

# セメント改良土を対象とした円柱供試体のせん断面形成3次元シミュレーション

名古屋大学 (正) ○山田正太郎 (フェロ) 野田利弘 (フェロ) 中野正樹 (正) 福和彩果

## 1. はじめに

著者ら<sup>1)</sup>はこれまでにセメント改良土の三軸試験結果などに基づいて、SYS Cam-clay model<sup>2)</sup>の拡張を行っている。一方、三軸供試体は非一様な変形を示すために、実験結果が真の要素挙動を表していないことはよく知られている<sup>3)</sup>。本稿では、同構成式を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>4)</sup>を用いて、三軸試験を初期値境界値問題として取り扱う立場から3次元解析を実施した。構成式レベルでは記述していない顕著な荷重低下をせん断面の形成に起因する現象として説明する。

## 2. セメンテーション効果を導入したSYS Cam-clay modelの概要と非排水三軸試験の要素シミュレーション

著者らはセメント改良土の非排水三軸試験結果や標準圧密試験結果と自然体積粘土の試験結果を比較することによって、セメント改良土に対しても骨格構造概念が有効であることを主張する一方で、セメント改良土が改良土を練返した供試体の限界状態線の上側で塑性圧縮を示すことを指摘した。このようなセメント改良土特有の挙動を、骨格構造概念に基づくSYS Cam-clay model上で再現するために、図1に示すようにSYS Cam-clay modelの各負荷面を平均有効応力軸に沿って平行移動した(セメンテーション効果の導入)。また、実験より、セメント改良土はせん断や圧縮を続けると、状態が練返した改良土に漸近することを主張するとともに、各負荷面の原点からのズレが塑性変形に伴って解消するようにモデル化を行った(塑性変形に伴うセメンテーション効果の喪失)。

さらに、各負荷面が、平均有効応力が負となる領域を有することになったことへ対処するために、通常の有効応力から各負荷面の平行移動分を差し引いて定義される修正応力をセメント改良土にとっての有効応力としてモデルを記述した(有効応力の修正)。

図2に改良土の非排水三軸試験結果と、一様変形場における上記構成式による同試験のシミュレーション結果を示す。実験に用いた改良土供試体は、有楽町層浚渫土を母材に管中混合固化処理工法の適用を想定した配合で作製した。図中に引いた限界状態線は改良土の実験結果から得られた限界状態線である。また、シミュレーションは同一の初期状態から圧密過程も含めて行った。実験結果の平均有効応力がこの限界状態線の上側で減少していることと、解析結果が同様な特徴を示していることを確認できる。これはすでに述べた通り各負荷面を $p'$ 軸の負の方向へ平行移動した効果である。また、セメント改良土は一般に自然堆積粘土と比較して高い初期剛性を有する。平均有効応力依存型の速度型弾塑性構成式を適用した弾塑性構成式では、この高い初期剛性を再現することが容易ではないが、解析結果は実験結果と同程度の初期剛性を示すことができている。これは、上記の修正応力を用いてモデルを記述したことにより、有効応力が実質的に高まったことによる。このように拡張の効果によってセメント改良土に特徴的な挙動を再現できるようになった一方で、軸差応力一軸ひずみ関係では、解析結果は実験結果に比べて緩やかな荷重低下を示している。これは、せん断面が形成された影響と

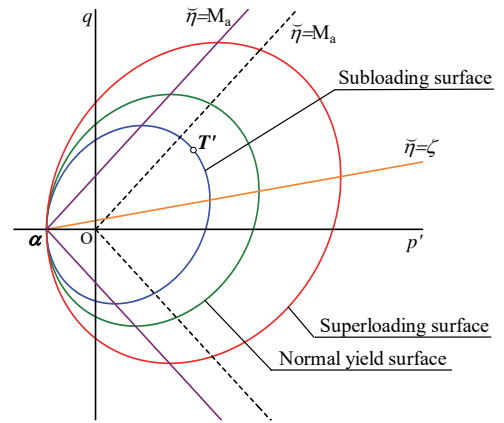


図1 セメンテーション効果を導入したSYS Cam-clay modelの負荷面

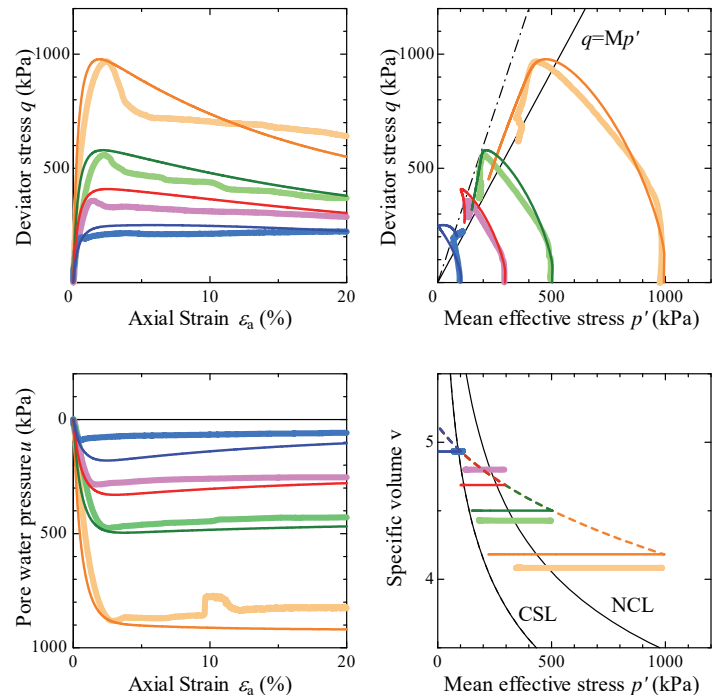


図2 セメント改良土の非排水三軸試験結果と提案モデルによるシミュレーション結果(太線:実験, 細線:計算)

これは、上記の修正応力を用いてモデルを記述したことにより、有効応力が実質的に高まったことによる。このように拡張の効果によってセメント改良土に特徴的な挙動を再現できるようになった一方で、軸差応力一軸ひずみ関係では、解析結果は実験結果に比べて緩やかな荷重低下を示している。これは、せん断面が形成された影響と

判断して敢えてモデル化しなかった挙動である。このような挙動が提案した構成式を適用した解析コードによって、せん断面形成による影響として説明できることを実際に示そうというのが、以下に示す解析の目的である。なお、比較的拘束圧の実験結果では、実験結果と解析結果の有効応力パスに乖離が見られる。これは三軸試験がテンションカットオフライン ( $q=3p'$ ) より上側での挙動を再現できない (この領域に到達するような水圧を計測し得ない) ことによると考えられるため、本稿ではこの点については議論しない。

### 3. 初期値境界値問題としての三軸試験のシミュレーション

**3-1 解析条件** セメンテーション効果を導入した SYS Cam-clay model を水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA** に実装した上で解析を行った。対象としたのは図 2 に示した実験で用いた供試体と同じ寸法 (高さ 10cm×直径 5cm) の円柱供試体である。図 3 に解析に用いた有限要素メッシュを示す。同図が示す通り、3次元解析を行った。供試体表面は非排水境界とした。上下端面は摩擦がない条件とし、下端中央に位置する節点のみ水平方向の運動を固定した。供試体キャップが傾かない場合を想定し、上端面には鉛直下向きに一律な速度を与えた。軸ひずみ速度は実験と同じく 20%/day とした。ただし、慣性力対応の解析コードを使用しているため、初速 0 の状態から 1,000 秒間で所定の軸ひずみ速度に達するようにした。また、せん断面を誘発するために、初期不整として、図 3 に示すような切り欠きを与えた。材料定数は一様変形場におけるシミュレーションで用いた値と同じである。拘束圧

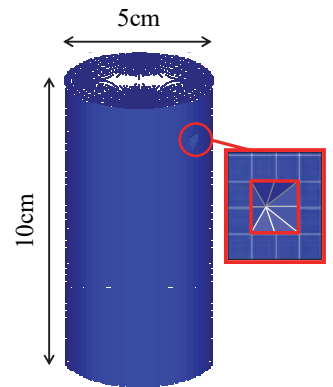


図 3 有限要素メッシュ

は 500kPa とし、一様変形場におけるシミュレーションのせん断開始時と同じ状態を初期値として用いた。透水係数は  $2.0 \times 10^{-6}$  cm/sec とした。

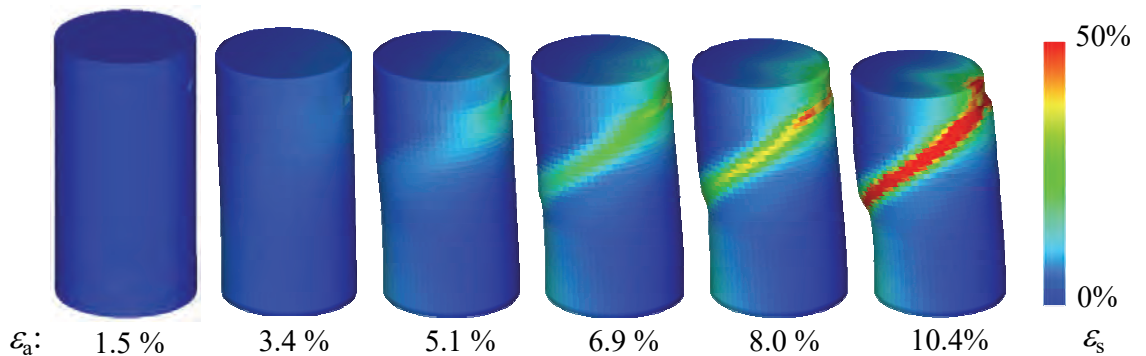


図 4 せん断ひずみ分布

**3-1 解析結果** 図 4 にせん断ひずみ分布図を示す。ひずみが局所化し、袈裟懸け状にせん断面が発現している。図 5 に供試体を一つの要素として整理した結果を示す。比較のために一様変形場における構成式の応答も示す。軸差応力-軸ひずみ関係において、軸差応力がピークを迎える付近から分岐し、一様変形が生じる場合よりも明確な荷重低下が発生している。写真 1 はセメント改良土の三軸試験において観察されたせん断面

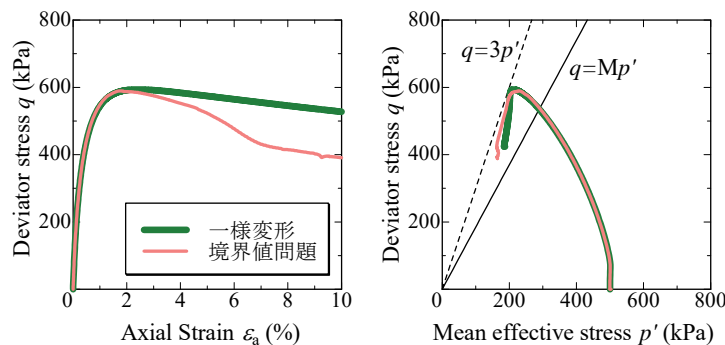


図 5 ひとつの要素としての見かけの挙動

写真 1 改良土供試体に入ったせん断面

面の一例を示している。改良土を用いた実験でも確かに袈裟懸け状のせん断面が発生するケースがあることを確認できる。

### 4. おわりに

比較的クラシカルな話題であるが、実寸のセメント改良供試体を対象とした 3次元解析によりせん断面の形成過程をシミュレーションした。せん断面が発現することで構成式レベルよりも顕著な荷重低下が生じることを示すことで、提案するモデルの妥当性を示した。

**謝辞** 本研究は科学研究費補助金 (基盤研究(B): 課題番号 16H04408) の補助を受けて実施した。

**参考文献** 1) Yamada et al. (2017): Expansion of SYS Cam-clay model for simulation of mechanical behavior of cement-treated soils, *Proc. 19th ICSMGE*, accepted. 2) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, 42(5), 47-57. 3) Asaoka and Noda (1995): Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundaries, *S&F*, 35(1), 83-100. 4) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, 45(6), 771-790.