

流木による橋梁での河川氾濫の大規模 3 次元シミュレーション

(一財) 砂防・地すべり技術センター／東京科学大学 ○青木 尊之
 京都工芸繊維大学 坂根慎治
 九州大学 渡辺 勢也

1 はじめに

斜面崩壊とともに大量の流木が河川に流れ込み、橋梁等で捕捉され河川氾濫につながる災害が増えている。どのような条件の場合に流木が捕捉され始めるのか、捕捉され始めてから氾濫が発生するまでの過程を明らかにするために 3 次元シミュレーション・コードを開発し、GPU スパコンを使って大規模計算を実行した。

令和 7 年の砂防学会誌, Vol.78, No.2, p.3-14 に掲載された原著論文「流木捕捉の 3 次元流体シミュレーション」[1]では、流木を含んだ自由界面流れのシミュレーション・コードを開発し、水理模型実験での流木模型の捕捉実験の再現で、コードの妥当性を検証した。さらに、不透過型堰堤に設置された張り出し型の流木捕捉工に対して 1000 本の流木を流し、流木どうしの衝突や流木と部材との衝突による流木の減速、沈み込みなどの流れと流木の詳細な相互作用が計算でき、①流木捕捉の流木長の影響 (図 1)、②水中で捕捉されている流木分布の水面との角度、③流木の捕捉率と数密度の関係、④流木捕捉による堰上げが明らかになった。また、実災害に同コードを適用し、流木が大量に捕捉される条件を明らかにしている[2]。

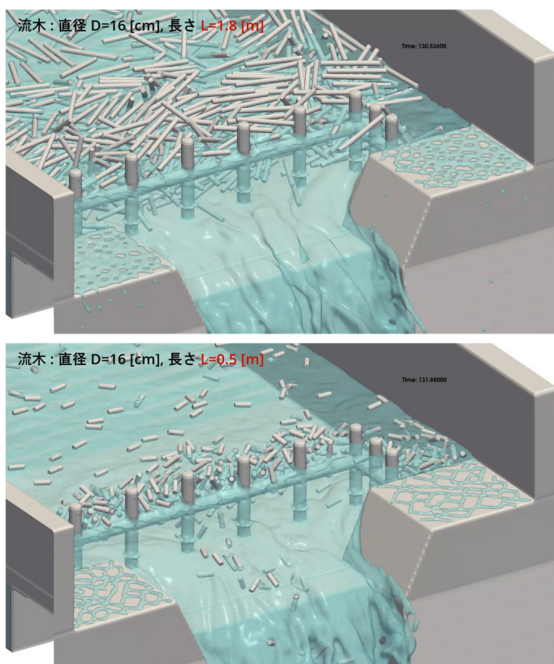


図 1 流木長による捕捉の違い[1]

2 計算手法

水の流れに対しては、D3Q27 モデルの Cumulant 型衝突項の格子ボルツマン法を使い、自由界面はフェー

ズフィールド法の保存形 Allen-Cahn 方程式を解いて識別している。固体として扱う流木、橋梁や河床の形状は、レベルセット関数と微小球形粒子の (剛体連結した) 集合体として二通りで表現している。レベルセット関数は流体計算に対する境界条件を設定するために用いられ、固体間の衝突は微小球形粒子を用いた DEM (個別要素法) に基づいて計算している。自由界面、流木には動的に高解像度格子を割り当てるように Octree 型の AMR 法を導入し、CUDA プログラミングで実装することにより東京科学大学の GPU スパコン TSUBAME4.0 の NVIDIA H100 を複数個用いて、大規模シミュレーションを行った。

3 橋梁および河川地形モデル

対象とする河川の地形および橋梁の 3 次元形状を図 2 に示す。流木が橋梁で捕捉されることによる河川氾濫は小規模河川で発生するため、兵庫県宍粟市一宮町の森川に架かる新森川橋をモデルとしている。単純桁橋で、床版は幅 5 m、長さ 8 m とした。計算領域は橋周辺の 71.68 m × 26.88 m × 26.88 m と設定した。

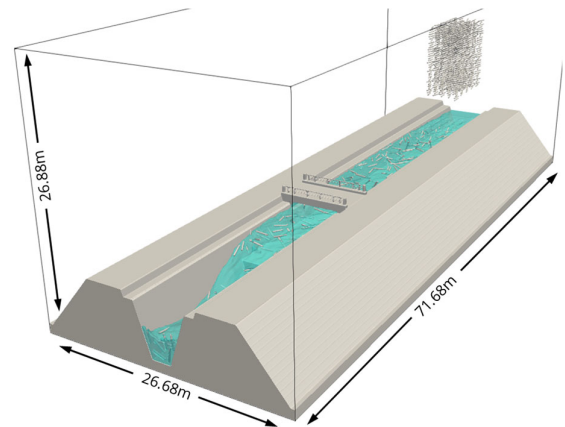


図 2 河川の地形と橋梁の 3 次元形状および計算領域

橋梁の 41m 上流から流速 5m/s、水位 h で水を流入させている。水が流れる距離が短いため、河床に流れ方向の勾配は付けていない。橋梁から下流 13m のところで河床を段落ちさせ、流

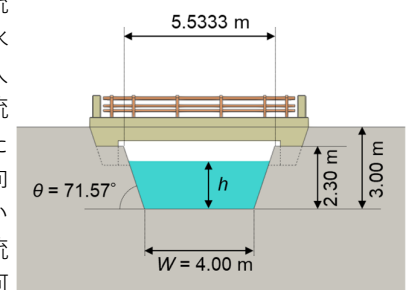


図 3 橋梁より上流の河床断面

出境条件が上流に影響しないようにしている。橋梁より上流の河床は図3のように2段の台形断面となっており、河床の最深部からの水位が2.3mになると、水面が床版底部に接する。河岸との接続部の橋台には図4に示すように河床最深部から1.6mのところ

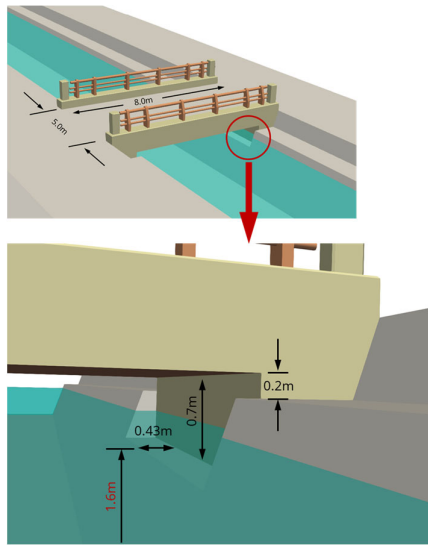


図4 床版と橋台近傍

のところに段差があり、実際の橋梁の形状を反映させている。両岸には土手を設置している。

4 橋梁部で氾濫するシミュレーション

橋梁手前から流入する水位 h を変えてシミュレーションを行った。流木は直径 16 cm、長さ 1.5 m の丸棒形状とし、質量密度を 850 kg/m^3 と仮定している。初期に水だけを流入させ、一定時間経過後のほぼ定常状態になった時刻 ($t \geq 3.36 \text{ s}$) から上流側の上空に 5 行 5 列 40 段 (合計 1,000 本) で配置した流木を 1 段ずつ 0.42s の間隔で順次投下した。流木を解像できるように、AMR における最小格子幅は $\Delta x = 3.5 \text{ cm}$ とし、それに基づいて時間刻み Δt を決定している。

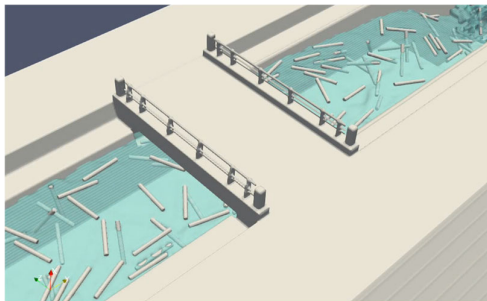


図5 水位 1.5m で流入させたときの流木の流れ

河床からの水位を $h=1.5\text{m}$ として流速 5m/s で流入させた場合 (流量は $33.7 \text{ m}^3/\text{s}$)、投入された流木の体積に応じた約 7cm の水位上昇しか起こらない。1.6m のところにある橋台の段差部分には水位が到達しないため、橋梁部で流木は捕捉されない結果となった。

次に、河床からの水位を $h=1.75\text{m}$ として流速 5m/s で流入させた場合 (流量は $40.1 \text{ m}^3/\text{s}$)、流木が投入されたこ

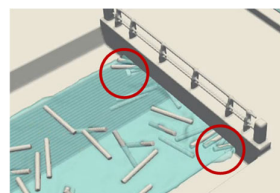


図6 橋台の段差部分での流木捕捉

とにより水位が 7cm 上昇してもなお床版の底面には到達しないが、図4の橋台の段差部分に流木が衝突する水位になる。

図7では、河岸に近いところを流れる流木が稀に橋台の段差部分に衝突し、速度が一時的に停止し、その影響で後続の流木がその流木に衝突し易くなるため、橋台近傍の流木の速度がますます低下し、流木密度が上昇する。それとともに堰上げが

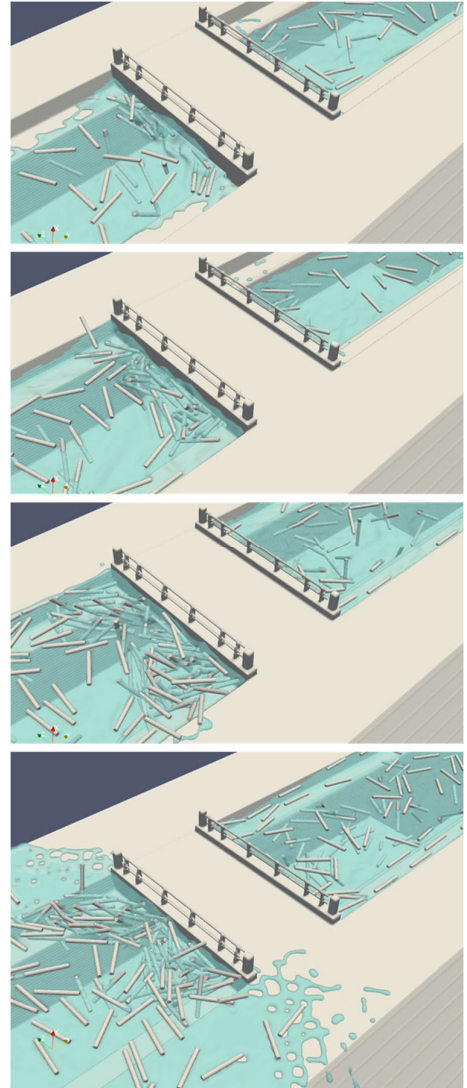


図7 水位 1.75m で流入させたときの橋梁近傍での流木による河川氾濫の発生過程

ことにより流木は床版の下面に衝突するようになる。そうすると水面だけでなく、水中でも流木が捕捉されるようになり、流れに対する閉塞率が一気に上昇し、堰上げがさらに進行することにより橋梁の手前の両岸から河川氾濫が発生する。橋台のところに段差が無ければ、さらに水位が高くても河川氾濫が発生しないと予想される。

今後はさまざまな橋梁に対し、色々な流木 (自然木や根を考慮) や河岸表面の凹凸の影響を調べ、流木による河川氾濫を低減させる方策を検討する。

参考文献

- [1] 沈 大衛・青木尊之・嶋 文示・渡辺勢也：流木捕捉の3次元流体シミュレーション, 砂防学会誌 (原著論文), Vol.78, No.2, p.3-14, 2025
- [2] Dawei Shen・Takayuki Aoki・Seiya Watanabe・Shuji Moriguchi・Shinsuke Takase・Masaaki Sakuraba: 3-D Direct Simulation of Driftwood Accumulation in a Real River Flood, J. JSCE, 2024 Volume 12 Issue 1, 2024/12