

粒径変化を考慮した土石流氾濫予測手法に関する研究

京都大学大学院農学研究科
立命館大学理工学部松本直樹・〇和田孝志・水山高久
里深好文

1. 背景および目的

扇状地における土石流の氾濫は大きな人的・物的被害を生む。このような被害を防止・軽減するためには、土石流の発生・流動・堆積が予測可能な数値シミュレーションモデルを作成し、土石流の氾濫による被害規模や範囲を予測することが有効である。

土石流の数値シミュレーションモデルにおいては、土石流の挙動をより詳細に捉えるために、飯尾らによる一次元河道を対象とした土石流の巨礫の分級現象モデル¹⁾、和田らによる一次元・二次元計算の結合モデル²⁾などが提案されている。しかし、飯尾らのモデルは、土石流の性質である巨礫の分級現象は表されているが侵食・堆積過程は考慮されていない。また、和田らのモデルは、これまで別個に行っていた一次元・二次元計算を、一次元・二次元計算双方に与える影響を考慮して同時に計算できるが一樣粒径を対象としている。土石流が幅広い粒径範囲を持つ混合材料によって構成されており、巨礫の分級現象・先端集中など、粒度特性が流れに強く影響することは広く知られおり、混合粒径を対象としたモデルが必要であると考えられる。

そこで、本研究では、混合粒径を対象とした結合モデルに、侵食・堆積過程を考慮した土石流の分級現象を組み込んだモデル（以下、「混合粒径モデル」とする）を作成し、一樣粒径を対象とした従来の結合モデルで数値シミュレーションを実施した場合と混合粒径モデルで実施した場合の結果を比較検討し、その妥当性を検証する。

2. 混合粒径モデルの概要

混合粒径モデルは、一樣粒径を対象とした結合モデルを、混合粒径を対象としたモデルに組み替え、さらに一次元領域を分級現象モデルに組み替えたものである。

混合粒径モデルにおける二次元土石流計算の基礎方程式を以下に示す。なお、一次元計算では y 方向成分について考慮しない方程式を用い、(2)は各粒径階ごとに計算する。

(1) 水・土砂を含めた全容積の保存式

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

(2) 土砂の体積の保存式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = iC_s \dots\dots\dots (2)$$

(3) x 方向（流下方向）の流水の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g \sin \theta_{wx} - \frac{\tau_x}{\rho h} \dots\dots\dots (3)$$

(4) y 方向（横断方向）の流水の運動方程式

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g \sin \theta_{wy} - \frac{\tau_y}{\rho h} \dots\dots\dots (4)$$

(5) 河床変動の式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 h : 流動深、 u : x 方向の流速、 v : y 方向の流速、 C : 土砂濃度、 z : 河床位、 t : 時間、 p : 水圧、 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_s : 河床堆積物の体積濃度、 θ_{wx} 、 θ_{wy} : x 、 y 方向の水面勾配、 τ_x 、 τ_y : x 、 y 方向の河床せん断力である。

一次元領域においては、断面方向に二層に分けて各粒径階ごとに土砂濃度を計算し、平均粒径 d_m はそれらの濃度から次式で求められる。

$$d_m = \frac{C_1 d_1 + C_2 d_2 + \dots + C_k d_k + \dots + C_{kmax} d_{kmax}}{C_1 + C_2 + \dots + C_k + \dots + C_{kmax}} \dots\dots\dots (6)$$

$$C_k = (C_{Uk} + C_{Lk}) / 2 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 C_k : 粒径階 k の土砂濃度、 C_{Uk} 、 C_{Lk} : 上層、下層の粒径階 k の土砂濃度、 d_k : 粒径階 k の粒径、 $kmax$: 最大粒径階である。

一方、二次元領域においては、一次元計算と比較して縦断勾配が緩くなり横断方向へ応力が分散することから、土石流内部での粒子の入れ替えが少ないと考えられる。よって、(8)に示す粒子数の保存則を用いて流動中の粒子の平均粒径の時空間的変化を算出し、一樣粒径で計算を行う。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Ch}{d_m^3} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Cuh}{d_m^3} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Cvh}{d_m^3} \right) = \frac{iC_s}{d_m^3} \dots\dots\dots (8)$$

3. 混合粒径モデルの検証

本研究で提案した混合粒径モデルの妥当性を検証するために、混合粒径モデルと一樣粒径を対象とした従来の結合モデルを用いてシミュレーションを行い、結果を比較した。図-1は混合粒径モデルと一樣粒径を対象とした従来の結合モデルとの比較に用いた単純な仮想的流域を示している。一次元計算領域は角度 θ_1 の一樣勾配とし、下流の二次元計算領域は x 軸方向に角度 θ_2 の一樣勾配とした。また、両計算領域ともに初期河床堆積厚は無いものとした。流入は一次元領域の上流端から、表-1に示す流入条件で与えた。総計算時間は1800秒である。

$\theta_1=20^\circ$ 、 $\theta_2=4^\circ$ の条件で行ったシミュレーション結果について比較をする。図-2は、混合粒径モデルにおける、粒径階別の一次元下流端を通過する流砂

量の時間変化を表している。混合粒径モデルでは、土石流先頭部に粒径の大きい砂粒子が多く含まれていることがわかる。

図－3は、一次元下流端を通過する流量の時間変化を表している。混合粒径モデルでは一様粒径の結合モデルと比較して流量のピークが大きいこと、一次元下流端に早く到達していることがわかる。これは、図－2に示されるように、混合粒径モデルによって土石流の巨礫の分級・先端集中が表されるようになったためであると考えられる。

図－4は、計算開始から 800 秒後の二次元平面上での堆積厚を示している。混合粒径モデルの方が一様粒径の結合モデルよりも堆積厚、堆積範囲ともに大きいのは、図－3に示されるように、ピーク流量の大きい土石流が二次元平面に早く到達したためであると考えられる。

図－5は、混合粒径モデルにおける、計算開始から 600 秒後の二次元平面上での砂粒子の粒径分布を示している。下流に行くほど粒径が大きくなるのは、二次元平面に到達した土石流先頭部が粒径の大きい粒子で構成されており、先頭部に粗い粒子を残したまま氾濫したからであると考えられる。

4. まとめと今後の課題

単純な仮想的流域上で混合粒径モデルと一様粒径の結合モデルによるシミュレーション結果を比較したところ、下流の二次元平面の堆積過程に違いが見られた。これは、混合粒径モデルによって、土石流の特徴である巨礫の分級・先端集中が表現可能になり、より合理的な二次元計算の流入条件を求めることができるようになったためと考えられる。

以上から、本研究で提案した混合粒径モデルは、土石流機構をより合理的に捉えているということが示されたといえる。

しかし、モデルの比較には様々な条件下の計算結果が必要であり、本研究の結果だけでは不十分である。今後さまざまな条件下でのシミュレーションを行う必要がある。

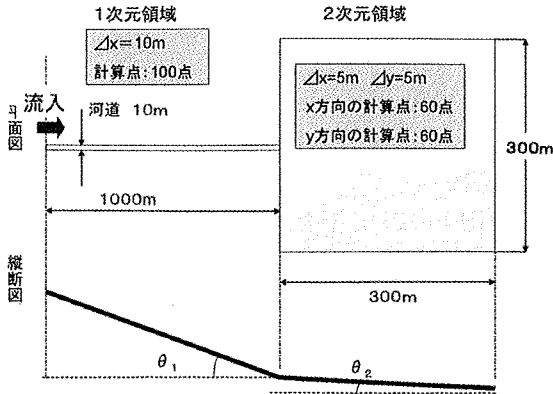
また、本研究では仮想的流域を対象としてシミュレーションを行ったが、混合粒径モデルの物理的な妥当性について、過去に起こった災害の再現計算や水理模型実験により検証する必要があるといえよう。

引用文献

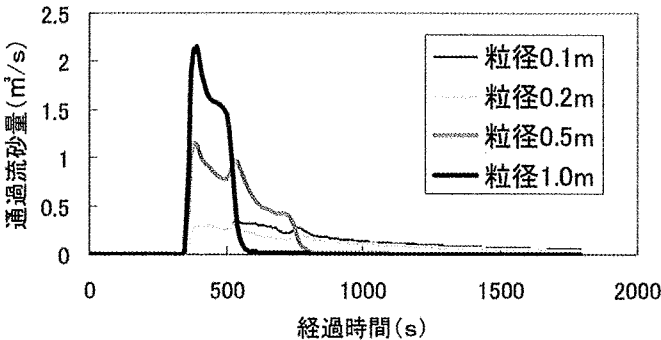
- 飯尾達朗ら(2007)：石礫型土石流に含まれる巨礫の分級現象に関する研究、平成 19 年度砂防学会研究発表概要集、p.72-73
- 和田孝志ら(2007)：土石流計算における 1 次元・2 次元シミュレーションモデルの結合、平成 19 年度砂防学会研究発表概要集、p.424-425

表－1 モデル比較に用いた流入条件

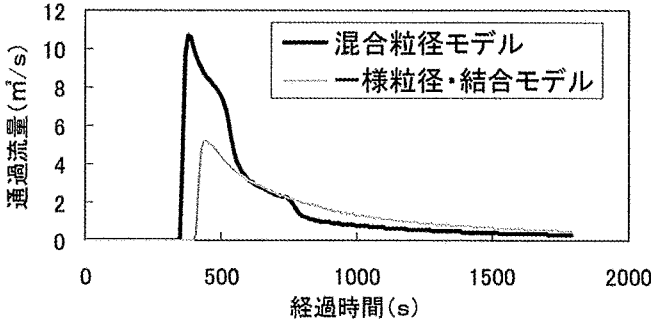
	混合粒径モデル				一様粒径・結合モデル
粒径 (m)	0.1	0.2	0.5	1.0	0.45
流入土砂濃度	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
平均粒径 (m)	0.45				0.45
流入流量 (m³/s)	400				400
供給時間 (s)	10				10



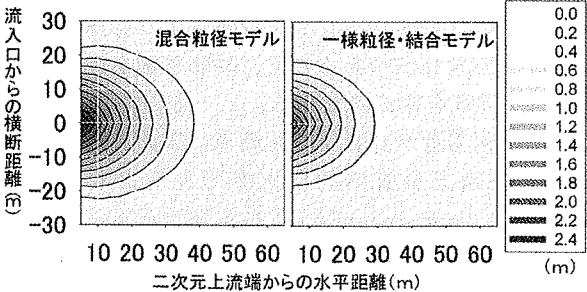
図－1 モデル比較に用いた仮想的流域



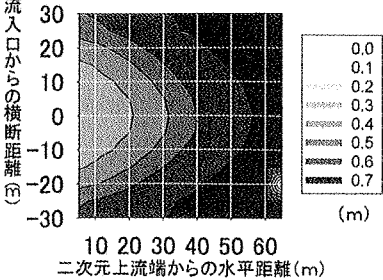
図－2 一次元下流端通過流砂量(混合粒径モデル)



図－3 一次元下流端通過流量



図－4 計算開始から800秒後の二次元平面上の堆積厚



図－5 計算開始から600秒後の二次元平面上の粒度分布