

水中での砂柱崩壊実験に基づく土粒子と間隙水の連成計算手法の高度化

長岡技術科学大学 ○齋藤 雅史

福元 豊・大塚 悟

1. はじめに

液状化や内部侵食のような間隙水を伴う地盤の破壊現象を微視的に調べるために、土粒子と間隙水の両方を DEM (Discrete Element Method, 個別要素法) と LBM (Lattice Boltzmann Method, 格子ボルツマン法) を連成させて直接解くことが出来る数値計算について検討した。特に本研究では、高レイノルズ数の条件に対応するための LES (Large Eddy Simulation) モデルを導入した。計算モデルの妥当性を検証するために水中で砂柱崩壊実験を行い、解析で得られた結果と比較した。

2. 土粒子と間隙水の連成モデル

DEM は、固体粒子同士の衝突と各粒子の並進・回転運動を逐次追跡する手法である。固体粒子は変形しない剛体であるが粒子同士のオーバーラップを許容し、それを相対変位として接触力を求める。一方 LBM は、デカルト格子に配置した速度分布の確率密度関数を陽的に時間発展させることで巨視的な流れ場を求める手法で、複雑物体を含む流れに適している。LBM による流体計算の解像度は図-1 のように固体粒子の大きさ以下となり、格子幅 h は固体粒子直径よりも十分に小さい値を設定する。格子ボルツマン方程式における 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。

今回は LES モデルとして Smagorinsky model を導入した。

DEM と LBM を連成させる場合、移動する固液境界面の取り扱うとともに流体と固体の相互作用力の算出する方法が必要となる。本研究では、固体内部の格子点における速度分布関数をその格子点が占める固体領域の体積分率と固体の移動速度に応じて再配分する手法を採用したり、この方法を用いて、直交格子空間における球形の固液境界面形状を補完しながら境界に non-slip 条件を課した。流体と固体の相互作用力は、固体領域を含む格子点での運動量変化を総和することで求めた。

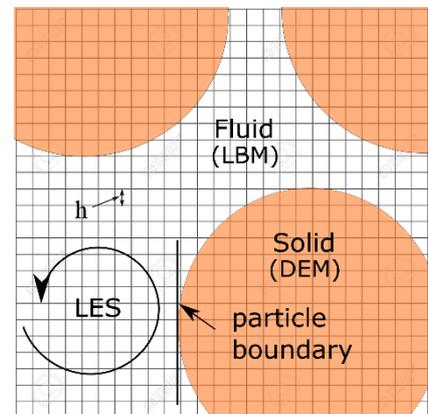


図-1 LBM 直交格子空間における DEM 粒子

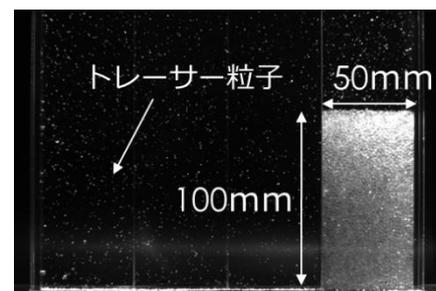


写真-1 実験装置

3. 水中での砂柱崩壊実験

写真-1 に示す砂柱崩壊装置を使用して、水中で土粒子の動きを高速度カメラで 60fps により撮影した。試験装置は横 200mm、縦 300mm で装置に仕切りを付け水中にガラスビーズ、トレーサー粒子を入れて行う。ガラスビーズは直径 2mm、4mm、6mm の 3 パターン行いその中から 2mm の結果のみ示す。

ガラスビーズは実験装置の右端に横 50mm、縦 100mm となるように積み上げ砂柱とし、仕切りを引き上げることで崩壊させる。その様子を撮影した動画に対して PIV 画像解析を行い、流速分布 (m/s) を出力する。

実験結果より一部抜粋した画像を図-2(a), (b)と図-5(a), (b)に示す。図-2(a)は仕切りを外した直後の砂柱の変形が表れており、図-2(b)は崩壊が終了している。図-5(a)は仕切りを外した直後に流速の変化が粒子の左側面に表れており、図-5(b)は砂柱崩壊が終了した後、装置内の左下部と中間部で渦の発生を確認した。

4. 土粒子-間隙水連成シミュレーションと実験結果との比較

解析モデルは横 200mm, 縦 150mm の枠内の右下に直径 2mm, 4mm, 6mm の粒子を横 50mm, 縦 100mm になるよう不均一に配置し、実験同様仕切りを設け引き上げることによって崩壊の計算を行った。結果は2mmのみを示す。解析結果より図-2(a)に相当する時間の様子を図-3(a)と図-6(a)、図-2(b)に相当する時間の様子を図-3(b)と図-6(b)に示す。図-4 は各粒径で先端位置の移動距離を表している。流速の単位は (m/s) である。これより砂柱崩壊の初期段階では崩壊の様子はほぼ一致していたが、最終的な崩壊形状は近いが図-4 から分かるように崩壊は実験よりも解析の方が速い。また、渦はほぼ同一箇所で生じていたが流速は実験の方が大きく表れていた。

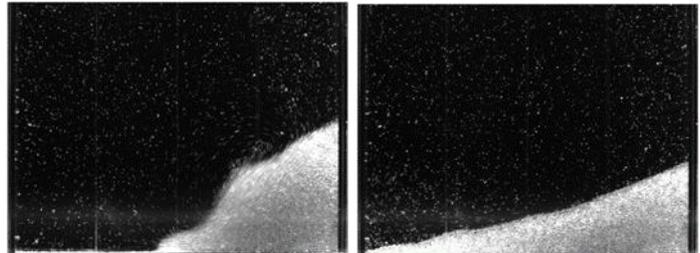


図-2(a) 実験開始後 0.5 秒

(b) 実験開始後 1.5 秒

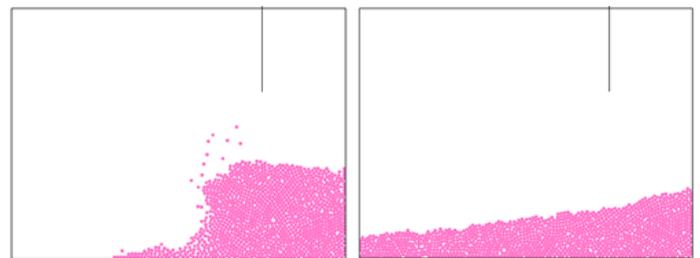


図-3(a) 解析開始後 0.5 秒

(b) 解析開始後 1.5 秒

5. おわりに

砂柱崩壊実験との比較により、流速の数値が高い領域と砂柱崩壊の挙動に関して計算の妥当性が得られた。崩壊速度と流速は不一致であったため計算パラメータの再検討の他に 3 次元での拡張も必要である。

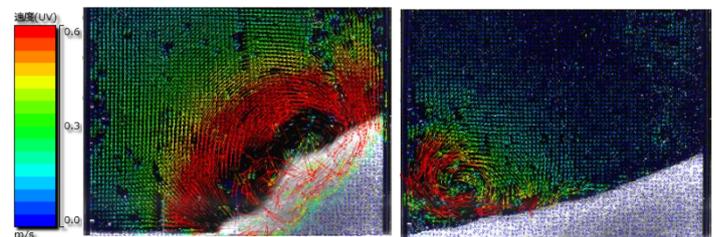


図-5(a) 実験流速分布 0.5 秒

(b) 実験流速分布 1.5 秒

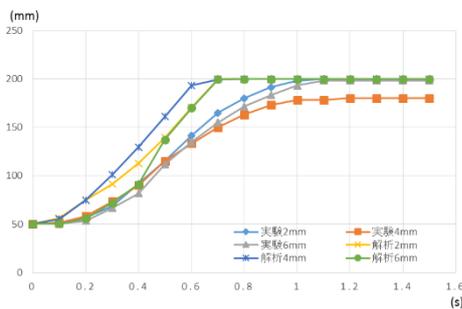


図-4 粒径ごとの粒子先端位置の移動距離の比較

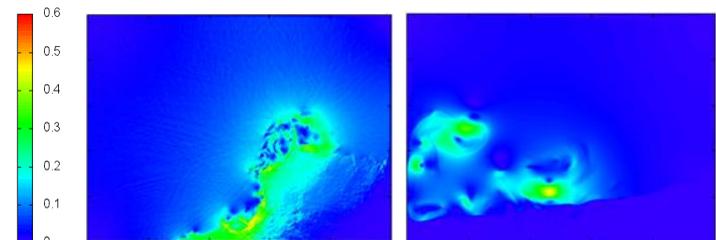


図-6(a) 解析流速分布 0.5 秒

(b) 解析流速分布 1.5 秒

参考文献

- 1) 福元 豊, 大塚 悟: 浸透流と土粒子の直接数値計算のための PS-MRT Lattice Boltzmann モデル, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.72, No.2, pp.I_335-I_343, 土木学会, 2016.