

# 透過型砂防えん堤における土砂・水・流木混相流の挙動に関する水路実験

EXPERIMENTS ON FLOW BEHAVIOR OF SEDIMENT-WATER-WOOD MIXTURE FLOWS  
AT AN OPEN CHECK DAM

橋村京介<sup>1</sup>・橋本晴行<sup>2</sup>・Farouk Maricar<sup>1</sup>・三好朋宏<sup>3</sup>・池松伸也<sup>1</sup>

蓮尾齊彦<sup>1</sup>・坂田賢亮<sup>1</sup>

Kyousuke HASHIMURA, Haruyuki HASHIMOTO, Farouk MARICAR, Tomohiro MIYOSHI  
Shinya IKEMATSU, Tadahiko HASUO, Kensuke SAKADA

<sup>1</sup> 九州大学大学院工学府(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

<sup>2</sup> 九州大学大学院工学研究院(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: hasimoto@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup> 国土交通省青森河川国道事務所(〒030-0822 青森県青森市中央 3 丁目 20-38)

*Key words : open check dam, debris flow, woody debris, sediment-water-wood mixture*

## 1. はじめに

透過型砂防えん堤は、洪水流など通常の小規模な出水時にはそれを通過させ、土石流など稀に発生する大規模な出水の場合には巨礫群がえん堤開口部を閉塞し後続の土石流を食い止めることができることが期待されている。近年自然環境の視点から注目を集めている土石流対策のひとつである。しかしながら、2009年7月21日に山口県防府市八幡谷川で発生した土石流災害では、大量の流木が透過型砂防えん堤の開口部を閉塞し、後続の土砂を完全に捕捉していた<sup>1), 2)</sup>。従って透過型砂防えん堤については土石流捕捉効果に流木が重要な役割を持つことが考えられ、従来から実験的研究が行われてきたが<sup>3), 4)</sup>、定量化までには至っていない。崩壊型土石流は通常土砂・水・流木の3相流を形成し、それぞれ比重や形状が異なるため、砂防えん堤に遭遇すると異なった複雑な挙動をする。

本研究は、流木を伴った土石流の透過型砂防えん堤における挙動を3相流の観点から解明するもので、流木の本数や長さスケールが砂防えん堤の土石流捕捉機能にどのような影響を及ぼすかを実験的に調べたものである。

## 2. 実験方法

実験には、図-1のような長方形断面の直線水路を用いた。透過型砂防えん堤としては、図-2のようなI型えん堤模型を用いた。これを水路下流端から1.5m上流に設置した。それらのスケールを表-1に示す。これは、防府市八幡谷川設置の砂防えん堤の1/50縮尺模型に相当する。同表には移動床材料、流木模型の特性も合わせて示している。

図-1の移動床の部分に平均粒径3.6mmの土砂を敷いた。その後、移動床面上に図-3のような方法で流木を配置した。流木を配置し終えた後、水路勾配を8°に設定し、水路上流端から約100cm<sup>2</sup>/sの単位幅流量の水を供給した。水と流木が先行する形で土砂・水・流木の3相流が発生・流下し、流れの先端がえん堤模型に到達してから約20秒後に水の供給を停止した。この状況を水路真上からビデオカメラ1台および側方からビデオカメラ2台を用いて撮影した。一方、実験終了後、えん堤に捕捉された流木模型の本数、それを通過した流木模型の本数、通過土砂量、捕捉土砂量をそれぞれ計測した。さらに、土砂の堆積高を、ポイントゲージを用いて計測した。

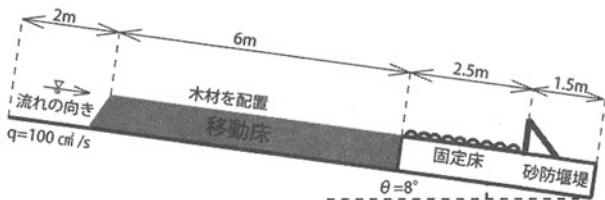


図-1 実験水路の縦断図

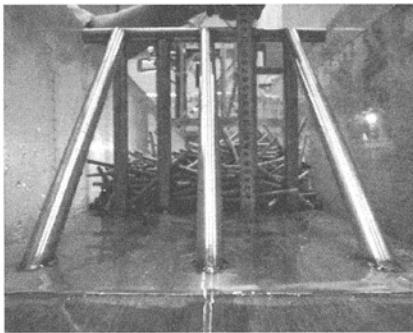


図-2 えん堤模型の写真(下流から上流を望む)

表-1 実験条件

水路長(m)	12
水路幅(cm)	30
水路勾配(°)	8
えん堤高さ(cm)	22.8
えん堤幅(cm)	30
スリット径(cm)	1.8
開口部間隔lo(cm)	3.5
単位幅流量(cm <sup>2</sup> )	100
平均粒径(mm)	3.6
土砂比重σ / ρ	2.65
流木長L(cm)	5.25, 7, 10
流木径D(mm)	2.0, 3.0, 4.1, 5.2
配置本数N(本)	60, 120, 180
流木比重	0.65~0.76

### 3. 実験結果と考察

#### (1) 流木と土砂の挙動

水路に供給された水は、土砂、流木を巻き込んで流下するが、流木は土砂よりも先行しえん堤に到達した（図-4, 5）。えん堤に到達した流木は、一部えん堤を通過し、残りは捕捉された。捕捉された流木はえん堤開口部を閉塞することで、後続流の土砂をせき止めた。一方、流木を全く設置しない条件で実験を行った場合は、土砂はえん堤に捕捉されなかった。

#### (2) 流木捕捉率

図-6 は、砂防えん堤によって捕捉された流木の本数  $N_D'$  を流下した全流木数  $N_D$  に対して示したものである。ここに、流木長  $L$  と流木径  $D$  をパラメータとした。水路に設置された流木のほとんどは下流に流下しており、水路に設置された流木本数が多いほど、えん堤に捕捉される流木数も多くなることが分かる。また、長さ  $L=5.25\text{cm}$ 、径  $D=5.2\text{mm}$  や  $L=7.0\text{cm}$ 、 $D=3.0\text{mm}$  などスケールの小さ

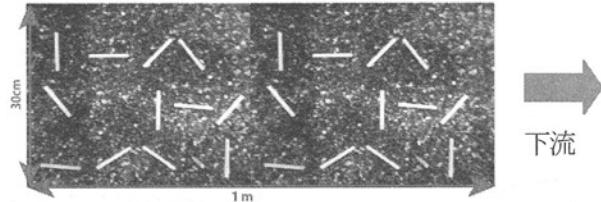


図-3 流木の配置

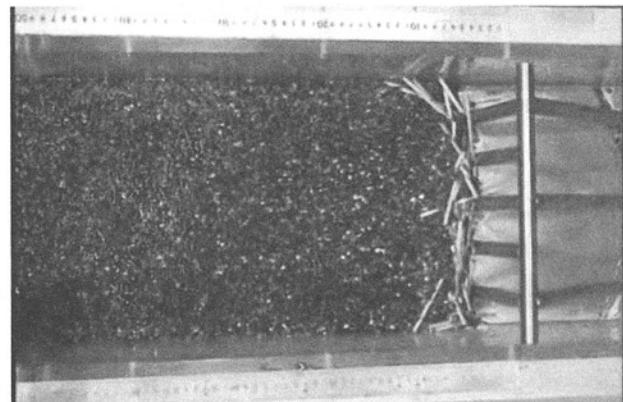


図-4 えん堤真上から撮影された実験終了後の状況  
( $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=120$  本)

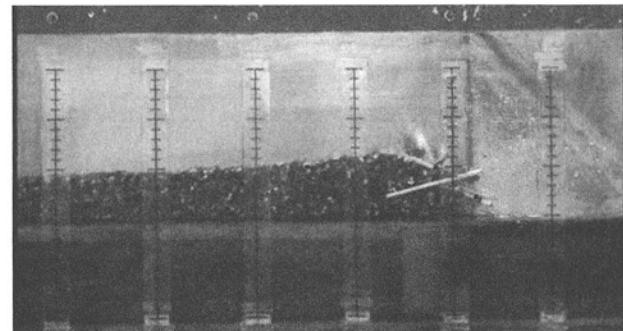


図-5 水路側方から撮影された実験終了後の状況  
( $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=180$  本)

な流木については、設置本数が多くても、その捕捉量は少なかった。流木スケール特に流木長が長くなるほど捕捉本数も多くなっている。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ることが分かる。この図において回帰式として

$$N_D^t = a_N(N_D - N_c)$$

を仮定する。ここに、 $a_N$ =流木捕捉係数、 $N_c$ =捕捉限界流木本数である。図から、平均的に見て  $a_N=0.9$ 、 $N_c=30$  となる。捕捉限界流木本数  $N_c$  については、流木スケールの関数と考えられるが、さらに検討が必要である。

図-7 は流木捕捉量  $V_D^t$  と流下流木量  $V_D$  との関係を示したものであるが、両者にはおよそ比例関係があることが分かる。しかしながら、上述のように、スケールの小さい流木については、ある程度十分な流下流木量が捕捉には必要である。同図において回帰式として

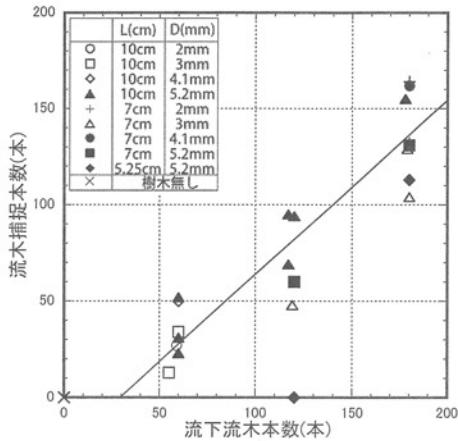


図-6 流木捕捉本数と流下流木本数との関係

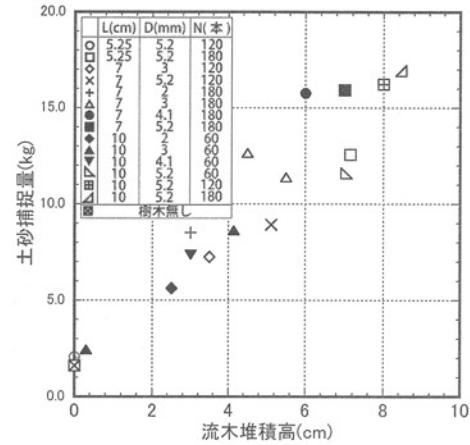


図-8 土砂捕捉量と流木堆積高との関係

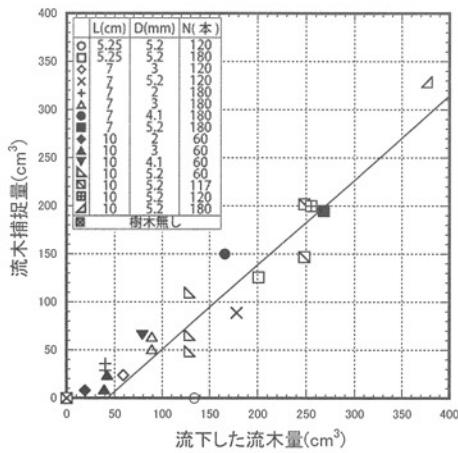


図-7 流木捕捉量と流下流木量との関係

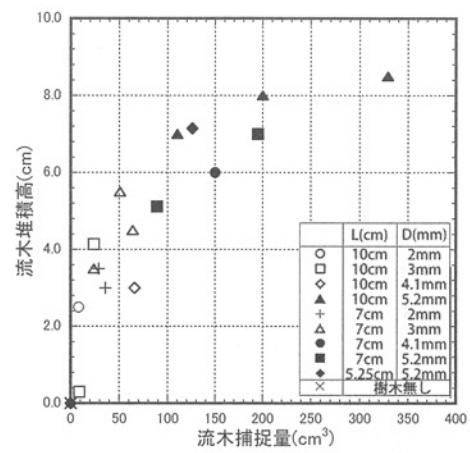


図-9 流木堆積高と流木捕捉量との関係

$$V_D^t = a_V (V_D - V_c)$$

を仮定する。ここに、 $a_V$ =流木捕捉係数、 $V_c$ =捕捉限界流木量である。図において平均的に、 $a_V=0.9$ 、 $V_c=47$ とみなすことができる。捕捉限界流木量  $V_c$  も流木スケールの関数と考えられるが、今後さらに検討が必要である。

砂防えん堤に捕捉された流木が後続の土砂を堆積させて、捕捉流木のスケールが土砂捕捉量を規定する要因となることが考えられる。図-8は土砂捕捉量と流木堆積高の関係を示している。流木堆積高が大きくなるほど土砂捕捉量は線型的に増大していることが分かる。

図-9は、砂防えん堤における流木堆積高と捕捉流木量との関係を示したものである。捕捉流木量  $V_D^t \approx 150$  ( $\text{cm}^3$ ) を境にして流木堆積高の増加が急に緩やかになっている。

砂防えん堤に堆積した流木群の全体を直方体で近似してその堆積高と縦断方向長との比を求める、図-10を得る。砂防えん堤における捕捉流木量が多くなるほど流木堆積高は増加する。また、流木の堆積高と堆積長の比は、捕捉流木量  $V_D^t \approx 150$  ( $\text{cm}^3$ ) を境にして、捕捉流木量がそれ

以上の場合には 1.0、それ以下の場合には約 0.2~1.0 の範囲でバラツキがある。このバラツキは、流木捕捉量が少ない場合には読み取り精度がかなり落ちるためと考えられる。

図-11は、流木捕捉(本数)率とえん堤開口部・流木長比  $I_o/L$  との関係を、流木初期本数  $N$  とスケールをパラメータとして示したものである。ここに、 $I_o$  はえん堤開口部のスケール、 $L$  は流木長である。同図には大隅ら<sup>4)</sup>の実験結果も示している。

まず回帰曲線を求める、初期流木数  $N$  に対応して図中の実線 ( $N=120$ )、破線 ( $N=180$ ) のようになる。一方、大隅らの実験は、本実験とは流木スケール、流木の発生の方法が大きく異なるが、本実験における  $N=180$  本の場合とほぼ同様な傾向を示す。

えん堤開口部・流木長比  $I_o/L$  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。

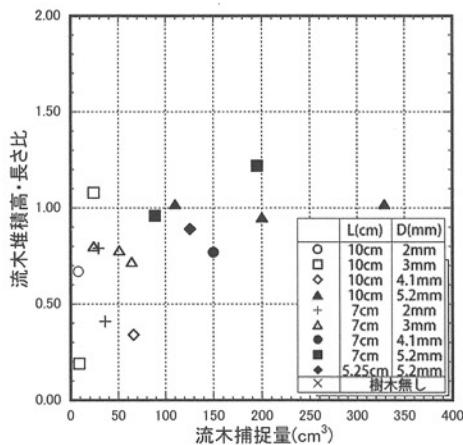


図-10 流木堆積高・長さ比と流木捕捉量との関係

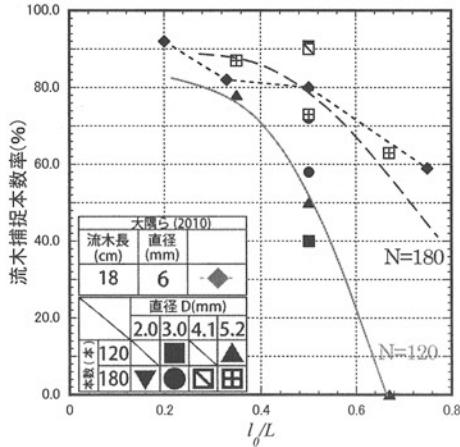


図-11 流木捕捉率と  $I_0/L$  との関係

以上、流木の流下本数や流木量およびそのスケールと流木・土砂の捕捉状況との関係を調べたが、次に、流木の流動状況と流木・土砂の捕捉状況との関係を調べた。流木の流動状況の指標としては流木の数密度と体積密度が考えられる。ここに、流木本数密度は河床単位面積当たりに存在する流木の本数と定義し、流木体積密度は河床単位面積当たりに存在する流木の総体積として定義する。

本実験において流木がえん堤に流下する際、水路幅方向に対して一様に流下する場合もあれば偏って流下する場合もあった。流木の流下密度が捕捉率に与える影響を調べるために、本実験で、比較的水路幅方向に対して流木が一様に流下した場合を抽出し、流木の密度と捕捉率の関係について調べた。

まず、図-12は、流木の数密度と流下流木本数との関係を、図-13は、流木の体積密度と流下流木量との関係をそれぞれ示した。流下する流木本数がN=50~120の場合、流木数密度=0.1~0.2(本/cm<sup>2</sup>)となるが、N=180の場合は流木数密度=0.1~0.6(本/cm<sup>2</sup>)と大きくばらつく。一方、流下流木体積密度は流下流木量にほぼ比例して増加するが、流下流木量が200cm<sup>3</sup>を超えると流下流木体積密度はばらつく。

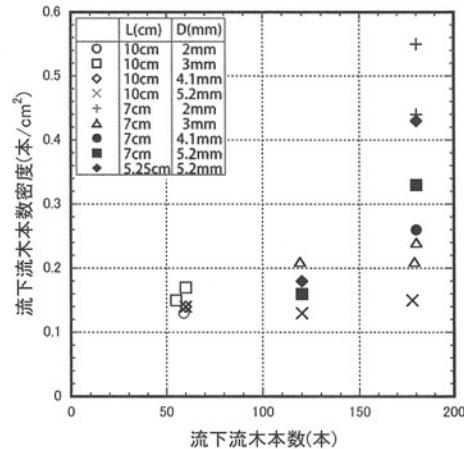


図-12 えん堤到達時における流木本数密度と流下流木本数との関係

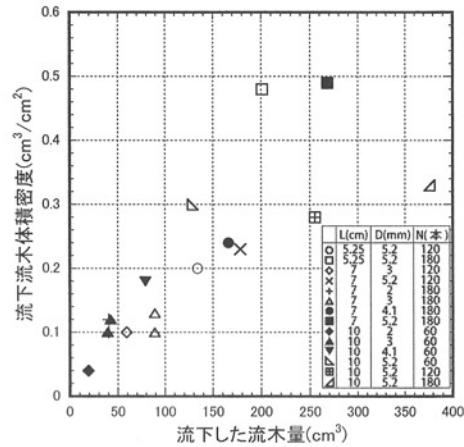


図-13 えん堤到達時における流木体積密度と流下流木量との関係

図-14は、比較的水路幅方向に一様に流下した場合における流木の捕捉(本数)率と流木数密度との関係を示した図である。また、図-15は、流木の捕捉(体積)率と流木体積密度との関係を示した図である。図-14を流木の長さ別にみてみると、流木の長さが同じである場合、流下流木本数密度が大きくなると流木の捕捉率も大きくなっている。図-11で、初期本数N=120本の時と、N=180本の時とを比較してみると、N=180本の方が流木の捕捉率は高く、図-12を見ると、このとき、流下流木本数密度が増加している。

しかし、図-11において長さL=10cm( $I_0/L=0.35$ )、径D=5.2mmの場合、N=120本とN=180本で流木捕捉率はほとんど変わらなかった。一方、図-12を見ると、上述と同じ流木スケールの条件では、流下流木本数に関わらず流下流木本数密度はほぼ同じであった。図-14において、流下流木本数密度が小さくても、流木スケールが大きければ、流木捕捉率は大きな値を示すことから、流木長が十分に大きい( $I_0/L$ が十分小さい)場合、流下流木本数密度の大小に関わらず流木捕捉率は大きい値を示すことが分かった。

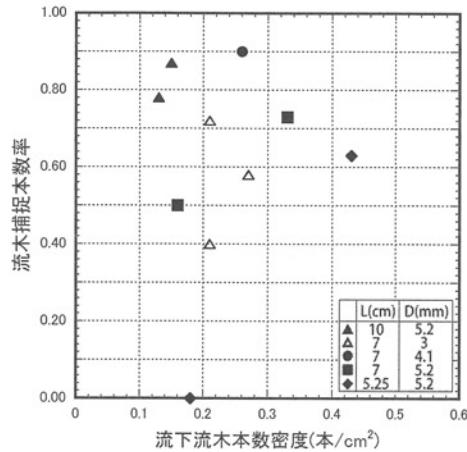


図-14 流木捕捉本数率と、えん堤到達時における流下流木本数密度との関係

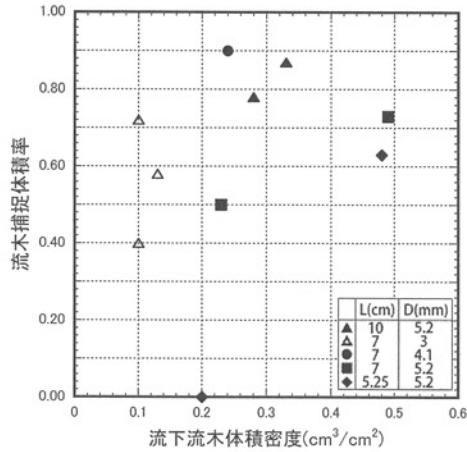


図-15 流木捕捉体積率と、えん堤到達時における流下流木体積密度との関係

さらに、流木スケールが十分に小さい ( $I_0/L$  が十分大きい) 場合でも、数密度が大きくなるとえん堤に捕捉されることが分かった。

また、流下流木本数密度が等しい場合、流木スケールが大きく ( $I_0/L$  が小さく) なれば捕捉率は大きくなるということが分かった。

また、図-15 を同じように流木の長さ別にみると、流下流木体積密度が大きくなると捕捉率は大きくなることが分かる。また、スケールの小さな ( $I_0/L$  が大きな) 流木でも、流下流木体積密度が十分に大きければえん堤に捕捉された。

### (3) 土砂の堆積過程

図-16, 17 は、流木条件  $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=120$  本と、 $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=180$  本のもとで行った、砂防えん堤における土砂堆積の実験の結果である。

土砂は、まず、捕捉流木が形成したメッシュ構造に捕捉されて堆積高を増加させ、その後、徐々に上流方向に

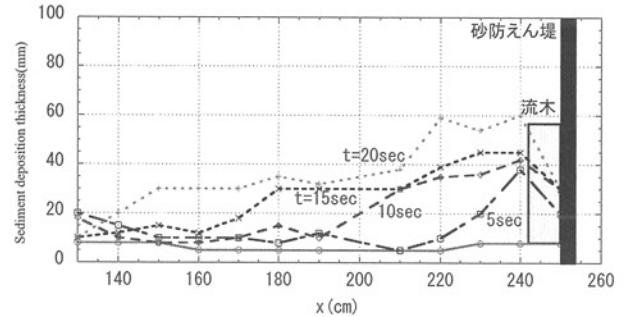


図-16 堆砂の縦断形状の時間的変化

( $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=120$  本)

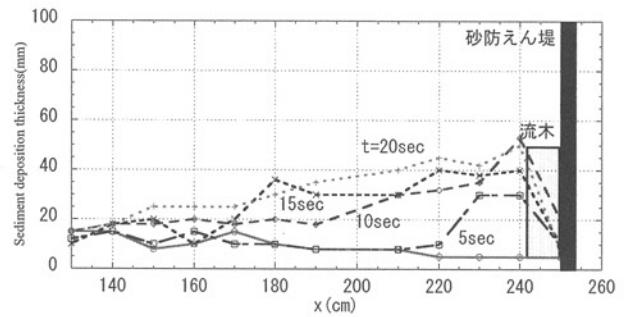


図-17 堆砂の縦断形状の時間的変化

( $L=10\text{cm}$ ,  $D=5.2\text{mm}$ ,  $N=180$  本)

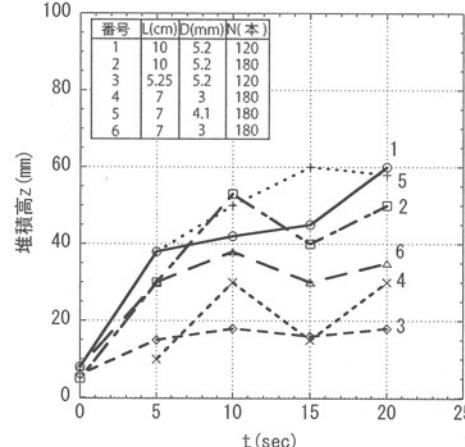


図-18 砂防えん堤直上流における堆砂高の時間変化

( $x=240\text{cm}$  地点)

堆砂を遡上させている。その際、一部の土砂は流木のメッシュ構造の隙間やその上部から下流方向に流出している。

また、流木が水路幅方向に一様に流下しなかった場合は、捕捉流木が偏在し、それが存在する部分と存在しない部分が発生し、捕捉流木の存在しなかった部分から土砂が下流に流出している。

図-16, 17 は、水路右岸から撮影したビデオ映像をもとに作成しているため、水路右岸の土砂堆積の状況を示しているが、水路中央や左岸では、図-17 のほうが流木の堆積高は大きい。そのため、図-17 のほうが土砂の捕捉量は大きい。

図-18は、比較的水路幅方向に一様に流木が流下した場合における、 $x=240\text{cm}$  地点の土砂堆積の時間変化を示した図である。これは、堆砂形状（図-16, 17）形成の境界条件となり、堆砂過程の解析において重要である。図-6～11で、流木無しの条件下実験を行った場合、土砂は捕捉されず、流木の堆積高が大きくなると土砂捕捉量が大きくなつたことから、土砂の捕捉は流木堆積高に依存し、土砂が堆積する高さは完全に流木の堆積高によつて決まる。

#### 4. 結論

以上、流木の流下量やスケールなど種々のパラメータが透過型砂防えん堤の流木・土砂捕捉に及ぼす効果について調べた。

まず、流木は、土砂よりも先にえん堤に到達する。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本数は多くなる。流木の捕捉量と流下量には、おおよそ比例的な関係がある。

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（体積）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、捕捉量も大きくなつた。

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った。えん堤開口部・流木長比  $l_o/L$  は小さく、初期流木数  $N$  が大きくなると流木捕捉率は増大することが分かった。

流木は、流木のスケールが同じ場合、流下時の本数密度が大きくなると捕捉率が増大した。しかし、流木の長さが十分に長い場合は、本数密度の大小に関わらずその捕捉率は大きな値を示す。また、スケールの小さな流木に関しては、十分な大きさの本数密度が捕捉には必要だということが分かった。

さらに、本数密度が等しい場合、流木の長さが長くなるほど捕捉率の値は大きくなつた。

流木は、流木のスケールが同じ場合、流下時の体積密度が大きくなるとその捕捉率は増大した。

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。土砂は、えん堤開口部を閉塞した流木が形成するメッシュ構造によって捕捉される。土砂は、時間の  $1/2$  乗に比例するような形でえん堤に堆積していく。えん堤に到達した後、徐々に上流方向に遡上しながら堆積していく。

#### 謝辞

本研究は、一部、社団法人九州地方計画協会の研究支援金の補助のもとに実施したものである。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 三好朋宏、橋本晴行、Farouk MARICAR、池松伸也、黒田佳祥：連続する砂防えん堤によって捕捉された土石流の堆積特性、第5回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.75-86、2010.
- 2) Farouk MARICAR, Haruyuki HASHIMOTO, Shinya IKEMATSU and Tomohiro MIYOSHI : Effect of Two Successive Check Dams on Debris Flow Deposition, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Debris-flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment, pp.1073-1082, June, 2011.
- 3) 渋谷一、原木大輔、香月智：透過型砂防堰堤の流木混じり土石流の捕捉性能に関する実験的研究、砂防学会誌、Vol.62, No.1, pp.66-73, 2009
- 4) 大隅久、石川信隆、渋谷一、香月智、嶋丈示、水山高久：流木捕捉率に及ぼす流下密度と平均流木長の影響について、平成22年度砂防学会研究発表会概要集 pp.226-227, 2010.

(2012. 5. 9 受付)