

## 集中豪雨時の流木による橋梁閉塞と河岸浸食対策に関する実験的研究

Experimental study on Log Jam Formation at Bridge and Bank Erosion by Flood Flow in Localized torrential rain

京都大学 助教 岡本 隆明

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. はじめに

集中豪雨時には山間部で斜面崩壊が起こり、大量の流木が河川に流出する。都市域の中小河川は十分な河積を有していないため、流木が橋梁部で堰きとめられて河道閉塞し、水位上昇を招き河川を氾濫させる（2012年宇治市志津川、2016年北海道清水町）。このような流木被害を抑制するための対策としては川幅の拡張や流木捕捉工の設置などが挙げられる。しかしながら、中小河川では上下流のバランスや経済的な事由からどちらの対応も困難な場合が多く、流木による水害に対して十分な対策ができていないのが現状である。また中小河川の洪水氾濫は河川地形の影響を大きく受け氾濫流が局地的に集中するため、氾濫危険箇所を予測することが難しい。そこで本研究では橋梁模型を設置して水路実験を行い、流木形状による流木閉塞率の変化を調べる。流木による橋梁閉塞後の氾濫水の挙動をPIV計測する。さらに橋梁周辺の氾濫流による河岸浸食実験を行い、橋梁・護岸の補強等流木対策を実施するための有意義なデータを提供する。

#### 2. 実験装置

##### 2. 1 流木投入実験

本研究ではまず流木捕捉による橋梁閉塞について調べるために、流木投入実験を行った。図-1 に橋梁模型と流木捕捉実験装置図を示す。実験には長さ 10m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配水路を用いた。x, y および z は、それぞれ流下方向、鉛直方向および横断方向である。流下方向原点  $x=0$  は河道閉塞部（橋模型の上流端）、鉛直方向原点  $y=0$  は橋の上流側氾濫原底面、横断方向原点  $z=0$  は右岸側の水路壁とした。U, V および W は各方向における時間平均流速を示す。

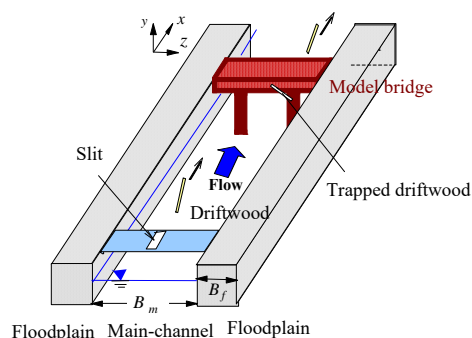


図-1 流木投入実験装置

図-1 に示すように氾濫原模型(1/80 スケール:塩ビ製)を水路両側に設置した。低水路幅は  $B_m=20\text{cm}$ 、左岸側と右岸側の氾濫原の幅は  $B_f=10\text{cm}$  である。両岸の氾濫原高さは  $D_L=D_R=10\text{cm}$  (左岸と右岸で流下方向に一樣) とした。橋梁模型(1/80 スケール)は水路上流端から 4.0m の位置に設置した。橋梁模型は橋長 20cm、幅員 5cm、床板厚 1cm で、高さ 9cm、幅 1cm の橋脚部を 2 本有しており、橋脚間距離  $B_R$  は 6.0cm である。橋模型の上部には欄干部として高さ 3cm、幅 20cm、厚さ 2mm のメッシュ(メッシュサイズ  $2\times 2\text{mm}$ )板を取り付けている。また流木が捕捉されていない状態での河道全体の断面積  $A(=B_m\times D)$  に対する橋模型の投影面積の割合は  $A_{\text{bridge}}/A=0.19$  である。

流木模型として木製円柱(直径  $d=6.0\text{mm}$ , 長さ  $l=6.0, 9.0, 12\text{cm}$ (1/80 スケール),  $l/d=10, 15, 20$ , 比重 0.5)を用いた. 橋梁模型の 4.0m 上流から水路中央に 10 本ずつまとめて同時に投入した. 着水時の給木方向はランダムとなる. これを 10 秒ごとに繰り返し行った. 供給した流木量は各ケース計 270 本とした. 流木閉塞による堰上げ効果について調べるために, 捕捉された流木は除去せず投入を繰り返した. 各投入が終了するごとに橋模型の上流側 5cm における水深を計測した. 10 回実験を行い, 水深の集合平均値を堰上げ水深とした.

また流木捕捉時の橋梁部での河道閉塞率について調べるために, 流木除去後に橋模型の前面に既知の遮蔽面積のアルミ製ポーラス板(20cm×15cm, パンチ径 3.0mm で穴の配置は均等)を設置して橋模型の上流側の水深を計測した. 流木閉塞時の水深と比較することで河道閉塞率  $A_b/A$  を評価した. ここで  $A_b$  は閉塞面積である. 本研究ではアルミ板の空いている穴の個数を変えることで, 河道閉塞率  $A_b/A$  を変化させている.

## 2. 2 迂回流による河岸浸食実験

次に流木による橋梁閉塞時にどの程度の氾濫流量が氾濫原に流れ込むか詳細に調べるために鉛直面(x-y 面)PIV 画像計測法を導入した. 図-2 に示すように橋模型の前面にアルミ製ポーラス板を設置し, 大量の流木が一度に橋梁に捕捉され河道閉塞した状態を再現した. ポーラス板の閉塞率  $A_b/A$  は流木捕捉実験をもとに決定している. PIV 計測実験ではポーラス板を設置して十分に時間が経過して, 氾濫原の氾濫流水深が増加しなくなった状態(定常状態)に達したときに流速計測を行った. PIV 計測では 2012 年志津川水害を想定して橋梁部の下流側で氾濫原高さを変化させている. 左岸側の氾濫原高さは  $D_L=8\text{cm}$ , 右岸側の氾濫原高さは  $D_R=10\text{cm}$  である.

$x$ - $y$  鉛直面 PIV では水路上方から 3.0W のアルゴンイオンレーザー(LLS)を照射し, 水路側方に高速カメラ(1024×1024pixel)を設置し, フレームレート 500Hz, サンプルレート 30Hz で 60 秒間撮影した. 撮影領域のサイズは河道閉塞部を含むように 20cm×20cm 領域である. 計測画像から鉛直面の時間平均流速( $U, V$ )を算出した. PIV トレーサーについては粒径  $80\mu\text{m}$ , 比重 1.02 のポリスチレンを用いた. 氾濫原の氾濫流量を正確に算出するため, 氾濫原全域をカバーするように LLS 位置を横断方向にシフトさせている. LLS の照射位置は  $z/B_m=1.9$ (左岸側),  $z/B_m=0.1$ (右岸側)とした.

次に流木閉塞時に越流した迂回氾濫流による河岸浸食プロセスを明らかにするために移動床実験を行った. 橋模型の前面には幅 20cm 高さ 15cm のアルミ製ポーラス板(パンチ径 3.0mm)実験では河道閉塞率  $A_b/A$  に応じてアルミ板の穴を塞ぎ穴の個数を変化させることで, 河道閉塞率の影響についても調べた.

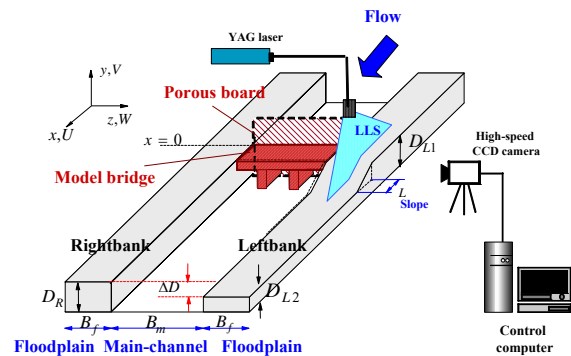


図-2 PIV計測装置

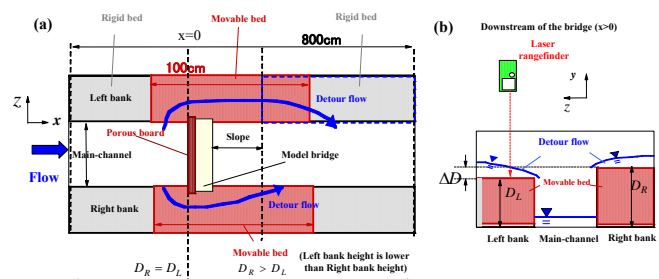


図-3 迂回流による河岸浸食実験

流木閉塞時には橋梁周辺で氾濫原侵食が発生すると考えられるため、図-3のように橋模型の上流側  $x=-60\text{cm}$  から下流側  $x=90\text{cm}$  までの区間に移動床ボックスを設置した。移動床ボックスには図のようにそれぞれの氾濫原高さ  $D$  まで焼砂(粒径0.9mm)を敷き詰めた。本実験では移動床ボックスの低水路側との仕切りとして2mmの塩ビ板を用いているが、これは河川護岸を想定している。迂回氾濫流発生時には氾濫原は侵食され、氾濫原高さは時々刻々と変化する。本研究では水路上方にレーザー距離計(G1m50c, Bosch社)を設置し河岸高の時系列データを得た。レーザー距離計のサンプリングレートは2Hzである。

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 3. 1 橋梁部での流木集積と堰上げ水深

まず単独投入時の流木の橋梁捕捉率に注目する。図-4は流木の橋梁捕捉率  $P_b$  の変化を示したものである。  $l/B_R=1.0$  のケースでは捕捉率  $P_b=0$  となっており、流木は橋脚に捕捉されない。流木は橋脚に対して横向きに捕捉されるため、橋脚間距離(支間長)  $B_R$  よりも流木長が小さくないと捕捉されないためである。  $l/B_R=1.5$  のケースでは流木が橋脚に捕捉されるのがみられた。図-5に示すように流れに対して横向きになった状態(偏揺角が大きい)で流下してきた流木は橋脚に対して横向きに捕捉される。また流れに対してほぼ平行になった状態(偏揺角が小さい)で流下してきた流木は橋脚に衝突した場合は、流木が回転して橋脚に対して横向きに捕捉されるのがみられた。偏揺角が小さい状態で流下して橋脚に接触せずに通過していく流木もみられた。

図-6に橋梁部での流木集積のスナップショットを示す。実験初期の10本投入時における捕捉確率は、  $Fr=0.26$  では  $P_b=0.3$ 、  $Fr=0.60$  では  $P_b=0.23$  である。既往研究でも報告されているように、流木が1本でも捕捉されると後続の流木がこれに接触しやすくなり捕捉確率が飛躍的に増大する。  $Fr=0.26$  のケースでは  $Fr=0.60$  のケースよりも水面付近で流木捕捉が進行しているのがみられた。  $Fr=0.60$  ケースでは橋梁前面で流木が集積していくと水深が増加し、越流し氾濫原で橋梁迂回流がみられた。

図-7にCaseL6-3( $l/B_R=1.0$ ,  $Fr=0.60$ ), CaseL9-3( $l/B_R=1.5$ ,  $Fr=0.60$ ), CaseL12-3( $l/B_R=2.0$ ,  $Fr=0.60$ )のケースにおける流木集積時の堰上げ水深  $H$  の累計流木投入本数による変化を示す。

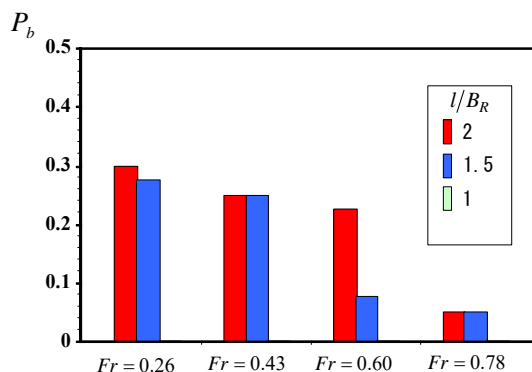


図-4 流木捕捉率(単独投入)

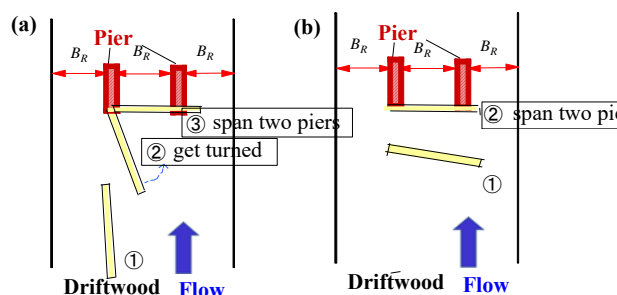


図-5 流木捕捉の模式図

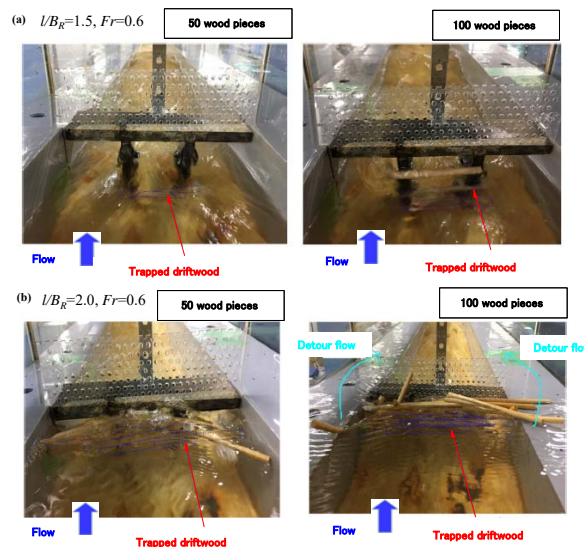


図-6 橋梁部での流木集積のスナップショット

値は10回の流木投入実験の堰上げ水深平均値で、流木投入前の低水路水深 $H_m$ で無次元化している。横軸は投入した流木本数 $n_d$ である。

$l/B_R = 2.0$ ,  $Fr = 0.60$ ケースでは流木集積とともに上流側的水深が堰上げされ、70本投入時に氾濫原への越流がみられた。200本投入以降では堰上げ水深の増加はあまりみられずほぼ一定値 $H_{max}$ に達している。図中には $A_b/A$ (河道閉塞率)が既知のポーラス板を設置したときの水深を示しているが、270本投入時には $A_b/A = 0.65$ のポーラス板を設置したときの堰上げ水深と同程度となった。 $l/B_R = 1.5$ ,  $Fr = 0.60$ ケースでも氾濫原への越流がみられたが(140本投入時)、 $l/B_R = 2.0$ ,  $Fr = 0.60$ ケースよりは堰上げ水深効果が小さい。これに対して、 $l/B_R = 1.0$ ,  $Fr = 0.60$ のケースでは流木捕捉はみられず、堰上げ水深 $H$ は変化しない。流木が橋脚に接触しても、回転して下流側に流出するのがみられた。

### 3. 2 迂回流の流況特性

中小河川河道閉塞時の洪水氾濫危険区域について調べるために、図-8にCaseR10L8(左岸側の氾濫原高さは $D_L=8\text{cm}$ , 右岸側の氾濫原高さは $D_R=10\text{cm}$ )の迂回流発生時の氾濫流水深 $H_{FR}$ ,  $H_{FL}$ の水平面コンターを示す。河道閉塞部の近傍( $x/B_m=0.0-0.5$ )では水深の横断方向変化が大きい。すなわち、橋梁部を迂回する流れが発生しているため、氾濫原の低水路に接している領域( $z/B_m=0.375-0.5, 1.5-1.625$ )の水深が小さくなっている。また $z/B_m=0.125, 1.875$ では流下方向に下流に進むにつれて氾濫流水深 $H_{FR}$ ,  $H_{FL}$ が小さくなっているのがみられる。これは氾濫流が氾濫原から低水路に流れ込むためである。

橋梁部より上流側( $x/B_m < 0$ )では左岸と右岸の氾濫流水深に大きな差はみられない。橋梁部より下流側( $x/B_m > 0$ )では氾濫原高さが低い左岸側に氾濫流が集中するため、左岸側の氾濫流水深が大きくなり、洪水氾濫危険区域も大きくなっている( $x/B_m=0.0-2.5$ )。右岸側では洪水氾濫危険区域が小さくなっている( $x/B_m=0.0-1.75$ )。

図-9にCaseR10L8,  $A_b/A$ (河道閉塞率)=0.65,

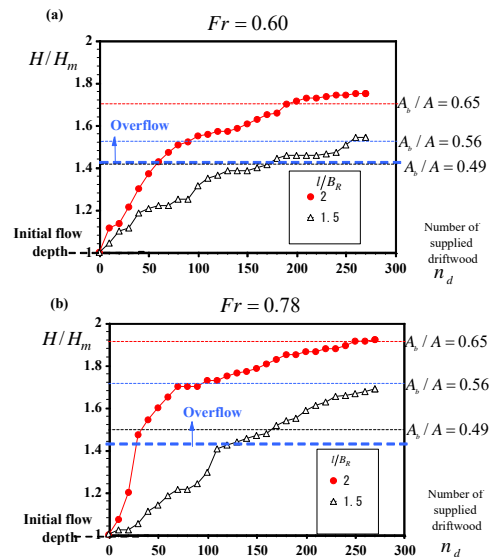


図-7 橋梁部での流木集積による堰上げ水深の変化

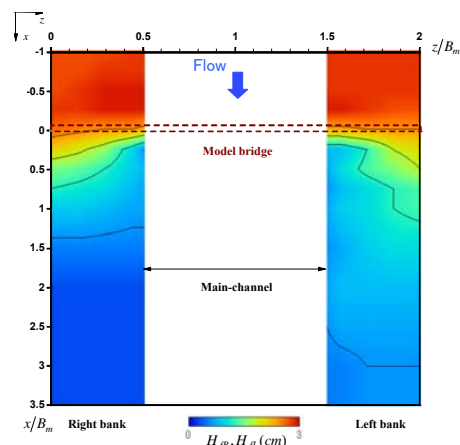


図-8 迂回流発生時の氾濫流水深コンター

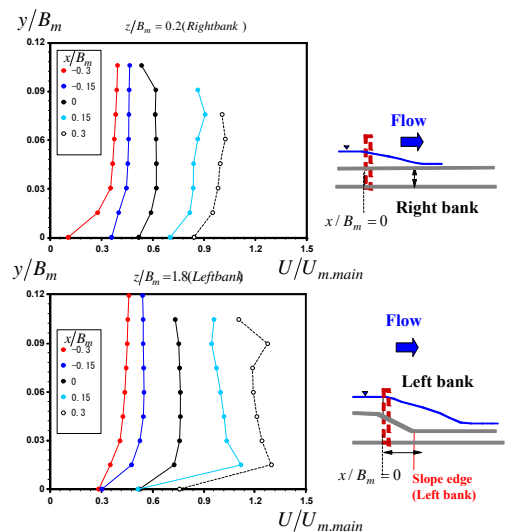


図-9 左岸側と右岸側氾濫原における時間平均流速鉛直方向プロット

$Fr=0.6$ の左岸側と右岸側氾濫原における時間平均主流速鉛直方向プロット $U(y)$ の流下方向変化を示す。

左岸側では橋梁部より上流側( $x/B_m < 0$ )で鉛直方向にほぼ一様な流速分布である。橋梁部では主流域の流れが氾濫原に流れ込むため、主流速の値が増加している。橋梁部より下流側では流速分布も一様ではなく、半水深位置付近で流速が増加する傾向がみられた。

### 3. 3 迂回流による河岸浸食

図-10に $A_b/A=0.65$ ケースの迂回流による河岸原浸食過程のスナップショットを示す。 $t=9s$ で橋梁近傍において河岸浸食がみられた。時間とともに浸食域が上流側と下流側に拡大しているのが観察される。 $t=60s$ で橋梁の上流側 $x/B_m = -1.0 \sim 0.0$ が浸食され、橋梁の下流側領域は $x/B_m = 0.0 \sim 1.5$ の領域が浸食されるのが観察された。

図-11に $A_b/A=0.49, 0.65, 0.91$ ケースの橋梁近傍の点 $x/B_m=0.0$ におけるレーザー距離計によって得られた氾濫原高さの時系列変化 $H_b(t)$ を示す。 $A_b/A=0.65$ ケースでは浸食領域は時間とともに拡大し、 $t=100s$ で深さ7cmの河岸浸食が発生している。河岸の浸食深さは $t=0-120s$ で急激に増加し、 $t>120s$ で時間変化が緩やかになっている。このことから氾濫原浸食は氾濫初期に集中して進行することがわかった。

### 4. おわりに

本研究では橋梁模型を設置して水路実験を行い、流木形状による流木閉塞率、堰上げ水深の変化を調べた。また流木による橋梁閉塞後の氾濫水の挙動をPIV計測した。さらに橋梁周辺の氾濫流による河岸浸食実験を行い、河岸浸食領域を評価した。

- 1)  $l/B_R = 2.0, Fr = 0.60$ ケースでは流木集積とともに上流側の水深が堰上げされ、水深が急激に増加するのが観察された。70本投入時に氾濫原への越流がみられた。200本投入以降では堰上げ水深の増加は緩やかになり、ほぼ一定値 $H_{max}$ に達した。270本投入時には閉塞率 $A_b/A = 0.65$ のポーラス板を設置したときの堰上げ水深と同程度となった。
- 2) PIVによる氾濫原の流速計測結果から氾濫流速は迂回流が流れ込む橋梁近傍で増加し、流下方向に下流にいくほど流速が増加することがわかった。特に左岸と右岸に高低差のあるCase10L8では氾濫原高さの低い左岸側に氾濫流が集中し、橋梁の下流側 $x/B_m = 0.15-0.3$ ( $B_m$ は川幅)の領域で特に氾濫流速が大きくなることがわかった。
- 3) 橋梁近傍において迂回流による河岸浸食がみられた。時間とともに浸食域が上流側と下流側に拡大しているのが観察された。氾濫初期には河岸高さの減少速度が大きく、初期に集中して浸食が進

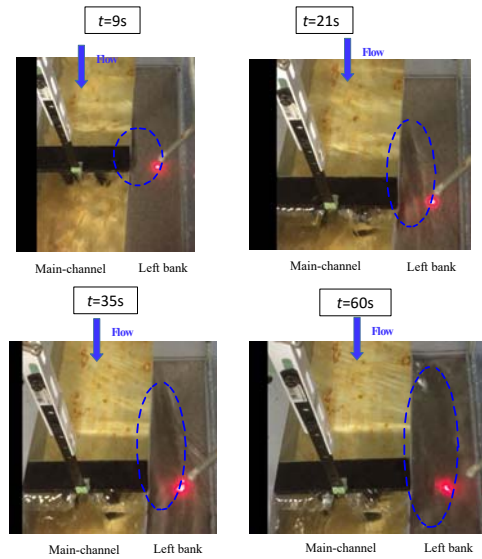


図-10 迂回流による河岸浸食過程のスナップショット

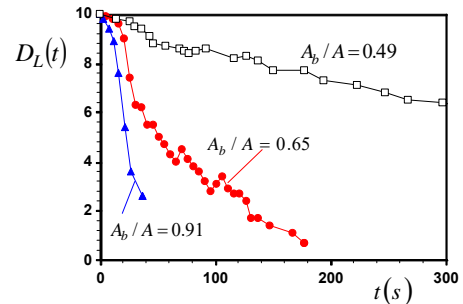


図-11 迂回流発生時の河岸高さの時系列変化

行し、迂回流による河岸浸食は非常に短時間で起こることがわかった。また橋梁近傍の河岸浸食深さが最も大きく、橋梁の上流側  $x/B_m = -1.0 \sim 0.0$  ( $B_m$ は川幅)が浸食され、橋梁の下流側領域は  $x/B_m = 0.0 \sim 1.5$  の領域が浸食されるのが観察された。橋梁部を中心に  $x/B_m = -1.0 \sim 1.5$  の領域で護岸する必要がある。

**( 発表論文 )**

1. Okamoto, T., Kashihara, Y., and Sanjou, M. : Experimental Study on Drag Force and Pitching Moment Stability of Drifting Object, *Proc. ISEAS, Osaka*, pp.123-132, 2017.
2. Okamoto, T., Takebayashi, H., Takenaka, M., Kashihara, Y. and Toda, K.: Driftwood accumulation and flood damage area in blocked river, *Proc. Geomate2017, Tsu*, pp.599-604, 2017.