

山地溪流における流木を伴う土石流シミュレーションモデルの開発

株式会社ニュージェック ○和田孝志
立命館大学理工学部 里深好文
京都大学大学院農学研究科 水山高久

1. 背景および目的

土石流中に混入した多量の流木によって、家屋への衝突や橋脚に引っかかることによる越流氾濫など下流域への被害が拡大することは知られている。近年においても、2006年7月長野県岡谷市の土石流災害など多量の流木が混入した土石流災害が起こっており、土石流対策とともに流木対策も重要である。

流木対策を検討するために、これまでいくつかの流木を考慮した土石流シミュレーションモデルが提案されてきたが、これらのモデルは清水を対象とした流れ場上の流木の挙動を追跡するものであり、土石流のような土砂を含めた流れ場を想定していない、または計算領域や計算時間が制限されてしまう点において課題が残っている。

そこで本研究では、既存の土石流1次元モデルを基に、流木の混入を考慮した土石流1次元モデルを作成した。作成したモデルと流木模型を用いた水理実験による結果を比較することにより、モデルの課題を検証した。

2. 流木の混入を考慮した土石流1次元モデル

流木の混入を考慮した土石流1次元モデルは、流木の特性を考慮して、既存の土石流1次元モデルに流木に関する以下の機構を組み込んだものである。

① 流木の体積の保存式

土石流中の流木の挙動を追跡するためには、土石流に含まれる流木量を追跡する必要がある。本モデルでは、土砂の連続式を引用して流木の連続式を設定した。

② 流木輸送速度

流木の容積密度は土石流（砂礫と間隙流体）の容積密度よりも小さいと考えられるので、土石流に取り込まれた流木は流動表面に浮き上がり、土石流の平均輸送速度より速い上方の流速に乗って前方へと輸送されると考えられる。本モデルでは、取り込まれた流木は直ちに表面に浮上し、土石流の表面速度で輸送されると設定した。表面流速は平均断面流速の定数倍で表されると仮定した。

③ 流木と河床の接触による摩擦力

前方へ輸送されてきた流木は土石流先頭部に集積し、集積が過度になると流木が河床に接触すると考えられる。その際、流木と河床との間に摩擦抵抗が生まれると考えられる。流木と河床との摩擦力は集積した流木の質量に比例するが、土石流内部に存在している流木については浮力分を差し引いた質量となり、過度の集積により土石流表面から完全に出てしまっている流木についてはそのままの質量となる。質量

よりも浮力分のほうが大きくなり、見かけの流木の質量が負になったときは河床と接触はないと考え、摩擦抵抗は0とする。なお、完全に土石流表面から出てしまう流木量は、土石流流量に対する流木存在割合から土石流内部で流木が存在できる限界存在割合を引いた量とする。

④ 土石流への流木の取り込み量

本モデルでは、土石流への流木の取り込みは土石流到達とともに直ちに起こると仮定し、流木の取り込み量は河床に存在している流木量と同じとした。

以上より、本モデルの基礎方程式は以下のようになる。

(1) 水・土砂を含めた全容積の保存式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} = i \dots\dots\dots (1)$$

(2) 土砂の体積の保存式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} = iC_* \dots\dots\dots (2)$$

(3) x 方向（流下方向）の土石流の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g \sin \theta_w - \frac{\tau}{\rho h} - \frac{F'}{\rho h} \dots\dots\dots (3)$$

(4) 河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \dots\dots\dots (4)$$

(5) 流木の体積の保存式

$$\frac{\partial C_r h}{\partial t} + \frac{\partial C_r h u_r}{\partial x} = V_r \dots\dots\dots (5)$$

(6) 流木の輸送速度

$$u_r = k u \dots\dots\dots (6)$$

(7) 流木と河床の接触による摩擦力

$$F' = \begin{cases} \mu_r g (\sigma_r C_r - \rho C_r') h \cos \theta & (\sigma_r C_r > \rho C_r') \\ 0 & (\sigma_r C_r \leq \rho C_r') \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 h ：流動深、 u ：流速、 C ：土砂濃度、 z ：河床位、 t ：時間、 g ：重力加速度、 i ：侵食・堆積速度（慣性的運動は無視している）、 ρ ：間隙流体の密度、 C_* ：河床堆積物の体積濃度、 θ_w ：水面勾配、 τ ：河床せん断力、 C_r ：土石流流量に対する流木存在割合、 u_r ：流木輸送速度（ k は定数であり、ここでは1.2とする）、 F' ：流木と河床の接触による摩擦力、 μ_r ：動摩擦係数、 σ_r ：流木容積密度、 C_r' ：土石流流量に対する流木の限界存在割合、 θ ：河床勾配、 V_r ：土石流への流木の取り込み量（河床上に存在する流木量）

である。なお、 k 、 μ_r 、 σ_r については実験室内で行った簡易的な測定による値を用いた。 C_r' については正確な値がわからないので、現段階では堆積時の流木の容積濃度 C_{r*} を用いた。

3. 流木模型を用いた水理実験

図-1 に流木模型を用いた水理実験の実験概要を示す。使用する流木模型は棒状の木材で、総体積を共通にして材質、密度、長さ、使用本数を変えて表-1 に示す CASE ごとに複数回実験を行った。

4. 結果の比較と考察

実験では、流木模型は土石流が到達すると直ちに先頭部に取り込まれ、そのまま先頭部に集積し下流端まで流下した。土石流先頭部では、流木模型が河床や側面に激しく接触しながら流下している様子が観察され、本モデルで仮定した流木の流動状態を表していた。

図-2 では、水路の上流端から 120cm の地点における流木を含めた土石流の流動深について、図-3 では、水路下流端における通過流木の時間変化について実験結果と計算結果を並べて示している。これらの図より、以下の実験結果については計算でも表現されていることがわかった。

- ① 同じシラカバ材を用いた CASE2、3 では、下流端通過流木量が流木模型の容積密度の違いに依存しないこと。
- ② CASE1 と CASE2、3 の比較から、流木の有無によって上流端から 120cm 地点への到達時刻が遅れること。
- ③ CASE1 と CASE5 の比較から、流木模型長が小さくなると、流木の存在が、上流端から 120cm 地点への到達時刻の遅れに寄与しなくなる。
- ④ CASE5 では、他の CASE と比較して、土石流先頭部の流動深が大きくなり、下流端通過流木量が大きくなること。

しかし、以下の点では実験結果と計算結果に大きな違いが見られた。

- ① CASE4 以外の CASE では、下流端到達時刻において、実験に比べて計算のほうが早くなること。
- ② 一方 CASE4 では、実験に比べて計算のほうが土石流の到達時

刻が遅くなり、流動深、流木量ともに計算のほうがピークが小さくなること。

これらの結果については、土石流の流下を遅らせる流木の影響が、たとえば流木の存在による土石流の流動層内の抵抗力の増加など、流木と河床の接触による摩擦力だけではないことが原因と考えられる。また、式(7)中の土石流流量に対する流木の限界存在割合 C_r' について正確な値が導入されていないことによって、 F' が実現象を正確に反映した値として求められていないことが原因と考えられる。今後、土石流に対する流木の影響や C_r' については検討する必要があると考えられる。

参考文献

1)長谷川ら(2006)：流木を含む土石流の流れに関する実験的研究、建設技術研究所所報 2006、p.44-46、2006

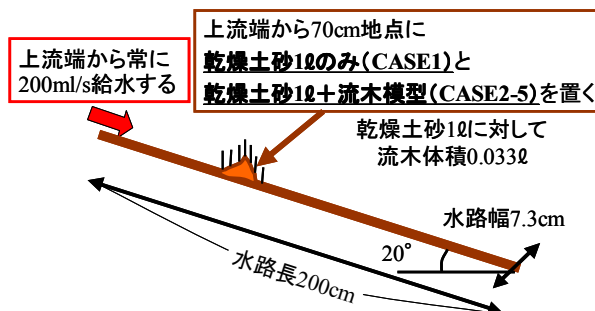


図-1 実験の模式図

表-1 実験条件

	流木模型	長さ (cm)	直径 (cm)	使用 本数	密度 σ_r (g/cm ³)	動摩擦 係数 μ_r	堆積時の 容積濃度 C_{r*}
CASE 1	なし	---	---	---	---	---	---
CASE 2	乾燥爪楊枝(シラカバ)	6.5	0.23	100	0.56	0.84	0.12
CASE 3	湿润爪楊枝(シラカバ)	6.5	0.23	100	0.97	0.87	0.12
CASE 4	竹串を切ったもの6.5cm	6.5	0.26	100	0.92	0.54	0.12
CASE 5	竹串を切ったもの3cm	3.0	0.26	217	0.87	0.54	0.43

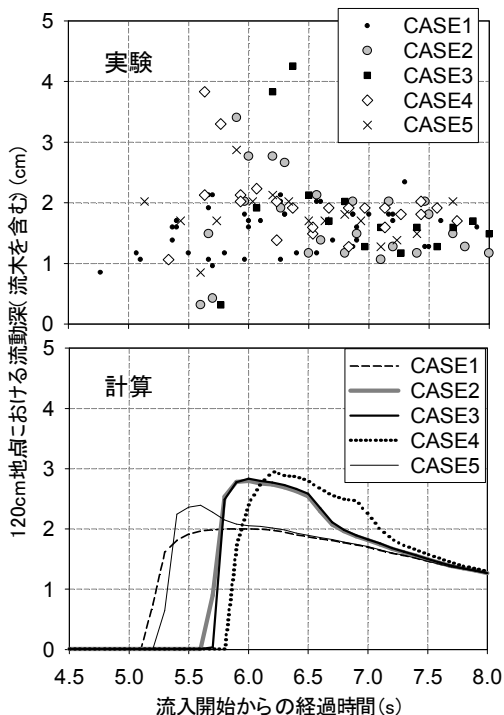


図-2 120cm地点における流動深(流木含む)

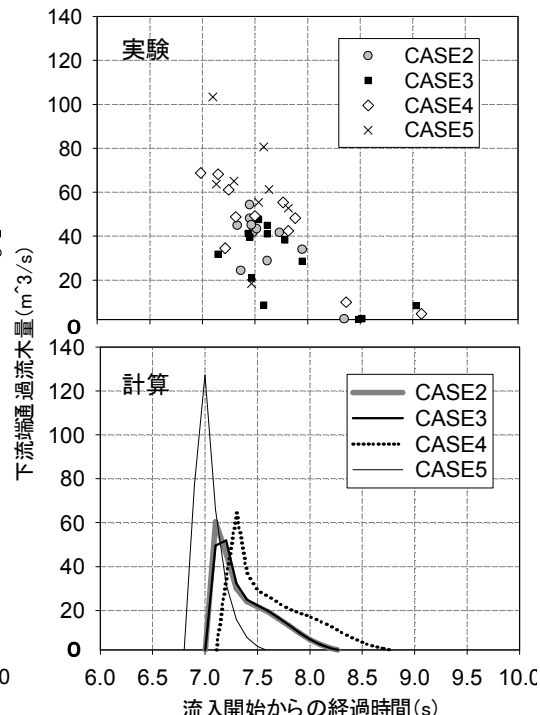


図-3 下流端通過流木量