

PMS モデルを用いた固液混相流解析に関する基礎的研究（シンポジウム講演概要）
Study on solid-liquid multiphase flow analysis using PMS model
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

森 宏大（神戸大・工） 大石哲（神戸大・都市安全）

Kodai MORI, Kobe University

Satoru OISHI, Kobe University

E-mail: morinko215@icloud.com

This study attempted to investigate the behavior of solid-liquid multiphase flow using the PMS (Passively Moving Solid) model which modifies rigid body positions after fluid calculations using the SPH method as particles with different densities. As a result, sinking of the object due to the coordinate transformation process was observed.

1. 序論

土砂崩れに人が巻き込まれた際に効果的に救出するために、最終的にどのような位置に埋没されるのかを調べることが重要である。

本研究では SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法により土砂崩れを、PMS(Passively Moving Solid)モデルにより人(剛体)を想定した固液混相流解析を行う。固液混相流モデルとして、非圧縮性流体である水を想定したシミュレーションの既往研究はあるが、本研究では土を圧縮性流体として物体に作用させ、巻き込まれた剛体の挙動を調べた。

2. SPH 法の概要と支配方程式

本研究では粒子法の一つである SPH 法を土砂の再現に用いている。また、本研究のプログラムで用いられている近似式や支配方程式は野中(2020)¹⁾を引用している。

各物質間に掛け合わせるカーネル関数として、(コンパクトサポート条件)

$$\omega_h^{SPH}(|\xi - x|) = 0, |\xi - x| \geq h \quad (1)$$

(ユニティ条件)

$$\int_{\Omega} \omega_h^{SPH}(|\xi - x|) d\xi = 1 \quad (2)$$

を満たす必要がある。それに加えて偶関数特性、非負性条件を満たすカーネル関数 ω_h^{SPH} として Bui ら(2008)²⁾を参考に正規化された粒子間距離 $s = r/h$, 粒子間距離 $r = |\mathbf{x}^I - \mathbf{x}^J|$, スムージング長さ $h = 1.2\Delta d$ を用いた

$$\omega_h^{SPH} = \alpha \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}s^2 + \frac{3}{4}s^3 & (0 \leq s \leq 1) \\ \frac{1}{4}(2-s)^3 & (1 \leq s \leq 2) \\ 0 & (2 \leq s) \end{cases} \quad (3)$$

を用いる。 α は計算する次元により異なり、本研究では3次元での計算のため

$$\alpha = \frac{1}{\pi h^3} \quad (4)$$

を用いる。これらを用いてある物理量 $f(\mathbf{x}^I)$ は、質量 m 、密度 ρ を用いて

$$f(\mathbf{x}^I) = \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} f(\mathbf{x}^J) \omega_h^{SPH} \quad (5)$$

と離散化される。 J は中心粒子 I の影響半径内に存在する粒子を示し、 N はその周辺粒子 J の総数を表す。

物理量 $f(\mathbf{x}^I)$ の一次空間微分は

$$\frac{\partial f(\mathbf{x}^I)}{\partial \mathbf{x}} = \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} (f(\mathbf{x}^J) - f(\mathbf{x}^I)) \frac{\partial \omega_h^{SPH}}{\partial \mathbf{x}^I} \quad (6)$$

で求められる。

支配方程式として質量保存則を式(6)に当てはめると

$$\frac{D\rho}{Dt} = \sum_{J=1}^N m^J (v_i^I - v_i^J) \frac{\partial \omega_h^{SPH}}{\partial x_j^I} \quad (7)$$

、運動方程式は

$$a_i^I = \frac{\partial v_i^I}{\partial t} = \sum_{J=1}^N m^J \left(\frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} + \frac{\sigma_{ij}^J}{(\rho^J)^2} \right) \frac{\partial \omega_h^{SPH}}{\partial x_j^I} + g_i \quad (8)$$

と表される。³⁾

3. PMS モデルによる物体位置の更新

Koshizuka *et al.*(1998)³⁾で提案された PMS (Passively Moving Solid) モデルは、剛体構成粒子を密度の異なる流体粒子として土粒子同様流体計算を行った後に、剛体の相対位置、速度の修正を行う。以下に剛体位置補正過程の概念図を示す。

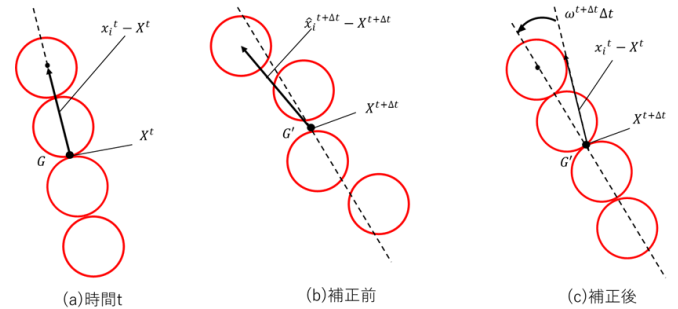


Fig. 1 Conceptual diagram of the rigid body position correction process⁴⁾

粒子計算後の剛体粒子の速度ベクトル、位置ベクトルをそれぞれ $\hat{v}_i^{t+\Delta t}$, $\hat{x}_i^{t+\Delta t}$ とすると重心座標は

$$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{x}_i^{t+\Delta t} \quad (9)$$

と表され、慣性テンソル I_G^t を用いて角速度ベクトルは

$$\omega^{t+\Delta t} = m I_G^{t-1} \cdot \sum_i (\mathbf{x}_i^G \times \hat{v}_i^{t+\Delta t}) \quad (10)$$

と求められる。そこで剛体構成粒子の位置 $\mathbf{x}_i^{t+\Delta t}$ は

$$\mathbf{x}_i^{t+\Delta t} = \mathbf{x}_i^t + \mathbf{X}^{t+\Delta t} - \mathbf{X}^t + (\omega^{t+\Delta t} \times \mathbf{x}_i^G) \Delta t \quad (11)$$

と更新される。 $X^{t+\Delta t} - X^t$ は並進運動を表し、 $(\omega^{t+\Delta t} \times x_i^G)\Delta t$ は回転運動を表している。速度は(12)式で修正される。

$$v_i^{t+\Delta t} = \frac{x_i^{t+\Delta t} - x_i^t}{\Delta t} \quad (12)$$

4. 初期位置の違いによる剛体位置の推移

ここでは粘着力 $C=0.0[\text{kPa}]$ の場合について (a)物体 $(0.3[\text{m}] \times 0.3[\text{m}] \times 2.0[\text{m}])$ -土粒子 $(2.4[\text{m}] \times 2.4[\text{m}] \times 2.4[\text{m}])$ 距離 $X=0.0[\text{m}]$, (b) $X=1.2[\text{m}]$ とで剛体の重心座標がどのように変化するかを調べた。摩擦による影響を調べるために物体初期位置を z 軸正の方向に $0.1[\text{m}]$ だけずれていることに注意されたい

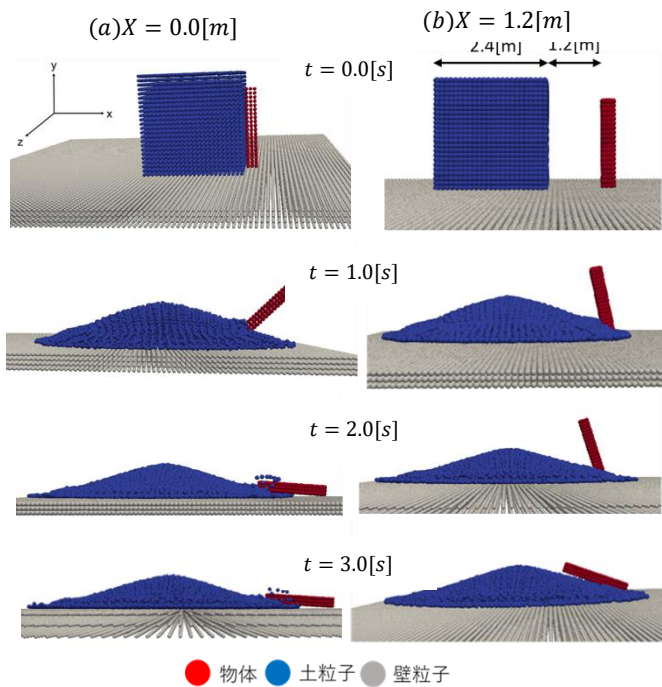


Fig. 2 Deformation state at each time

Fig.2より剛体にかかる流体力の作用位置の違いから剛体の転倒する向きが異なることが窺われる。Fig.3に (b) $X=1.2[\text{m}]$ における物体の初期重心座標からの各軸方向への変化量を示す。

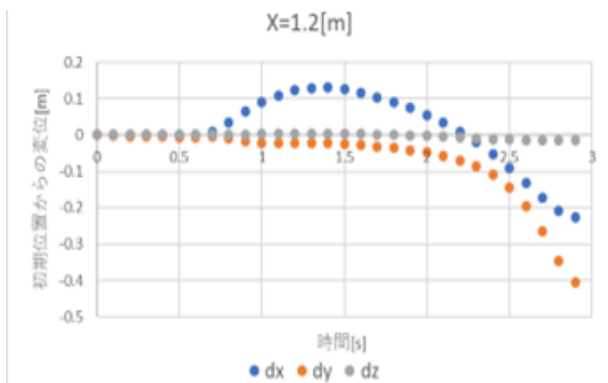


Fig. 3 Displacement in each axis direction

Fig.3の dx, dz の変位から、 $0.7[\text{s}]$ あたりで土粒子が物体に作用したことが読み取れる。その後転倒による座標変化が見られたと考えられる。しかし、 0.7 秒以前に微少ではあるが y 軸負の方向(鉛直下向き)に変位していることが見られる。

5. PMS モデルの特性

Fig. 4のような物体を重力と垂直抗力の釣り合いで静止させるシミュレーションを行ったところ線形的な微小沈み込みが見られた。

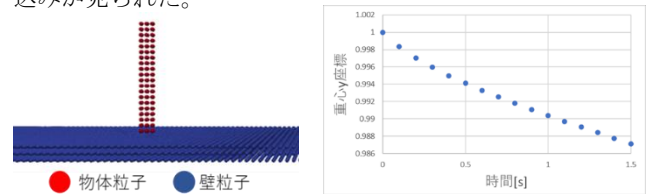


Fig. 4 Initial state and displacement in y direction

このことは、PMS モデルの座標修正の手順に起因している。Fig.5は重心沈み込みの概念図を示している。

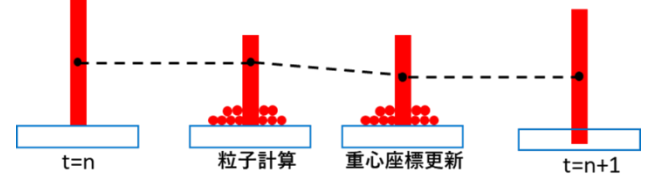


Fig. 5 Conceptual diagram of the sinking of the centre of gravity y -coordinate

密度の異なる粒子として自重崩壊する剛体の重心を、各粒子の平均値として求めているため重心座標が沈み込む。その後相対位置を補正するために全体として沈み込むような挙動が見られたことが考えられる。

6. 結論

固液混相流解析として PMS モデルを用いた解析を行ったところ、座標修正過程に起因する沈み込みが見られた。

参考文献

- 1) 野中沙樹：SPH シミュレーションによる斜面崩壊の定量的評価に関する研究，修士論文，神戸大学工学研究科，2020
- 2) Ha H. Bui, R. Fukagawa, K. Sako and S. Ohno : Lagrangian meshfree particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterial using elastic-plastic soil constitutive model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 32, pp. 1537-1570, 2008
- 3) 浅井光輝：明解粒子法 SPH,MPS,DEM の理論と実践，丸善出版,2022
- 4) S. Koshizuka, A. Nobe, and Y. Oka : Numerical analysis of breaking waves using the moving particle-semi-implicit method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 26, No. 7, pp. 751-769, 1998
- 5) 後藤仁志：流れの方程式，森北出版，2022，551p.