

橋梁部における流木捕捉・水面形変化状況と 流木対策技術の効果検証

STUDY ON TRAP OF DRIFT WOOD AND LONGITUDINAL PROFILE OF
WATER LEVEL IN A BRIDGE AND A MEASURE FOR DRIFT WOOD

二瓶泰雄¹・桜庭拓也²・焼田航³・倉上由貴⁴

Yasuo NIHEI, Takuya SAKURABA, Wataru YAKITA and Yuki KURAKAMI

¹正会員 博(工) 東京理科大学教授 理工学部土木工学科
(〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

²学生員 学(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程(同上)

³非会員 学(工) 元東京理科大学 理工学部土木工学科

⁴学生員 修(工) 東京理科大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士課程 JSPS特別研究員DC(同上)

Blockages of drift woods can seriously increase the danger of flood events. However, the mechanisms of drift wood capture process are hardly studied and therefore, the possible countermeasures are not taken in the design of bridges. The aim of this study is to understand the basic mechanisms of drift wood capture process and water surface profile variations before and after the drift wood captures. Laboratory experiments with a model bridge in an open channel was carried out for that purpose. It was concluded that the number of driftwoods captured in the bridge has high correlation with increase of the water surface in upstream of the bridge. Water surface profiles due to driftwoods captured in the bridge seem to be intermediate between a sluice gate and radial gate.

Key Words : *Drift woods, blockages, River channel closure, Water surface profile*

1. 序論

近年の異常豪雨に伴う水害・土砂災害では、流木由来の災害が顕著になりつつある。山間部を流れる中小河川では、川幅が流木サイズと比べて相対的に狭いため、豪雨により大・小規模の流木流出が生じると、橋梁部において流木がトラップされ、それがきっかけで洪水氾濫が生じている事例が多い。2013年伊豆大島の土砂災害では流木を伴う土石流が発生し、小流路(大金沢)沿いでは、大量の流木が橋梁に捕捉され河道閉塞やそれに伴う洪水氾濫が発生した^{1)~3)}(図-1(a))。また、2012年九州北部豪雨⁴⁾や2014年山形豪雨⁵⁾(図-1(b))においても流木捕捉に関係すると考えられる洪水氾濫が発生した。完全に河道閉塞に至らなくても橋梁部での流木捕捉に伴う断面積減少と水位上昇が洪水氾濫被害を助長しているケースが多い。

このようなことから、橋梁部における流木捕捉過程を把握することは重要である。しかしながら、橋梁部においてどのように流木が捕捉され、流木捕捉時にどの程度

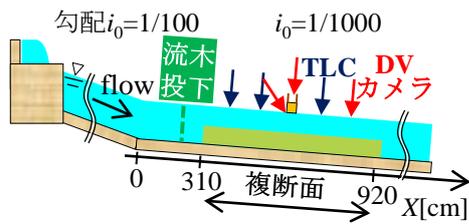


(a) 2013年伊豆大島土砂災害(大金沢)

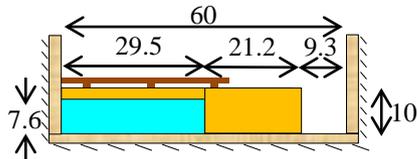


(b) 山形県最上川水系吉野川花台橋(2014年7月)

図-1 橋梁部の流木捕捉例



(a) 縦断面図



(b) 横断面図 (単位: cm)

図-2 基礎実験における開水路の概要

橋梁上下流部の水面形変化が生じるかに着目した研究は限定的である(例えば松本ら⁶⁾, 坂野⁷⁾, 小松ら⁸⁾)。特に, 橋脚の無い橋梁部における流木の捕捉過程やそれが水位上昇量に及ぼす影響に関する基本的な知見は限られ, 結果として, 流木対策を考慮した橋梁設計には至っていない。さらに, 流木捕捉対策技術はいくつか存在しているが⁹⁾, 現地での効果検証事例も少ない。

本研究では, 橋梁部の流木捕捉過程や水面形変化への影響に関する基礎的特徴を明らかにすることを目的として, 開水路における橋梁部の流木捕捉に関する二種類の実験(基礎・応用実験)を行う。基礎流木実験では, 橋梁部での流木捕捉状況やそれらが水面形変化に及ぼす基礎的な過程を明らかにする。応用流木実験としては, これらの過程に対する橋梁表面の粗度の影響を見るために, 二種類の表面粗度を有する橋梁部を設けた流木投下実験を実施する。これと合わせて, 流木捕捉状況をモデル化するために, スルースゲートとラジアルゲートを橋梁部に設けた実験も行い, ゲート前後の水面形と流木実験結果を比較・検討する。このような橋梁部での流木災害を軽減するための対策技術を検討するために, 一の宮貯水池(熊本県黒川)の流木捕捉状況の現地観測を行う。

2. 流木実験方法

(1) 基礎流木実験の概要

上記の目的を遂行するための基礎流木実験として, 図-2に示すような本学所有の開水路(長さ20m, 幅0.6m, 水路床勾配(測定部分)1/1000)を用いた室内実験を行う。ここで, 流木捕捉による水位上昇や周囲への氾濫過程を再現するために, 片側の複断面河道を作成し, 低水路の幅を29.5cm, 高さを10cmとし, 水路右岸側に高水敷(流下方向長さ6.1m)を設置した。この高水敷の右岸側(幅9.3cm)の空間は, 溢れた水を受け入れるために設けた。複断面区間先頭から3.0m下流に, 同図に示す模

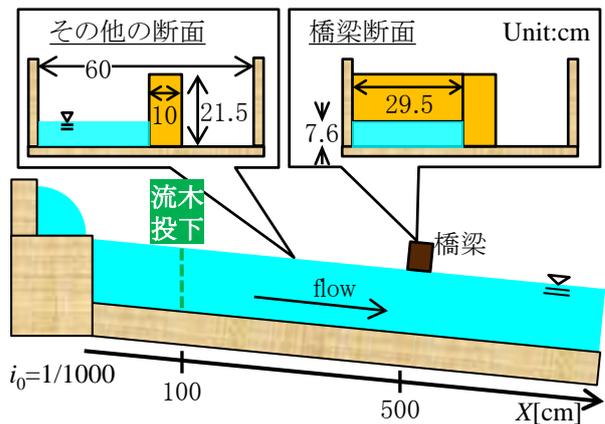


図-3 応用実験における開水路の概要

表-1 実験条件

実験名	実験内容	実験条件		実験ケース
基礎実験	流木投下実験	表面粗度小		Case F1-10
		表面粗度大		Case B1-B5
応用実験	ゲート実験	ラジアルゲート	$\Delta h = 4, 5, 6, 7$	各1ケース
		スルースゲート	$\Delta h = 4, 5, 6, 7$	各1ケース

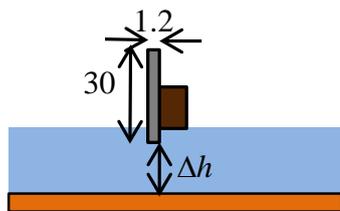
型橋梁(桁厚2.4cm, 流下方向長さ10cm)を設けた。

流況条件としては, 流量を0.0256[m³/s]で一定とし, 流木投下前の橋梁部における平均水深は7.6cm(水面はほぼ橋桁下部と一致), フルード数が1.32の射流となっている。用いる模擬流木は竹串(直径0.20cm, 長さ10cm)であり, 橋梁部から4m上流地点から, 5秒毎に20本ずつ集中投下し, 計500本の投下を10ケース実施した(Case F1-10, 表-1)。

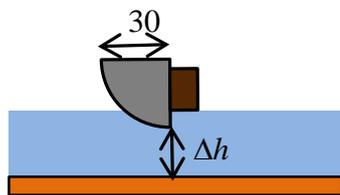
水位縦断分布の時間変化や橋梁部での流木捕捉本数を把握するために, DVカメラ(HDR-XR550 SONY社製)3台, タイムラプスカメラ(TLC, CBR-TLC200, brino社製)3台をそれぞれ用いた。この際, 開水路左岸側面のアクリル板に1cm四方のメッシュを張り水位を求めた。

(2) 応用流木実験の概要

基礎実験結果を踏まえて, 応用流木実験を行った。この実験では, 基礎実験で用いられた水路が一部改造された, 図-3に示す長さ9.0m, 幅0.60m, 高さ0.44m, 勾配1/1000の小型開水路を用いた。ここでは, 水路全体に幅10cm, 高さ21.5cmの木箱を設置して幅を狭くした。X=500cm地点に橋梁部(幅29.5cm, 高さ13.9cm, 長さ5.5cm)を設置し, 基礎実験と異なり, 橋梁部や側壁から越流しないようにした。模擬流木には, より捕捉されやすくするために, 上記の竹串3本を輪ゴムで束ねたもの(以下, これを1束と数える)を用いた。流木投下条



(a) スルースゲート



(b) ラジアルゲート

図-4 モデルゲートの概要 (応用流木実験)

件としては、 $X=100\text{cm}$ 地点において流木10束を5秒間隔で瞬間投下し、これを150秒間(計300束投下)実施した。流木捕捉に対する橋梁部の表面粗度の影響を見るために、橋梁部表面を滑らかなテープでカバーしたもの (Case A) と橋梁上流側・底面上にサンドペーパーを貼り付けて粗度を大きくしたもの (Case B) を設定し、各々5回の実験した (表-1)。流木投下前の平均水深が7.6cmとなるように流量を $0.015\text{m}^3/\text{s}$ ($h_c=6.4\text{cm}$) とした ($Fr=0.77$)。流木捕捉状況や水面形を計測するために、最大3台のデジタルビデオカメラと6台のタイムラプスカメラを水路脇に設置した。

次に、流木捕捉による水面形変化をモデル化するために、ゲート実験を行った。モデルゲートとして、図-4に示すと1/4円柱のラジアルゲートを橋梁部上流側に設置し、水面形を計測した。ここでは、ゲートの開口部 Δh を4, 5, 6, 7cmと変えたがスルースゲートの $\Delta h=4\text{cm}$ の場合には越流が生じたためデータ解析の対象外とした。流況条件や計測状況は流木投下実験と同じに設定した。

3. 基礎実験結果

(1) 流木捕捉状況

基礎流木実験における流木捕捉状況を示すために、全ケースにおける流木捕捉数の最大値と最終値(全流木投下後の値)を表-2に示す。これより、顕著な流木捕捉は3ケースのみで見られ、他のケースは全く引っ掛らないか数本引っ掛っても短時間で流出した。これより、流木投下条件は統一しているため、定常流場における橋梁での流木捕捉過程は確率事象であることが分かる。

(2) 流木捕捉本数と水深の時間変化

橋梁部における基本的な流木捕捉過程を調べるために、

表-2 全ケースの流木捕捉数 (基礎実験, 単位: 本)

Case名	F2, F4	F6, F9	F1	F8
最終	0	0	1	0
最大	0	1	1	6
Case名	F10	F5	F3	F7
最終	13	114	154	182
最大	13	114	154	203

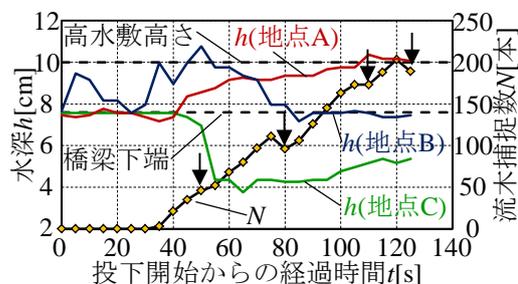


図-5 流木捕捉数Nと水深hの時間変化 (Case F7)

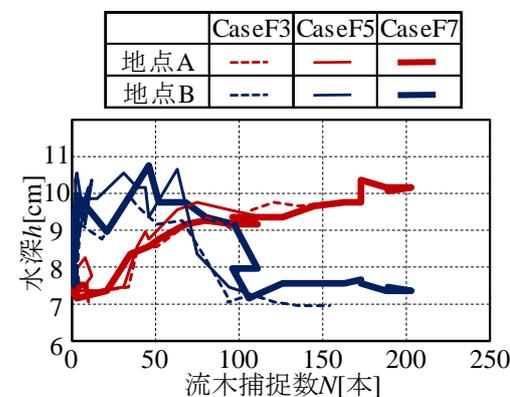


図-6 流木捕捉数Nと水深hのヒステリシス(Case F3, F5, F7)

捕捉数が顕著であったCase F7を例として、流木捕捉数Nと水深hの時間変化を図-5に示す。ここでの水深は、橋梁上流端から13cm (地点A)、1cm (地点B)、橋梁部下流端 (地点C) の結果を示す。これより、流木捕捉数は $t=35\text{s}$ 以降直線的に増加し、その傾きは捕捉率100%に近い。ただし、傾きが小さい時点 (図中矢印) が存在し、一定の周期性を有する。水位に関しては、橋直上流 (地点B) では橋梁部の流木捕捉開始時に急増し、高水敷高さを上回るが、その後水位低下する。捕捉数が35本を越えると上流側 (地点A) では水位は上昇、下流側 (地点C) では下降し、その後は緩やかに推移し、 $t=110\text{s}$ ($N=173$ 本) を越えると地点Aの水位は高水敷高さを上回る。この流木捕捉数と水深のヒステリシスを図-6に示す。これより、このヒステリシスは流木捕捉数が顕著に多かったCase F3, 5, 7全てでほぼ同じであり、これらは再現性の高い現象といえる。

(3) 流木捕捉前後の水深縦断変化

水面形の縦断分布に対する流木捕捉の影響を調べるた

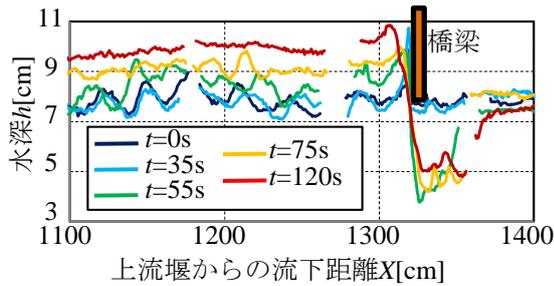


図-7 流木捕捉前後の水面形の縦断分布 (Case F7)

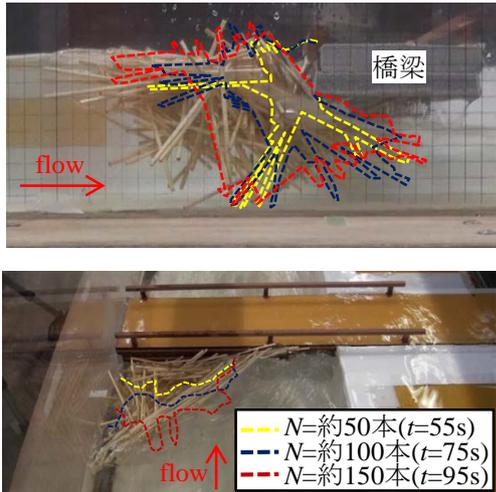


図-8 側面(上)と斜め上(下)から画像による流木捕捉状況 (Case F7, $N \approx 200$ 本, $t=120$ s)

めに、流木捕捉前後の水深縦断分布を図-7に示す。ここでは図-5と同じCase F7における捕捉前 ($t=0$ s)、捕捉開始時 ($t=35$ s)、捕捉後 ($t=55, 75, 120$ s)の結果を表示す。これより、捕捉開始時には、捕捉前に見られない橋梁周囲の水位変化が現れるが、この時点では橋梁上流傍のみ見られる。捕捉後では、水深の上昇が橋上流全体で見られ、その水深上昇量も時間と共に増加する。最終的に $t=120$ sでは、広範囲にて水深は高水敷高さの10cm前後に到達し、橋梁部における多量の流木捕捉とそれに伴う部分的な河道閉塞により上流側全体の洪水氾濫が再現されている。また、水面形はスルースゲートの流出と概ね類似しているが、流木捕捉数が増える(閉塞率が上がる)と下流側の水位が上昇する点は大きく異なる。

(4) 橋梁部における流木捕捉状況

この要因を明らかにすべく、橋梁部での流木捕捉状況を図-8に示す。ここでは、Case F7における斜め上と側面からの画像 ($N \approx 200$ 本時)に $N \approx 50, 100, 150$ 本の流木捕捉状況を重ねている。これより、流木は捕捉当初は鉛直方向に切り立ち、平面内の局所的範囲内に留まっていた。捕捉本数が増加すると、捕捉流木群は上流側に傾くと共に、平面内でも流木が相対的に広がって存在し

表-3 各ケースの最終・最大流木捕捉数の比較 (応用実験, 単位: 束)

Case名	A1	A2	A3	A4	A5
最終捕捉数	0	0	0	0	0
最大捕捉数	0	1	1	2	1
Case名	B1	B2	B3	B4	B5
最終捕捉数	125	73	15	0	63
最大捕捉数	125	73	15	4	63

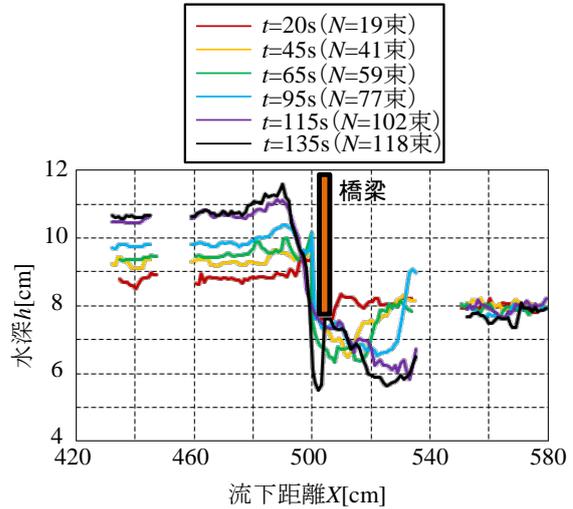


図-9 流木捕捉数 N と水面形の時間変化 (Case B1)

ていることが分かる。これにより、鉛直板のスルースゲートから、先端部が湾曲しているラジアルゲートに近い形となり、結果として、橋梁部下流側の水位が上昇したものと考えられる。このため、流木捕捉による水位変化をモデル化する時には、横断面内の閉塞率のみならず、閉塞状況の縦断変化を考慮する必要がある。これに関しては、次章の応用実験にて詳細に検討する。

4. 応用実験結果

(1) 橋梁部の表面粗度が流木捕捉に及ぼす影響

橋梁部の流木捕捉状況に対する橋梁表面粗度の影響を調べるために、サンドペーパー無(表面粗度小, CaseA)と有(大, CaseB)における最終・最大流木捕捉数を表-3に示す。これより、サンドペーパー無では全ケースにて最終捕捉数は0であるが、サンドペーパー有では5ケース中4ケースにおいて流木捕捉が確認された。このように、橋梁部の表面粗度の違いで流木捕捉状況が大きく変化するため、流木捕捉削減策として橋梁部表面の凹凸を減らす方法が有用である可能性が示唆された。具体例としては、主桁上流側の凹凸を減らすことや角の部分曲線的にすること等が挙げられる。

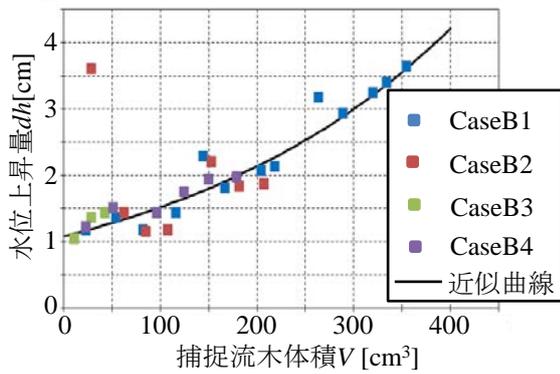


図-10 流木体積 V と水位上昇量 dh の相関関係 (応用実験)

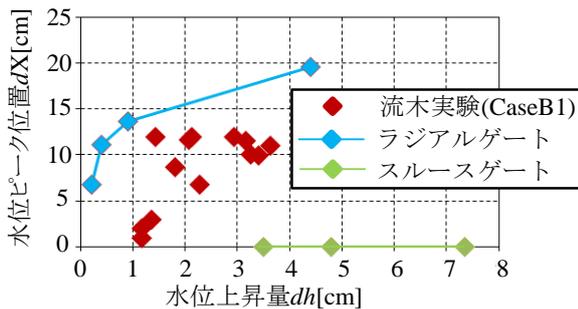


図-11 水位上昇量 dh と水位ピーク位置 dx の相関図 (応用実験)

(2) 流木捕捉数 N と水面形の時間変化

基礎実験結果と同様に、表面粗度大の中で最も流木捕捉数が多いCase B1における水深縦断分布の時間変化を図-9に示す。ここでは、 $t=20, 45, 65, 95, 115, 135$ sにおける水面形を表示する。これより、流木捕捉開始当初 ($t=20$ s) では橋梁直上のみ水位上昇が確認されたが、 $t=45$ sでは、上流部の上昇範囲が広がると共に、橋下流側では水位が低下して射流が発生し、跳水を経て常流に移行した。類似の状況は $t=65, 95$ sでも見られた。 $t=115$ sになると、上流側での水位上昇量は大幅に増加し、水位ピーク位置がより上流側にシフトすると共に、下流側の水位低下量や跳水スケールも大きくなり、顕著な変化が生じた。その時の流木捕捉状況の変化を確認すると(図面省略)、 $t=95$ sでは水路左岸側に流木が集中していたが、 $t=115$ sでは右岸側も含めて全面的に流木が捕捉された。その上、橋梁前面における流木捕捉範囲がこの20s間で上下に拡大し、橋梁下部の開口部面積が減少したため、大幅な水位上昇が生じたものと考えられる。

(3) 流木捕捉数 N と水位上昇量の相関関係

流木捕捉状況による水位上昇量を把握するために、流木捕捉が生じた4ケースにおける捕捉された流木体積 V と水位上昇量 dh の相関図を図-10に示す。体積 V は、画像解析により算出された。これより、両者の相関関係については、実験ケース間の差はなく、全データに対する近



図-12 観測サイト (熊本県阿蘇市一の宮貯木池)

似式の $R^2=0.873$ と高いことから、流木体積 V と水位上昇量 dh には明確な正の相関関係がある。また、この近似式は下に凸になっているため、流木が捕捉されるほど水位上昇量も大きくなる“非線形効果”が現れることが明らかとなった。

(4) 水位上昇量とピーク位置の関係

流木実験 (Case B1) における水位上昇量 dh と橋梁からピーク水位までの流下距離 dx の相関関係をゲート実験結果と合わせて比較したものを図-11に示す。流木実験の結果はラジアルゲートの結果に近いものの、両ゲートの結果に挟まれる形となっているため、流木捕捉状況は両ゲートの中間的なゲート形状に近いことが示唆された。これより、流木捕捉状況の水理モデル化には、二つのゲートの間の形状を与えることが有用であるが、詳細は今後の課題とする。

5. 熊本県黒川・一の宮貯木池の流木捕捉状況

(1) 観測概要

流木対策として既に現地に設置されている国内唯一の一の宮多目的貯木池 (熊本県黒川26.2km地点) における流木捕捉状況を把握するための現地観測を行った。一の

宮貯木池は、図-12に示すように、黒川の脇に設置されており、池表面積は2.9haである。上流側には越流堰、下流側には流木止工34基（高さ2mと3mが各々32、2基）がある。ここでは、大きな出水後にて貯木池内の流木捕捉量の空間分布を計測した（2016年12月）。なお、2015年は貯木池に流木が流入する出水イベントは発生しなかった。そのため、以下では、流木捕捉状況のみを示す。

(2) 観測結果

2016年出水期後における貯木池内の流木捕捉マップを図-13に示す。貯木池内では、流木止工以外のところでは目立った流木が存在しなかったため、流木止工付近のみの結果を示す。また、流木は、単独もしくは複数の流木止工にわたり堆積しているものがあったため、後者に関しては、その中心位置の堆積量を表示している。なお、図中の棒グラフは対数表示であることに注意されたい。これより、貯木池全体では77m³の流木が堆積していたが、そのうち、下流側の流木止工に43.5m³（56%）、河道内の流木止工に15m³（19%）も堆積していた。このような下流部での多量の流木捕捉は、貯木池内の流況の想定がある程度うまくできた結果であると考えられる。

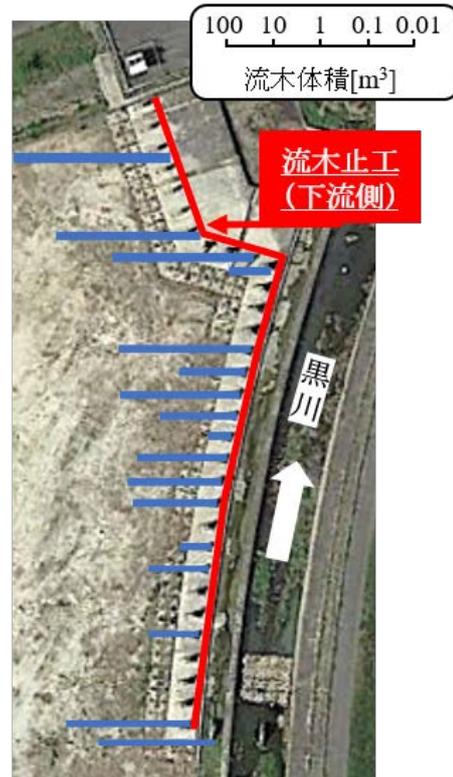


図-13 貯木池内の流木捕捉マップ

6. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 橋梁部の流木捕捉と水面形変化を調べた結果、流木捕捉開始時には、橋梁周囲のみ水位変化が現れるが、その後、水深上昇が橋上流全体で見られるとともに、その水深上昇量も時間と共に増加する。このように、本実験により、橋梁部における多量の流木捕捉とそれに伴う部分的な河道閉塞により上流側全体の洪水氾濫が再現された。
- 2) 橋梁部における流木は捕捉当初は鉛直方向に切り立ち、平面内の局所的範囲内に留まるが、捕捉本数が増加すると捕捉流木群は上流側に傾くと共に、平面内でも流木が相対的に広がって存在する。合わせて、モデル化対象のゲート実験より、流木捕捉による水面形変化はスルースゲートとラジアルゲートの中間的なゲート形状に近いことが示唆された。
- 3) 応用流木実験により、流木捕捉に対する橋梁表面の粗度の影響は大きく、流木捕捉量削減策として橋梁部表面の凹凸を減らす方法が有効であることが示された。
- 4) 貯木池内の流木捕捉状況を観測した結果、流木止工の位置と流木捕捉量の特徴的な関係が得られ、貯木池の流木捕捉効果が高いことが示された。

砂防分野（研究代表者：里深好文）の成果の一部である。

（独）土木研究所・研究・研修指導監・江頭進治先生には、室内実験に関して多くの有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 広報おおしま：災害臨時号，第9号（<http://www.town.oshima.tokyo.jp/news/pdf/rinji20140901.pdf>），2014.
- 2) 土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団：平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書，pp.1-90，2014.
- 3) 二瓶泰雄・永野博之・大槻順朗・焼田航・梶純也：平成25年10月伊豆大島土砂災害における家屋被害状況，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.71，No.4，pp. I_1265-I_1266，2015.
- 4) 土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害土木学会調査団報告，2013.
- 5) M.A.C. Niroshinie and Nihei, Y.: A flood inundation modelling considering the effect of debris blockage in bridge piers, *Proc. of the 20th IAHR-APD Congress*, 2016 (9pages).
- 6) 松本健作，小葉竹重機，清水義彦，石田和之，近内壽光，Ioakim Ioakim：流木塊の橋脚への堆積に関する研究，水工学論文集，Vol.45，pp.925-930，2001.
- 7) 坂野章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察，国土技術政策総合研究所資料，No.78，pp.1-96，2003.
- 8) 小松利光（監修）・山本晃一（編集）：流木と災害発生から処理まで，技報堂出版，pp.1-273，2009.

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募

(2017.4.3 受付)