

## 砂粒子と間隙水を直接解いた2次元液状化シミュレーション 2-D numerical simulation of liquefaction by solving directly sand and pore water

○北尾 朋広\*, 福元 豊\*\* 藤澤 和謙\*, 村上 章\*  
○KITAO Tomohiro\*, FUKUMOTO Yutaka\*\*, FUJISAWA Kazunori\*, MURAKAMI Akira\*

### 1 はじめに

地盤災害の1つである液状化現象については、発生時の粒子レベルでの挙動はあまり明らかではない。本研究では、液状化地盤に地下埋設物を想定した粒子を配置し、DEM-LBMの連成計算モデル [1] にて二次元シミュレーションを行うことで、地震動载荷中の粒子1つ1つに作用する力の観点から液状化現象発生の有無を調べた。

### 2 解析手法

流体計算はLBM（格子ボルツマン法）を用い、流体力を考慮した個体粒子の運動をDEM（個別要素法）によって解いた。粒子・流体間の相互作用についてはNoble and Torczynskiの方法 [2] を採用した。このモデルは個体の局所占占有率に基づく重み関数 $\beta$ を求めることで移動する個体粒子と流体の相互作用力を算出し、複雑な境界面も滑らかに扱える。個体粒子に作用する流体力 $F^{hyd}$ と流体トルク $T^{hyd}$ は以下のように算出される。

$$F^{hyd} = \frac{\delta_x^2}{\delta_t} \sum_n \beta_n \left( \sum_\alpha f_\alpha^m \mathbf{c}_\alpha \right), \quad T^{hyd} = \frac{\delta_x^2}{\delta_t} \left\{ \sum_n \beta_n ((\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_s) \sum_\alpha f_\alpha^m \mathbf{c}_\alpha) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\delta_x$ : LBMにおける格子幅、 $\delta_t$ : LBMにおける離散時間、 $f_\alpha^m$ : 密度分布関数の追加衝突項、 $\mathbf{c}_\alpha$ : 並進速度ベクトル、 $\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_s$ : 格子点及び粒子の座標を表す。また、添え字の $n$ は粒子内部に位置するLBMの格子点数を、 $\alpha$ はLBMの2次元9速度モデル [3] における方向を、それぞれ表す。また本研究では粒径分布と実際の粒子形状とを考慮するために円形粒子を組み合わせた非円形粒子を用いた。

### 3 計算モデル

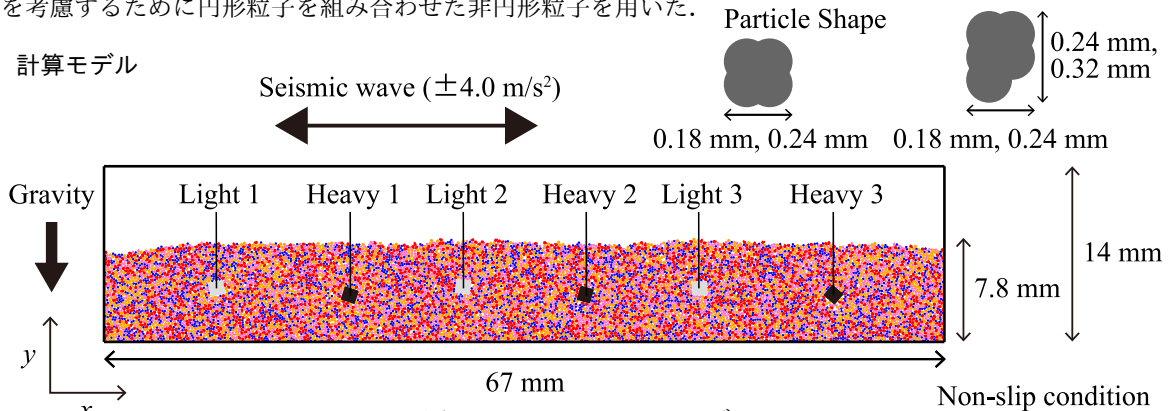


図1: シミュレーションモデル  
Fig. 1 Simulation model

粒子は比重2.50の五角形と正方形とし、構成する円形粒子の半径を変えて2種類ずつ、計4種類用意した。詳細な形状と粒子サイズは図1中に示している。これらを土粒子地盤とし、その中に地中埋設物を想定した土粒子より比重の重い粒子（比重7.90）と軽い粒子（比重0.90）を配置した（図1のLightとHeavy）。なお、これらの形状は一辺1.2 mmの正方形である。また、初期間隙比は $e=0.203$ となった。

### 4 解析結果の検討

本研究では、液状化現象発生を判断するため、粒子に作用する鉛直方向全ての力に対する流体力の割合に注目した。地震動が载荷されていない場合、粒子に作用する静水圧下での浮力が流体力となるため、その割合は流体と土粒子の比重の比に等しく0.4となり（式(2)左）、地震動载荷中液状化現象が発生している場合、粒子間の接触力が減少し、流体力が支配的に作用するため1.0に近くなると考えられる（式(2)右）。

$$\frac{f_{hy}}{\sum(f_{ty} + f_{ny}) + f_{hy}} \approx \frac{\rho_f}{\rho_s} = \frac{1000}{2500} = 0.4, \quad \frac{f_{hy}}{\sum(f_{ty} + f_{ny}) + f_{hy}} \approx \frac{f_{hy}}{f_{hy}} = 1 \quad (2)$$

\* 京都大学 Kyoto University, \*\* 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology, 数値解析

図2に地震動载荷前(0.03 s), 载荷開始直後(0.31 s), 载荷中(0.59 s), 载荷終了直前(0.87 s)における鉛直方向流体力割合の度数分布図を示す。地震動载荷前には用いた土粒子9,960個の大半が式(2)(中央)を満たし, 地震動载荷中は全粒子の3割から4割が式(2)(右)を満たしていることがわかる。図2には示されていないが, 地震動载荷中, 式(2)(左)の割合が0未満となっている粒子が3割~4割程度存在する。この粒子は, 接触力が鉛直下向き, つまり負の値である粒子ということになる。なぜならば流体力の向きは浮力の向きに一致し正の値をとるからである。このことと, シミュレーション開始前は0.203であった間隙比が地震動载荷中の低下し終了時には0.172となっていることを考慮すれば, 地震動载荷中に間隙水の抜けに伴い沈下している粒子だと考えることができる。ゆえに数は多いが, 液化化発生中の粒子の振る舞いとしては矛盾するものではないと考えられる。紙面の都合上詳しい結果は省くが, 大粒子の明確な浮上・沈下現象は確認できなかった。

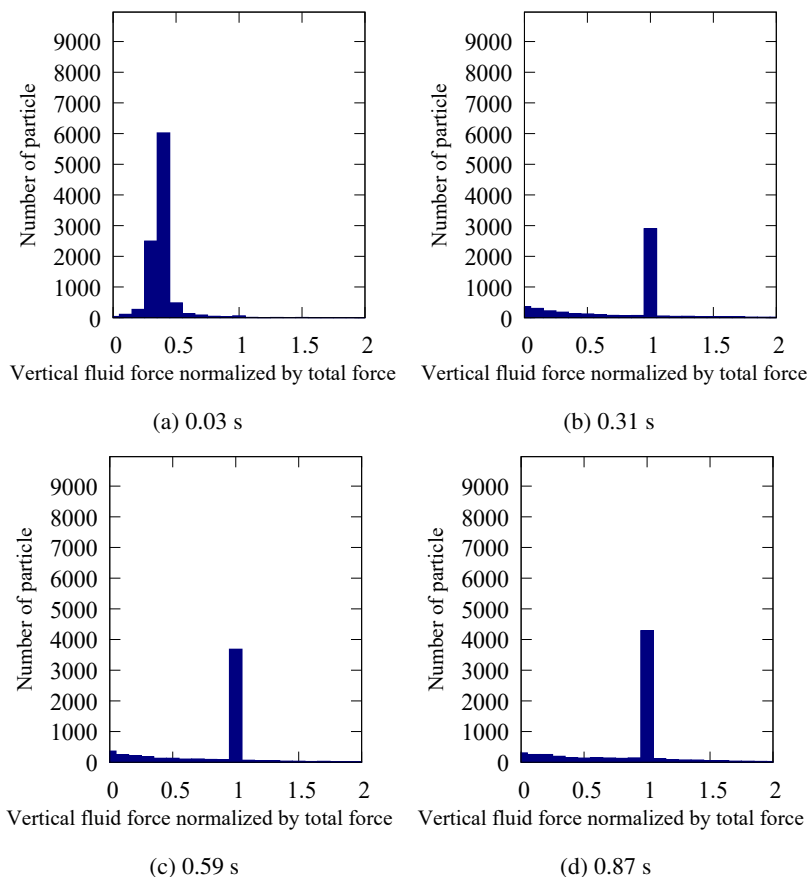


図 2: 各時間における鉛直方向流体力割合の度数分布図  
Fig. 2 Histogram of vertical fluid force ratio at a particular time

## 5 おわりに

本研究では, 液化化現象に焦点を当て, DEM-LBM 連成計算モデルを用いてこの二次元シミュレーションを試みた。2次元モデルでは砂質土を想定した地盤に地中埋設物を模した大粒子を DEM の空中落下法にて配置した。シミュレーションの結果, 地震動が载荷されている間粒子に作用する力のうち流体力の割合がほぼ 100% となる粒子が多数となり, 载荷されていない場合は 40% となる粒子が多数を占めるという, 液化化現象が発生している地盤状態に一致する結果を得ることができた。しかし本シミュレーションはゆる詰め地盤というには間隙比が小さい, 用いた地盤モデルが飽和状態の水中地盤であるなど, モデルの設定において必ずしも液化化解析に適しているとは言えない。したがって, ゆる詰め地盤を表現できる 3次元でのシミュレーションを行うこと, 自由水面モデルの導入による地下水面を持つ液化化地盤でのシミュレーションを行うことが再現性を高めるために必要である。それを踏まえて地震動の周期や加速度の違いによる液化化現象発生の有無を行うことが液化化現象のミクロ的メカニズムを解明するために必要であると考えられる。

## 参考文献

- [1] Fukumoto, Y. and Ohtsuka, S. (2017) 3-D direct numerical model for failure of non-cohesive granular soils with upward seepage flow, *Computational Particle Mechanics*, DOI: 10.1007/s40571-017-0180-5, pp. 1-12.
- [2] Noble, D. R. and Torczynski, J. R. (1998) A lattice-boltzmann method for partially saturated computational cells, *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 9, pp. 1189-1201.
- [3] Hou, S. et al. (1995) Simulation of cavity flow by the lattice boltzmann method, *Journal of Computational Physics*, Vol.118, pp329-347.