流木の挙動安定性と橋梁閉塞に及ぼす影響 に関する基礎的研究

山上 路生¹・岡本 隆明²

¹正会員 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: michio.sanjou@water.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

E-mail: takaaki.okamoto@water.kuciv.kyoto-u.ac.jp

集中豪雨時には流木をはじめとした漂流物が河川に流出し、橋脚周辺におけるこれらの集積は過度の水位上昇につながる河道閉塞を招き、深刻な洪水被害を引き起こす。そこで本研究は河川増水時における流木の漂流挙動に注目し、円柱流木モデルを用いた水路模型実験からその流体力を実測して安定特性を明らかにした。抗力および揚力の迎角と偏揺角に対する変化、ピッチングモーメントおよびヨーイングモーメントの計測データを解析し、姿勢安定性を考察した。また重心位置の変化が挙動安定に与える影響を解明した。さらに流木投入実験を行い、橋梁模型における補足確率や流木集積が発生した場合の堰上げ水深効果について、漂流挙動特性と比較してそのメカニズムを考察した。

Key Words : driftwood, pitching and yawing moments, drifting stability and accumulation at bridge

1. はじめに

近年、集中豪雨が増加傾向にあり、各地で水害が頻発している。豪雨時には流木をはじめとした漂流物が河川に流出し、橋脚に引っかかることで河道を閉塞させて水位上昇を招き、洪水被害を大きくすることが知られている¹⁾。さらに河川増水時の漂流物の衝突による人的、物的被害も甚大であり、その対策が急務となっている²⁾。流木災害の対策を考えるためには、流木の発生、河川への流入、流下特性、集積・捕捉および水位増加・氾濫等の個々のプロセスを詳細に研究する必要がある。多くの既往研究により貴重な知見が得られている。例えば流木発生について村本ら³⁾は水理実験により側岸浸食と主流への取り込みを研究している。

さて本研究は上述のプロセスにおいて橋梁や構造物の流木閉塞に注目するものである。この研究トピックは古くから重点的に研究されてきた。中川ら⁴⁾は平面2次元解析と水理実験より家屋群による流木の堰止め特性を研究し、流木のヨー角（主流方向に対する流木の長軸方向の偏差）、流木と家屋の位置関係を主要因として堰止め現象のモデル化を行っている。また彼らの実験ではすでに家屋や橋梁などの構造物に捕捉されている流木が多いほど、新たに上

流から輸送される後続流木の堰止め確率が捕捉本数の二乗で増加する。したがって最初に捕捉される流木の挙動を知ること重要で、多くの研究者によって水理模型実験が繰り返されてきた。一般的には多数の流木模型を水路に投入して堰止確率と、桁下余裕高、橋脚間隔、フルード数との関係を詳細に調べるもので、定量的な知見の一つとして流木の主軸長に対する橋脚間隔の比が0.5以上の場合、堰止確率が大幅に向上する¹⁾。このように流木災害は流況、橋梁諸元および水面の占有率も含めた流木諸元の3者が関係する非常に複雑な問題である。渋谷ら⁵⁾は樹根付きの模型流木を用いた水路投入実験を行い、根がある場合は根無し流木よりも絡まり効果によって捕捉率が向上し、さらには流木長の影響は小さいとしている。長谷川ら⁶⁾は室内水路における流木投入実験と次元解析から橋梁集積が発生する限界流下流量を示した。彼らは山岳河川における比重が1より大きな広葉樹の流出を対象としており、射流条件に限定してはいるが提案された集積判定式は実験結果と良好に一致する。より具体的な問題として末次ら⁷⁾は橋梁の取付道路の浸食と流木集積の関係を水理実験より考察している。このような橋梁と流木集積に関するトピックは海外でも古くから重視されており、例えば流木集積による橋脚周りの洗掘促進⁸⁾

やフルード数による捕捉確率の定式化⁹⁾などが鋭意研究されている。

模型実験に限らず、与えられた流況条件下における流木要素の漂流シミュレーションも活発に行われている¹⁰⁾⁻¹¹⁾。複数の円柱形要素で樹根部まで含めた流木をモデル化して、漂流挙動を解析するもので捕捉工や橋梁閉塞の再現に活用されている。この方法では計算負荷はそれほど大きくないと思われるので実務面における活用が期待される。

流れ場の局所性と流木挙動の関係についても興味深い課題である^{12),13)}。赤堀ら¹³⁾は、水制間のせん断流領域における流木の流下・集積特性を考察している。特に流れ場はPIV、流木挙動はPTVをそれぞれ適用したユニークな計測を実施して、流れの卓越周波数と流木の輸送速度の関係を論じている。また流木運動については個別要素法¹⁴⁾をベースとしたモデリングを行っており、計測値(流れ場)と計算値(流木運動)のハイブリッドな解析を試みている。

一方で流木群の挙動は平面のヨーイング(偏揺れ)だけでなくピッチング(頭振り)を伴う3次元性の強い現象であり、流木の運動と周囲の水流の流速場の相互作用を考慮してこれらを同時解析する計算ソルバーの研究も進んでいる。また同様に津波漂流の3次元数値シミュレーションモデル¹⁵⁾⁻¹⁷⁾も鋭意開発されており、漂流物の回転や動揺を含む複雑な輸送現象の再現が可能となっている。このような多相同時計算によって流木閉塞過程やそれに起因する抵抗増加を正確に予測できるようになり、現象解明に大きく役立っている^{18),19)}。グリッドレスの粒子法も有用で、例えば後藤ら²⁰⁾は急流河川における小橋梁の流木通過を解析対象とし、平面2次元計算では扱えないピッチングを伴う流木の潜り込みを再現している。また後藤ら²¹⁾は根付きの流木モデルを用いて、橋梁閉塞の瞬間を捉えて短時間の水位増加などを定量的に評価した。さらに五十里ら²²⁾はダムの洪水吐きにみられる流木閉塞を粒子法によって流れ場と個々の流木要素の運動をシミュレートし、閉塞状態から流出状態への遷移過程についても検討している。

以上のように3次元シミュレーションが普及しつつあるが、既往の実験研究の多くが平面2次元場を対象としており、回転運動は鉛直軸周りのヨーイングに限定されているため十分といえない。特に重心が偏った場合、仰角の変化を生むピッチング挙動が無視できない。橋梁部の流木補足は、流況、橋梁諸元、流木のサイズと偏向が主な決定要因である。

そこで本論文では前半で、流木模型の2種類の偏

向(ピッチ角とヨー角)と流体力の関係を水路試験によって評価する。さらに航空工学の知見を援用して、実測した回転力よりピッチングとヨーイングの安定性を検討する。流木の挙動を解析するためには、抗力特性の評価が基本となるが、姿勢安定性も重要なファクターである。例えば迎角のわずかな変化が流れ方向の投影面積を極端に増加させ、橋梁捕捉時の水深堰上げ効果を飛躍的に増大させる可能性がある。流体中の物体の安定性については、航空力学において多くの実験的研究²³⁾が積み重ねられてきた。揚力、抗力特性だけではなくピッチングおよびヨーイングモーメントに基づく静安定、時間軸を考慮した動安定などが詳細に検討されている。しかしながら、流木の形状は推進抵抗を追及したものとは無縁であり、航空力学の知見のみでは不十分である。そこで本研究の前半では開水路における流木の漂流挙動に注目し、水路模型実験から流木の揚抗力特性と静的および動的安定性を解析する。さらに後半では既往研究を参考に流木モデルの投入試験を行い、前半で得られた重心位置と回転による安定性の観点から橋梁の流木捕捉特性を考察する。さらに河道閉塞の進行にともなう水位増加についても定量的に評価する。

なお本研究で得られた知見は、流木による橋梁災害対策の一助となるだけでなく、数値シミュレーションのベンチマークテストとしての役割を担うことも期待される。

2. 実験装置と計測方法

(1) 流木にかかる抗力・揚力計測

本研究では流木に作用する揚抗力の計測を全長10m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型直線水路にて実施した。この水路の側壁は強化ガラス製であり、水流中に金属棒で固定支持された模型が観察できる。図-1は流木に作用する流体力と座標系を示す。 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の座標軸である。 H は水深である。流木を中心とした相対流速を考える。主流に向かって頭上げを正とする角度 α を迎角とよぶ。模型は流木模型として防水塗装を施した比重0.5の円柱木材を使用した。 l は流木模型の長さ、 d は流木模型の直径である。なお流木模型は全体積の半が沈水する半水没を想定し、いずれの迎角に対しても流木模型の中心が水面を通過するように、支持系全体の高さを上下方向に微調整している。すなわち、流木模型の中心位置の鉛直高さは水深に等しく15cmである。

図-1 流木模型に作用する揚抗力計測システム

図-1(a)および(b)はそれぞれ揚力と抗力測定の実験装置の概略である。流体力の計測にはフォースゲージ(日本電産シンボ製プッシュプルゲージ FGP-0.5)を用いた。これはアナログ出力可能で、PC に時系列データを記録して 60 秒間の平均値を計測値とした。抗力計測実験では図-1(a)に示す通り水平方向に設置したフォースゲージに金属の支持棒とトルクヒンジを介して流木模型を取り付けており、流木の迎角 α を微調整可能にしている。模型が水流から受ける抗力 D は金属棒を中継してフォースゲージで計測される。一方揚力計測実験では図-1(b)のように流木模型を支持し、鉛直下向きに設置したフォースゲージで揚力 L を計測した。

(2) ピッチングモーメントとヨーイングモーメント計測

本研究ではピッチングモーメントとヨーイングモーメントを計測し、流木流下時の横断方向軸と鉛直軸の安定性について考察する。特に重心位置が流木挙動に与える影響に注目する。図-2(a)に示すとおり、3 つのパターンを考えた。 G_d 、 G_c および G_u はそれぞれ主流に平行して流下することを想定した流木模型の下流側、中心および上流側に位置する重心を示す。図-2(b)に重心 G が物体の上流側に位置する場

図-2 流木の重心位置(回転軸の位置)とモーメントの定義

図-3 実験に用いた流木模型

合を例に、流体力の作用点を示している。重心を通る横断軸まわりの回転モーメントをピッチングモーメント M_G 、重心を通る鉛直軸の回転モーメントをヨーイングモーメント M_Y と定義する。点 P は水流による圧力の作用点、点 A は α に依存せず一定のモーメントとなる点で、空気力学では空力中心とよばれるが、ここでは水流を対象にしているため、水力中心とよぶ。点 O は流木の上流端である。 R は以下の考察で用いる流木の長軸に垂直に作用する流体力成分である。また流木模型は図-3 に示すように長さ $l = 40\text{cm}$ (1/12 スケール) で、流木直径 $d = 2.0, 3.0, 5.0\text{ cm}$ を 3 通りに変化させた。直径 d に対する流木

図-4 流木重心周りのピッチングモーメント計測システム

図-5 流木重心周りのヨーイングモーメント計測装置

長の比（径長比）はそれぞれ $l/d = 20, 13.3, 8.0$ となる。

図-4 は流木に作用するピッチングモーメントの計測システムである。常に半水没状態を保つように金属シャフトを上下方向に微調整可能としている。流木の重心位置と迎角 α を変化させて計測した。いずれの重心も流木の主流方向に沿う中心軸上にあるものとする。図のように 3mm 径の金属シャフトを回転軸として貫通させた点を流木模型の重心（ピッチングモーメントの回転中心）とし、上流側、中心、下流側と位置を変化させている。なお流木模型の材質は均一であるので厳密な重心は物体中心に一致するが、ここでは回転軸の位置を便宜的に重心とよぶ。水路側壁には軸受け用のベアリングを装着した金属プレートをセットし、ここに金属シャフトを通した。さらに主流方向の中心軸上の重心とは異なる点を水路上部にあるトラバーサーに取り付けたフォースゲージに接続された金属棒で支持する。トラバーサーによってフォースゲージの主流方向および鉛直方向の位置調整が可能である。この 2 次元位置調整により、流木模型の迎角 α を 1° 単位で微調整できる。フォースゲージの計測値と模型支持点／重心間の距離を用いればピッチングモーメント M_G が計算できる。ヒンジの抵抗の影響を考慮するため、既知の力を作用させてフォースゲージのキャリブレーションを行った。

(a) 単独投入による橋梁捕捉率に関する実験

(b) 集団投入による橋梁閉塞実験

図-6 流木投入実験と橋梁閉塞

図-5 は流木に作用する水平面のヨーイングモーメントの計測システムである。流木の重心位置と偏揺角 β を変化させて計測した。 $\beta = 0^\circ$ は流木の向きと主流方向が平行となっている状態である。ピッチングモーメント計測と同様に金属シャフトを回転軸として貫通させた点を模擬的に流木模型の重心（ヨーイングモーメントの回転中心）とし、上流側、中心、下流側と重心位置を変化させている。流木先端を水平に設置したフォースゲージで支持し、模型支持点・重心間の距離を用いてヨーイングモーメント M_Y を計算した。なお右回りをヨーイングモーメントの正の向きとした。

(3) 橋梁による流木捕捉実験

次に重心位置が変化したときの流木の橋梁による捕捉効果について調べるために、流木投入実験を行った。図-6 に示すように高水敷模型（塩ビ製）を水路両側に設置した。低水路幅は $B_m = 20\text{cm}$ 、左岸側と右岸側の高水敷幅は $B_f = 10\text{cm}$ である。両岸の高水敷高さは $D_R = D_L = 10\text{cm}$ とした。 H_f は橋梁前面におけるせき上げた水深である。橋梁模型は水路上流端から 4.0m の位置に設置した。橋長 20cm、幅員

表-1 実験条件

重心位置	l (cm)	d (cm)	l/d	Q (l/s)	U_m (cm/s)	H (cm)	Re	Fr	実験の種類
上流端(Gu)	40.0	5.0	8.0	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	揚抗力, モーメント計測
中央(Gc)	40.0	5.0	8.0	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	
上流端(Gu)	40.0	3.0	13.3	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	
中央(Gc)	40.0	3.0	13.3	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	
上流端(Gu)	40.0	2.0	20.0	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	
中央(Gc)	40.0	2.0	20.0	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	
下流端(Gd)	40.0	2.0	20.0	30.0	50.0	15.0	75000	0.41	単独投入: 流木捕捉実験
上流端(Gu)	12.0	0.6	20.0	7.0	47.0	7.5	35250	0.55	
中央(Gc)	12.0	0.6	20.0	7.0	47.0	7.5	35250	0.55	
下流端(Gd)	12.0	0.6	20.0	7.0	47.0	7.5	35250	0.55	
上流端(Gu)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	
中央(Gc)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	
下流端(Gd)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	集団投入: 流木捕捉実験
中央(Gc)	12.0	0.6	20.0	7.0	47.0	7.5	35250	0.55	
偏心(Ge)	12.0	0.6	20.0	7.0	47.0	7.5	35250	0.55	
中央(Gc)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	
偏心(Ge)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	
偏心(Ge)	12.0	0.6	20.0	3.0	20.0	7.5	15000	0.23	

2cm, 高さ 10cm で, 高さ 9cm, 幅 1cm の橋脚部を 2 本有しており, 橋脚間距離は 6.0cm である。

香月ら¹⁰⁾の現地調査によると河道外に氾濫堆積した流木の全てにおいて樹幹部が存在せずその 4 割が樹根も残されていない。また直径に対する流木長比の平均値はおよそ 24.3 である。そこで流木模型として木製円柱($l/d=20$, 直径 $d=6\text{mm}$, 長さ $l=12\text{cm}$ (1/40 スケール)を用いた(図-3)。

均一比重の流木模型に 0.4g のおもりを埋め込んで重心を偏心させ, 投入時のスリットに対する向きに対して重心を上流側および下流側と定義した。重心位置が中心のケースでも流木中心におもりを埋め込みいずれも比重が 0.6 になるようにした。また研究目的に応じて単独投入と集団投入の 2 種類の投入方法により実験を遂行した。

単独投入実験では図-6(a)のように橋梁模型から 4m 上流から水路中央に流木投入スリットを通して重心位置を 3 通りに変えた各ケースについて計 100 回投入し, 橋模型の前面での捕捉率を調べた。投入総数に対する捕捉本数を橋梁捕捉率 P_b と定義する。単独投入実験では毎回捕捉された流木を除去した後, 流木を投入している。

集団投入実験では重心が中央ケースと偏心しているケース(重心上流側と重心下流側が混在)を対象とする。図-6(b)のように橋梁模型から 4m 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。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。10 本の流木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。供給した流木量は各ケース計 120 本とした。集団投入

図-7 抗力係数と迎角の関係

図-8 揚力係数と迎角の関係

実験では 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ラス板(10cm×20cm, パンチ径 3mm)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 $\lambda_d = A_b/A$ を評価した。ここで A_b は閉塞面積で, A は河道全体の断面積である。

(4) 水理条件

表-1 に水理条件を示す. 流木の揚抗力計測とモーメント計測実験では断面平均流速は $U_m=50\text{cm/s}$ で水深は $H=15\text{cm}$ とした. 全ケースで迎角 α は最小 1.0° 刻みで -20° から 20° まで変化させた. 2.(2) で述べたモーメント計測実験の流木模型の重心位置は図-2(a) のようには流木模型の上流側(Gu: 点 O から $1/8l$), 中心(Gc: 点 O から $1/2l$), 下流側(Gd: 点 O から $7/8l$) の 3 パターンを設定した.

橋梁による流木捕捉実験では流木投入前の断面平均流速は $U_m=20, 47\text{cm/s}$ で主流域(Main-channel)の水深は $H_f=7.5\text{cm}(< D_R = D_L=10\text{cm})$ とした. すなわち初期流況は単断面の等流である.

3. 実験結果と考察

(1) 抗力と揚力特性

まず流木の揚抗比から流木流下時の安定性について考察する. 流木に作用する抗力 D と揚力 L は次式で表される. また C_D および C_L はそれぞれ抗力係数と揚力係数で, 物体に作用する流体力と動圧の比を意味する.

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D U_m^2 A_x \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho C_L U_m^2 A_x \quad (2)$$

A_x は主流軸 x に対する垂直面(y - z)への流木の投影面積, U_m は断面平均流速, ρ は水の密度である.

図-7 は 3 種類の径長比に対する迎角による流木の抗力係数 C_D の変化を比較したものである. ゼロ迎角付近では流木背後の剥離域が小さいため C_D は極小値をもつ. また迎角 α の正負にほとんど関係なく, 絶対値の増加とともに抗力はゼロ迎角をはさんで対称的に大きくなる. また流木径 d が大きくなると C_D も少し大きくなるが, 全ケースで 1.0 から 4.0 の間の値をとっている.

図-8 は迎角による揚力係数 C_L の変化を比較したものである. 本実験では流木が半水没状態で保たれるよう迎角を変化させており, フォースゲージの出力値から静水時にかかる浮力(一定値)を差し引いたものを揚力とした. ゼロ迎角付近では揚力はほぼゼロとなる. 正の迎角では C_L は正, 負の迎角では C_L は負になる. すなわち流れに向かって頭上げ状態($\alpha>0$)では自由水面に向かって浮上させ, 頭下げ状態($\alpha<0$)では底面に向かって降下させる力が発生する. この変化は正負ともに $2\sim 3^\circ$ の仰角で急激に増加することがわかり, わずかな擾乱でも流木挙動

図-9 揚抗比と迎角の関係

図-10 ピッチングモーメントと迎角の関係

は大きな影響を受けると考えられる.

図-9 は流木の揚抗比(C_L/C_D)と迎角の関係を示す. いずれのケースについても, 頭下げ状態($\alpha<0$)で揚抗比が負となる. 一方で頭上げ状態($\alpha>0$)で正となる. このことは過度の頭振りが大きな揚力を生み出すことを意味するが, 注目すべき点はその作用点と重心の関係である. これらの位置がずれていればさらなる z 軸の回転すなわち頭振りのきっかけとなり, 挙動安定に大きな影響をもたらす.

(2) 上下運動のピッチングモーメントと静安定性

次に重心まわりのピッチングモーメント M_G , および水力中心まわりのモーメント M_{ac} は次式のように書ける.

$$M_G = \frac{1}{2} \rho C_{MG} U_m^2 A_x l \quad (3)$$

$$M_{ac} = \frac{1}{2} \rho C_{Mac} U_m^2 A_x l \quad (4)$$

C_{MG} は重力まわりのモーメント係数, C_{Mac} は水力中心モーメント係数, l は流木の長さである. また M_G は流木の長軸に垂直に作用する流体力成分 R (図-2(b)参照) と水流による圧力作用点・重心間距離

(a) 重心位置：中央(Gc)

(a) 重心位置：中央(Gc)

(b) 重心位置：上流端部(Gu)

(b) 重心位置：上流端部(Gu)

図-11 流木のピッチングモーメントと迎角の関係

図-12 ピッチングモーメント係数と揚力係数の関係

$\overline{PG}$ を用いると

$$M_G = -R \cdot \overline{PG} \quad (5)$$

と表される．図-2(b)のように流木の上流端を点 O とすると $\overline{PG} = \overline{OA} + \overline{AP} - \overline{OG}$ なので

$$\begin{aligned} M_G &= -R \cdot (\overline{OA} - \overline{OG}) - R \cdot \overline{AP} \\ &= -R \cdot (\overline{OA} - \overline{OG}) + M_{ac} \end{aligned} \quad (6)$$

$\overline{OA}$ は流木上流端・水力中心間距離， $\overline{OG}$ は流木上流端・重心間距離， $\overline{AP}$ は水力中心・水流による圧力作用点間距離である． $R \cong L$ とみなせるような迎角 α が小さい範囲では

$$C_{MG} = -C_L \cdot (\overline{OA} - \overline{OG}) / l + C_{Mac} \quad (7)$$

と書けるので，重心周りのピッチングモーメント M_G は理論的に揚力係数 C_L に対して線形変化する．

図-10 は $d=2.0$ cm ($l/d=20$) ケースの重心位置が上流側(Gu)，中央(Gc)，下流側(Gd)に一致する場合

のピッチングモーメントと迎角の関係である．迎角が増加してピッチングモーメントが減少する(復元力が作用する)状態は静安定，迎角が増加してピッチングモーメントが緩やかに減少する状態は弱安定とされる．これに対して，迎角が増加してピッチングモーメントがゼロまたは増加する(復元力が作用しない)状態は不安定である．

中心ケース(Gc)の重心まわりのピッチングモーメント M_{Gc} はゼロ迎角付近でゼロとなり，迎角 $\alpha > 0^\circ$ のときは M_{Gc} が負，迎角 $\alpha < 0^\circ$ のときは M_{Gc} が正になっている．これは流木が流れに対して頭上げあるいは頭下げ状態になる際に，流木がゼロ迎角の状態に戻るよう復元モーメントが作用することを示している． $-5^\circ < \alpha < 8^\circ$ でモーメント M_{Gc} が急激に減少しており， $\alpha > 8^\circ$ では減少傾向が緩やかになる．このことより迎角の増加に従い静的安定から弱安定へ変化するといえる．

上流側ケース(Gu)の重心まわりのピッチングモーメント M_{Gu} は負の迎角($\alpha = -4.1^\circ$)でゼロとなっている．ほぼ全域で迎角の増加とともにモーメント M_{Gu}

が減少する。すなわち、迎角の増加する向きとは反対に復元モーメントが発生し、このケースは静安定といえる。

一方で、下流側ケース(Gd)の重心まわりのピッチングモーメント M_{Gd} は $-4^\circ < \alpha < 3.2^\circ$ で迎角の増加とともに減少する(静安定)。正の迎角 ($\alpha = 3.2^\circ$) で M_{Gd} がゼロとなり、 $\alpha > 3.2^\circ$ では α が増加しても M_{Gd} はあまり増加せずにゼロに近い値をもつ(不安定)。同様に $-4^\circ > \alpha$ でもモーメントの変化は小さく復元力が期待できる不安定といえる。すなわち何らかの外乱によって 3.2° 以上(頭上げ)あるいは -4° 以上(頭下げ)傾けば、流木が回転、倒立して複雑な挙動状態に遷移する可能性がある。

図-11(a)は重心位置が中心に一致するケース(Gc)のピッチングモーメント M_{Gc} を径長比 l/d により比較したものである。全ケースでゼロ迎角付近で M_{Gc} がゼロとなり、迎角 $\alpha > 0^\circ$ における M_{Gc} は負、一方で $\alpha < 0^\circ$ のときは M_{Gc} が正となる。すなわち、流木がゼロ迎角の状態に戻るようモーメントが作用することがわかる。 $d = 5.0 \text{ cm}$ ($l/d = 8.0$)の場合、 M_{Gc} は $-15^\circ < \alpha < 12^\circ$ で減少し、静的安定となる。一方で $d = 2.0 \text{ cm}$ ($l/d = 20$)では M_{Gc} は $-4^\circ < \alpha < 8^\circ$ で減少し、 M_{Gc} があまり増加しない弱安定の区間が $l/d = 8.0$ よりも増える。

図-11(b)は重心位置が上流側ケース(Gu)の流木模型のピッチングモーメント M_{Gu} を l/d により比較したものである。全ケースで迎角の増加とともにモーメント M_{Gu} が減少しており、静的安定である。 $d = 2.0 \text{ cm}$ ($l/d = 20$)の場合、迎角 $\alpha = 0^\circ$ でピッチングモーメント M_{Gu} が負の値をもつ。また迎角が増加すると、 M_{Gu} が減少する傾向がみられ $\alpha = -4.1^\circ$ でピッチングモーメント M_{Gu} が 0 となる。このことはゼロ迎角の状態から頭下げ状態に遷移するようモーメントが作用し、主流に対して常に頭下げ状態になって漂流することを示している。流木直径を変化させても同じ傾向がみられ、 $d = 3.0 \text{ cm}$ ($l/d = 13.3$)のケースでは $\alpha = -8.2^\circ$ 、また $d = 5.0 \text{ cm}$ ($l/d = 8.0$)のケースでは $\alpha = -12.3^\circ$ でピッチングモーメント M_{Gu} が 0 となる。これらの結果から流木長に対して直径が大きければ、頭下げの迎角 α がより大きい状態で流下することがわかった。 $l/d = 20, 13$ および 8.0 ケースの頭下げ状態 (M_{Gu} が 0 となる迎角時)における流木投影面積はそれぞれ $A_x/A_{x(\alpha=0)} = 2.8, 3.3$ および 3.1 となった(ここで $A_{x(\alpha=0)}$ は $\alpha = 0^\circ$ のときの流木の投影面積である)。いずれのケースでも頭下げ状態になると迎角 $\alpha = 0^\circ$ のときの3倍程度に投影面積が大きくなっている。 $l/d = 8$ ($d = 5.0 \text{ cm}$)のケースで

頭下げの迎角 α が大きいのに対し面積の増加率があまり大きくならないのは迎角 $\alpha = 0^\circ$ のときの流木の投影面積も大きいためである。

これらの結果は流木が頭下げになることで流木の流れ方向の投影面積を極端に増加させ、橋梁捕捉時の堰上げ水深効果を飛躍的に増大させる可能性があることを示しており、注目される。

図-12(a)および(b)は、各々 $d = 2.0 \text{ cm}$ ($l/d = 20$)ケースの重心位置が上流側(Gu)および中央(Gc)に一致する場合の揚力係数 C_L とピッチングモーメント係数 C_{MG} の関係を示す。全ケースにおいて小迎角に対応する小さい C_L の範囲では式(7)に対応する線形関係がみられる。静安定である中央ケース(Gc)で C_L に対するピッチングモーメント係数 C_{MGc} の勾配が負となる。 $C_L = 0$ のときの C_{MGc} が C_{Mac} (水力中心モーメント係数)に等しいが、どのケースにおいてもほぼゼロとなる。上流側(Gu)ケースでも C_L に対するピッチングモーメント係数 C_{MGu} の勾配が負となる。 $C_L = 0$ のとき $C_{MGu} < 0$ となっている。 $C_{MGu} = 0$ のとき $C_L < 0$ となっており、重心周りの回転モーメントが作用しないときは負の揚力が発生している。

(3) 動安定性の考察

次に流木が外乱によって振動したときの動安定性について考察する。外乱によって定常状態(重心周りのピッチングモーメントがゼロの迎角 α_0)から迎角が θ ($\equiv \Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$) 変化したとき、これによるピッチングモーメントの増減分は次式であらわされる。

$$\Delta M_G = (dC_{MG}/d\alpha)\Delta\alpha \frac{1}{2}\rho U_m^2 A_x \quad (8)$$

ΔM_G は定常状態から迎角が θ 変化したときのピッチングモーメントの変化量、 $dC_{MG}/d\alpha$ は迎角 α に対する縦揺モーメント微係数である。回転による流体抵抗を無視すれば、重心を通る流木の回転運動は次の方程式で表される。

$$I \frac{d^2 \Delta\alpha}{dt^2} = \Delta M_G \quad (9)$$

ここで I は重心まわりの流木の慣性モーメントである。さらに $\Delta\alpha$ を θ として変形する。

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \sigma \cdot \theta \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{\rho U_m^2 A_x}{2I} \left(\frac{dC_{MG}}{d\alpha} \right) \quad (11)$$

これはいわゆる振動方程式の一種であり、この微分方程式の一般解は次のようになる。

図-13 動安定解析に基づく振動周期の分布

 a) $\sigma = 0$ のとき

$$\theta = C_1 t + C_2 \quad (12)$$

C_1 , C_2 は積分定数である。迎角増加が完全に止まるならば, $t=0$ で $d\theta/dt=0$ となり $C_1=0$ であるので, θ は時間によらず一定となり動的安定といえる。

 b) $\sigma > 0$ のとき

$$\theta = C_1 e^{\sqrt{\sigma}t} + C_2 e^{-\sqrt{\sigma}t} \quad (13)$$

第 1 項のために θ は時間進行とともに発散し, 動的不安定である。

 c) $\sigma < 0$ のとき

$$\theta = C_1 \cos \sqrt{-\sigma}t + C_2 \sin \sqrt{-\sigma}t \quad (14)$$

これは $T = 2\pi/\sqrt{-\sigma}$ の一定振幅振動であり, 動的に中立といえる。

重心が中央に一致するケース(Gc)では図-11(a)のピッチングモーメントにより α が増加すると M_{Gc} が減少し式(3)より $dM_{Gc}/d\alpha < 0$ となるため静的に安定であっても動的に中立である。図から i) $\alpha < -5^\circ$, ii) $-5^\circ < \alpha < 8^\circ$, iii) $\alpha > 8^\circ$ で M_{Gc} の傾きが変化している。したがって振動周期も迎角によって変化すると考えられる。図-13(a)に重心が中央に一致するケース(Gc)について迎角ごとに式(11)から算出した周

期 $T_c = 2\pi/\sqrt{-\sigma}$ をプロットする。ゼロ角近傍で小さくなり, 迎角の絶対値の増加とともに長周期振動となる。また流木直径が大きくなると振動周期は長くなる。

図-13(b)に重心位置が上流側ケース(Gu)について迎角ごとに算出した周期 $T_u = 2\pi/\sqrt{-\sigma}$ をプロットする。迎角 α が負のときに α が正のときよりも周期が長くなる。また中心ケース(Gc)と同様に流木直径が大きくなると振動周期は長くなる。

実現象では流体抵抗により振幅が減衰する。これが回転速度に比例すると仮定すれば, 式(10)は次式のように拡張される。

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = C_f \frac{d\theta}{dt} + \sigma\theta \quad (15)$$

C_f は抵抗係数である($C_f < 0$)。この線形 2 階微分方程式の特性方程式は λ を用いて

$$\lambda^2 - C_f \lambda - \sigma = 0 \quad (16)$$

となり, 解は式(16)で与えられる。

$$\lambda = \frac{C_f \pm \sqrt{C_f^2 + 4\sigma}}{2} \quad (17)$$

もし, $C_f^2 + 4\sigma < 0$ なら

$$\lambda = \frac{C_f}{2} \pm \frac{\sqrt{-(C_f^2 + 4\sigma)}}{2} i \quad (18)$$

このとき基本解の重ね合わせより任意定数 C_1 と C_2 を用いて θ の一般解は

$$\theta(t) = e^{\frac{C_f}{2}t} \left\{ C_1 \cos \left(\frac{\sqrt{-(C_f^2 + 4\sigma)}}{2} t \right) + C_2 \sin \left(\frac{\sqrt{-(C_f^2 + 4\sigma)}}{2} t \right) \right\} \quad (19)$$

となる。 $C_f=0$ であれば式(13)に一致するが, 回転抵抗があればその分周期が短くなる。また時間方程式の減衰率は C_f で決まることがわかる。

現段階では C_f の実測が難しいが, 今後これを計測して動的安定性をより詳しく解明したい。

(4) 水平面のヨーイングモーメントの考察

流木の流下時に偏揺角 β によっても流木の投影面積は大きく変化する。すなわち, 偏揺角 $\beta=0^\circ$ のと

図-14 ヨーイングモーメントと偏揺角の関係

図-15 橋梁捕捉率の変化(単独投入)

きは流木の投影面積は最小となる。本節では水平面のヨーイングモーメントについても考察する。図-14は $d=2.0\text{ cm}$ ($l/d=20$)ケースの重心位置が上流側(Gu), 中央(Gc), 下流側(Gd)に一致する場合のヨーイングモーメント M_Y と偏揺角 β の関係である。

中央ケース(Gc)についてはほぼ全域でヨーイングモーメントがほぼ0となる。これは重心の上流側部分と下流側部分それぞれに作用する抗力(回転モーメント)が等しいためである。何らかの外乱によって流木が回転すると、摩擦で減衰するまで回転を維持することを示す。

上流側ケース(Gu)については β が正のときは負のモーメントが作用し、 β が負のときは正のモーメントが作用している。これは重心の下流側部分にかかる回転モーメントが上流側部分にかかる回転モーメントよりも大きいためである。これは外乱によって流木が回転しても回転モーメントを抑制するモーメントが作用し、 β が 0° の状態となり流下することを意味する。

これに対して重心位置が下流側ケース(Gd)については偏揺角 β が増加するとヨーイングモーメント M_Y が増加しており、静的に不安定である。 β が正

のときは正のモーメントが作用し、 β が負のときは負のモーメントが作用している。これより下流側ケース(Gd)では外乱によって流木が回転すると、回転が大きくなるようにモーメントが作用し重心側を上流に向けて流下することが理解できる。このことは実災害後の残存流木の調査において、根部が上流側を向き流向と平行な状態で観測されていることと整合する¹⁾。

(5) 橋梁による流木捕捉効果について

流木模型の投入実験を行い、前節までに考察した重心位置と橋梁による流木捕捉効果を考える。

まず単独投入時の橋梁捕捉率に注目する。図-15は流木の橋梁捕捉率 P_b の変化を示したものである。流速の小さな $Q=3.0\text{ l/s}$ ケース(フルード相似則より実河川スケールでは断面平均流速 1.3 m/s に対応)ではヨーイングモーメントが小さいため P_b に差はなく、重心位置の影響は小さい。これに対して流速の大きな $Q=7.0\text{ l/s}$ ケース(実河川スケールでは 3.0 m/s に対応)では、重心位置の影響が顕著にみられた。上流側ケース(Gu)では $P_b=0$ となる。図-14で考察したように、偏揺角のぶれがヨーイングモーメントによって補正されるため重心側が上流を向き流向と平行な状態で流下する。その結果、橋脚部への接触や捕捉が生じにくくなる。下流側ケース(Gd)についてはヨーイングモーメントが作用して流木が大きく回転するため、 P_b が大きくなる。本実験では流木が 4 m (実河川スケールで 160 m に相当)流下する間に、水平方向に回転し流向に対して 90° の向きになって橋梁に捕捉されるのがみられた。何らかの外乱により流木の重心が下流側に向くと、不安定になり捕捉率が增加することがわかる。中央ケース(Gc)ではヨーイングモーメントによる偏揺角の補正が期待できず擾乱の影響を受けやすい。このため上流側ケース(Gu)よりも捕捉率が高い。

また中央ケース(Gc), 上流側ケース(Gu)では流速が小さいほど P_b が増加する傾向がみられる。これはSchmocker & Hager⁹⁾の結果と一致しており、流木の捕捉率に断面平均流速の影響があることが示された。

次に、集団投入時の橋梁捕捉による水深堰上げ効果について考察する。図-16に $Q=7.0\text{ l/s}$ ケースにおける集団投入時の橋梁捕捉のスナップショットを示す。左は計50本投入時、右は120本投入時の様子である。実験初期の10本投入時における捕捉確率は、中央ケース(Gc)および偏心ケース(Ge: ランダム投入のため重心上流側と下流側が混在)ともに

(a) 重心位置：中央(Gc)

(b) 重心位置：偏心(Ge)

図-16 橋梁模型による流木捕捉のスナップショット

$P_b=0.2-0.3$ 程度であった。既往研究⁴⁾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。いずれのケースについても橋梁前面で流木が集積していくと水深が増加し、120本投入時には高水敷への氾濫がみられた。

図-17に橋梁による流木捕捉時の堰上げ水深 H_f を示す。横軸は投入した流木本数 n_d である。右軸には既知の遮蔽率 $\lambda_d=A_b/A$ のポラス板を設置したときの堰上げ水深 H_f を併示した。なお捕捉流木が存在しない状態における橋梁模型による遮蔽率は $\lambda=0.13(13\%)$ である。

流速の小さな $Q=3.0$ l/s ケースでは重心位置によって堰上げ効果に大きな差がみられた。中央ケース(Gc)では120本投入時の堰上げ水深は $\lambda_d=0.2$ と $\lambda_d=0.38$ の水深の中間の値と同程度であった。これは流木が捕捉されることにより閉塞率が約16%増加したことを示している。これに対して、偏心ケース(Ge)では流木集積によって閉塞率が43%増加している。また流速の大きな $Q=7.0$ l/s ケースでも同様の特性が観察されるが、流木集積が進むと、図-16に

も示すとおり高水敷での越流がみられる。中央ケース(Gc)では閉塞率が36%増加し、偏心ケース(Ge)では閉塞率が51%増加した。

注目すべきは、単独投入では捕捉率の小さい偏心ケース(Ge)が、集団投入では中央ケース(Gc)よりも大きな閉塞効果とそれにとまう水位増加を引き起こす点である。重心位置によって水深堰上げ効果が異なる理由を図-18のスケッチに基づいて説明する。集団投入実験における集積プロセスを詳しく観察すると、中央ケース(Gc)では水面付近においてのみ上流側に向かって流木が集積していくことがわかる。これにより流木による遮蔽面積と水位の増加が抑制されるといえる。一方、偏心ケース(Ge)では流下していく過程で多くの流木は図-14で考察したようにヨーイングモーメントが作用して重心が上流側を向き、流木が頭下げ状態で流下する。図-18(b)のように橋の前面で重なり合って集積するため、河道を閉塞する面積が大きくなると考えられる。

以上の結果から、流木本数が少なく、単独漂流性が高い場合、捕捉率は重心が偏心しているものが小さいが、流木本数が多い場合やすでに先行流木が捕

(a) $Q=3.0(l/s)$

(b) $Q=7.0(l/s)$

図-17 橋梁による流木捕捉時の堰上げ水深の変化

(a) 重心位置：中央(Gc)

(b) 重心位置：偏心(Ge)

図-18 頭下げと流木捕捉による橋梁閉塞のイメージ

捉されている場合には、仰角による接触確率の増加により、中央にある場合よりもかえって水位増加を招く可能性がある。

4. 結論

本研究は流木の揚抗力計測、ピッチングモーメント・ヨーイングモーメント計測を行い、揚抗比、静

的および動的安定性について検討した。さらに橋梁による流木捕捉実験を行い流木の重心位置(投影面積)の橋梁捕捉率と堰上げ水深への影響を直接評価することができた。ここで得られた知見を以下にまとめて示す。

- 1) 揚抗力計測結果から径長比が小さなケースほど揚抗比(C_L/C_D)の負値が大きく安定性に欠ける。
- 2) 迎角が増加するとピッチングモーメントが減少するため重心位置が上流側ケース(Gu), 中央ケース(Gc)では静的に安定である。重心位置が下流側ケースについては、正の迎角が $\alpha > 3.2^\circ$ では α が増加しても M_{Gd} の増加は小さくゼロに近い値をもつため、不安定である。
- 3) 重心中央ケース(Gc)ではゼロ迎角付近でピッチングモーメント M_{Gc} がゼロとなり、迎角 $\alpha > 0^\circ$ では M_{Gc} が負、迎角 $\alpha < 0^\circ$ では M_{Gc} が正となる。すなわち迎角の変化に対して常に復元モーメントが作用し、流木はゼロ迎角で流下することを示唆する。
- 4) 重心上流側ケース(Gu)では迎角 α が負のときにピッチングモーメント M_{Gu} がゼロとなり、頭下げの迎角で流下する。流木が頭下げ状態になると迎角 $\alpha = 0^\circ$ のときの3倍程度に投影面積が増大する。また径長比が小さければ、 M_{Gu} がゼロとなる頭下げの迎角はより大きくなる。
- 5) 流木が外乱によって振動したときの動安定性の振動周期はゼロ迎角近傍で小さくなり、迎角の絶対値の増加とともに長周期振動となる。また径長比が小さいほど振動周期は長くなる。
- 6) 重心上流側ケース(Gu)では偏揺角 β が増加するとヨーイングモーメント M_Y が減少し静的安定となる。一方で重心下流側ケース(Gd)では偏揺角 β が増加すると M_Y も増加する。このため重心側を上流に向ける様に大きな回転を促進するモーメントが作用する。
- 7) 流木の単独投入実験から流速の大きなケースではヨーイングモーメントの効果が顕著で、重心位置によって捕捉率が大きく変化する。
- 8) 流木の集団投入実験から重心上流側ケース(Gu)では中央ケース(Gc)よりも流木が捕捉・集積時の水深堰上げ効果が大きくなることがわかった。これはGuケースでは頭下げ状態で流下し橋の前面で傾倒しながら集積する結果、遮蔽面積が増加することによる。

謝辞：本研究は、科学研究費（若手研究B，課題番号892095，研究代表者 岡本隆明）の研究助成の下で実施した。また本学大学院修士課程の鈴木隆太氏，

檀原義信氏には水理実験とデータ解析に関してサポートを得た。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) 小松利光, 山本晃一: 流木と災害—発生から処理まで, 技報堂出版, 2009.
- 2) 坂野章, 箱石憲昭: 流木災害とその対策について, ダム技術, No. 271, pp. 18-26, 2009.
- 3) 村本嘉雄, 藤田裕一郎, 馬場健志: 流木を伴った河道災害に関する基礎実験, 土木学会関西支部年次学術講演集, II-22, 1992.
- 4) 中川一, 井上和也, 池口正晃, 坪野考樹: 流木群の流動と堰止めに関する研究, 水工学論文集, 第 38 巻, pp. 543-550, 1994.
- 5) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 根付き流木モデルによる流木捕捉工の捕捉効果に関する実験的検討, 構造工学論文集, 第 57 巻 A, pp. 1087-1094, 2011.
- 6) 長谷川裕治, 中谷加奈, 竹林洋史, 里深好文, 藤田正治: 流木の流下と橋梁への集積に関する実験, 京都大学防災研究所年報, Vol. 58, pp. 350-357, 2014.
- 7) 末次忠司, 坂野章, 二村貴幸: 谷底平野を流下する河川の橋梁取付部における超過洪水時の被災現象, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp. 133-136, 2001.
- 8) Bruce, W. and Dongol, D. M.: Bridge pier scour with debris accumulation, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 118, pp. 1306-1310, 1992.
- 9) Schmocker, L. and Hager, W. H.: Probability of drift blockage at bridge decks, *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 137, pp. 470-479, 2011.
- 10) 香月智, 渋谷一, 大隅久, 石川信隆: 三次元個別要素法による実橋梁の流木閉塞災害事例の解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 69, No. 1, pp. 1-15, 2013.
- 11) 渋谷一, 香月智, 大隅久, 石川信隆: 円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 応用力学論文集, 第 14 巻, pp. I_323-I_334, 2011.
- 12) 初田直彦, 赤堀良介, 清水康行: 蛇行流路の流体場と流木の挙動に関する実験と数値解析, 応用力学論文集, 第 15 巻, pp. 415-422, 2012.
- 13) 赤堀良介, 初田直彦, 清水康行, 伊藤丹: 水理構造物周辺の流れの構造に対する流木の応答, 水工学論文集, 第 58 巻, pp. I_691-I_696, 2014.
- 14) 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, 第 51 巻, pp. 829-834, 2007.
- 15) 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 禰津家久: 3 次元自由水面流れによる物体輸送の数値解析法(3DMICS)の提案と適用性の検討, 土木学会論文集, No. 810/II-74, pp. 79-89, 2006.
- 16) 川崎浩司, 袴田充哉: 3 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の開発と波作用下での漂流物の動的解析, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 31-35, 2007.
- 17) 米山望, 永島弘士: 複雑な移動・回転を考慮した津波漂流物の三次元数値解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp. 266-270, 2009.
- 18) 牧野統帥, 牛島省, 吉川教正, 禰津家久: 流木の流送と集積に関する T 型個体モデルによる 3 次元数値計算, 水工学論文集, 第 52 巻, pp. 991-996, 2008.
- 19) 中村元太, 牛島省, 黒田望, 永井克明: 流木群の集積による流水抵抗の 3 次元数値計算, 水工学論文集, 第 54 巻, pp. 1171-1176, 2010.
- 20) 後藤仁志, 酒井哲郎, 林稔: 粒子法による流木群堰止め過程の Lagrange 解析, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 919-924, 2001.
- 21) 後藤仁志, 五十里洋行, 酒井哲郎, 奥謙介: 山地橋梁の流木閉塞過程の 3 次元シミュレーション, 水工学論文集, 第 51 巻, pp. 835-840, 2007.
- 22) 五十里洋行, 後藤仁志, 角哲也: 自然調節型洪水吐の流木による閉塞機構に関する計算水理学的研究, 水工学論文集, 第 50 巻, pp. 793-798, 2006.
- 23) 例えば岡本正人, 神馬義貴: 低レイノルズ数における翼の平面形空力特性の実験的研究, 秋田高専紀要, 第 44 号, pp. 42-50, 2009.

(2016. 8. 17 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN STABILITY CHARACTERISTICS OF DRIFTWOOD AND BLOCKAGE PROPERTY AT BRIDGE

Michio SANJOU and Takaaki OKAMOTO

Localized torrential rains yield large amounts of driftwood in rivers aggravate the flood events. For example, large driftwood blocks the river, which lead to a decreased discharge capacity and increased water levels. However, there is almost no detailed information about the pitching and yawing moment stability of driftwood. In the present study, three kinds of flume experiments (1. Drag force and Lift force measurement, 2. Pitching moment and Yawing measurement, 3. Driftwood accumulation experiment) were performed. We also examined the effect of the gravity center position on the directional stability of driftwood. Particularly, small increase in angle of attack caused a significant increase of the projected area of driftwood. The results revealed that the blocking probability of driftwood at bridge decks and backwater rise due to driftwood accumulation depend on the projected area of driftwood.