

橋脚における伝統的な流木対策技術

三井共同建設コンサルタント株式会社 ○ 原田 紹臣
立命館大学理工学部 里深 好文
政策研究大学院大学 水山 高久

論文要旨

橋脚における流木対策等として、古くから橋脚の上流部に設けられた木除杭が提案されている。木除杭は芥留杭とも称されており、流木の橋脚への衝突防止や橋脚で詰まりやすい流木や芥の巻付け防止を目的としている。ただし、木除杭に関するメカニズムは明確でないとともに設計手法は確立しておらず、橋梁毎にその杭の配置形式等が異なっている。そこで、本研究は木除の機能やその配置設計に関して、実験に基づいて提案している。

キーワード：橋梁，流木，実験，解析

まえがき

効果的かつ効率的な流木対策は、古くて新しい技術的な課題である。特に、多発する近年の洪水被害において、土石流や山地崩壊等により発生した流木が橋梁等の横断構造物に集積し氾濫を拡大させており、流木災害の軽減対策が求められている(例えば、写真-1)^{1) 2)}。これまで、橋脚や橋桁における流木の集積について、橋梁での流木被害やその対策に関して研究が多く報告されている。

橋梁や河道の狭窄部における流木の閉塞に関して、足立・大同³⁾、石川⁴⁾の報告がある。足立・大同³⁾は流木密度、表面流速ならびに支間長と流木長との比の違い等が流木の閉塞に影響を与えると指摘している。石川⁴⁾は、水路上の狭窄部における流木の捕捉率に関して、フルード数や狭窄部の幅、流木長・直径等を用いた関係式を実験結果に基づいて提案している。一方、流木の挙動に関して、それぞれ提案された解析モデル等を用いて詳細に検討した報告が存在している(例えば、5)、6)、7)。

一方、江戸時代における橋梁は主に板や石部材を用いた構造であり、材料長の制約によって橋脚間の長さが比較的短く、洪水時に流木等の閉塞に伴って多くの橋梁が流出した(例えば、隅田川の両国橋)⁸⁾。このため、大都市の橋以外では、渡し船による河川横断が図られていた。なお、当時における板橋の平均的な支間長は3から4間(約5から7m)であり、材料の制約から10mを超えることは困難であった。また、橋脚は柱と杭の一体構造であり、柱の直径が7寸から2尺(0.2から0.6m)程度であったため、橋脚に流木や芥(ごみ)が巻き付きやすく、破損しやすい構造であったと報告されている。この対策として、古くから橋脚の上流部に設けられた木除杭(例えば、京都嵐山の渡月橋：写真-2、伊勢神宮五十鈴川

の宇治橋：写真-3、京都宇治川の宇治橋：写真-4)が提案されている。この歴史的な橋梁の流木対策である木除杭は芥留杭とも称されており、流木の橋脚への衝突防止や橋脚で詰まりやすい流木や芥の巻付け防止を目的としている⁹⁾。

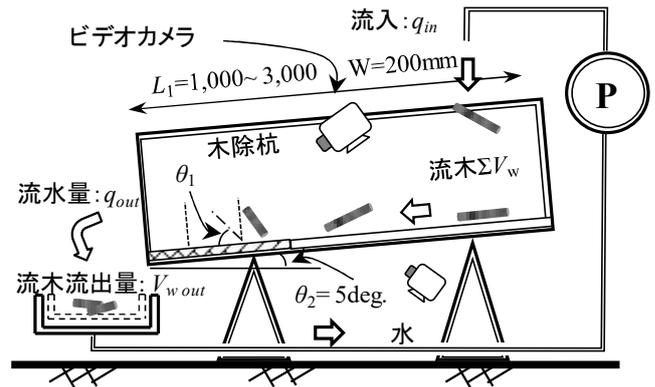
現在、支間長が狭く、流木対策の必要な橋梁が全国的に多く存在しており、この伝統的な木除杭を用いた流木対策も有効な手段の一つであると考えられる。しかしながら、木除杭に期待するメカニズムは明確でないとともに、木除杭に関する設計手法は確立しておらず、橋梁毎にその杭の配置形式等が異なっている(例えば、渡月橋は橋脚一つ置きに設置、両宇治橋は全橋脚毎に設置)。また、これまで木除杭による流木の回転に着目した杭の平面配置、河床に対する杭の傾斜角度の違いが木除の効果へ与える影響に関する研究は、筆者らが知る限り存在しない。



写真-1 近年に発生した橋梁における流木被害



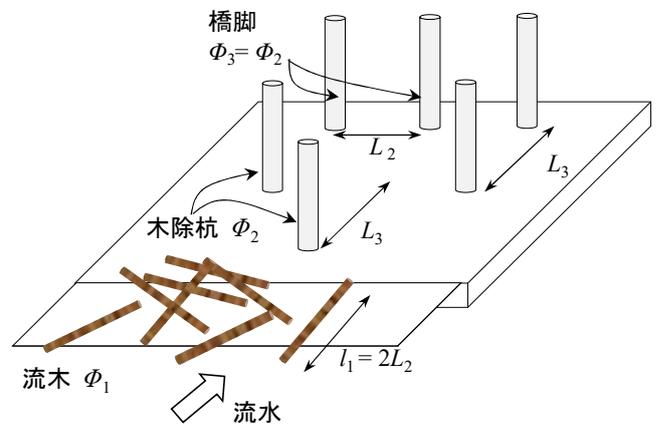
写真—2 嵐山の渡月橋における木除杭



図—1 実験水路の概要



写真—3 伊勢神宮内の宇治橋における木除杭



図—2 橋脚と流木除杭の設置概要



写真—4 宇治川(京都宇治市)の宇治橋における木除杭

そこで、本研究はこの歴史的な橋梁における対策である木除杭の機能やその配置設計に関して、基礎的な実験に基づいて提案している。最後に、今後の更なる解析的な検討に向けて、一般的に公開されて汎用的に使用されている流木を考慮

した三次元水理解析プログラム¹⁰⁾を用いて実験結果を対象に検討し、今後の本解析モデルの適用性について考察する。

1. 木除杭の機能に関する実験

木除杭の機能やその配置設計に関して把握するために、実験に基づいて考察する。

1. 1 検討方法

実験に使用した水路を図—1に示す。図—1に示すように、傾斜させた水路(長さ3m、幅20cm)の上流から水(q_{in})と流木(円柱材料、長さ10cm、乾燥状態での比重0.75;手動により投入)を供給し、下流部に設置した橋脚部及び木除杭(図—2)で閉塞された流木の本数を計測している。水路の傾斜角は既往報告⁴⁾を参考に、閉塞しやすい緩勾配($\theta_2=5$ 度)としている。実験水路床には流水を安定させるため、細砂を接着

表-1 実験条件

CASE	Φ_1 (mm)	L_1 (mm)	V_w	流木投入 方向	型式 Type	θ_1 (deg.)	L_3	q_{in} (l/s)			
1-1	3	1,000	1/s *50s	流れ直角 方向	杭無			1.0			
1-2								2.3			
1-3								2,000	流れ方向	杭無	1.0
1-4											
2-1		3		1,000	1/s *50s	流れ直角 方向	B	90	$1.0 * l_1$	1.0	
2-2									$1.5 * l_1$		
2-3									$1.0 * l_1$		
2-4									$0.5 * l_1$		
2-5				2,000			杭無			2.3	
2-6							杭無				
2-7							杭無				
2-8							杭無				
2-9	50		杭無				2.3				
3-1			杭無								
3-2			杭無								
3-3			杭無								
3-4	3,000	杭無			2.3						
3-5		杭無									
3-6		杭無									
3-6		杭無									
4-1	1	2,000	1/s *50s	流れ直角 方向	B	45 135	$1.5 * l_1$	1.0			

している。図-2に示すように、今回採用した木除杭及び橋脚を円柱とし、直径はそれぞれ1cmとしている。なお、予備実験において、これらの構造物を角柱とした場合、構造物周辺の流れが乱れて不安定となり実験結果の値が収束しなかったため、今回は円柱を採用している。橋脚の支間長 L_2 については、既往研究⁴⁾の実験結果において流木長と狭窄部との比が2分の1以下の場合に顕著に閉塞されている傾向が示されているため、実験に用いた流木長(10cm)の2分の1(5cm)としている。

実験条件の一覧を表-1に示す。表-1に示すように、流木材(円柱)の直径 Φ_1 、流木投入位置から構造物までの間隔 L_1 、流木の投入量 V_w (1/s*50s:1秒毎に1本投入を50秒間、50:1度に50本を1回)、流れに対する流木の投入方向(流れ方向:流木軸が流れと同じ方向、流れ直角方向:横断方向で上部より投入)、木除杭の配置形式(図-3)、杭の傾斜角度 θ_1 (図-4)、橋脚と杭等との中心間隔 L_3 (流木長 l_1 との比:図-2)、上部からの供給水量 q_{in} (図-1)をそれぞれ変化させて、木除杭の機能について把握している。

図-3に示すように、木除杭の配置に関して対策無及び橋脚一つ置きに対する杭の設置(Type A:渡月橋)に加えて、

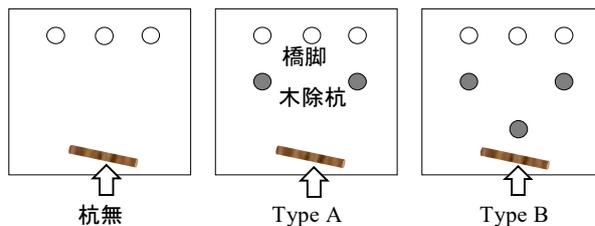


図-3 木除杭の配置形式

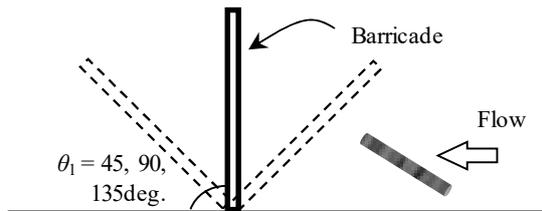


図-4 木除杭の傾斜角度

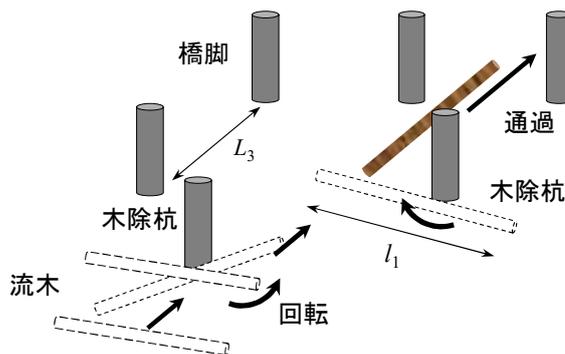


図-5 橋脚及び木除杭における流木流向制御の概要

新たに千鳥配置形式(Type B)を提案し、それぞれ比較している。なお、一度に投入する流木の本数については、予備実験において全流木が杭の1列目と2列目の空間内(図-3)に収まる流木量としている(容積濃度0.3程度)。また、供給水量 q_{in} (1.0, 2.3 l/s)に対して、水深はそれぞれ約1.1, 1.9cm, フルード数は約1.3, 1.4であった。ここで、本研究で期待する流木の杭による回転に伴う流木流向制御の概要を図-5に示す。図-5に示すように、流木が杭を軸として回転し、そのまま橋脚を通過する構造としている。なお、手動での流木投入による影響を低減するため、実験は同じ条件にて3回実施するとともに、ビデオカメラを用いてその様子を記録している(図-1)

1.2 実験結果と考察

実験結果において、橋脚部を通過して下流に流出した流木

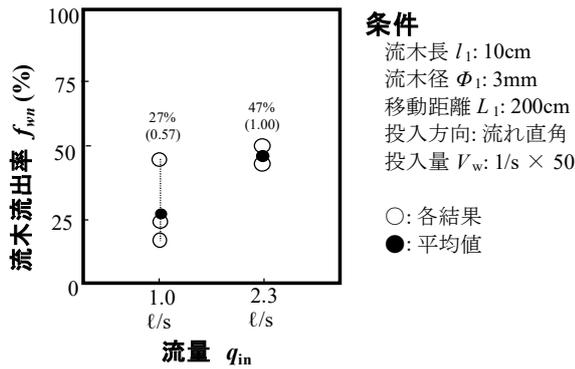


図-6 上部からの供給水量の違いによる木除率 f_{wm} の変化

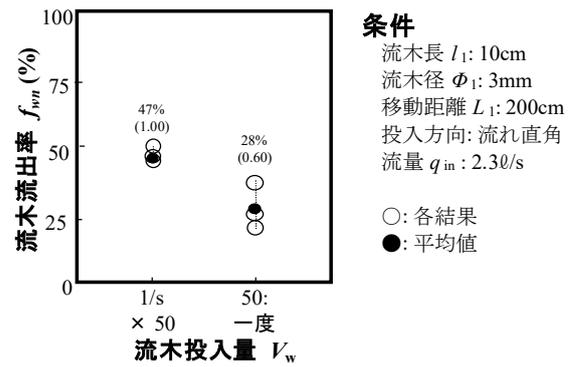


図-8 流木の供給条の違いによる木除率 f_{wm} の変化

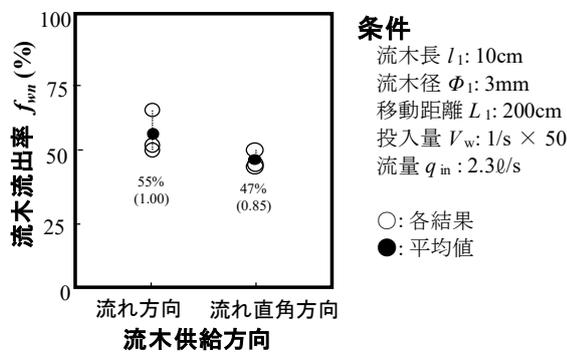


図-7 流木の供給条件の違いによる木除率 f_{wm} の変化
(流木を流れ方向, 流れ直角方向に投入)

の割合(木除率) f_{wm} は,

$$f_{wm} = V_{wout} / V_w \quad (1)$$

と表される。ここに、 V_{wout} は橋脚部を通過して流出した流木の本数、 V_w は流木の投入本数である。以降に条件の違いが木除杭の機能に与える影響に関して、考察する。

上部からの供給水量 q_{in} (図-1)の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-6に示す。図-6に示すように、流量(及び流速)が大きくなるに伴って、木除率 f_{wm} が向上することがわかった。実験中の観察結果によると、流速が大きい場合においては、流木が橋脚を軸に周りの干渉を受けずに円滑に回転し、下流へ流出した。一方、流速が小さい場合には流木の回転が不安定となり、隣の橋脚に接触して閉塞の様子が確認された。ただし、流速が小さい場合における結果(木除率)の一部は約50%であり、流量が大きい場合と比べて顕著な差がなかった。これより、流木の回転は確率論的な現象であると考えられる。また、流れが遅い平常時において流木が流出してきた場合、橋脚部での閉塞確率が向上することが推測される。

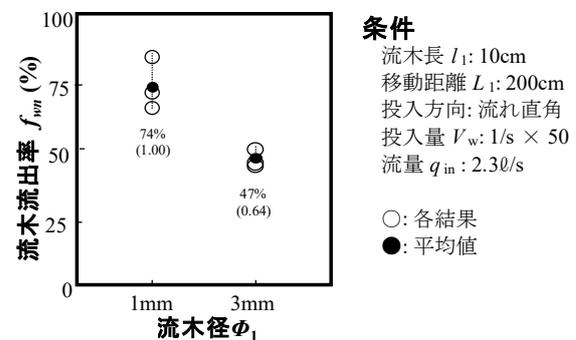


図-9 流木直径の違いによる木除率 f_{wm} の変化

流木軸の投入方向の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-7に示す。図-7に示すように、流木を流れと同じ方向に投入した場合(流れ方向)の木除率 f_{wm} は横断方向に投入した場合(流れ直角方向)と比べて向上することが分かった。なお、実験中の観察によると、流木途中に流木の一部は流水方向へ回転していたが、その他の流木は不規則に回転しているのが確認された。また、流木軸が流れに対して完全に直角方向ではなく傾斜している程度であった場合においても、橋脚への接触に伴って閉塞の可能性が高くなることが確認された。

流木の投入量 V_w の違い(1/s*50s:1本/秒を50秒間, 50:1度に50本)による木除率 f_{wm} の変化を図-8に示す。図-8に示すように、1度に流木を投入した場合には橋脚部での閉塞確率が向上(木除率 f_{wm} が低下)する傾向が示された。これは、既往研究³⁾で指摘されている流水中における流木密度の違いが閉塞に影響を与えたことによるものと考えられる。ただし、1度に投入した場合の結果はあまり収束しておらず、実験結果の一部においては木除率 f_{wm} が40%程度と同等であり、投入方法(量)の違いによる顕著な差が無いケースも確認された。

使用した流木直径 ϕ_1 の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-9に示す。図-9に示すように、流木直径が大きくなるに伴

って橋脚部で閉塞する傾向が示され、既往研究⁴⁾で示された傾向と一致している。ここで、石川ら⁴⁾は前述のとおり、水路上の狭窄部における流木の捕捉率と、フルード数、流速、水深、狭窄幅、流木直径及び流木長との関係式を提案している。なお、本実験での観察結果によると、流れが速い場合においては流木が橋脚部を回転中に隣の橋脚に接触しても、流水の影響により新たに流木の鉛直方向における回転が加わって閉塞が回避(離脱)され、流木が橋脚間を通過するのが確認された。フルード数が与える影響について更なる検討が望まれる。

次に、木除杭の設置有無と平面配置形式(Type A, Type B: 図-10)の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-10に示す。図-10に示すように、木除杭の設置に伴って木除率 f_{wm} が顕著に向上する傾向が示された(約2倍程度)。なお、木除杭の配置形式の違いに関して、Type Bの方がType Aに比べて有利であることがわかった。これは、観察結果によると、Type Aの場合、木除杭間を通過した流木が中央の橋脚を中心に回転する際に、流木が隣接する橋脚(ただし、 $L_2=0.5l_1$: 図-2)に接触したことによるものである。

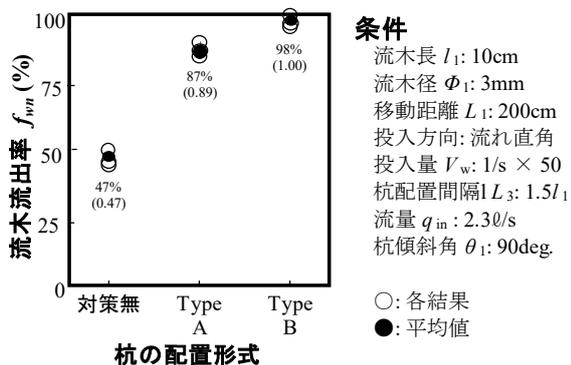


図-10 木除杭の有無と配置形式の違いによる
流木除率 f_{wm} の変化

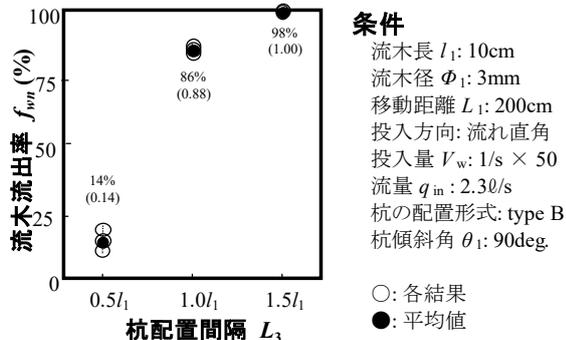


図-11 木除杭の配置間隔の違いによる
流木除率 f_{wm} の変化

配置形式 (Type B) における木除杭の間隔 L_3 の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-11に示す。図-11に示すように、木除杭の縦断方向における間隔 L_3 については流木長 l_1 の概ね1.5倍以上が望まれる傾向が示された。なお、予備実験において、間隔 L_3 を流木長 l_1 の2.0倍にした場合の結果と1.5倍の結果との比較により両者において殆ど差がなかったことを確認している。これより、流木が木除杭を中心に円滑に回転させるためには、十分な回転させる空間を確保する必要があることが分かった。

最後に、木除杭の傾斜角度 θ_1 (図-4) の違いによる木除率 f_{wm} の変化を図-12に示す。図-12に示すように、上流側に杭を傾斜させた場合、流木の杭による回転が鉛直方向に対して不安定となり、円滑に回転されない様子が確認された。これは、上流側に傾斜させた杭の影響により、杭上流側周辺において鉛直下向けの流れ(二次流)が発生し、流れが乱れたことによるものと考えられる。一方、下流側に杭を傾斜させた場合、流木は円滑に回転するが、回転中に流れの影響を受けるため、流水方向まで完全に回転せずに回転途中で流出してしまうことが確認された。なお、詳細な角度の違いが流木の流向制御効果に与える影響については今後の課題とする。

これまでの結果より、橋脚における流木の閉塞対策として、木除杭を全橋脚対象に千鳥配置(ただし、縦断方向における杭間隔は対象流木長の1.5倍程度)で垂直に設置した配置が有効であることが新たに分かった。なお、流木の投入条件(最大本数等)、比重ならびに水路勾配の違い等が流木の流向制御効果に与える影響に関する更なる検討や、定式化(一般化)が望まれる。

最後に、今後の解析的なアプローチ実施のために、一般的に公開され、今後も汎用的な利用が期待されている流木を考慮した三次元河床変動水理解析モデル(iRIC: Nays CUBE)¹⁰⁾を用いて再現計算を行った。なお、本解析モデルは流木を球

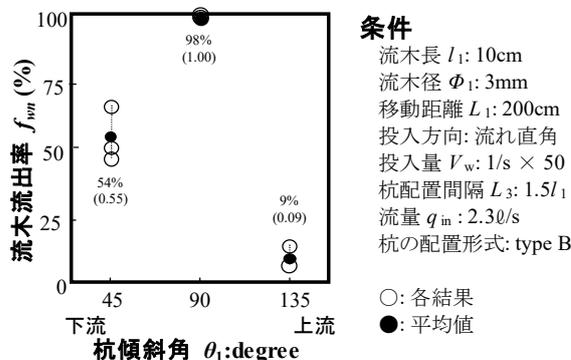


図-12 木除杭の傾斜角度の違いによる
流木除率 f_{wm} の変化

体の直列接合としてモデル化し、球体群の運動(球体群モデル)として近似している。また、一般的なデカルト座標系の場合においては球体運動の基礎式は比較的簡単に表現できるが、本解析モデルは一般曲線座標系を用いている。そこで、流木に関する定式化部分についても一般曲線座標で表記し、流木を構成する個々の球体の時間ステップ Δt 時間移動をLagrange方程式により計算している。なお、Lagrange方程式を用いた本解析モデルにおける流体中の固体の運動は、

$$\sigma A_3 d^3 = \frac{du_{pi}}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 |u - u_{pi}|$$
$$(u - u_{pi}) + \rho A_3 d^2 \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_{pi}}{dt} \right) \quad (2)$$

と表される。ここに、 ρ : 流体密度、 σ : 粒子密度、 C_D : 抗力係数、 A_2 : 粒子の二次元形状係数($\pi/4$)、 A_3 : 粒子の三次元形状係数($\pi/6$)、 d : 粒径、 u : 周囲流体流速、 u_p : 砂粒子速度、 t : 時間の次元量、 g : 重力である。その他の基礎式は既往文献¹⁰⁾を参考されたい。

実験結果を対象に再現計算した結果を図-13に示す。図-13に示されるとおり、水流に伴う流木の挙動及び杭部における回転が表現されており、今後における適用の可能性が期待される。ただし、流木同士の相互作用や流木が流れに及ぼす影響等については考慮されていないため、更なる再現性の向上に向けた本解析モデルの改良が望まれる。

あとがき

古くから橋梁における流木等の対策として用いられてきた木除杭の機能について、基礎的な実験により考察するとともに、優位と考えられる杭の配置形式や構造について提案した。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 木除杭は流木の橋脚への直接的な衝突防止だけでなく、杭を中心とした回転による流木の流向制御に関する機能も期待できることが実験により確認された。
- 2) 木除杭の流向制御効果(木除効果: 木除率)に関して、流速が小さい場合は流木の杭部での回転が不安定となり、木除率の機能が低下することが分かった。
- 3) 木除杭については、全橋脚を対象に杭を上流側へ千鳥に配置するのが有効であることが分かった。さらに、それらの流水方向における杭間隔は対象とする流木長に対して約1.5倍程度とし、垂直に杭を設置するのが優位であることが分かった。

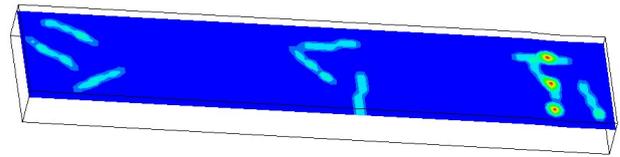


図-13 一般的に公開されて汎用的に用いられている解析モデル¹⁰⁾を用いた再現計算結果の一例

参考文献

- 1) 石野和夫・橋丸大史・玉井信行: 2004年7月18日福井水害における流木の橋梁への影響調査結果, 土木学会第61回年次学術講演会, No.2, pp.9-10, 2006.
- 2) 伊豆大島土砂災害対策検討委員会: 伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書, 2014.
- 3) 足立昭平・大同淳之: 流木に関する実験的研究, 京都大学防災研究所年報, Vol.1, pp.41-49, 1957.
- 4) 石川芳治・水山高久・福澤 誠: 土石流に伴う流木の発生及び流下機構, 新砂防, Vol.42, No.3, pp.4-10, 1989.
- 5) 後藤仁志・酒井哲郎・林 稔: 粒子法による流木群の堰止め過程のLagrange解析, 水工学論文集, Vol.45, pp.919-924, 2001.
- 6) 清水義彦・長田健吾: 流木形状を考慮した個別要素法による橋脚周辺の流木集積過程に関する数値実験, 水工学論文集, Vol.51, pp.829-834, 2007.
- 7) 渋谷 一・堀口俊行・香月 智・大隅 久・石川信隆: 円形柱集合体要素を用いた個別要素法による根付き流木の捕捉シミュレーション, 土木学会論文集A2(応用力学), Vol.67, No.2, pp. I_323-334, 2011.
- 8) 松村 博: 江戸の橋, 鹿島出版会, pp.68-70, 2007.
- 9) 財団法人 河川環境管理財団, 流木災害軽減対策と河川流木管理に関する総合的研究, 2008.
- 10) iRIC web site, <http://i-ric.org/ja/>