

水～土骨格連成有限変形解析によるセメント改良土の三軸試験の数値シミュレーション

セメント安定処理, 三軸圧縮試験, 有限要素法 名古屋大学 国際会員 ○中野 正樹, 山田正太郎, 野田 利弘
学生会員 堀内 俊輔, 依田 広貴, 笹山 哲司

1. はじめに

著者らは、現在、セメント改良土の力学挙動を骨格構造の変化を記述可能な弾塑性構成式 SYS Cam-clay model¹⁾によって再現することを試みている^{2,3)}。一方で、三軸試験に代表される要素試験の非一様性はよく知られるところである⁴⁾。本稿では、三軸試験を要素試験と見做す立場から求めた材料定数および初期値を用いて、改めて三軸試験を境界値問題として解き直すことによって、非一様な変形が生じた結果、三軸試験結果に現れる影響について調べる。

2. 解析条件

三軸試験を境界値問題として取り扱うにあたり、土骨格の構成式に SYS Cam-clay model を搭載する水～土連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁵⁾を用いた。図-1 に有限要素メッシュおよび境界条件を示す。解析は平面ひずみ条件で行った。供試体の周囲を非排水境界とし、上下端面はキャップとペダスタルが剛で摩擦のある条件とした。供試体側面には幾何学的な初期不整として、振幅 0.005cm の余弦カーブ (半周期) で与えられる 1 次の非対称モード⁴⁾を与えた。せん断速度は $1.4 \times 10^{-2}\%$ /min として、供試体上端面に下向きの変位速度を与えた。解析の対象としたセメント改良土は、管中混合固化処理工法を適用することを想定して、含水比 120% の浚渫土にセメント 50kg/m^3 を添加して 28 日間養生した試料である^{2,3)}。図-2 と 3 に、このセメント改良土を拘束圧 98kPa または 294kPa まで圧密した後、非排水三軸せん断した結果をそれぞれ示す。別報^{2,3)}では、三軸試験を要素試験と見做す立場に立って、SYS Cam-clay model の材料定数および初期値を求めた。本稿では、これらの値を用いて、図-2 と 3 に示す三軸試験結果を境界値問題として改めてシミュレーションする。

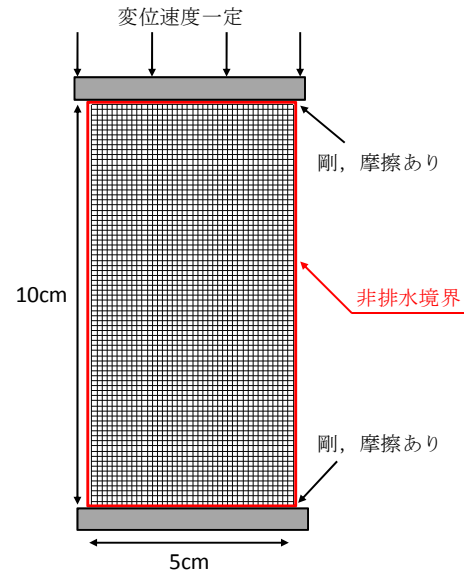


図-1 有限要素メッシュと境界条件

3. 解析結果

拘束圧 98kPa の場合に対し、供試体をひとつの要素と見做して整理した解析結果を図-4 に、せん断ひずみ分布の推移図を図-5 に示す。図-4 には、構成式の応答も併せて示した。図-4 の軸差応力-軸ひずみ関係からは、軸ひずみ 3~4% 付近で急激な軸差応力の低下が見られる。図-5 のせん断ひずみ分布には軸ひずみ 4% で袈裟がけ状のせん断面が見られることから、明確な荷重低下はこのせん断面の発生に伴うものであることが分かる。図-2 に示す実験結果でも、やはり軸ひずみ 2% 付近で荷重低下する様子が見られる。実験と解析では、荷重低下の大きさにこそ違いが見られるが、実験においてもせん断面が入った影響で荷重低下が生じたものと考えられる。図-5 では、軸ひずみ 7% 付近から縦に割裂するようにひずみの局所化が伸展してゆく様子が見られるが、その影響は、マスとしての挙動に大きな影響を及ぼしていない。写真-1 に図-1 に示す実験に用いた供試体のせん断後の様子を示す。解析で最終的に非対称な破壊形状が示されるのと同様に、実験後の供試体でも一本の袈裟がけ状のせん断面が確認できる。

次に、拘束圧 294kPa の場合に対し、供試体をひとつの要素と見做して整理した解析結果を図-6 に、せ

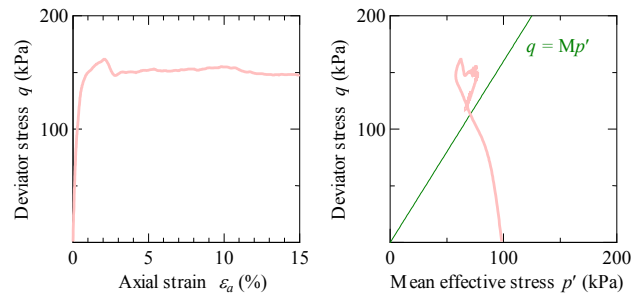


図-2 セメント改良土の非排水せん断挙動 (拘束圧 98kPa)

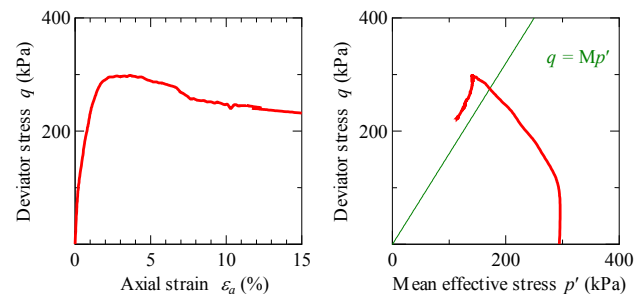


図-3 セメント改良土の非排水せん断挙動 (拘束圧 294kPa)

せん断ひずみ分布の推移図を図-7 に示す。図-6 には、構成式の応答も併せて示した。図-6 の軸差応力-軸ひずみ関係からは、軸ひずみ 3%付近と 6%を過ぎた付近で急激な軸差応力の低下が見られる。図-5 のせん断ひずみ分布でははじめ袈裟がけ状のせん断面が入った後、反対方向にもせん断面入り、最終的に X 字のせん断面が形成されている様子が見て取れる。せん断面の発生と荷重低下のタイミングが合っていることから、荷重低下の要因はせん断面の発生にあ

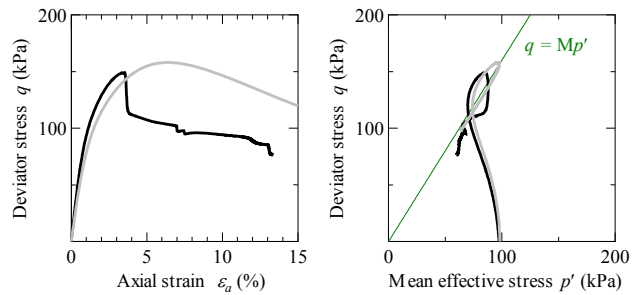


図-4 構成式およびマスとしての非排水せん断挙動 (拘束圧 98kPa)

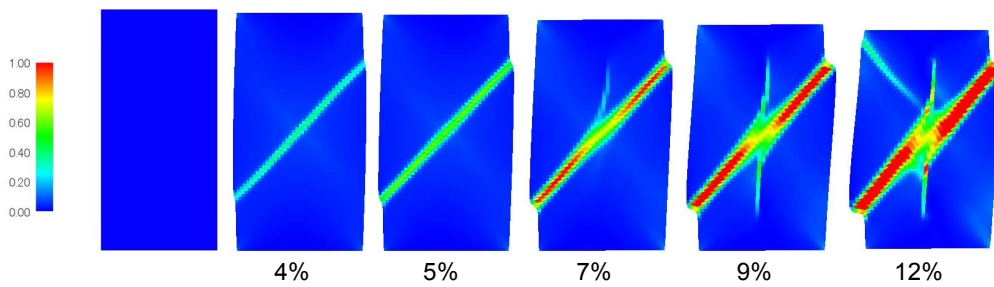


図-5 せん断ひずみ分布の推移 (拘束圧 98kPa)



写真-1 供試体破壊形状 (拘束圧 98kPa)

ることが分かる。図-3 に示す実験結果では、やはり解析結果ほど大きくはないが、荷重低下が発生している。図-3 では、軸ひずみ 7~8%付近ではっきりとした荷重低下が生じているが、5%付近でも僅かに荷重低下していることが見て取れる。写真-2 に図-3 に示す実験に用いた供試体のせん断後の様子を示す。実験同様、最終的に X 字のせん断面が形成されている様子を見て取ることができる。

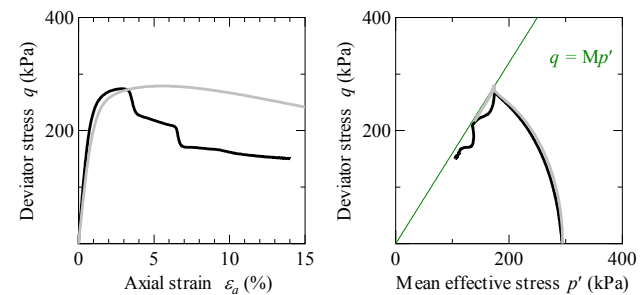


図-6 構成式およびマスとしての非排水せん断挙動 (拘束圧 294kPa)

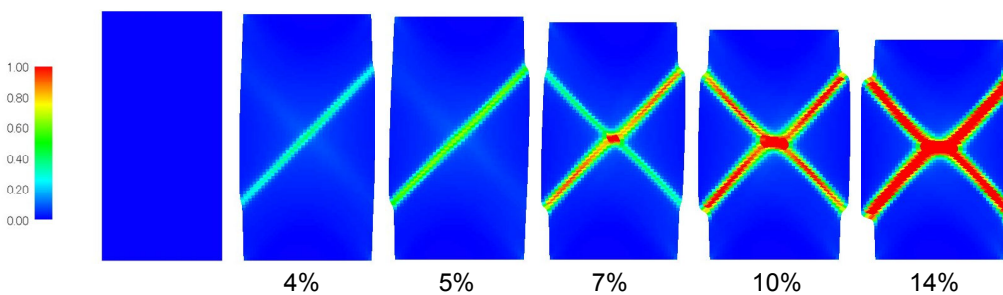


図-7 せん断ひずみ分布の推移 (拘束圧 294kPa)



写真-2 供試体破壊形状 (拘束圧 294kPa)

4. おわりに

本稿で示したように、三軸試験では、せん断面の発生と共に急激な荷重低下が生じる。このように、三軸試験には要素試験として有効ではない情報が含まれる。一方で、例えば供試体を一つの要素と見做して得た有効応力経路が構成式の応答から極端に離れたものではないことから分かるように、三軸試験は土骨格本来の性質を知らせてくれる役割も十分に果たしている。また、本稿で示したように、三軸試験を要素試験とみなして与えた材料定数および初期値を用いて解析を行った結果、実験と解析で符合するような破壊形状が得られたりもする。今後も、三軸試験で得られた結果を、要素試験と境界値問題の両方の視点を持って、セメント改良土本来の性質を見定めてゆきたい。

参考文献 1) Asaoka, et al. (2002): An elasto-plastic-elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F* **42**(5), 47-57. 2) 山田ら (2011): セメント改良土および練返したセメント改良土の力学挙動と SYS Cam-clay model によるその再現, 本概要集. 3) 依田ら (2011): 管中混合固化処理工法を想定したセメント改良土の力学挙動に与えるセメント添加量の影響, 本概要集. 4) Asaoka et al. (1995): Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundaries, *S&F* **35**(1) 83-100. 5) 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*, **48**(6), 771-790.