

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○鶴田 修己
 京都大学大学院工学研究科 正会員 原田 英治
 京都大学大学院工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

マウンド魚礁や埋立地の造成には、海面からの土砂やブロックの投入が経済的な工法として多用されており、水中投入された土砂やブロック群挙動の的確な予測は重要な検討事項である。本研究では、CIP-CUP法をベースとした混相乱流場の数値解析手法と、個別要素法によるブロック挙動の追跡をカップリングしたモデル¹⁾を3次元に拡張し、単一ブロックの水中沈降過程を対象にした数値シミュレーションを実施した。また、混相乱流場の空間解像度に注目したケーススタディと実験結果との比較から3次元に拡張した混相乱流モデルの再現性を検討した。

2. 固液混相流モデルの概要

(1) 粒子 - 流体混合系流れ

まず、CIP-CUP法を用いて、混相流場を求解する。基礎式は、粗視化された連続式および Navier-Stokes 式によって記述される。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \{2(\nu + \nu_i)\mathbf{S}\} + \mathbf{g} \quad (2)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \phi_p \rho_p + (1 - \phi_p) \rho_l \\ \mu &= \phi_p \mu_p + (1 - \phi_p) \mu_l \\ \mathbf{u} &= \phi_p \mathbf{u}_p + (1 - \phi_p) \mathbf{u}_l \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\nu_i = (C_s \Delta)^2 (2\mathbf{S} : \mathbf{S})^{1/2} \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \{ \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \} \quad (6)$$

ここに、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 ρ : 密度、 p : 圧力、 \mathbf{g} : 重力加速度、 μ : 粘性係数、 ν_i : SGS 乱流粘性係数、 \mathbf{S} : 歪み速度テンソル、 C_s : Smagorinsky 定数、

Δ : 計算格子幅、 ϕ : 各計算格子に含まれる各相の占有率であり、式中の下付添え字 p , l はそれぞれ固体粒子及び流体を示す。なお、本研究では $C_s = 0.1$ としているが、ここでは LES を導入することで乱流現象を取り扱うことが可能な枠組みを示すことを第一の目的とし、Smagorinsky 定数 C_s の値の妥当性については今後の研究課題とする。

(2) 個別要素法

(1)で求めた混相流場から粒子に作用する流体力を計算し、個別要素法よりブロック構成要素の運動を追跡する。なお、Passively Moving Solid Model²⁾を用いてブロック構成要素の剛体連結を模擬した。

$$\frac{dm_p \mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_{flow} + \mathbf{F}_{pint} + \mathbf{F}_g \quad (7)$$

$$\frac{d(I_p \cdot \boldsymbol{\omega}_p)}{dt} = \mathbf{T}_{flow} + \mathbf{T}_{pint} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_p = \phi_p \Delta^2 \rho_p \frac{D\mathbf{u}}{Dt} \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_{flow} = \int_{V_p} \mathbf{f}_p dV \quad (10)$$

$$\mathbf{T}_{flow} = \int_{V_p} \mathbf{r}_c \times \mathbf{f}_p dV \quad (11)$$

ここに、 m_p : 個々の要素質量、 \mathbf{v}_p : 要素移動速度ベクトル、 t : 時間、 \mathbf{f}_p : 計算格子中の要素に作用する流体力、 \mathbf{F}_{flow} : 要素に作用する流体力、 \mathbf{F}_{pint} : 要素間相互作用力ベクトル、 \mathbf{F}_g : 体積力、 I_p : 慣性テンソル、 $\boldsymbol{\omega}_p$: 要素の角速度ベクトル、 \mathbf{T}_{flow} : 流体力に起因するトルク、 \mathbf{T}_{pint} : 要素間力に起因するトルク、 V_p : 混相領域、 \mathbf{r}_c : 要素の回転中心から要素を含む計算格子への相対距離である。 \mathbf{F}_{pint} の力学的モデルは、Voigt 物体(スプリングとダッシュポットの並列連結)をベースに構成されており、粒子間衝突の粘弾性挙動が表現される。なお、その際計算に必要となるスプリングおよびダッ

表-1 case 毎の計算格子幅, 要素径比

case1 : $L_{cell} = d/4.0$	case2 : $L_{cell} = d/5.0$	case3 : $L_{cell} = d/6.0$
----------------------------	----------------------------	----------------------------

シュポットに関するモデル係数は、ヘルツの弾性接触理論を準用して設定した。個別要素法の安定した計算には計算時間刻みを小さくする必要があり、固液混合系流れの計算刻み 1 ステップに対して、複数回数の個別要素法計算のループを実施することになる。この過程で、流体力 f_p は計算効率に考慮して一定値を与えている。上記計算後は、新しく移動した要素の位置および速度ベクトルに応じて、各計算格子での要素占有率と要素を含む計算格子における流れ場を、次式の

$$\mathbf{u}_p = \mathbf{v}_p + \boldsymbol{\omega}_p \times \mathbf{r}_c \quad (12)$$

によって修正し、次ステップに進む。

3. 単一ブロック沈降過程

(1) 計算条件及び実験条件

単一要素を三個連結して単一ブロック剛体を模擬し、水槽上部から静かに投下して、その挙動を追跡する。本研究では、流れ場の計算格子を要素径の 4~6 分の 1 の範囲で変えて実施し、その結果を比較検討した。表-1 にシミュレーションの計算格子幅 L_{cell} と要素径 d との比率設定を case 別に示す。実験に合わせて、計算領域は $0.136 \times 0.136 \times 0.5[m]$ とし、粒子の比重：2.23、粒子の粒径：0.02[m]とした。なお、シミュレーション結果の再現性に配慮して、固液混合系流れの計算刻み 1 ステップに対して、個別要素法の計算回数は 2 回とした。

(2) 実験とシミュレーション結果の比較

図-1 に単一ブロックの重心座標の時系列を示す。また、図-2 に比較的良好な結果を示した case2 のスナップショットと実験画像を示す。図-1 より、case1 と比べて空間解像度の高い case2,3 が、実験結果に近づくことが理解される。また、図-2 に示した case2 のスナップショットからは、ブロック沈降姿勢に僅かな違いが認められるものの、概ね良好な沈降過程が確認できる。

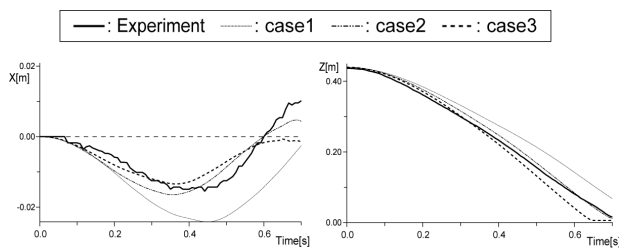


図-1 ブロック重心座標の時系列

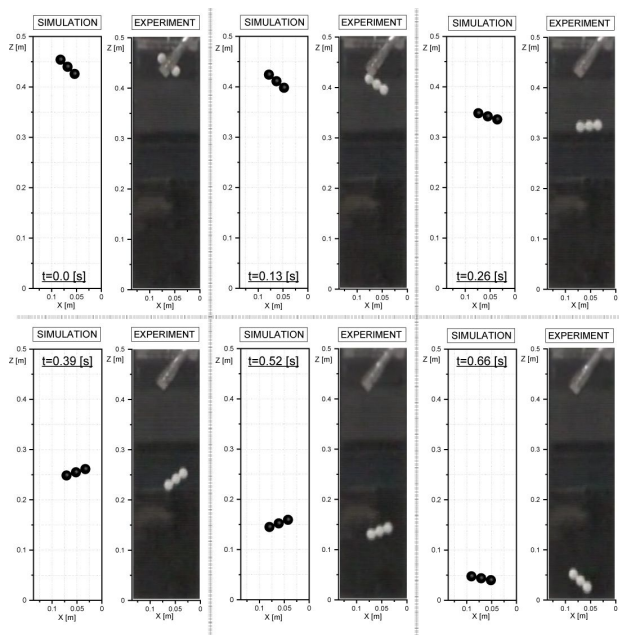


図-2 スナップショット(case2 vs.実験)

4. おわりに

本稿では、開発した 3 次元固液混相乱流モデルの再現性について、対象にした実験とシミュレーションの比較から検討した。今後、渦構造の詳細な検討や、乱流モデルの高精度化を実施したい。

参考文献

- 1) 原田英治, 後藤仁志, 鶴田修己 : 固液混相流モデルの捨石群の沈降・堆積過程計算への適用例, 土木学会論文集B, Vol.66, No.1 pp.25-34,2010.
- 2) Koshizuka,S.,A.Nobe and Y.Oka(1988) : Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method,Int.Numer.Meth.Fluids,Vol.26,pp. 751-769.