

技術報 橋梁における流木閉塞を考慮した土砂・洪水氾濫危険箇所抽出手法の提案

土砂・洪水・流木氾濫 研究グループ

近年、超過洪水時に、土砂とともに流出した流木が橋梁部で捕捉・集積し、河積阻害、背水、土砂堆積を介して土砂・洪水氾濫を増幅させるリスクがある。本稿では、近年、被害事例が多く見られる小規模な橋梁部を土砂・洪水氾濫時のトラブルスポットとして捉え、既往知見や研究成果に基づき、流木発生源の設定、橋梁候補の抽出、橋梁条件による一次スクリーニング、一次元洪水解析、堤防余裕高・桁下余裕評価、流木の流下・到達性評価、閉塞を考慮した一次元河床変動解析を組み合わせた危険箇所抽出手法を提案する。さらに、試行検討により、閉塞効果を考慮した場合に水深ピークが増大し、高水深状態が持続する傾向を確認した。

キーワード：土砂・洪水氾濫、流木閉塞、橋梁、背水、危険箇所抽出

1. はじめに

土砂・洪水氾濫は、豪雨時に斜面崩壊や土石流等により生産された土砂が河道に供給され、河道内に堆積することで流下能力が低下し、保全対象に被害を及ぼす現象である¹⁾。近年は、これに加えて流木が橋梁部や狭窄部で閉塞し、上流側の水位上昇や流速低下を通じて土砂堆積を助長することが問題となっている（例えば、写真-1）。なお、河川砂防技術基準では、土砂・洪水氾濫対策計画、土石流・流木対策計画に加え、土砂・洪水氾濫時に流出する流木の対策計画が整理されている¹⁾。また、流木の発生ポテンシャル、施設・トラブルスポット調査、閉塞の有無の判定、被害想定範囲の検討を踏まえて、施設配置計画へ接続する考え方が示されている²⁾。

このような災害では、橋梁部の閉塞が単なる局所的な水位上昇にとどまらず、背水、流速低下、土砂堆積、河床上昇を介して氾濫の発生・拡大に影響する。特に、広域に多数の橋梁が存在する流域では、限られた調査情報から優先的に評価すべき橋梁を抽出する実務的な手順が必要となる。そこで本稿では、写真-1 に示す近年多く見られている小規模な橋梁部（例えば、単径間）における流木閉塞に着目し、既往知見や研究成果を基に、土砂・洪水氾濫の危険箇所抽出と影響評価のための検討フローを提案する。さらに、閉塞を有効通水断面の減少として一次元河床変動解析へ組み込み、試行検討により閉塞の有無が水深応答に及ぼす影響を整理する。

2. 橋梁部の流木閉塞評価における課題

橋梁部における流木閉塞は、流木が桁、高欄、橋脚、狭窄部等に捕捉・集積することで有効な通水断面が減少し、上流側に背水を生じさせる現象である（図-1）。背水が生じると、橋梁上流側では流速が低下し、流入した土砂が堆積しやすくなる。その結果、河床上昇に伴う通水断面の減少、水位上昇の増幅、氾濫発生の早期化・拡大



写真-1 流木を伴う土砂・洪水氾濫の一例

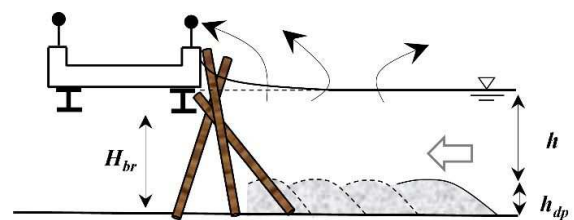


図-1 橋梁部における流木閉塞・背水・土砂堆積の概念

が連鎖的に進行する可能性がある。

橋梁閉塞に関する既往研究では、流木の捕捉・集積率、堰上げ水深、迂回流量、全面閉塞に至る条件などが水路実験により検討されている³⁾。一方で、土砂・洪水氾濫時に流出する流木を対象とする場合には、流木閉塞が水位を上昇させるだけでなく、流速低下に伴う土砂堆積を誘発し、河床上昇を通じて通水断面をさらに減少させる点を考慮する必要がある。

また、橋梁形式や桁下余裕は閉塞の発生可能性に大きく関係する。例えば、上下流の堤防天端高に対して桁位置が低い橋梁では、洪水時に桁や高欄へ流木が接触しやすく、閉塞が生じる可能性が相対的に高いと考えられる⁴⁾。一方、桁下余裕が十分に確保されている場合や、洪水時に流水が上部工を越流する沈下橋では、流木の捕捉・滞留の形態が異なるため、同一の評価指標で単純に判定することは適切でない。

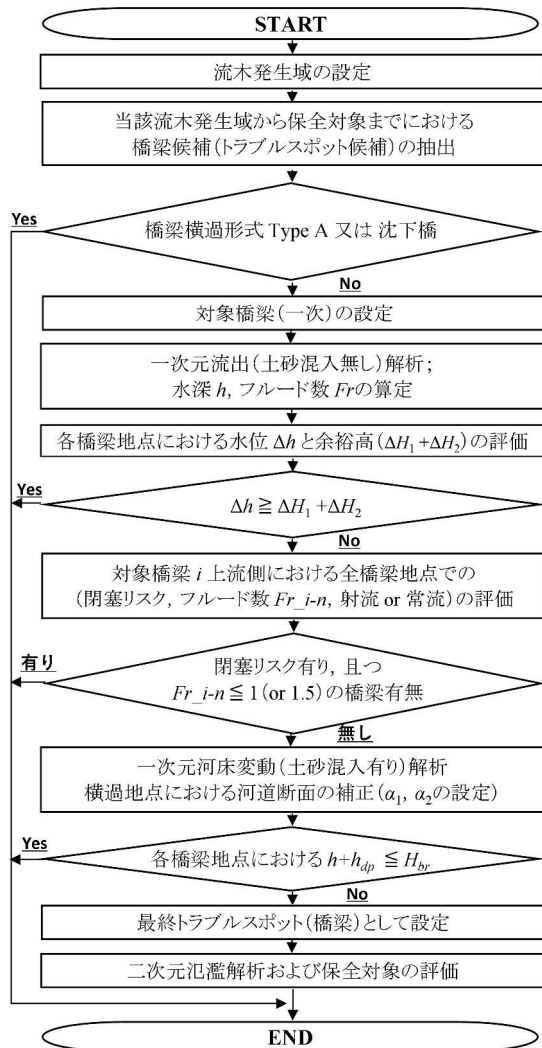


図-2 橋梁流木閉塞を考慮した危険箇所抽出フロー

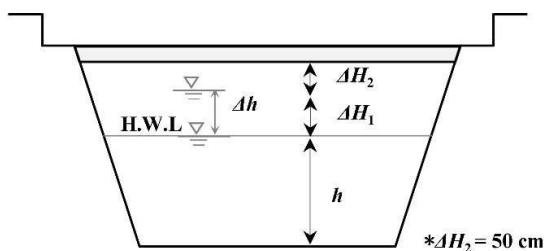


図-3 余裕高評価の概念

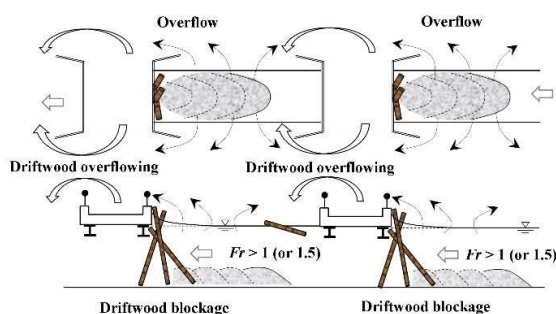


図-4 流木が下流側へ流下し得る条件の概念

したがって、橋梁部の危険性を評価する際には、橋梁

条件、水量、余裕高、上流橋梁における流木捕捉の有無、河床変動の時間的進行を段階的に評価することが重要である。本稿では、これらの項目を実務で扱いやすいフローとして整理する。

3. 危険箇所抽出および影響評価フロー

本稿で提案する検討フローを図-2 に示す。本フローは、橋梁を対象として、スクリーニング、詳細評価、必要に応じた氾濫解析へ接続することを意図したものである。まず、流木発生源となり得る溪流、山地斜面、河道内樹木等を設定し、流木発生源から保全対象までの河道区間に存在する橋梁を抽出する。

次に、桁下高、橋脚配置、径間長、沈下橋の有無等の橋梁条件に着目し、流木が捕捉・集積しやすい橋梁を一次的に選別する。既往調査では、上下流の堤防天端高に対して桁位置が相対的に低い橋梁（例えば、図-2：Type A 以外⁴⁾）において、洪水時に桁や高欄へ流木が接触しやすいことが示唆されている⁴⁾。このため、桁下余裕が小さい橋梁や狭窄部に位置する橋梁は、優先的に評価対象とする。形式スクリーニング後は、一次元洪水解析により各橋梁地点の水深 h 、平均流速 u 、フルード数 Fr を算定する。フルード数は、 $Fr = u / \sqrt{gh}$ で表され、常流・射流の判別に用いられ、流木が滞留しやすい流況か、下流へ流下しやすい流況かを把握する補助指標である。本稿では、フルード数（例えば、1.5³⁾）を単独の判定条件とせず、水深、流速、桁下余裕等と併せて、流木が橋梁部で捕捉されるか、あるいは下流側橋梁へ到達するかを検討するための指標として用いる³⁾。また、橋梁地点の堤防余裕高および桁下余裕を確認し、洪水時の水位が堤防天端や桁下高に接近する地点を抽出する。堤防余裕高が不足する橋梁では、流木閉塞による背水がわずかに加わるだけでも越水・溢水に至る可能性がある。一方、桁下余裕が大きく、流木が桁や高欄に接触しにくい橋梁では、閉塞の継続性が相対的に低いと考えられる。

余裕高評価では、解析水位と堤防天端高、さらに桁下高との関係を同時に確認する。すなわち、堤防余裕高は越水・溢水の発生可能性を把握する指標であり、桁下余裕は流木が桁・高欄へ接触し、閉塞が形成・継続する可能性を把握する指標である。これらを分けて整理することで、氾濫リスクと閉塞リスクを混同せず、次段階の詳細評価における基礎資料となる。

連続する橋梁が存在する場合には、上流側の橋梁で流木が捕捉されるか、下流側へ流下して対象橋梁へ到達するかを評価する。上流側で流木が捕捉される場合、下流側橋梁への流木到達量は小さくなる。一方、射流に近い

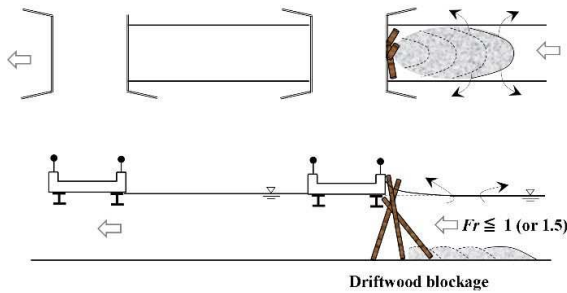


図-5 流木が上流側で捕捉される条件の概念

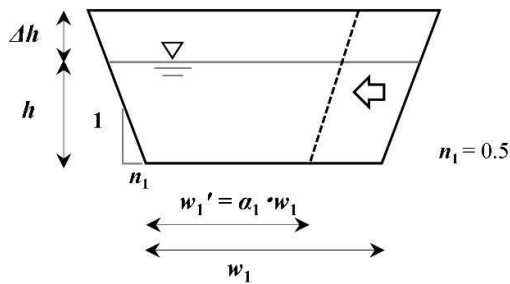


図-6 流木閉塞を考慮した河道断面補正の概念

流況や桁下余裕が大きい条件では、流木が橋梁部を通過し、下流側で再び捕捉される可能性があるため、連続橋梁全体としての流木到達性を評価する必要がある。

図-4 および図-5 の整理は、流木が必ず捕捉または通過することを厳密に示すものではなく、広域スクリーニングにおける優先度付けの考え方である。実際の捕捉は、流木長、流木量、流木群の姿勢、橋脚間隔、河道幅、橋梁周辺の付帯構造に左右される。このため、フルード数による評価は、水理量と橋梁条件を併用した一次判定と位置づける。

最終判定では、詳細評価が必要な橋梁について、閉塞を考慮した一次元河床変動解析を行う。初期河床高に河床上昇高および水深を加えた水位が桁下標高に到達するかを判定し、閉塞・氾濫が顕在化し得る橋梁をトラブルスポットとして抽出する。これにより、単なる最大水位の比較ではなく、土砂堆積の時間発展を含めて危険箇所を抽出できる。

4. 解析モデルの提案と試行検討

本提案では、橋梁地点における流木閉塞を、有効通水断面の減少として簡易的にモデル化する。具体的には、橋梁地点の低水路幅や高水敷幅を縮小係数 α により低減し、流木集積に伴う河積阻害を断面補正として一次元河床変動解析へ組み込む(図-6)。この考え方は、流木閉塞を厳密な三次元形状として扱うのではなく、実務上の初期検討で必要となる水位上昇や堆積進行の相対比較を目的としたものである。

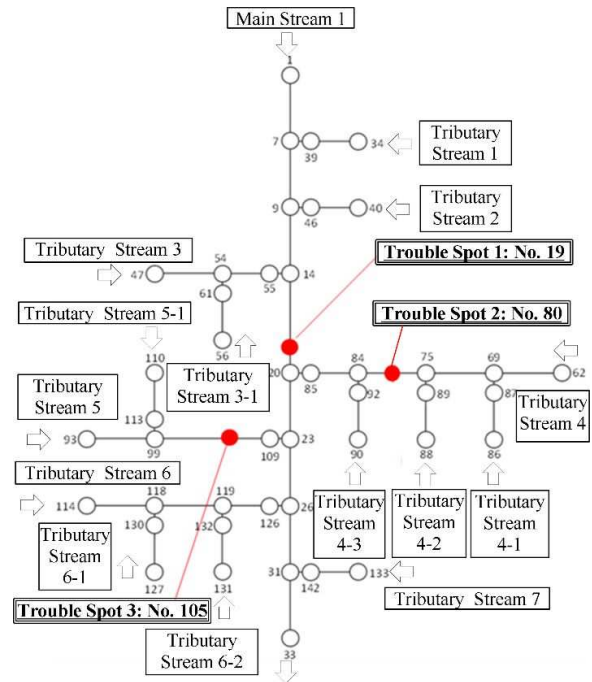


図-7 解析対象河道ネットワークとトラブルスポット

解析モデルは、斜面部からの流出、河道部の一次元洪水流、土砂の侵食・堆積、河岸崩壊等による土砂供給、橋梁部の断面補正を組み合わせたものである⁹⁾。降雨外力により斜面部から河道へ流入する流量を与え、河道内では各断面の流量、水深、流速を算定する。さらに、流砂形態や粒径分布を考慮し、堆積・侵食に伴う河床高の時間変化を計算する。

本モデルでは、河道区間の水理量と河床高を時間的に更新することで、橋梁部の背水による流速低下、土砂堆積の進行、有効通水断面の縮小、水位上昇の相互作用を表現する。流木閉塞の程度は縮小係数により与え、感度分析により閉塞条件の不確実性を把握することを想定する。斜面部からの流入量は、降雨外力に対する流出応答として与える。これにより、本川・支川の各地点で時間的に変化する流量を算定し、合流点を介して下流側へ伝達する。土砂供給については、河床材料の侵食・堆積に加え、河岸崩壊等に伴う局所的な供給を考慮し、河道断面の変化として反映する。

橋梁部の断面補正は、閉塞が発生する可能性のある横断位置に限定して与える。これにより、河積阻害が上流側の水位、流速、土砂堆積量に及ぼす影響を、閉塞なしのケースと比較できる。なお、縮小係数は現地の橋梁条件や想定流木量に応じて設定する必要があり、現段階では感度分析を行うことが望ましい。

試行検討では、図-7 に示すように、本川と複数の支川からなる河道ネットワークを対象とし、橋梁に起因する

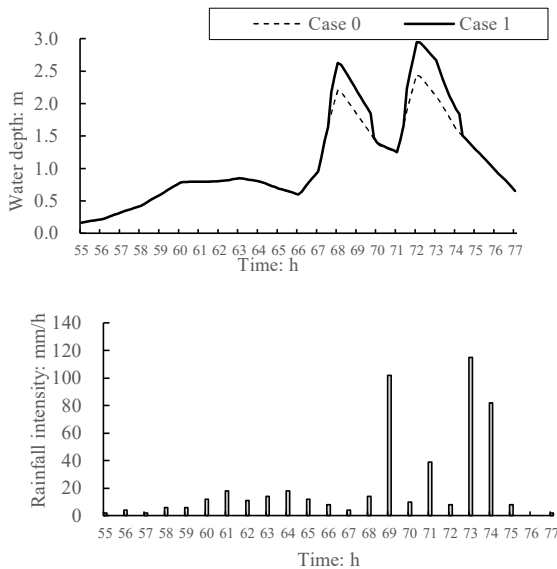


図-8 閉塞効果有無の比較図 (上: No.105 地点水深, 下: 降雨)

トラブルスポット候補として3地点を設定した。解析ケースは、橋梁地点に河積阻害を与えない「閉塞効果なし: Case-0」と、橋梁地点に河積阻害を与える「閉塞効果あり: Case-1」の2ケースとした。両ケースで降雨条件、縦断条件、その他の解析条件は同一とし、閉塞の有無による水深応答の差を比較した。

図-8に、代表地点 (No.105) における水深の時間変化と降雨条件を示す。閉塞効果を考慮したケースでは、閉塞効果なしのケースに比べて、増水期のピーク水深が大きくなる傾向が確認された。また、ピーク付近の水深が高い状態で持続する傾向もみられた。これは、橋梁部の河積阻害により背水が発生し、上流側で流速が低下することで土砂堆積が進行し、有効通水断面の減少状態が持続するためと考えられる。この結果は、橋梁部の流木閉塞が、単に橋梁直上流の水位を一時的に上昇させるだけでなく、土砂堆積や河床上昇を介して、土砂・洪水氾濫の発生・拡大に影響する可能性を示している。また、地点ごとに水深ピークの増幅幅や継続時間が異なることから、閉塞影響の現れ方は、縦断条件、支川合流、上流からの土砂供給条件等に依存すると考えられる。試行検討で確認された水深差は、閉塞地点の位置、上流域からの流入量、河道勾配、支川合流のタイミングによって変化する。したがって、同じ閉塞率を与えた場合でも、すべての橋梁で同じ危険度になるわけではない。この点は、橋梁単体の構造条件だけでなく、上下流を含む河道ネットワーク全体で評価する必要性を示している。

実務適用においては、まず本フローにより多数の橋梁を段階的に絞り込み、次に優先度の高い橋梁について現地確認、流木発生源調査、橋梁諸元の整理を行うことが

考えられる。その上で、閉塞率や土砂供給条件に幅を持たせた解析を行い、対策候補地点と対策優先度を整理することが有効である。

本手法を用いることで、流木閉塞の影響が大きいと考えられる橋梁を抽出し、対策優先度を整理できる可能性がある。特に、広域的に多数の橋梁を対象とする初期検討では、流木発生源、橋梁条件、水理量、余裕高、流木到達性、河床変動を段階的に評価することにより、詳細解析や現地調査を実施すべき箇所の絞り込みに寄与すると考えられる。

5. まとめ

本稿では、超過洪水時に土砂・洪水氾濫とともに流出する流木が橋梁部で閉塞する現象に着目し、危険箇所抽出と影響評価の考え方を整理した。提案手法では、既往知見や研究成果を基に、流木発生源、橋梁条件、水理量、堤防余裕高・桁下余裕、流木の到達可能性、河床変動を段階的に評価することで、流木閉塞の影響が大きい橋梁を効率的に抽出できる具体的な検討手法を示した。

試行検討では、流木閉塞を河積阻害として断面補正により表現し、一次元河床変動解析に組み込むことで、閉塞効果の有無による水深応答の違いを比較した。その結果、閉塞効果を考慮したケースでは、水深ピークが増大し、高水深状態が持続する傾向が確認された。

今後は、橋脚の影響や縮小係数の設定方法、流木捕捉条件の定量化、閉塞発生のタイミングと継続時間、連続橋梁における流木到達性の評価方法を整理するとともに、実災害事例や現地データによる検証を進める必要がある。また、最終的に抽出されたトラブルスポットについては、一般的な二次元氾濫解析を用いて、保全対象への浸水深、流速、到達範囲を評価し、実務における対策優先度の設定に活用していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省:河川砂防技術基準 計画編(基本計画編), 2024.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部:土砂・洪水氾濫時に流出する流木の対策計画の基本的な考え方, 2023.
- 3) 山上路生ほか: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, 土木学会論文集, Vol.72, No.3, 2016.
- 4) 原田紹臣・里深好文:超過洪水時における河川洪水流が橋梁上部工の流出に与える影響, 構造工学論文集, Vol.69A, 2023.
- 5) 和田浩幸・原田紹臣・河野文俊ほか:土砂・洪水氾濫メカニズムを踏まえた数値解析モデル構築における一考察, 土砂災害に関するシンポジウム論文集, Vol.12, 2024.