

3次元粒子法における土石流構成則モデルの定式化に関する基礎検討

(国研)土木研究所 寒地土木研究所 ○阿部 孝章, 藤浪 武史, 船木 淳悟

1. はじめに

近年砂防分野において、数値解析手法は広く普及しその活用はごく一般的となっている。PC性能の発展に伴い、より時空間解像度の高い計算や、3次元領域を対象とした計算モデルなども、徐々にではあるが実務に取り入れられてきている。また最近、計算メッシュによらない連続体解析手法として注目を浴びる粒子法(MPS法やSPH法)に基づく計算モデルは、自由界面のダイナミックな変動を安定的に解析可能であることや、二相流モデルも数多く提案されていることから、砂防分野でも注目され活発に研究されている。しかしながら、土石流計算手法としての活用は未だ研究途上の段階である。その理由の一つには土石流現象の複雑性があると思われ、二相流モデルを使った事例や混合体モデルを使った事例¹⁾などいくつかのアプローチと既往研究が存在する。

本稿では、計算点が空間に固定されず、流体の複雑挙動にも柔軟に適用可能であるという粒子法本来の長所に着目し、マクロな土石流の挙動を再現可能な粒子法の確立を目標として、土石流の構成則を3次元粒子法の枠組み内でモデル化することを試みる。仮想的な数値実験水路を作成し、その抵抗特性に関する基礎検討を報告する。

2. 数値計算手法と構成則モデルの定式化

数値計算手法としては越塚ら²⁾によるMPS陽解法を基本的な解析手法として採用した。支配方程式は以下の連続式と運動方程式である。

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = c_0^2, \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (1)$$

但し、 p は圧力、 ρ は密度、 c_0 は音速に関する数値計算上のパラメータ(=22.0)、 \mathbf{u} は流速、 ν は動粘性係数、 \mathbf{g} は重力加速度である。上式で微分演算子を含む2項はMPS法独自の粒子間相互作用モデルを用いて離散化される。構成則については椿ら³⁾により高濃度石礫流れの検討に導入された式を導入する。彼らの提案した構成則は鉛直2次元場のものであるが、そのうち x, z 成分のみについて仮想的な剪断応力として与え他の項は標準のMPS法と同様に計算するものとした。五十里ら⁴⁾の非ニュートン流体の離散化法を参考に、椿らの剪断応力 $\boldsymbol{\tau}$ を用い(1)式内の $\nu\nabla^2\mathbf{u}$ を $(1/\rho)\nabla\cdot\boldsymbol{\tau}$ で置き換える処理を行い、 $\boldsymbol{\tau}$ は各計算粒子 i で評価することで $\boldsymbol{\tau}_i$ を求めた。運動方程式中では剪断応力の発散を取る必要があるが、MPS法における標準の発散モデル²⁾がテンソル量にもそのまま適用可能であると仮定し、

$$(\nabla\cdot\boldsymbol{\tau})_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{\boldsymbol{\tau}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} w(r_{ij}), \quad \text{但し、} \boldsymbol{\tau} = \frac{\pi}{6} \beta^2 k_M \sigma d_m^2 \frac{(C/C_*)^2}{1 - (C/C_*)} \left(\frac{du}{dz}\right)^2 \mathbf{A} \quad (2)$$

と算定した。但し、 D_s は空間の次元数、 n_0 は基準粒子数密度、 r_{ij} は粒子 j の粒子 i に対する相対位置ベクトル、 $w(r)$ は粒子間距離 r に応じた重み関数であり、 $w(r) = (r_e/r) - 1 (r < r_e), = 0 (r > r_e)$ 、 $r_e = 2.4d_0$ は計算空間内で相互作用範囲を制限する有効半径である(d_0 は計算粒子径)。式(2)中で $\beta = 1.15$ 、 $k_M = 7.5$ 、そして摩擦係数 μ を変数に持つテンソル量 \mathbf{A} の3項は椿ら³⁾が導入した石礫流れを規定するパラメータ、 σ は材料密度、 d_m は平均砂礫径、 C は濃度、 C_* は最密充填濃度である。速度勾配(du/dz)は剪断応力の算定前段階で着目粒子 i と近傍粒子 j の重み付け総和を求め、 n_0 で割り規格化した。もう一点の仮定は土砂濃度 C で、ここでは著者ら⁵⁾の既報を踏襲して固定値とし、暫定的に $C = 0.4$ 、 $C_* = 0.55$ を与えた。これは、流れの非圧縮性を基本的な仮定としたMPS法において濃度分布、即ち密度分布が存在すると計算が著しく不安定になることがあるため、これを避けるためである。数値実験用のモデル水路は図-1に示すように、延長2m、幅7cm(但し側壁は非表示)、勾配15度(但し計算領域は平面的に表示)、計算粒子径 $d_0 = 5\text{mm}$ で3次元モデルを作成し、上流端から1m/s(0.0035m³/s相当)で計算粒子を流入させた。比較のため、標準MPS法については動粘性係数 $\nu = 1 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ (水とほぼ等しい値)、 $\nu = 1 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$ (粘度が大きい場合)をそれぞれ与え流況を比較した。水路底面も計算粒子で構成されるが、底面のみノンスリップ条件、側壁はフリースリップ条件とした。

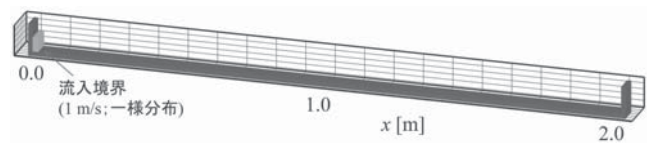


図-1 数値実験水路の初期状態図

3. 結果

図-2に示したのは各ケースにおける時系列的な流下状況の俯瞰図比較である。(a)の構成則モデルを適用したケ

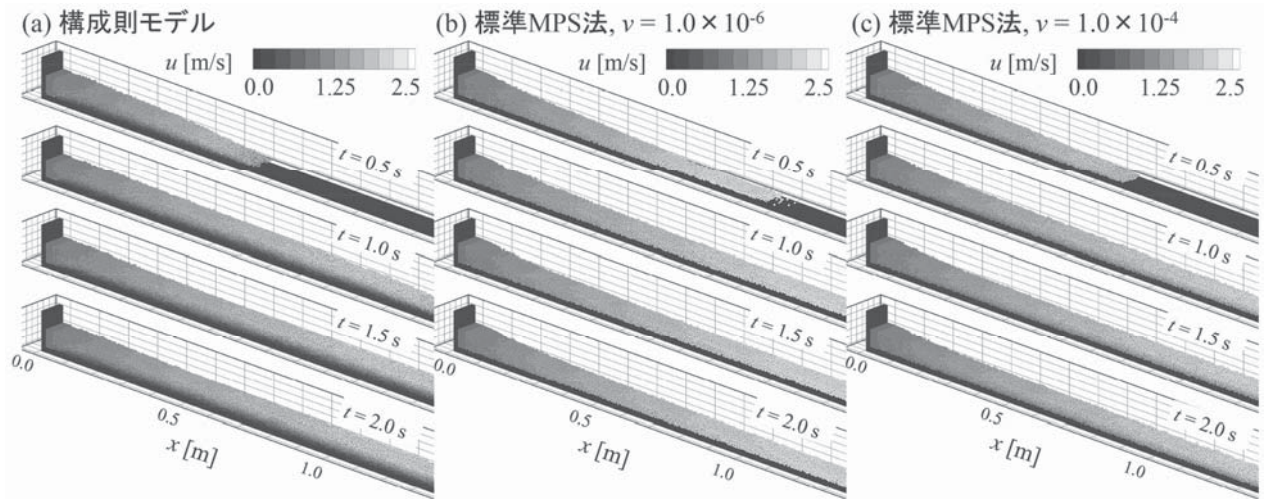


図-2 各ケースにおける時系列的な流速分布の計算結果

ースでは、 $t=0.5$ s の時点でフロントが 0.7 m 付近にあり、1.0 s で 1.3 m 付近を過ぎた後、1.5 s 以降はほぼ定常に近い状態となった。(b)の水に近い動粘性係数の場合は計算開始後高速で流下し、0.5 s の段階で既に 1.0 m に到達し、1.0 s 以降はほぼ定常となる様子が確認された。一方で、粘度の大きい(c)のケースでは、 $t=0.5$ s におけるフロント位置や流速分布は(a)のケースに類似している。ところが、底面付近での流速は(a)の場合より大きく 1 m/s を超えていることが確認された。

以上の流況と鉛直的な速度分布の傾向を定量的に把握するため、数値実験水路で概ね流下方向に等流に近い状態になったとみなせる $x=1.2$ m 地点付近で、 $t=2.0$ s 時点での流速分布を算定した結果を図-3 に示した。図中では各ケースの水面位置も描画している。図から、若干の差はあるものの3ケースとも表面流速は 2.5 m/s 前後であることがわかる。ケース間で大きく異なるのは流動深及び底面近傍流速で、構成則モデルありのケースでは底面付近で 0 に近く、鉛直方向に大きな速度勾配が発生している。一方(b)のケースでは底面付近でも概ね 2.5 m/s 以上の流速が発生しており、ほぼフラットな速度分布となっている。(c)のケースでは両者の中間的な傾向となっており、鉛直方向の速度勾配は生じているものの、底面付近でも 1.5 m/s 以上の流速が発生している。つまり、MPS 法において底面付近で 0 m/s から始まる流速分布を再現するにはノンスリップ境界条件を課すのみならず、構成則モデルのように速度勾配に依存する抵抗を考慮しなければならないことが示唆される。

本稿では、流動層が本来持つはずの濃度分布を一定値としていることから椿ら³⁾の剪断抵抗を精緻に評価しているとは言い難いが、少なくとも速度勾配の 2 乗に比例するという抵抗の効果により、図のような速度分布を得ることができたものと考えられる。

4. まとめ

本稿では、3次元粒子法の枠組における土石流構成則の離散化手法を提案した。実験スケールを模した簡単な数値実験により、通常のニュートン流体を想定した粘性項では再現が困難である流速分布が図-3のように現れることを数値解析的に確認した。今後は水理実験等との比較を通じ、モデルの適用性を更に検証していく予定である。

謝辞：本研究は第1著者が京都大学大学院在学時の研究に着想を得ており、当時の京都大学水山高久教授、立命館大学里深好文教授からは多くのご助言を頂きました。また本研究は一部に砂防学会数値砂防力学研究会の支援を受けており、研究会員各位からは多くの示唆に富むご助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木ら, 砂防学会誌, Vol.68(1), pp.13-24, 2015.
- 2) 越塚ら, 粒子法入門, 丸善出版, 230 p., 2014.
- 3) 椿ら, 土木学会論文報告集, Vol.317, pp.79-91, 1982.
- 4) 五十里ら, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68(2), pp.I_066-I_070, 2012.
- 5) 阿部ら, 砂防学会誌, Vol.63(6), pp.23-31, 2011.

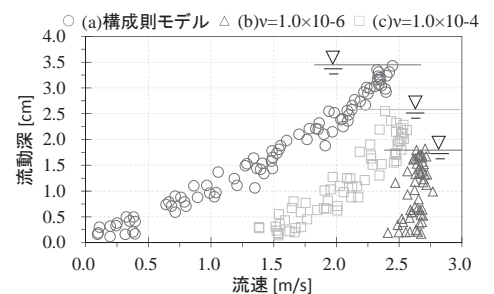


図-3 速度分布の定量比較