

平成30年7月10日に発生した広島県府中町榎川下流における氾濫に関する実験的検討

渡部海*, 吉岡海*, 高尾優*, 田中健路*
*広島工業大学環境学部地球環境学科

1. はじめに

平成30年7月豪雨において広島で大雨が発生した3日後の7月10日に、広島県府中町榎川で突発的な土砂・流木混じりの出水が発生し、下流において流木が橋梁に補足されて浸水被害が発生した。砂防学会による調査によれば、榎川上流部に置いてあった捨て盛り土が崩壊したものと報告されている¹⁾。榎川の中流域の区間は幅10m以下、河道の深さが2~3m程度と断面が狭く、府中みくまり病院から氾濫発生箇所までの榎川支流山田川との合流点までの間に川を跨ぐ橋が15本架かっている。橋脚のある河川に対して流木の堰き止め効果に関する実験的検証は数々行われている^{2),3)}が、榎川のような橋脚のない橋が架かる中小河川を想定した実験に基づく知見は乏しい。

そこで、本研究では、2018年7月10日に榎川下流域で発生した氾濫を対象として、水槽実験、数値実験の双方を実施し、中小河川における合流点付近の流木の静止、堆積およびそれに伴う浸水過程について検討を行った。

2. 実験方法

本研究で行った室内模型実験と数値実験の対象領域を図-1に示す。いずれも氾濫点となる榎川と山田川との合流点を中心として与えた。上流側の流量は、発災時に撮影された監視カメラの映像と現地での測量調査より35 m³/sと推定され、それぞれの実験に適用させた。

2.1. 模型実験

対象領域の1/200スケールの室内水路模型を作成した。幅2m、奥行1m、厚さ50mmの発泡スチロール板を3枚接合して、3m×2mの平板を作成した。国土地理院基盤地図情報より水涯線データを入力し、緯度経度で収録されている位置情報を平面直角座標系第3系に変換し、模型内の水涯線の位置を決定した。水涯線を左右河床の境界とし、法面勾配70°、河床からの天端高2.5mの台形断面で単純化して与えた。以上の手順で算出した断面を1/200に縮小し、CADソフトSketchUp 2019を使ってstl形式の3Dモデルデータを作成し、広島工業大学情報メディアサポートセンター所蔵の



図-1 本研究の対象領域

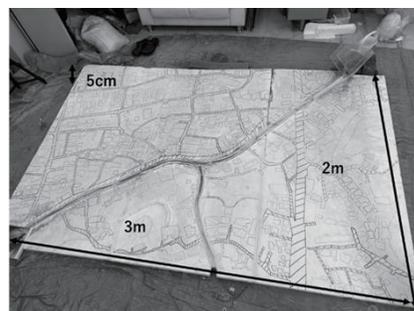


図-2 模型の概観

3D プリンターで出力した。3D プリンターで出力した水路模型を、発泡スチロール平板に埋め込み、発泡スチロール専用接着剤で接着し、模型を完成させた(図-2)。対象領域内にかかる橋についても、現地調査で採寸の上 1/200 に縮小した模型を製図し、3D プリンターで出力した。

模型に流す水の量は、フルード数(Fr)を保存する条件下で次元解析を行い、16 秒/ℓと定めた。土砂は広島県産真砂土をふるい分けし粒径 200 μm以下の細砂を抽出した。実験条件は、① 空実験(水のみ、橋梁なし)、② 橋梁の有無(橋梁なし、山田大橋のみ、龍仙寺橋と山田大橋、全橋梁設置)、③土砂濃度(10g/ℓ, 50g/ℓ, 100g/ℓ, 200g/ℓ)、④流木(10本, 20本, 30本, 50本)の条件をそれぞれ組み合わせ、同一条件下で3回繰り返し実験を行った。合流点付近の状況についてカメラを固定し動画撮影を行ったの共に、各実験で発生した越水地点を記録していった。

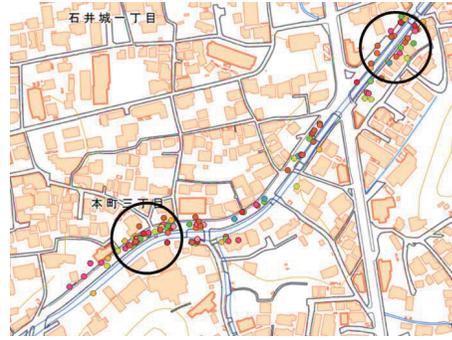


図-3 本研究の実験での越流箇所



図-4 土砂濃度 100g/ℓにおける氾濫状況
(模型流木 30本)

2.2. 数値実験

本研究では、河川解析ソフトウェア iRIC のうち、流木の挙動の解析が可能な 3次元解析ソルバー Nays CUBE¹⁾を使用した。数値モデルの基礎方程式系は、空間3次元の Navier-Stokes 方程式と質量保存則に、乱流運動エネルギーとエネルギー散逸率に関する方程式 ($k-\epsilon$ 方程式)⁵⁾が加わったものである。

3次元乱流場の中での流木の挙動については、流木を複数の球体に分割し、個々の球体の移動ベクトルを流れ場から算出し、微小時間後の移動を求めた後に、剛体条件を適用して、流木の重心や方向などを解析した。水平方向の格子点間隔は約 50cm、河床勾配を 1/90 として一定とした。計算の安定性確保のために、川の左右両岸を非越流構造物として設定した。計算時間間隔は $CFL \leq 0.15$ となるように可変とし(概ね 5.0×10^{-4} 秒 $\sim 3.0 \times 10^{-3}$ 秒)、計算開始から 10 秒後に上流側から流木を投入し、60 秒後までの解析を行った。

3. 実験結果

3.1. 模型実験

本研究で実施した全ての実験で確認された越流箇所をまとめたものを図-3に示す。流木が堆積した龍仙寺橋と山田大橋の間の区間での越流発生も見られたが、榎川と山田川の合流点より 50~100m 下流側の右岸側で最も多く越流が発生した。山田大橋よりも上流側で越流が発生した例は、土砂濃度が 50g/ℓ以上の高濃度の条件で多く見られた。図-4は 100g/ℓの高濃度土砂を流下させた場合の例であるが、上流側で大部分の砂が堆積し、河床模型の両外側へと越流した。

橋梁設置条件による差異の例を図-5に示す。模型橋梁なしの条件で、合流点周辺の急拡部で流木が5~10本回転しながら静止したのと共に、山田川の上流に向かって逆流する様子が捉えられた。山田大橋のみを設置した条件では、橋の下流周辺で流木が静止し、山田川への逆流も橋梁なし条件と比



(a) 橋梁なし (b) 山田大橋のみ設置 (c) 山田大橋・龍仙寺橋設置
 図-5 橋梁設置条件別の榎川・山田川合流点付近の流木の堆積状況 (流木 30 本)

べて10%程度逆流が強まる結果となった。山田大橋・竜仙寺橋双方の橋梁を設置した条件では、下流側の龍仙橋の周囲で10本程度の流木の静止が確認されたが、そのすぐ下流側で流木が静止し、越水が始まった。山田川合流点付近の緩やかなS字状の湾曲部のうち、龍仙寺の下流側での左側への湾曲部で減勢し、右岸側へ越流していく様子が見られた。

3.2. 数値実験

Nays CUBE を用いた解析結果として、流木の流下状況と水深・流線の分布を重ねたものを図-5に、乱流運動エネルギー密度と流木の流下状況を重ねたものを図-6にそれぞれ示す。山田川との合流点の上流側では、右側への湾曲に沿う形で、外側の左岸側に流線が偏るが、合流点の直ぐ下流側で流線が右岸側に急激に湾曲している様子が計算開始から27秒後、35秒後いずれのスナップショットにも現れている。流線の集中帯にそって水位が上昇しており、合流点左岸側や山田大橋および龍仙橋の下流右岸側やで2mを超える水位となった。後者の結果は、室内模型実験の結果と整合する。乱流運動エネルギー密度の分布によれば、図-5に見られる流線の集中帯で、乱流運動エネルギー密度が $0.5(\text{m}^2/\text{s}^2)$ を超える領域が合流点の周辺で流下方向に従って左岸側、右岸側の順に出現している。流木群はエネルギー高密度域を通過する際に、左右兩岸の壁面に衝突し、3次的に回転しながら流下していった。

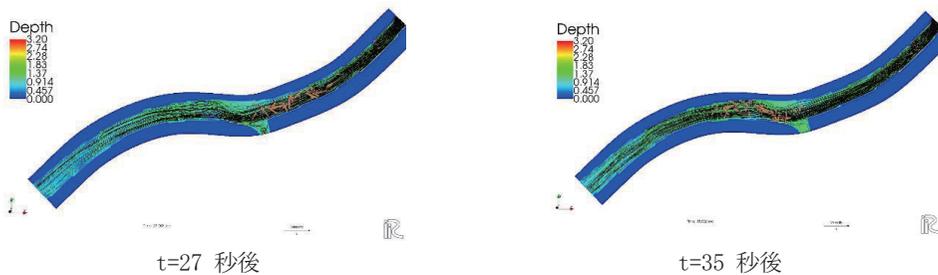


図-5 3次元乱流モデルを用いた解析結果(1)。水深・流線の分布。

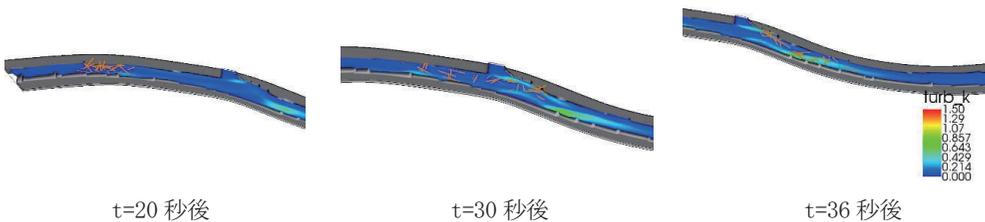


図-6 3次元乱流モデルを用いた解析結果(2)。流木の挙動と乱流運動エネルギー密度の分布

なお、本研究では、橋梁下の空間をアンダーパスセルとした計算を試行した。しかし、CFL 条件を計算開始直後に計算不安定となり、橋梁への衝突による流れの堰き止め効果を直接的に検討する点では課題が残っている。

4. 結論

本研究では、榎川と山田川の合流点周辺の氾濫過程について、室内模型実験、および、数値実験による検討を行った。

- (1) 2018 年 7 月 10 日に下流に到達した土砂流は、土砂濃度は比較的低い濃度で流れた可能性が考えられる。
- (2) 榎川と山田川の合流点のすぐ下流の橋により流木の堆積が増大すること室内実験で確認できた。ところが、橋梁なし条件でも合流点付近で流木が回転し静止し、山田川への逆流が強化する効果も見られ、合流点付近の河道の急拡も流木堆積の一因として考える必要がある。
- (3) 越流箇所は合流点下流側の山田大橋・龍仙寺橋よりも下流側で最も多く確認された。流木による堰き止めが発生しても、土砂濃度が低くかつ粒径が細かく、隙間を透過した水が下流側で増水し、浸水に至ったと見られる。
- (4) 3 次元流動解析によれば、乱流運動エネルギーの高密度域が合流点下流側で湾曲外側方向の左岸側に偏って分布しており、局所的に水位上昇が発生した。流木はエネルギー高密度域に沿うように 3 次元的な回転を伴いながら流下しており、橋に衝突して堰き止められた可能性が高いことを示唆している。今後、アンダーパス計算を加えて、流木による河道埋塞について更なる検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 海堀正博 他：平成 30 年 7 月豪雨により広島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol.1, No4, pp. 49-60, (2018)
- 2) 山上路生，岡本隆明：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 B1，第 72 卷 3 号，pp. 88-100, (2016)
- 3) 藤森祥文，越智有生，速山祥子，白石央，渡辺政広：急勾配中小河川における流木に起因する洪水氾濫軽減対策，水工学論文集，第 52 卷，pp. 679-684 (2008)
- 4) 木村一郎：iRIC Software NaysCUBE Ver. 3.1 solver Manual 第六版，北海道河川財団，pp. 53-73 (2018)
- 5) 木村一郎，細田 尚，音田 慎一郎，富永 晃宏：非線形 $k-\epsilon$ モデルによる斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析，応用力学論文集 Vol. 5, pp. 717-726 (2002)