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)〇山田正太郎 (フェロー)野田利弘 (フェロー)中野正樹 (正)福和彩果

1. はじめに

著者ら¹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 model²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³。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*⁴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。

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 $\alpha \qquad \overrightarrow{\eta} = M_a \qquad \overrightarrow{\eta} = M_a$ Subloading surface $\alpha \qquad \overrightarrow{\rho} \qquad \overrightarrow{\eta} = \zeta$ Superloading surface
Normal yield surface





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)

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 ー軸ひずみ関係では、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

キーワード セメント改良土,三軸試験,せん断面,弾塑性,骨格構造,水〜土連成解析 連絡先 〒464-8601 名古屋市千種区不老町名古屋大学 TEL052-789-4829 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、比較的低拘束圧 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、下端面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 に一様な速度を与えた。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



図3 有限要素メッシュ

である。拘束圧 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 2.0×10⁻⁶ cm/sec とした。

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 ー 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



図5 ひとつの要素としての見かけの挙動

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-slay model, S&F, 45(6), 771-790.

写真1 改良土供試体に 入ったせん断面