

等方圧密された粒状体の液状化後の再圧密による異方性の変化 -DEMによる数値実験-

東北大学 学 ○柴田孝之 蔣明晋 正 加村晃良 フ 風間基樹

1. 研究背景と目的

液状化後の再圧密挙動を評価することは、地盤構造物の性能設計において重要である。しかし、液状化後の再圧密により生じる体積ひずみ量の予測評価法は、室内試験で観測可能な物理量に基づく限定的な議論に留まっている。再圧密挙動の本質的な物理量を捉えるためには、要素としての挙動に加えて、微視的な粒子の情報（配位数などの統計量）を評価する必要がある。

本研究では三次元 DEM を用いて、粒状集合体に対して定体積の繰返しせん断を与えたのち、再圧密挙動をシミュレートする数値実験を実施した。液状化から再圧密までの一連の挙動を通じて、巨視的な要素挙動と微視的統計量の変化、およびその関係を評価した。

2. 数値実験の概要

解析コードには PFC3D<sup>1)</sup>を用いた。はじめに、無重力条件下で、密度 2g/cm<sup>3</sup>の単一粒径（直径 2mm）の球形粒子 15,517 個を用いて、50×50×50 (mm)の初期供試体を図 1 のように作成した。各種応力や接触点情報は、供試体の中心に設置したφ40 (mm)の計測球を設定し、そこから統計量として取り出した。境界条件は、XY 方向が周期的境界、Z 方向が固結粒子を用いた剛境界（以下、粒子壁）とした。接触モデルについては表 1 に示すように、粒子間は地盤の非線形性を模擬するために Hertz モデルを使用し、粒子と粒子壁間は繰返しせん断ひずみ時にすべりが生じないように、圧密以前は Hertz モデル、以降の過程では Linear Parallel Bond モデルを使用した。設置した初期供試体に、無重力条件下で周期的境界・粒子壁をひずみ速度制御で動かすことにより、目標の応力状態（100 kPa）まで三方向の等方圧密を行った。圧密後の供試体の大きさは、48.52×48.52×48.50 (mm)となった。等方圧密した供試体に、下部の粒子壁を図 1 の X 方向に水平移動させることにより、ひずみ振幅 0.2%の繰返しせん断ひずみを与えた。本実験では、鉛直有効応力が 1.0×10<sup>-3</sup> kPa を下回った状態を液状化と見なして載荷を止めた。ここで、繰返し載荷過程では、非排

水状態を模擬するため、無重力条件かつ定体積条件とした。これら条件は、間隙水は粒子骨格の圧縮性に比較して非圧縮性を有し且つ飽和しているという前提の下、非排水繰返しせん断試験において、粒子の接触力から有効応力を直接取り出すことを意味する。

再圧密のシミュレートについては、液状化した供試体に上部の粒子壁を鉛直下方に動かすことにより、一方向再圧密を模擬した。なお、本実験では、体積ひずみ速度を先行研究<sup>2)</sup>よりも大きい 1%/s と設定した。

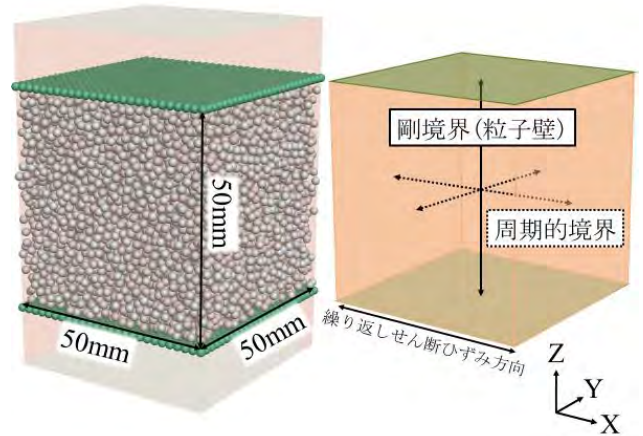


図 1 初期供試体（左が全体図、右が境界の模式図）

表 1 接触のパラメータ

粒子間 (Hertz モデル)			
せん断剛性	G	(GPa)	1.0
ポアソン比	v	-	0.3
摩擦係数	μ	-	0.5
臨界減衰比(法線方向)	ξ <sub>n</sub>	-	0.35
臨界減衰比(接線方向)	ξ <sub>s</sub>	-	0.35
粒子と粒子壁間 (Linear Parallel Bond モデル)			
有効弾性係数	E	(N/m <sup>2</sup> )	1.0×10 <sup>8</sup>
ボンド有効弾性係数	E <sub>b</sub>	(N/m <sup>2</sup> )	1.0×10 <sup>8</sup>
張力	σ <sub>c</sub>	(N)	1.0×10 <sup>6</sup>
粘着力	c	(N)	1.0×10 <sup>6</sup>
摩擦角	φ	(°)	30
摩擦係数	μ	-	0.5
臨界減衰比(法線方向)	ξ <sub>n</sub>	-	0.35
臨界減衰比(接線方向)	ξ <sub>s</sub>	-	0.35

### 3. 結果と考察

繰返しせん断過程における有効応力経路と応力-ひずみ関係を図 2 および図 3 に示す。これらの挙動より、液状化に対応する非排水繰返しせん断挙動が本数値実験で表現できていることが分かる。有効応力経路においては、変相線が明瞭でなくせん断応力が減少しているが、これは、先行研究<sup>2)</sup>と比較して小さいひずみ振幅で液状化し、正のダイレイタンスーに起因するサイクリックモビリティが起こらなかったことによる。

初期圧密から再圧密までの有効応力と間隙比の関係を図 4 に示す。全体的な挙動として、繰返し載荷をしても有効応力は完全にゼロに至らず、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$  オーダーで存在することが分かる。これは、土が非排水繰返しせん断を受けて「液状化」に至ったとしても、統計量として粒子の接触点全てが失われるわけではないことを示すものである。

再圧密については、再圧密開始 ( $e=0.757$ ) から 0.2 秒 ( $e=0.753$ ) 付近まで、有効応力が急激に回復した後再び下がる現象が確認できる。ここで、粒子の挙動と比較するために、再圧密過程における配位数の変化を図 5 に示す。図 5 では、再圧密開始時点で配位数の急激な上昇と 0.2 秒付近での減少が見られる。これら結果の比較より、本実験条件においては、再圧密開始直後に粒子壁の下方移動によって、粒状体の内部で粒子の粗密状態の伝播（粗密波のようなもの）が生じたと考えられる。

再圧密過程における  $K_0$  値の変化を図 6 に示す。等方圧密された供試体は、液状化と再圧密を経て  $K_0=0.564$  となった。また、再圧密開始時点では不安定であった  $K_0$  値は、再圧密開始から 1.0 秒付近で減少に転じており、これは有効応力の発現と対応している。図 5 の配位数 3.0 付近の急激な上昇（再圧密開始から 0.9 秒付近）とも対応していると考えられる。

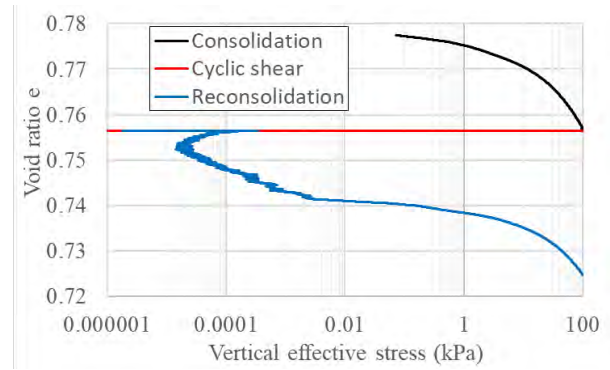


図 4 有効応力と間隙比の関係  
(初期圧密～繰返しせん断～再圧密過程)

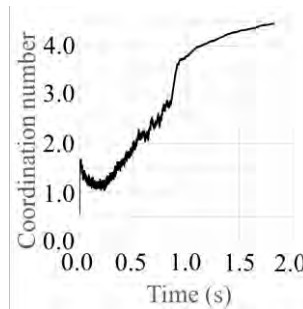


図 5 再圧密中の配位数

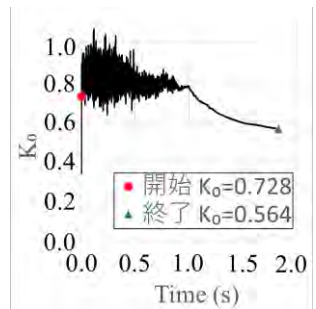


図 6 再圧密中の  $K_0$  値

### 4. 結論

等方圧密された粒状体に定体積の繰返しせん断を作用させ、鉛直下向きに再圧密させる数値実験を行った結果、以下のことが分かった。

- ・ 再圧密開始直後に有効応力が急激に回復した後、再び減少に転じる。また、それに対応した配位数の増減も起きる。
- ・ 再圧密過程の初期に不安定であった  $K_0$  値は、配位数の増加と有効応力の発現に伴い、ある時点（平均配位数 3.0 程度）を境に安定的な減少に転じる。

### 参考文献

- 1) Itasca Consulting Group, Inc.: PFC 7.0 documentation, 2023.
- 2) Jiang, M., Kamura, A., Kazama, M.: Volumetric strains after undrained cyclic shear governed by residual mean effective stress: Numerical studies based on 3D DEM. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Springer Vol.52 2188-2195, 2022.
- 3) 渦岡良介, 仙頭紀明, 清水友子, 加村晃良, 風間基樹: 有効応力解析における最小有効応力の設定方法と液状化地盤の沈下の簡易予測. 土木学会論文集 Vol.63 No.3 806-811, 2007

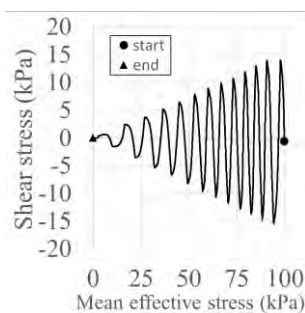


図 2 有効応力経路

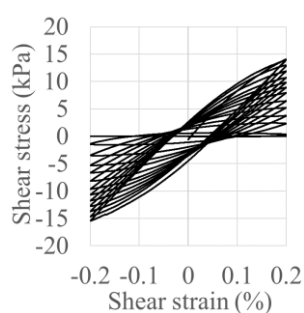


図 3 応力-ひずみ関係