

多数の巨礫を含んだ土石流と流木捕捉の3次元大規模シミュレーション

(一財) 砂防・地すべり技術センター／東京科学大学 ○青木 尊之
東京科学大学 下畑 和希
東京科学大学 Shen Dawei
九州大学 渡辺 勢也

1 はじめに

令和6年度砂防学会研究発表会和歌山大会では「多数の巨礫を含んだ土石流と堰堤の3次元シミュレーション」として、土石流に対して巨礫を含む泥流としてモデル化し、巨礫は固体として扱い、泥流はMohr-Coulomb破壊基準が適用したBingham性の非ニュートン流体として扱った。泥流の流体計算手法には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。固体として扱う岩石、堰堤構造物や河床の形状は、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、巨礫、堰堤構造物、河床近傍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GPUスパコンを用いてシミュレーションを行った。

2024年度は斜面の河床が平滑であったため岩石が転がらずに流下し、現実の土石流の流下と異なる結果となってしまった。2025年度は、実際の斜面を再現するために河床に凹凸を付けてシミュレーションを行った。凹凸の高さとそれぞれのサイズの岩石の速度分布も明らかにする。さらに、流木も同時に計算し、流木が含まれる効果を明らかにする。

2 岩石のモデル

土石流に含まれる40cm以下の岩石は泥流に含めて扱い、41cm、52cm、61cm、72cm、79cmの岩石をそれぞれ200個、199cmの岩石を10個、合計1,010個の岩石を固体としてモデル化してシミュレーションに用いた(図1)。岩石の密度は $2,740\text{kg/m}^3$ としている。

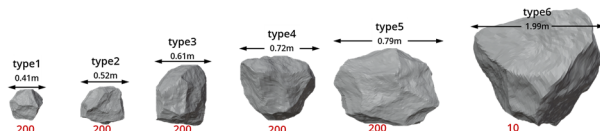


図1 シミュレーションに使われる岩石モデル

図2のように転がりながら落下する岩石の表面近傍に高解像度格子を動的に配置することで、岩石の形状と流体との相互作用計算の精度を向上させている。

3 斜面および透過型砂防堰堤のモデル

土石流の成長域に近い 10° から 15° に流路斜面の傾きを設定し、斜面には自然の凹凸を模擬するため、それを定量的・系統的に表現するために図3の形状の凹凸を斜面に敷き詰め、図4のように下流端に透過型砂防堰堤を設置した。斜面のサイズは、高低差32.3m、長さ120.3m、幅33.0mとした。

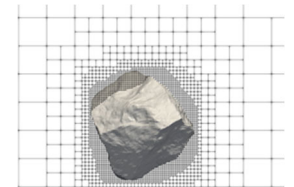


図2 岩石形状に適合する

AMR格子

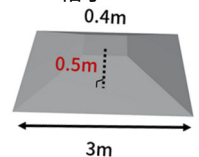


図3 斜面の凹凸

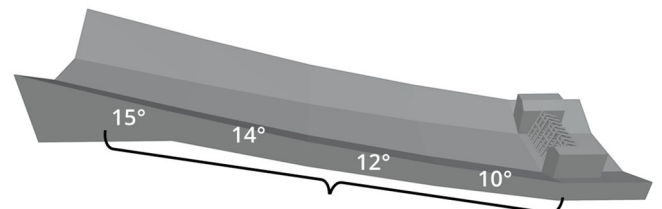


図4 用いた斜面のモデル

用いた透過型砂防堰堤のモデルを図5に示す。部材純間隔は1.0mであり、粒径95cm以下の岩石をせき止めるための基準となる。

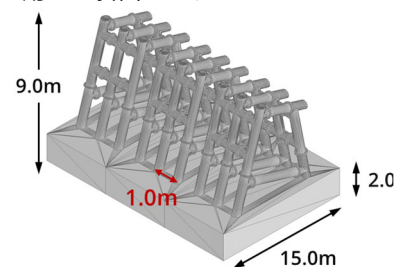


図5 透過型砂防堰堤のモデル

4 河床の凹凸に応じた土石流の流下シミュレーション

河床に0.3m、1m、1.5mの凹凸を規則的に設定し、図1の合計1,010個の岩石を含んだ土石流を上流から流し、流下する過程と堰堤での岩石の捕捉を調べた。AMR法により最小4cmの高解像度格子を用いて $120\text{m} \times 40\text{m} \times 32\text{m}$ (均一格子なら $3000 \times 1000 \times 800$ 格子)の巨大な計算領域を高効率・高速に計算している。

河床の凹凸が大きくなるにつれ、土石流全体の流下速度が低下し、巨礫に対して摩擦となることが図6から分かる。また、どの場合も砂防分野でよく知られている巨礫が土石流の先頭を走ることも再現されている。

図7は河床の凹凸が1.5mの場合、時刻1.92s、5.76s、11.52s、13.44sにおけるそれぞれのサイズの岩石の速度分布を表している。小さい41cm~72cmの岩石は、流下とともに河床に捕捉され取り残される岩石と、凹

土石流の先頭を走ることが分かる。

5 巨礫と流木を含んだ土石流シミュレーション

土石流は斜面崩壊で岩石だけでなく、流木を巻き込むことも多く、流木も含んだシミュレーションを行った。泥流とともに 31cm の岩石を 1,000 個投入し、堰堤の部材間隔を 2m とした。流木は直径 20cm、長さ 4.0m、密度を 900kg/m³ とし、最小格子 3cm で計算している。流木は変形しないと仮定している。

岩石のサイズは堰堤の部材間隔の 1/6 以下であるが、目詰まり効果（アーチ構造）により流木を含まない場合でも約 60%が堰堤で捕捉される。約 40%の岩石が堰堤を通過するが、流木を 25 本含むだけで通過する岩石は 25%に減少し、流木が 100 本含まれると 3%にまでに低下することが明らかになった（図 9）。

図 10 は土石流に含まれる流木が 25 本と 100 本のときの岩石と流木の速度分布の時間変化である。流木は泥流より密度が小さいために沈降せず、流木はいつも岩石よりも速い速度で流下している。土石流が堰堤に衝突した後の時刻 16.0s（図 10 の最右図）では、流木の本数が 25 本の場合、より多くの岩石が堰堤を通過していることが分かる。

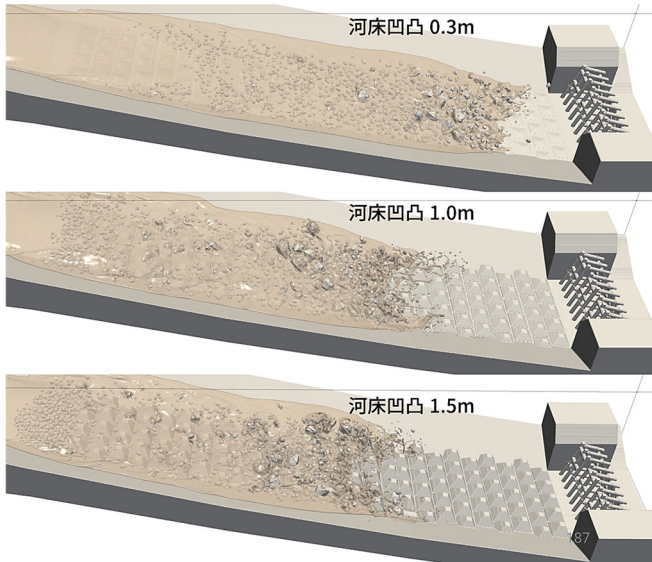


図 6 河床の凹凸が 0.3m、1.0m、1.5m の場合の土石流シミュレーション（同時刻のスナップ・ショット）

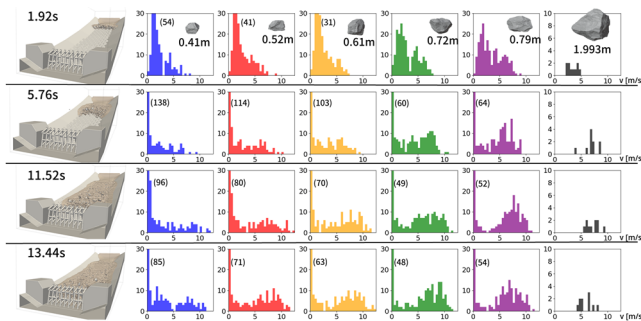


図 7 河床の凹凸が 1.5m の場合の時間経過に伴う岩石の速度分布の変化

凸を乗り越えて加速される岩石に分布が 2 つに分かれることが分かる。時刻 13.44s では、1.99m の岩石だけが堰堤に衝突している。

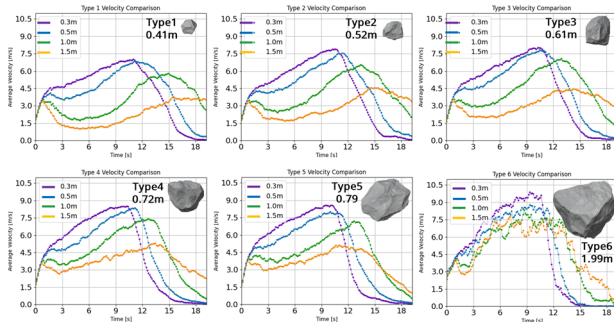


図 8 河床の凹凸が 0.3m、0.5cm、1m、1.5m に対し、それぞれのサイズの岩石の平均速度の時間変化

図 8 は河床の凹凸が 0.3m、0.5cm、1m、1.5m の場合に対し、6 種類の岩石が土石流の流下とともに加速され堰堤に衝突して減速するまでの平均速度の時間変化を示している（縦軸は速度で、横軸は時間）。河床の凹凸が大きくなるにつれ、小さい岩石は強く減速されたり凹凸の間に捕捉されたりするが、岩石が大きくなると減速を受け難くなり、1.99m の岩石は凹凸の高さによらずに、それを乗り越えて加速されながら流下して

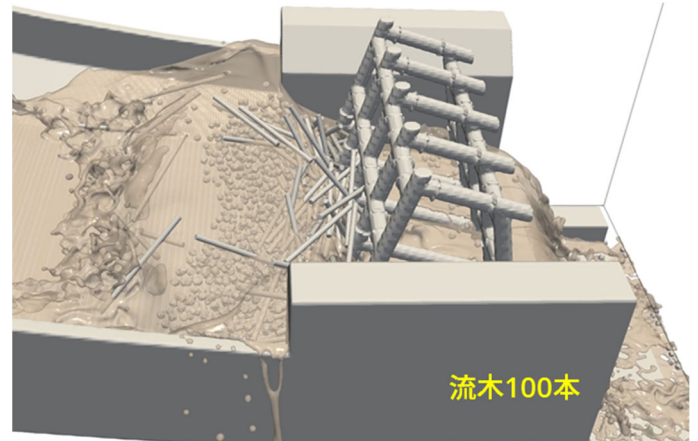


図 9 100 本の流木を含んだ土石流シミュレーションの堰堤近傍のスナップ・ショット

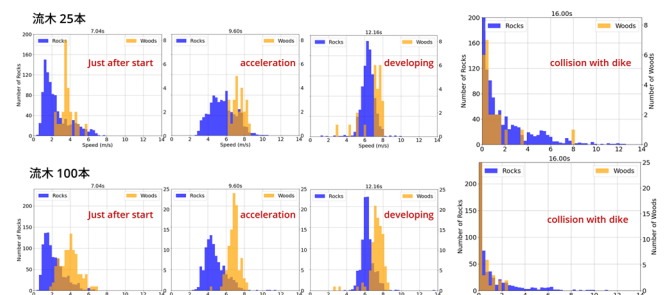


図 10 岩石と流木の速度分布の時間変化

謝辞

本研究は HPCI 一般課題 hp240034 として進めた研究であり、科学研究費補助金・基盤研究(S) 課題番号 19H05613 から支援されている。計算には、東京科学大学・情報基盤センターの TSUBAME4.0 および名古屋大学・情報基盤センター「不老」Type-II を利用させて頂いた。記して謝意を記す。