

粒径の異なる粒子挙動のシミュレーションを可能とする MPS-DEM 法の開発

Development of MPS-DEM method for particle behavior with different particle sizes

○豊田辰方*・小林範之*

Tatsunori TOYOTA, Noriyuki KOBAYASHI

1 はじめに

土中の水の流れを再現する手法として、非連続体である土石の挙動を解析する DEM(Distinct Element Method)と非圧縮性流体を解析する MPS 法(Moving Particle Semi-implicit)のハイブリッド解析手法である MPS-DEM 法がある。土石粒子による間隙を作り、そこを通過できる流体粒子を作ることによって浸透流を表現できるが、従来の MPS 法は粒径が等しい粒子(均一粒子)の解析のみに対応でき、粒径の異なる土石粒子と流体粒子を扱う解析に適用することができない。本研究では、粒径の異なる粒子(非均一粒子)の挙動のシミュレーションを可能とする EMPS 法に拡張し、EMPS-DEM 法を開発した。

2 解析手法

2.1 MPS-DEM 法

MPS-DEM 法の流体粒子と土石要素の運動方程式を次式に示す。MPS 法の支配方程式である Navier-Stokes 式を基本に圧力勾配項、粘性項、外力項で構成されている。

$$\text{流体粒子} \quad \frac{D\mathbf{u}_l}{Dt} = \left(-\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_l\right)_l + \left(-\frac{1}{\rho_l} \nabla p_l + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_l\right)_s + g \quad (1)$$

$$\text{土石粒子} \quad \frac{D\mathbf{u}_s}{Dt} = \left(-\frac{1}{\rho_s} \nabla p_s + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_s\right)_s + \left(-\frac{1}{\rho_s} \nabla p_s + \nu_{mix} \nabla^2 \mathbf{u}_s\right)_l + (g + a_{DEM}) \quad (2)$$

ここで、 ρ : 密度、 \mathbf{u} : 速度ベクトル、 p : 圧力、 ν_{mix} : 混相流の動粘性係数、 a_{DEM} : DEM で求めた要素間作用力 F_p による加速度ベクトル。なお、添え字 l, s はそれぞれ液相、固相を表している。

2.2 MPS 法

MPS 法は流体を有限個の粒子によって表し、挙動を粒子の運動によって計算する粒子法の一つである。非圧縮性流体の支配方程式は以下の連続の式と Navier-Stokes 式である。

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (3) \quad \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + g \quad (4)$$

MPS 法では式(4)を離散化する際に、各粒子に設定された影響域内で、粒子間相互作用モデルを用いて各微分演算子を離散化する。式(3)は従来の MPS 法では均一粒子を用い、粒子数密度(単位体積当たりの粒子数)を基準粒子数密度 n^0 に保つことで満足させる。

2.3 EMPS 法の開発

従来の MPS 法は、粒径が等しいことを前提条件として作られている。そのため、非均一粒子に対応するためにいくつかの計算式を改良した。従来の MPS 法と EMPS 法の改良部分の比較を表 1 に示す。ここで、 i : 基準となる粒子、 j : i の影響域内の粒子(近傍粒子)、 R : 影響半径、 r_e : 影響半径を決定するパラメータ、 L : 粒子直径、 r_{ij} : 粒子間距離、 w : 重み関数、 \mathbf{u}_{ij} : 粒子 i と j の速度ベクトル差、 \mathbf{u}^* : 仮の速度ベクトル、 n^* : 仮の粒子数密度、 V : 粒

*愛媛大学大学院農学研究科: Graduate School of Agriculture, Ehime Univ. キーワード: 粒子法, 粒径, 混相流

子の面積， V^0 ：非圧縮状態における粒子の面積の和， β ：表面判定のための係数。

非均一粒子を扱う場合，粒径を基準に決定される影響半径と粒子間の相互作用を適切に評価するために用いられる重み関数は従来の方法では不十分となるため，影響半径は平均値を用い，重み関数は粒径も考慮して求める。また，近傍粒子の重み関数の和である粒子数密度は，一定に保てず，粒径が大きく異なる場合には基準粒子数密度 n^0 を用いることができない。そのため，非圧縮条件を速度の発散が0という条件を用いて表現し，自由表面判定に粒子の面積を用いた式を適用する。

表 1 改良前後の式の比較

	従来のMPS法	EMPS法
影響半径	$R = r_c \times L$	$R_{ij} = \frac{r_c}{2} (L_i + L_j)$
重み関数	$w(r_{ij}, R) = \begin{cases} \frac{R}{r_{ij}} - 1 & (r_{ij} \leq R) \\ 0 & (r_{ij} > R) \end{cases}$	$w(r_{ij}, R_{ij}) = \begin{cases} \frac{R_{ij}}{r_{ij}} - 1 & (r_{ij} \leq R_{ij}) \\ 0 & (r_{ij} > R_{ij}) \end{cases}$
	$w_{ij} = w(r_{ij}, R)$	$w_{ij} = \frac{L_j}{L_i} w(r_{ij}, R_{ij})$
粒子数密度	$n_i = \sum_{j \neq i} w_{ij}$	$n_{k,i} = \sum_{j \neq i} \frac{r_{k,ij}^2}{r_{ij}^2} w_{ij}$
非圧縮条件	$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n^*}{n^0}$	$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t_{MPS}} \nabla \cdot \mathbf{u}^*$
		$\langle \nabla \cdot \mathbf{u} \rangle_i = \sum_{j \neq i} \sum_{k=x,y} \left[\frac{\mathbf{u}_{k,ij} \cdot \mathbf{r}_{k,ij}}{n_{k,i}} \frac{w_{ij}}{r_{ij}^2} \right]$
自由表面判定	$n^* < \beta n^0$	$\sum_{j \neq i} V_j w_{ij} < c' V^0$

3 解析条件

矩形容器中のダム崩壊モデルを非均一粒子型と均一粒子型の2種類作成して解析を行った。解析条件として流体の粒径0.5(cm)，密度1.00(g/cm³)，土石粒子のパラメータを表2のように設定した。非均一粒子型の解析条件として土石粒子の粒径を流体粒子の5倍とした。一方，均一粒子型では複数の粒子で集合体(group)を作り，粒径5倍の土石粒子を表現した。また，土石粒子の質量を等しくするために土石粒子密度を面積比に応じて大きくした。

表 2 土石粒子の計算パラメータ

パラメータ	土石粒子数	土石粒子径(cm)	土石粒子密度(g/cm ³)
非均一粒子	30	2.5	2.65
均一粒子	570(30group)	0.5	3.50

4 解析結果と考察

解析結果を図1に示す。左から順に0.00s, 0.57s, 1.80sの挙動である。均一粒子型の解析結果は非均一粒子型のものとは比べ，短時間で運動が収まっている。これは，土石粒子間に働く摩擦が大きく，水粒子のエネルギーが土石粒子に衝突するときに使われるからであると考えられる。この結果から，非均一粒子型は摩擦の影響が小さく挙動が滑らかであることが分かる。また，従来のMPS法と比べ，EMPS法を用いることで粒子数が少なくなり，計算コストを小さくすることができる。

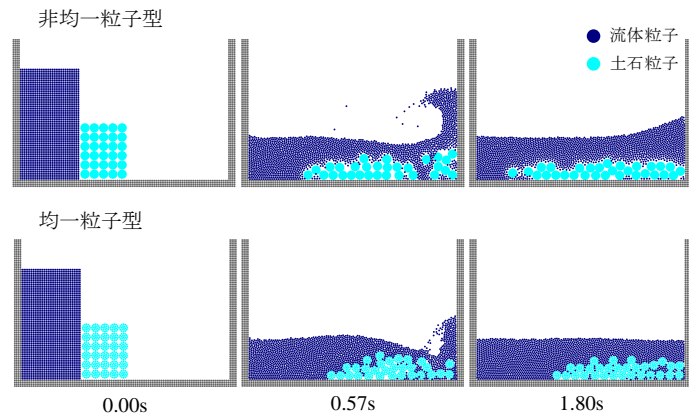


図 1 粒子挙動の経時変化

また，従来のMPS法と比べ，EMPS法を用いることで粒子数が少なくなり，計算コストを小さくすることができる。

5 おわりに

本手法では，粒径が5倍異なる場合でも安定して解析できることを確認した。今後，大きく粒径の異なる粒子に対応できるよう改良し，三次元に拡張させ浸透流を再現する。

参考文献：[1]越塚誠一(2005)：粒子法，丸善，[2]田中正幸・益永孝幸・中川泰忠(2009)：解像度可変型MPS法，日本計算工学会，[3]Koshizuka, S.・Yoon, H. Y.・Yamashita, D.・Oka, Y.(2000)：Numerical analysis of Natural Convection in a Square Cavity Using MPS-MAFL, Computational Fluid Dynamics Journal, 8, 4, 485-494,