

## 水中での砂柱崩壊実験に基づく土粒子-間隙水連成計算手法の高度化 Improvement of coupled soil particles – pore water numerical method based on laboratory experiment

○齋藤 雅史\*・福元 豊\*・大塚 悟\*

Masashi Saito, Yutaka Fukumoto, Satoru Ohtsuka

### 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、計算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方法

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。個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  $\alpha$  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。

DEM と LBM を連成させる場合、移動する固液境界面の取り扱い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<sup>1)</sup>。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。

### 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。試験装置は横幅 20cm、縦幅 15cm 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。使用するガラスビーズは直径 6mm、トレーサー粒子は直径 48~52 $\mu\text{m}$  である。

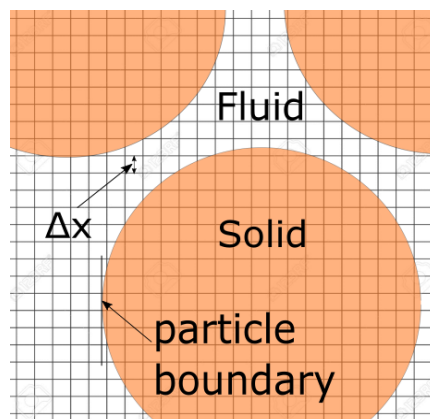


図-1 LBM 直交格子空間における DEM 粒子  
DEM particle in LBM orthogonal lattice space

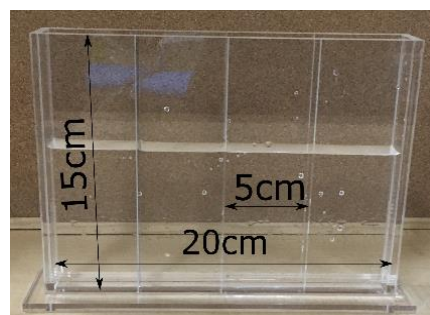


写真-1 実験装置  
Experimental device

\*長岡技術科学大学環境社会基盤工学専攻 Nagaoka University of Technology

個別要素法, 格子ボルツマン法, 間隙水, 連成計算

ガラスビーズは実験装置の右端に横 5cm,縦 12cm 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により崩壊させる.その様子を撮影した動画に対して PIV 画像解析を行うことで流速分布を出力する.

実験結果より一部抜粋した画像を図-2(a)~(c)に示す. 図-2(a)は静止状態であり, 図-2(b)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-2(c)は砂柱崩壊が終了した後, 装置内の左下部と中間上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

表-1 に解析で使用したパラメータを示す. 解析モデルは横 12cm, 縦 12cm の枠内に右端に直径 1.5mm の粒子を横 3cm, 縦 7.2cm の枠内に不均一に配置して計算を行った. 解析結果より 図-2(b)に相当する時間の様子を 図-3(a)と 図-4(a), 図-2(c)に相当する時間の様子を 図-3(b)と 図-4(b)に示す. 流速の単位は(m/s)である. これより砂柱崩壊の初期段階に差が生じてはいたが, 最終的な崩壊形状は一致していた. また, 渦がほぼ同一箇所で生じていたことが分かる. 但し, 中間上部での渦の発生は見られなかった. 渦が形成される様子は再現できたが完全には類似しなかった為, 崩壊の様子に差が生じないように実験装置か計算条件を改良することが今後の課題である.

表-1 解析で使用したパラメータ  
Parameters used in analysis

DEM	
土粒子の密度(kg/m <sup>2</sup> )	2500
法線方向ばね定数(N/m)	$5.0 \times 10^6$
接線方向ばね定数(N/m)	$1.25 \times 10^6$
法線方向減衰係数(Ns/m)	2.0
接線方向減衰係数(Ns/m)	1.0
粒子間摩擦係数	0.5
DEM時間ステップ(s)	$5.0 \times 10^{-7}$
LBM	
流体の密度(kg/m <sup>2</sup> )	1000
格子幅(m)	$1.0 \times 10^{-5}$
緩和時間係数	0.8
動粘度(m <sup>2</sup> /s)	$1.0 \times 10^{-4}$
LBM時間ステップ(s)	$1.0 \times 10^{-6}$

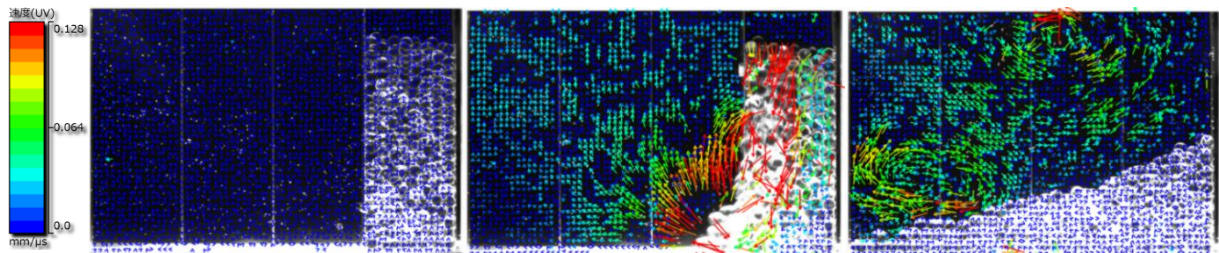


図-2(a) 実験開始後 0 秒  
Snapshot at 0 seconds

(b) 実験開始後 0.2 秒  
Snapshot at 0.2 seconds

(c) 実験開始後 1.0 秒  
Snapshot at 1.0 seconds

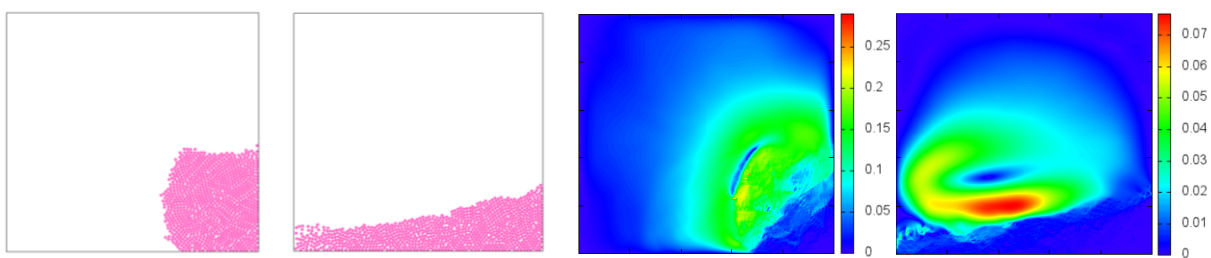


図-3(a) 解析開始後 0.2 秒  
Snapshot at 0.2 seconds

(b) 解析開始後 1.0 秒  
Snapshot at 1.0 seconds

図-4(a) 流速分布 0.2 秒  
Flow velocity distribution  
at 0.2 seconds

(b) 流速分布 1.0 秒  
Flow velocity distribution  
at 1.0 seconds

#### 5. おわりに

砂柱崩壊実験との比較により, 渦の発生に関して計算の妥当性が得られた. 今後は装置の改良や実験方法, 解析パラメータの調整を行い, 精度を向上させていく予定である.

#### 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.