

形状を持つ物体の水中落下の粒子-流体連成シミュレーション

環境防災研究室 4年 デ・ラ・フエンテ・ロドリゲス・ファン・マヌエル

福元 豊

大塚 悟

1. はじめに

水は地盤に影響を与え、ひび割れや他の侵食関連の現象を引き起こす可能性がある。したがって、地盤粒子と水の相互作用が見られるシミュレーションの実行方法を理解する必要がある。液体中の粒子（さまざまな形で）の落下を研究し、方法が正しいかどうかを確認する。以降では、計算法の定式化を示すとともに、固液連成模型を用いた観察実験を通して提案法の妥当性を報告する。

2. DEM-LBM 連成モデル詳細

2.1 Discrete Element Method (DEM) 理論

DEMは、粒子と相互作用に焦点を当てた数値モデリングまたはシミュレーションである。荷重とひずみを仮想サンプルに適用し、物理実験をシミュレートできる。

$$m_p \frac{d^2 x_p}{dt^2} = \sum_{nc} F^{con} + F^{gra} + F^{hyd}$$

$$I_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} = \sum_{nc} T^{con} + T^{hyd} + \sum_{nc} T^{rol}$$

接触力 F^{con} と接触トルク T^{con} の衝突則は、Voigt モデルに従う DEM によって支配される。前の式において重力 (F^{gra}) と粒子の質量 (m_p) を考慮する。下の式において粒子の慣性モーメント (I_s) と回転変位 (θ_s) を表す。 F^{hyd} と T^{hyd} は流体力と流体トルクも必要である。

2.2 Lattice Boltzmann Method (LBM) 理論

LBM は離散化した空間格子における各粒子の衝突と伝播について粒子の速度分布関数を用い、その時間発展方程式を解くことで巨視的な流れ場を求める計算手法である。

$$f_\alpha(x + c_\alpha \delta_t, t + \delta_t) - f_\alpha(x, t) = \Omega_\alpha(x, t)$$

f_α は密度分布関数、 c_α は α 方向の粒子の並進速度ベクトルは二次元下で速度モデルとして D2Q9 モデルが主に用いられ、 $\alpha = 0 \sim 8$ である。また、 x は流体ノードの位置ベクトル、 t は時間、 δ_t は離散時間を表す。

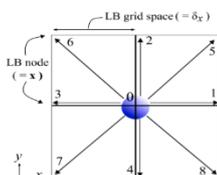


図 1. D2Q9 モデル

単一緩和時間 (SRT) モデルにおいて、衝突演算子 Ω_α はこの式で表す。

$$\Omega_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau} \{f_\alpha(x, t) - f_\alpha^{eq}(x, t)\}$$

式において、緩和時間 τ は動粘度に直接関係する。

2.3 DEM-LBM

DEM と LBM を連成させる場合、移動する固体と液体の境界面を取り扱うとともに流体と固体の相互作用力を算出する方法が必要となる。PS モデルと呼ばれる。固体内部の各格子点が占める固体領域の体積分率を求め、その値を LBM の基本式に含めて解く方法を採用した。この方法は各格子点で必要な演算は局所性を保ったままにすることができる利点がある。

$$\Omega_\alpha(x, t) = -\frac{1}{\tau} (1.B(x,t)) (f_\alpha(x, t) - f_\alpha^{eq}(x, t)) + B(x,t)\Delta_\alpha$$

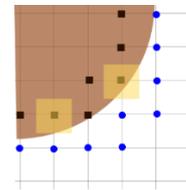


図 2. 解析結果および破壊形態の比較

3. 研究実験

今回の実験では、アクリルの四角形、円形、L型の形を使用し、指定された位置に落下することで構成されている。形的位置を取得するための参照ポイントが必要である。このデータから、シミュレーションと位置と時間のグラフを比べられる。水平・鉛直にそれぞれ 250x300 格子配置した。

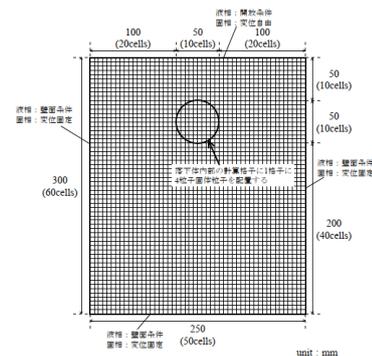


図 3. 実験のモデル

4. DEM-LBM シミュレーション

最初にシミュレーションを実行し、使用するのに最も便利な値を決定する。具体的には、データ δ_x と δ_t は、緩和時間と粘度に関連している。最初は $\delta_x=1 \times 10^{-4}$ のデータを使用していたが、計算時間が長くなった。水の粘度が 1×10^{-6} になるように、 δ_x 、 δ_t 、 τ の変更する。それに基づいて値が大きくなった。これとは別に、数学的な安定性のために、 δ_x / δ_t の関係と水のviscosityの値を守った。四角形では、値が大きくても、違いは少ないので、 $\delta_x = 5 \times 10^{-4}$ を使用する。L型の形では、四角形と同じように $\delta_x = 5 \times 10^{-4}$ を使用する。しかし、円形では、大きくなるにつれて跳ね返りが消えていくので、 $\delta_x = 1 \times 10^{-4}$ を使用する。

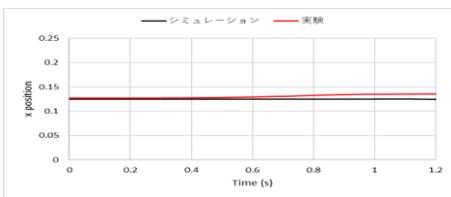


図 4. 四角形の x 位置と時間の比較

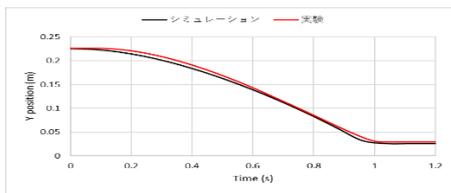


図 5. 四角形の Y 位置と時間の比較

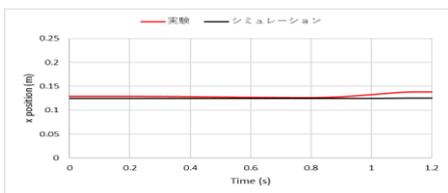


図 6. 円形の x 位置と時間の比較

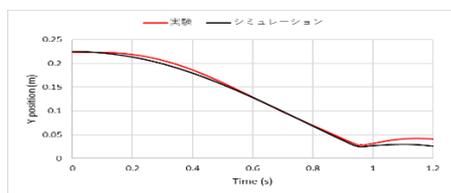


図 7. 円形の Y 位置と時間の比較

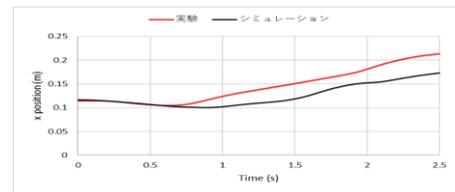


図 8. L型の形の x 位置と時間の比較

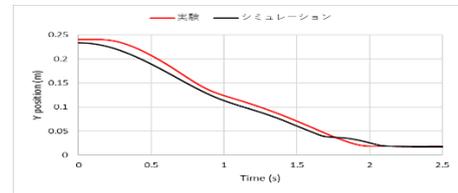


図 9. L型の形の Y 位置と時間の比較

分析するために、このグラフだけでなく、流速分布も作成した。四角形と円形の流速分布では、落下しながら渦が2つ発生している。L型の形の流速分布では、落下中に回転するため、不均一な分布が発生される。

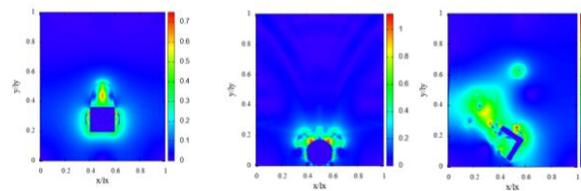


図 10. 四角形, 円形, L型の形の流速分布

5. 結論

実験とシミュレーションで得られた結果に基づいて、DEM-LBM 連成法は有効であることを理解することができる。このために、粒子の数値的安定性を守るのは必要である。実験とシミュレーションの比較により落下の挙動が一致した。DEM と LBM 連成シミュレーションのモデルで実験装置と同じ大きさでの再現計算が可能である。

L型の形が落下中に回転するため、動きが非常に変わる。これは、この形で動きが3次元の影響がほかの形より必要だと思われる。違いがあるのに、3次元でシミュレーションをすれば、実験のように再現するはずだ。ほかの形では、動きの変更もあり、3次元の影響である。特に、落下の後で、物体の動きを変える。

参考文献

- 1) O'Sullivan C. (2011) Particulate discrete element modelling: a geomechanics perspective, Chapter 1, Taylor and Francis, New York.
- 2) Yutaka Fukumoto, Hongxuan Yang, Tokuzo Hosoyamada, Satoru Ohtsuka: 2-D coupled fluid-particle numerical analysis of seepage failure of saturated granular soils around an embedded sheet pile with no macroscopic assumptions.