえん堤開口部・流木長比  $l_0/L$  との関係プロットしたものである。えん堤開口部・流木長比が大きくなると流木捕捉率は急減することが分かる。回帰曲線を求めると、初期流木数  $N$  に対応して図中の実線、破線のようにになっている。えん堤開口部・流木長比  $l_0/L$  は小さく、初期流木数  $N$  は大きくなると流木捕捉率は増大することが分かる。

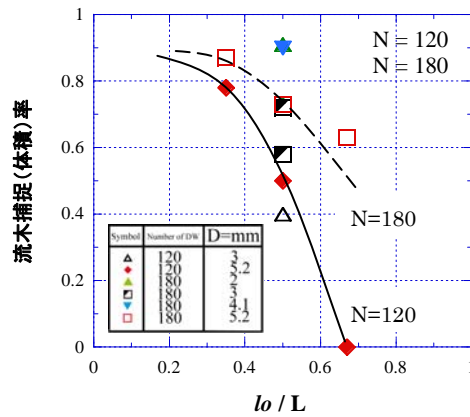


図1 流木捕捉（体積）率のえん堤開口部・流木長比への依存性

### 5. 流木を伴った土石流の砂防えん堤における堆積過程に関する水路実験

防府市剣川の不透過型砂防えん堤と八幡谷川の透過型砂防えん堤とは、流木・土砂の堆積形態が全く異なっていた。そこで本章では、不透過型と透過型砂防えん堤について、堆砂実験を行い、土砂・流木の挙動・堆積過程を調べた。

その結果、両者において流木の挙動、土砂の堆積過程に大きな違いが観察された。堆砂地形の縦断図を図2に示す。ここに初期流木本数  $N=120$  の条件のもとで透過型と不透過型えん堤の堆砂地形を比較する。透過型の場合えん堤まで土砂が到達し堆積するが、不透過型では、えん堤付近に湛水が生じるため、土砂がえん堤まで達することができず、えん堤から上流に離れたところで堆積している。流木は透過型の場合、えん堤開口部に一部捕捉されるが、不透過型の場合にはえん堤を越えて下流へ全て流下した。

流木の有無は透過型砂防えん堤に大きな影響を与えるが、不透過型砂防えん堤には影響がないことが確認された。

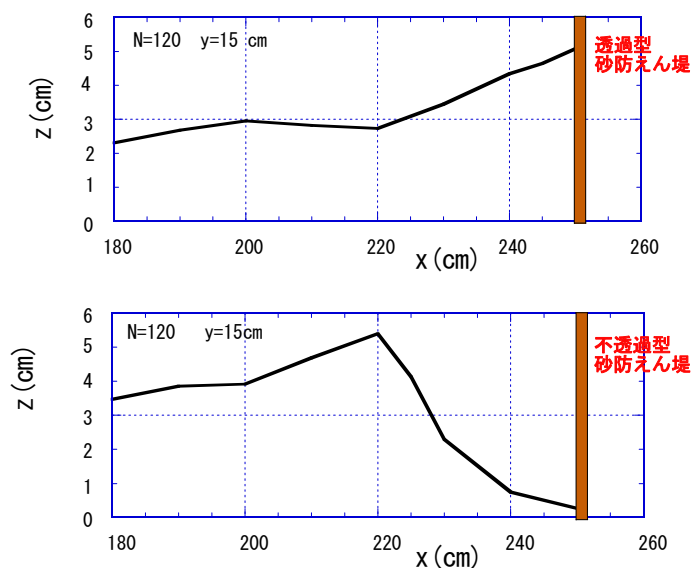


図2 堆砂地形縦断図(上:透過型, 下:不透過型)

## 6. おわりに

代表的な土石流対策工である砂防えん堤について、流木を伴った土石流を、土砂・水・流木の3相流の視点から、不透過型と透過型砂防えん堤における各相の挙動を解明した。

土砂・水・流木はそれぞれ様態と比重が異なっており、砂防えん堤などの構造物に遭遇すると、異なった挙動をする。本研究は土砂・水・流木の3相流に着目し、(1)砂防えん堤によって捕捉された土石流の事例、(2)流木を伴った土石流の砂防えん堤による捕捉効果について調べた。

砂防えん堤設置の河道の湾曲状態、河道内の植生状況、側方からの土石流の流入の有無、崩壊地からの距離、土石流の流動性などは、砂防えん堤における堆砂地形の形成に対する大きな要因となった。

流木は、防府市剣川では湾曲部や横流入付近の堆砂表面に集積していたが、八幡谷川では砂防えん堤開口部に集積していた。しかしながら巨礫は開口部には見られなかった。開口部における流木の集積は、下流への土砂流出を完全にくい止めていた。一方、船石川では巨礫が、砂防えん堤の堆砂地に多く観察された。1号(透過型鋼性スリット)えん堤では、スリット開口部を巨礫が閉塞しているようであった。一方、2号(不透過型コンクリート製)えん堤では巨礫が堤体の上に多数乗り上げていた。

防府市の土石流は、流下の過程で巨礫など粗粒な粒子を堆積させながら流下してきた結果、砂防えん堤における堆砂勾配は緩やかで、巨礫もあまり観察されなかった。それに対して、船石川の土石流では、崩壊地からの距離が短いため、流動過程で巨礫など粗粒な粒子を堆積させるほどの十分な流送距離を持たなかった。その結果、砂防えん堤では堆砂勾配は急になり、巨礫も顕著となった。

さて、実験結果によると、流下する流木本数が多いほど、砂防えん堤に捕捉される流木数は多くなる。またスケールの小さな流木については、流下する流木本数が多くても、捕捉量は少量であった。捕捉されるためには十分な数量の流木の流下が必要であった。

砂防えん堤に捕捉された流木の堆積高が増加すると、捕捉土砂量は線型的に増大した。

流木捕捉率は、えん堤開口部の開きと流木長との比  $l_0/L$  が小さくなるほど、初期流木本数が多くなるほど増加した。

最後に、透過型および不透過型砂防えん堤模型において水・土砂・流木の混相流の挙動を調べる実験を行った。その結果、透過型の場合土砂がえん堤まで到達し堆積するが、不透過型では土砂はえん堤まで到達しなかった。流木は透過型の場合、えん堤開口部に一部捕捉されるが、不透過型の場合にはえん堤を越えて下流へ全て流下した。流木の有無は透過型砂防えん堤の機能に大きな影響を与えるが、不透過型砂防えん堤には影響がないことが確認された。

従って、土石流対策として砂防えん堤を考える場合には、まず、流木・土砂の生産・流出を正確に見積もる必要がある。その上で、えん堤が設置されている現地の地形特性も合わせ考えながら、砂防えん堤のタイプやえん堤設置数などを決定する必要がある。