

伝統的橋梁に設置された木除杭の性能に関する実験

An Experimental Study of the Performance of Stakes that has installed in the Traditional Bridges

竹田周平¹・石橋孝則²

Shuhei Takeda and Takanori Ishibashi

¹福井工業大学教授 工学部建築土木工学科 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

Professor, Fukui University of Technology, Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

²福井工業大学大学院院生 大学院博士前期課程 社会システム学専攻 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

Graduate student, Fukui University of Technology, Department of Social System Engineering

Stakes that has installed in the traditional bridges like Uji-bridge and Togetsu-bridge, have long been used to prevent bridges from driftwood. However, stakes design codes are not established. And little is known about the function of these stakes. In this paper, we focus on the function and performance of stake. At first, we investigated the actual stakeks of four traditional bridges. And we demonstrate a fundamental experiment. It was found that driftwood passes between piers after rotation about the stake.

Keywords: stake, driftwood, experiment, tsunami, flood

1. はじめに

2011年の東日本大震災により大津波が発生し、多数の橋梁の橋桁が流失する被害が発生した。また海外においても、2004年に発生したインド洋のスマトラ沖地震で発生した津波により、多数の橋梁で上部構造が流出するなどの被害が発生している。これに加え、豪雨に伴う洪水によっても橋梁被害が認められている。例えば、2004年の福井豪雨によりJR線の鉄橋5本が流出するなどの被害¹⁾が発生、また平成25年の台風18号による記録的な豪雨によって、京都の桂川周辺で浸水被害等の甚大な被害が発生した²⁾。以上のように、津波や洪水により水位が上昇すると橋梁の上部構造が流出する被害が発生する可能性が高くなる。このように災害時に橋桁の流出等により橋梁の機能を失うと、災害復旧や復興に大きな影響をもたらすことは言うまでもない。このような状況において、平成25年度の台風18号では、京都市の桂川に架かる渡月橋が増水のために通行止めになり、橋桁に増水した水や漂流物が衝突や接触したものの、桁流出の重大な被害を免れた。この要因には詳細な分析が必要であるが、橋梁に設置された木除杭が被害を低減した可能性も十分に考えられる。これらの課題を解決するために、原田ら³⁾は室内水理実験装置により木除杭に関する実験を試み、木除杭が狭窄部の閉塞改善に効果が認められることを明らかにしている。しかしながら木除杭に関する実験は原田らの研究成果に代表され、定量的に評価するには更なる検討が必要である。

よって、本研究では、原田らの実験をより発展させるため、伝統的な橋梁に設置されている木除杭の特徴を調査し、そしてこの木除杭の効果を検証するための実験を試みた。

2. 既存木除杭の調査

(1) 対象橋梁の概要

最初に木除杭が設置されている伝統的な橋梁を説明する。対象となる橋梁は4橋であり、京都市に位置す



(a) 宇治橋（宇治）



(b) 渡月橋（京都）



(c) 宇治橋（伊勢神宮）

写真1 伝統的橋梁と木除杭

表1 木除杭の現地調査結果

	宇治橋 (宇治市)	渡月橋 (京都市)	宇治橋 (伊勢神宮)	風日祈宮橋 (伊勢神宮)
測定箇所 (本)	3	3	3	2
平均水平距離 (m)	7.51	6.32	13.04	14.93
橋脚間隔 (m)	10.93	10.30	7.40	7.40

る渡月橋、同じく京都の宇治市に位置する宇治橋、また三重県伊勢市の伊勢神宮に位置する宇治橋と風日祈橋である。宇治市の宇治橋は、「瀬田の唐橋」と「山崎橋」と共に日本三古橋の一つである。また伊勢市の二つの橋は、伊勢神宮の境内に位置し由緒ある伝統的な木橋である。

写真1にこの伝統的な橋梁の3橋と木除杭を示す。この宇治橋（宇治）は、橋長 $L=153.3\text{m}$ 、幅員 $W=8.0\text{m}$ の鉄筋コンクリート桁橋であり、14径間（橋脚間距離 10.93m ）で橋梁の上流には橋脚と同じ間隔で木除杭が設置されている。渡月橋（京都）は、橋長 $L=155.0\text{m}$ 、幅員 $W=8.0\text{m}$ の桁橋の15径間（橋脚間距離 $10.30\text{m} \sim 10.55\text{m}$ ）であり、橋梁の上流には橋脚の一本おきの間隔で木除杭が設置されている。木除杭はコンクリート製であり、橋脚の上下流側には頬杖形状の部材及び流木止めが設置されている。

伊勢神宮に位置する宇治橋は、橋長 $L=101.8\text{m}$ 、幅員 $W=8.42\text{m}$ の伝統的な14径間の木橋（橋脚間距離約 7.4m ）で、橋梁の上流には橋脚と同じ間隔で木除杭が設置されている。木除杭も木製であり橋脚の柱と同様に円形の形状である。また同じく伊勢神宮に位置する風日祈宮橋は、宇治橋と同型式であるが規模が小さくなり、橋長が約 45.6m 、幅員は約 4.6m である。この橋について、資料が公表されていないこと、また限られた条件（測定できる範囲）でしか測定できないことを踏まえ、本論文では参考値として示している。なお今後の詳細な調査や文献による確認が終えた後に修正を加える予定である。

(2) 木除杭の現地調査

木除杭について、資料が公表されていないことから、橋梁とのクリアランスを簡易測量を実施して求めた。計測は河川中央で1カ所、中心から右岸側と左岸側でそれぞれ1カ所の合計3カ所を測定した。また風日祈宮橋においては数が少ないことから河川内に位置する2カ所を測定した。簡易測量はレーザー計測による距離測定と鉛直角測量により三角比の原理に基づき橋梁からの水平距離を求めた。

表1にこれらの結果を示す。なお表中の水平距離は橋梁の地覆端から木除杭までの水平距離を意味し、平均水平距離は、現地計測した水平距離を平均した値である。なお、橋脚間隔は橋脚の中心間距離を示している。この表より、橋梁とのクリアランスは、最大が風日祈宮橋の 14.93m であり、最小は渡月橋の 6.32m 、なおこれらの平均値は 10.45m であった。なお渡月橋のみ一本おきに設置されているが、それ以外の3橋は橋脚毎に設置されている。次に橋脚間隔と木除杭と橋梁とのクリアランスとの比について述べる。水平距離と橋脚間隔の比を求めると、宇治橋（宇治市）は 0.68 ($7.51 \div 10.93$) 程度、同様に渡月橋は 0.61 、また宇治橋

(伊勢神宮)は1.76、また風日祈宮橋は2.02となる。京都に位置する2橋は約0.7倍程度のクリアランスに対し、伊勢神宮の2橋では約1.9倍のクリアランスとなった。この様に木除杭が設置されている地域により、配置の条件が異なることが判った。また、京都の渡月橋のみ木除杭が一本おきに設置され、ほかの3つの橋梁は橋脚と同数の配置である。今回の調査対象橋梁は4橋であり、水平距離や橋脚間隔と木除杭と橋梁とのクリアランスとの関係について、定量的に評価するにはより多くの橋梁の調査結果が必要となる。

3. 木除杭の実験

(1) 実験の概要と条件

a) 対象となる実験水路

対象となる実験水路は、より実際の流れ場を再現することを目指したため、実在する用水路を対象とした。この用水路は、河床堆積等物がなく対象区間の流体の流れの様子から極端な斜流も認められないことから安定した流速が期待でき、今回の実験に適している。図1に実験対象の用水路の断面構成を示す。この図より、河床幅は $W=1.19\text{m}$ 、ブロック積み護岸の勾配は1:0.3、また基本河床勾配は $i=1/750$ である。また写真2に対象となる用水路を示す。写真に示す矢印の向きが流下方向であり写真奥が上流側で手前側が下流側となる。

b) 実験の実施方法

次に実験の概要について説明する。図2に実験水路の概要（縦断方向）を、図3に橋脚及び木除杭の配置を示す。これらの図に示すように、実験は橋脚の位置を基準点とし、この点から上流側の所定の位置（図中では3.0mと10.0mのみ表示）より対象とする漂流物を投入、その後自然流下により橋脚部及び木除杭部を通過する本数を記録する方法とした。漂流物を投入するにあたり、図3に示す様に流下方向に対して90度（横方向）で投入するが、投入時に角度を有した場合や衝撃により水面が波打つ様な場合は、無効としてやり直した。通過時の記録については、目視により通過が明確であるものは観察のみとし、橋脚もしくは木除杭で留まるのか流下するか慎重に判断が求められる場合のみストップウォッチで通過時間（秒）を記録した。なお、漂流物の回収については、橋脚から約2.0m程度下流側で、釣り用の網を複数使用して回収した。また漂流物が橋脚等の狭窄部で留まった際は、ポールを使用して人為的に強制流下させて回収した。

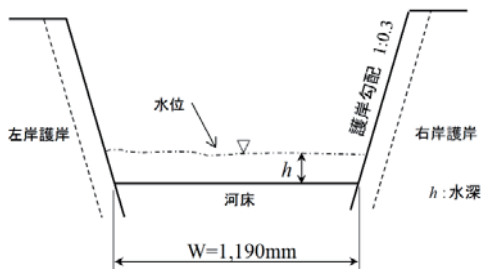


図1 用水路の断面構成



写真2 実験用水路

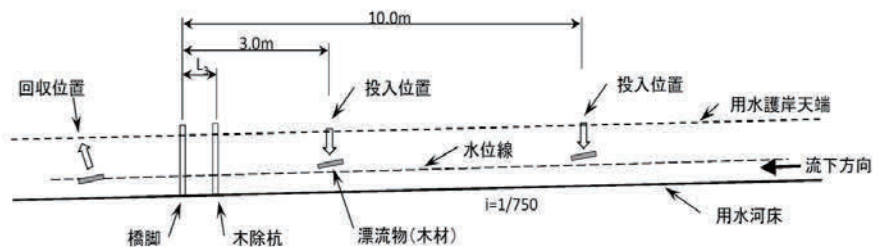


図2 実験水路の概要（縦断方向）

表2 漂流物の種類と特性

名称	断面サイズ (mm)	実寸 (mm)	比重	長さ (mm)
丸 φ9	φ9	φ8.4~8.9	0.34 (0.29~0.39)	400
丸 φ15	φ15	φ14.4~15.5	0.27 (0.23~0.32)	400
角材四角	12×12	11.8~12.3	0.30 (0.21~0.36)	400
角材偏平	12×5	11.8~12.1 5.0~5.2	0.28 (0.23~0.33)	400

() 最小~最大

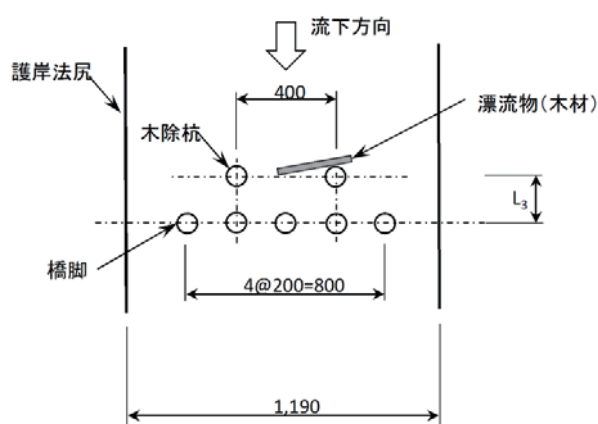


図3 橋脚と木除杭のレイアウト

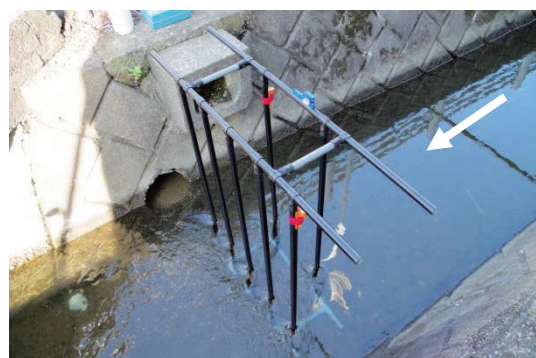


写真3 橋脚及び木除杭の設置状況

c) 橋脚及び木除杭のモデル及び漂流物の設定

橋脚及び木除杭のモデルについて説明する。橋脚及び木除杭は鋼製パイプ（20A、外径25mm）にて、またこれらの部材を連結するための二次部材は塩化ビニールのパイプ（VP20、外径24mm）を用いモデルを製作した。橋脚の間隔については、本研究で想定している伝統的な橋梁である4橋の橋脚間距離が概ね10.0mであり、縮尺として1/50程度となるように200mmと設定した。なお先行している実験³⁾では、縮尺が1/200程度であり、本研究ではより実際の挙動に近い条件で実験を再現することを目標にした。

また、木除杭については、図3に示す様に1本おきとし、所定のクリアランスを保持して配置した。なおこれらのクリアランス(L_i)は、1.0m~10.0m（1.0~3.0m、10.0m）の間で変化させた。写真3にこれらの設置状況を示す。なお写真の矢印は流下方向を示している。

次に漂流物について説明する。本研究で対象とする漂流物は、橋梁に影響する流木や瓦礫である。これらの断面形状は非常に複雑であるが、ここでは4種類（円形状2種、角材四角、角材偏平）を選定した。この断面形状については、実際の漂流物を想定するならば、小枝であったり表面の皮のような状態を再現すべきであるが、まずは基礎的な知見を得ることに加え汎用的な資材を使用することから、今回の実験ではこのような形状を選定した。なお選定した木材は汎用性の高い材料としたため本研究では桐を用いた。但し桐は比較的比重が軽いため、この比重が与える影響については今後の検討課題とする。

漂流物の長さは、原田らの研究³⁾を参考に、もっとも閉塞率が高くなる橋脚間隔の2倍（ $2 \times 200 = 400\text{mm}$ ）と設定した。なお漂流物の流下については、1本ごとに人力による投入を行う方法としたが、流す順番は4種を10本単位×5セットでランダムに投入した。漂流物について、表2にこれらの特性一覧を示す。

表 3 実験ケース

実験番号	実験日時	水位 (m)	漂流物投入位置 L ₁ (m)				橋脚と木除杭の間隔 L ₃ (mm)		
			1.0	2.0	3.0	10.0	なし	200	300
1	11/7	0.45	—	—	—	—	—	—	
2	11/11	0.46	○	○	○		◎	◎	
3	11/18	0.49			○	○	◎	◎	
4	11/21	0.46				○	◎		
5	12/1	0.32			○		◎	◎	
6	12/2	0.29			○	○	◎	◎	
7	12/3	0.28				○		◎	
8	12/7	0.16			○	○		◎	

d) 評価式

評価式について説明する。本研究ではこの様に構造部を通過した本数に着目し、投入した総数に対して通過した数に対する比率により評価を行うこととし、これを通過率 f_{wn} と定義して式(1)で求めた。ここに、 V_{wout} は橋脚部を通過して流下した漂流物(流木等)の本数、 V_w は漂流物(流木等)の投入本数である。

$$f_{wn} = \frac{V_{wout}}{V_w} \quad (1)$$

e) 実験ケース

表3に実験ケースの一覧を示す。この表では実験日時、平均水位、漂流物の投入位置、橋脚と木除杭との間隔を示している。例えば「実験5」は、投入位置から橋脚までの距離が3.0m(○)の条件で、橋脚と木除杭との間隔が200mm(◎)と300mm(◎)のケースを実施したことを意味している。

それぞれの実験ケースについて、実験1は、流速の確認を行うことと橋脚の模型の確認等をキャリブレーションするために実施し、実験2(総投入数240本)は、漂流物投入距離が3.0m以下で比較的短い距離の影響を確認するために実施、実験3.4(総投入数1,240本)では水位が比較的高く流速が速い場合のケース(計測値0.66m/s)、実験5.6.7(総投入数1,260本)では水位が中位のケース(計測値0.42 m/s)、実験8(総投入数400本)は水位が低く速度が遅いケース(計測値0.15 m/s)の結果を得るためのケースである。以上から、本研究では漂流物 $N=3,140$ 本を流下させた。本論文では、木除杭が通過率に与える影響を分析するため、木除杭がない条件、橋脚と木除杭の距離を200mと300mmと変化させた実験結果、また漂流物の種類・形状に関する通過率の依存性について考察する。なお流速について、本来であればフルード数やレイノルズ数から、目標とする流速に対して設定を行うべきところであるが、本研究では実水路を用いていることから、流速の調整や水位の設定を行うことが困難であることを踏まえ、橋脚間隔や木除杭の構造の縮尺を1/50にすることを優先させた。

(2) 実験の結果

a) 橋脚と杭との中心間隔の違いによる実験結果

ここでは、橋脚と木除杭の中心間隔の違いによる結果を述べる。表 4 に実験 3.4、実験 5.6.7、実験 8 における木除杭がない場合、橋脚間隔と同等 (200) の場合、橋脚間隔が 1.5 倍の場合 (300) における通過率一覧を、また、図 4 はこの表の結果をグラフで整理したものを示す。この図について、縦軸は漂流物の通過率を、また横軸は橋脚と杭との中心間隔を示している。これらの表及び図より、木除杭がない場合の通過率は、最大が投入距離 3.0(実 3.4)の 42%、最小は投入距離 3.0(実 5.6.7)の 20%で、これらの比率は 2.1 倍という結果を得た。同様に 200 における通過率は、最大が 10.0(実 3.4)の 56%、最小は 3.0(実 5.6.7)の 27% (比率 2.1 倍)、また、300 における通過率は、最大が 10.0(実 5.6.7)の 62%、最小は 3.0(実 8)の 10% (比率は 6.2 倍) という結果であった。平均通過率に着目すると、木除杭がない場合の結果で 33%、200 の場合では 39%、300 の場合では 44%となった。

次に、投入距離の違いによる結果を比較する。投入距離 3.0(実 3.4)の通過率の結果は、最大が橋脚間隔 300 の 60%、最小は 200 の 33%で、その差は 27%であった。投入距離 10.0(実 3.4)の通過率の結果は、最大が 300 の 61%、最小は木除杭がない場合の 37%で、その差は 24%であった。投入距離 3.0(実 5.6.7)の通過率の結果は、最大が 300 の 47%、最小は木除杭がない場合の 20%で、その差は 27%であった。また、投入距離 10.0(実 5.6.7)の通過率の結果は、最大が 300 の 62%、最小は木除杭がない場合の 33%で、その差は 29%であった。

表 4 実験結果 (木除杭の有無、L₃の違い)

L ₃ (mm)	木除杭無	200	300	平均値	最大-最小
3.0 (実験 3.4)	42%	33%	60%	45%	27%
10.0 (実験 3.4)	37%	56%	61%	51%	24%
3.0 (実験 5.6.7)	20%	27%	47%	31%	27%
10.0 (実験 5.6.7)	33%	39%	62%	45%	29%
3.0 (実験 8)	—	—	10%	—	—
10.0 (実験 8)	—	—	26%	—	—
平均値	33%	39%	44%(58%)	43%	27%

* () 内は実 8 を含まない平均通過率を示す。

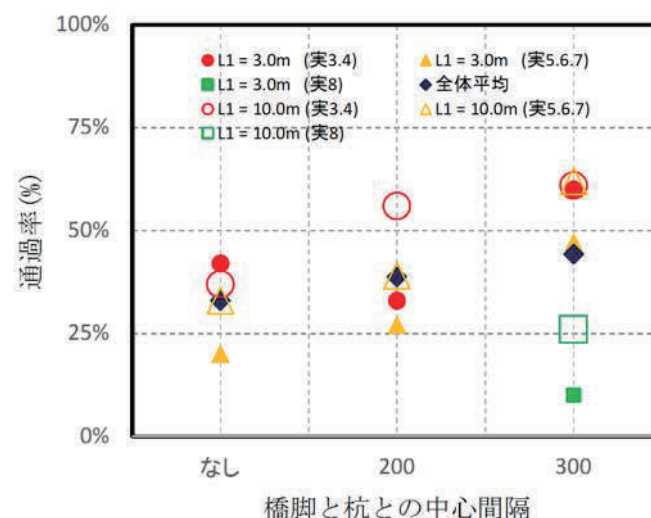


図4 実験結果 (木除杭の有無、L₃の違い)

橋脚と木除杭の間隔に注目すると、木除杭がなしの場合では、最大が 3.0(実 3.4)の 42%、最小は 3.0(実 5.6.7)の 20%でその差は 22%、同様に 200 の場合、最大が 10.0(実 3.4)の 56%、最小は 3.0(実 5.6.7)の 27%で、その差は 29%であった。また、300(実 8 を除く)の場合、最大が 10.0(実 5.6.7)の 62%、最小は 3.0(実 5.6.7)の 47%で、その差は 15%であった。以上より、木除杭を設置しない場合の全体としての最大値は 42%、200 のケースの最値 56%、そして 300 のケースの最大値が 62%と木除杭を設置すると通過率が向上し、更には橋脚との距離が離れると、より通過率が向上することが判る。また、低速である実験 8 の結果を加えると、300 でのケースのみの比較となるが、水位が低い場合（速度が遅い）の通過率が低下していることが判る。しかし実験 3.4 の 3.0m のケースのみ、200 のケースで通過率が低下しているが、これは実水路を用いていることもあって漂流物に偶然に発生した流れの変化による影響が含まれている可能性がある。このため、有意な変化として評価するには平均値である変化に着目すると、平均値は 33（木除杭無）から 39%（200）へ、そして 58%（300）と通過率が向上していることが判る。この結果からも、木除杭を設置することで通過率が向上すること、また橋梁から距離を確保するとより通過率が更に向上することが明らかになった。

b) 漂流物の種類の違いによる実験結果

ここでは、漂流物の種類の違いによる結果を述べる。表 5 に実験 3.4、実験 5.6.7、実験 8 における木除杭がない場合(なし)、橋脚間隔と同等の場合(200)、橋脚間隔が 1.5 倍の場合 (300)における通過率一覧を、また図 5 はこの表の結果をグラフで整理したものを示す。この図について、縦軸は漂流物の通過率を、また横軸は漂流物の種類を示している。これらの表及び図より、木除杭がない場合(なし)における通過率は、最大が角材四角の 44%、最小は丸φ15 の 25%で、これらの比率は 1.8 倍という結果を得た。

表 5 実験結果（漂流物の違い）

L ₃ (mm)	なし	200	300	平均値	最大-最小
丸 φ9	28%	40%	46%	38%	18%
丸 φ15	25%	42%	44%	37%	19%
角材四角	44%	37%	42%	41%	7%
角材偏平	35%	36%	45%	39%	10%
平均値	33%	39%	44%	39%	14%

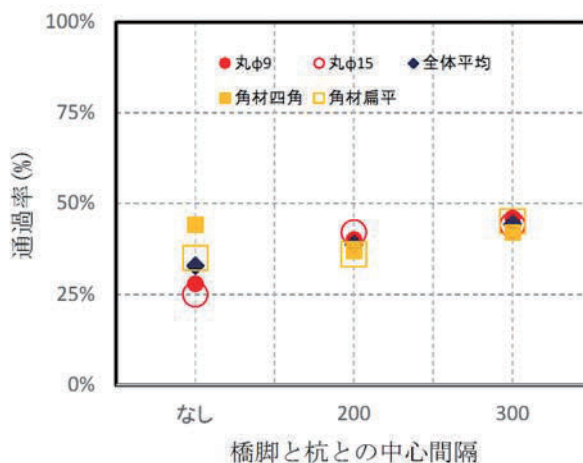


図 5 実験結果（漂流物の違い）

同様に200における通過率は、最大が丸φ15の42%、最小は角材扁平の36%で、これらの比率は1.2倍という結果であった。また、300における通過率は、最大が丸φ9の46%、最小は角材四角の42%で、これらの比率は1.1倍という結果であった。平均通過率に着目すると、木除杭がない場合(なし)の結果は33%、200の結果では39%、300の結果では44%、また全体の平均は39%であった。次に、漂流物の種類の違いによる結果を比較する。表5より全体平均は37~41%であり平均値が39%であることから、漂流物の形状に依存することがない結果であることが判る。また図5より、木除杭なしの場合では形状により通過率に差が認められるが、200そして300になるごとに通過率の差が小さくなる。特に300のケースでは形状による依存性はないことが判る。また通過率の最大と最小との関係に注目すると、角材四角の7%の差が全体として小さくなったが、それ以外は平均値である14%前後である10~19%の範囲であった。

4. まとめ

研究では、実在する用水路にて、木除杭を有する伝統的な橋梁である3橋をモデルとし、1/50程度の縮尺にて漂流物を流下する実験を実施した。漂流物は、瓦礫や流木等を想定して4種類(丸2種類、角材四角、角材扁平)にて、流速(水位)の異なる条件、流木投入位置を変化させた条件、また木除杭と橋脚との間隔を変化させた条件により、漂流物の形状による依存性も踏まえた通過率を測定した。ここで得られた結果を以下に整理する。

- ・ 伝統的な橋梁に設置された木除杭を調査した結果、4橋と限られたデータであるが、橋脚間隔と木除杭と橋梁との間隔の比率は、京都における2橋と、伊勢神宮に位置する2橋で同様な傾向にあるものの、規則的なものではないことが判った。これらの結果は、概ね京都の2橋が0.7倍程度、伊勢神宮の2橋が1.9倍程度であった。また、木除杭の配置について、京都の渡月橋では橋脚の一本おきに設置されていることに対し、他の3橋は各橋脚位置に設置さえていることから、統一的な配置規則性は認められなかった。
- ・ 流速が速くなる場合(実験3.4)では全体的に通過率が高くなること、また流木の投入位置が離れる場合(10.0m)では通過率が向上することが明らかとなった。
- ・ 漂流物の4種類の違いが通過率に与える影響は小さいこと、また木除杭を設置すると通過率が向上することや、木除杭の間隔を200mmから300mmに広げるとさらに通過率が高くなることが明らかとなった。またこの間隔を広げると漂流物の形状による依存性がなくなることから、多様な形状である漂流物から閉塞を回避するには、木除杭は橋梁から距離を確保することが効果的であることが明らかとなった。

以上より、木除杭を設置することにより漂流物の通過率が向上する傾向があることを明らかにした。なお、木除杭の設計について、先行する原田ら³⁾の研究や、本研究の実験結果より一定の効果が期待されるものの、実験のケース数や、木除杭をより橋梁より離れた場合の追加実験の必要性等から、定量的な評価を行うには至っていない。すなわち、今後も継続して実験を試みる予定である。

謝辞：本研究はJSPS科研費 26289148の助成を受けたものです。また実験を行うにあたり、工学部・建築生活環境学科4年(実験時の学年)の伊藤誠人君、猪又裕人君、大橋拓斗君、甲斐志門君、紺谷和宏君、得能友太君に協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 2004年の自然災害 福井豪雨, https://www.mlit.go.jp/river/pamphlet_jirei/bousai/saigai/2005/14.pdf, 国土交通省ホームページ・水管理・国土保全・災害列島2005(閲覧2017.1.25)
- 2) 平成25年9月台風18号洪水の概要, <http://www.kkr.mlit.go.jp/river/saigai/20130916typhoon18/saigaihoukoku04.pdf>, 国土交通省ホームページ・近畿地方整備局河川部(閲覧2017.1.25)
- 3) 原田紹臣・里深好文: 橋梁における歴史的な流木対策に関する研究, 歴史都市防災論文集Vol.10, pp.115-122, 2016年7月.