

球体粒子を用いた三次元個別要素法による再液状化解析

東京大学大学院社会基盤学専攻 学生会員 ○森本 時生
東京大学生産技術研究所 正会員 大坪 正英
東京大学大学院社会基盤学専攻 フェロー会員 古関 潤一

1. 概要

2010-2011 年カンタベリ地震や 2011 年東北地方太平洋沖地震において、同一地盤が複数回液状化する再液状化現象の報告がなされた。この背景から、地震動によるせん断履歴が砂の液状化強度に及ぼす影響に関する研究のニーズが近年再び高まっている。室内試験における検討は Finn et al. (1970)¹⁾ など古くからおこなわれてきたが、依然そうした液状化強度の変化の微視的理解に至っていない。そこで本研究では粒状体の微視的構造に着目できる三次元個別要素法（以降、DEM）²⁾ を用いて二回の非排水繰返しせん断を受ける砂の巨視的な挙動の再現、微視的構造の変化の検討に関して単純な条件を用いて基礎的な検討を行った。

2. 手法

DEM のソースコードにはオープンソースの LAMMPS を用いた。その他の解析条件およびパラメータに関しては表 1 と表 2 にまとめる。次の手順で同一供試体を二回液状化させた。i) 粒子をランダムに生成する。ii) 100kPa の等方圧密を行う。iii) 繰返し偏差応力 $q_{cyc} = \pm 50 \text{ kPa}$ を定体積・定ひずみ速度条件で与え、様々なポイントで載荷を止める。このとき、 $q = 0 \text{ kPa}$ に至った時点で止めるようにした（図 1）。iv) iii) で得られた様々なせん断履歴を持つサンプルに対し、それぞれ 100kPa の等方圧密（再圧密）を行う。v) 再び $q_{cyc} = 50 \text{ kPa}$ の繰返し定体積せん断を行う。

iii) におけるせん断履歴の大小と v) における様々な巨視的挙動や微視的構造の関係性に関して考察を行った。

3. 解析結果と考察

巨視的挙動の考察：二回目の定体積繰返しせん断（2. 手法の v)）における有効応力経路や応力ひずみ関係の例を図 3 にまとめる。既往研究と同様せん断履歴を供試体が前の載荷（2. 手法の iii)）で受けた最大の軸ひずみ振幅 $\varepsilon_{D\text{Amax}}$ で定義しており、本発表ではせん断履歴なし（ $\varepsilon_{D\text{Amax}} = 0\%$ ）、 $\varepsilon_{D\text{Amax}} = 0.1\%$ 、 0.6% 、 2.4% の 4 ケースを中心に考察を行う。なおそれぞれのケースに対応する一回目の載荷での有効応力経路上の点は図 2 に示されており、 $\varepsilon_{D\text{Amax}} = 2.4\%$ のみ一回目の載荷で液状化状態に至っている。まず、図 3 より室内試験で得られるような有効応力経路や応力ひずみ関係が DEM でも得られたことがわかる。 $\varepsilon_{D\text{Amax}}$ が大きくなるほど液状化しやすい関係が見られ、これは既往の室内試験で報告された傾向と一致するものである。こうした液状化強度のせん断履歴による低下が球体粒子を用いた検討によって得られたことは注目に値する。

微視的構造の考察：DEM でもせん断履歴による液状化強度の低下が見られたため、定体積繰返しせん断直前の供試体の微視的構造に関して様々な検討を行った。図 4 はある接触点数（ある粒子がほかの粒子との間に持つ接触点数の数）を持つ粒子の供試体内の頻度分布を示しており、せん断履歴が大きい供試体ほど全体とした接触点数が小さいことがわかる。また接触力・接触点と粒子の中心の位置関係・粒子の体積から粒子内部の応力（粒子応力）を計算することができ、図 5 はある接触点数をもつ粒子一粒当たりが分担する平均粒子主応力を表している。これを見ると大きなせん断履歴を受けた供試体ではより接触点数が少なく不安定な粒子がより大きな応力を負担していることがわかる。これらの結果から一度大きく液状化した地盤は密度が上昇したとしてもより不安定な骨格を形成しており、全体として非常に脆弱な構造をしていると考えられる。接触点数と弾性波速度・剛性との相関はよく知られており、実務への応用も期待できる。

4. 結論

DEM においても室内試験と同様の有効応力経路と応力ひずみ関係を描け、大きなせん断履歴による液状化強度の低

キーワード 液状化、再液状化、個別要素法、DEM、接触点数、せん断履歴

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部一号館 B1F-B39 東京大学土質地盤研究室 TEL 03-5841-6137

下を再現することができた。また、大きなせん断履歴を受けた供試体では接触点数の小さい比較的不安定な粒子が内部応力を伝達しており、それが液状化強度の低下の原因と考えられる。なお、粒子形状や供試体の作製条件などを含めたより発展的な解析を行っており、今後その成果を報告する予定である。

参考文献

1) Finn, W. D., Bransby, P. L., & Pickering, D. J. (1970). Effect of strain history on liquefaction of sand. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 96(SM6). 2) Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique, 29(1), 47-65.

表 1 供試体の条件

供試体形状	立方体
境界条件	周期境界
粒子数	約 4000 粒子
試験条件	三軸試験条件（等方圧縮、定体積繰返しせん断）
供試体間隙比	0.66（一回目の等方圧密完了時）

表 2 粒子に関するパラメータと条件

コンタクトモデル	Hertz-Mindlin モデル
粒子形状	球体
粒径	1.0-1.2(mm)（正規分布に近い確率密度で混合）
ポアソン比	0.2
せん断剛性	2.5×10^9 (Pa)
摩擦係数	0.10(等方圧密時), 0.35(繰返しせん断時)
粒子密度	2.6×10^3 (kg/m ³)

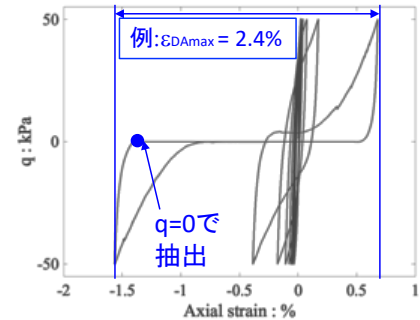


図 1 せん断履歴の終了点の例

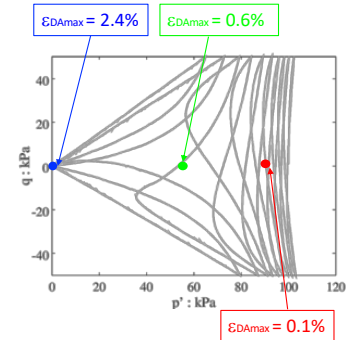
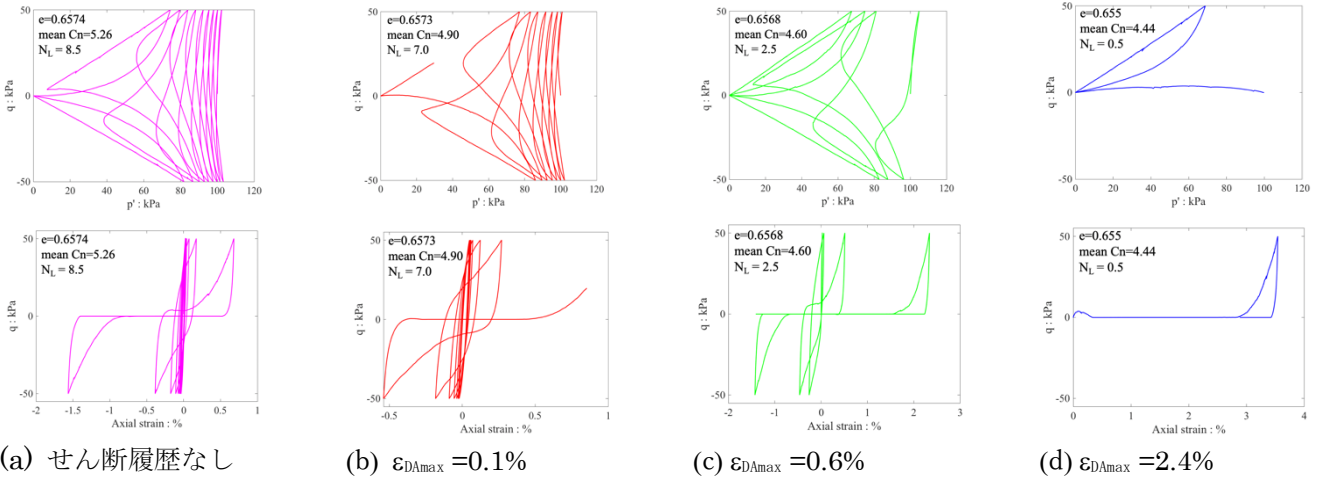


図 2 せん断履歴終了時の有効応力



(a) せん断履歴なし (b) $\epsilon_{DAmax} = 0.1\%$ (c) $\epsilon_{DAmax} = 0.6\%$ (d) $\epsilon_{DAmax} = 2.4\%$

図 3 各解析結果の有効応力経路及び応力ひずみ関係

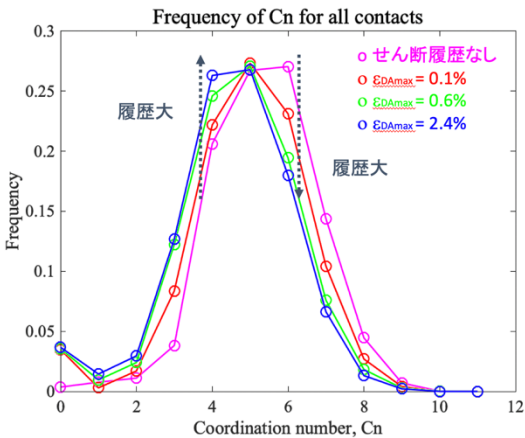


図 4 各供試体内の粒子の接触点数の頻度分布

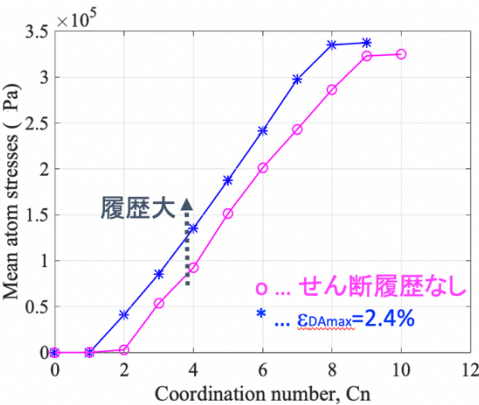


図 5 各供試体内の粒子の平均粒子主応力の接触点数に基づく整理