

不飽和砂質土の非排気-非排水せん断試験およびそのシミュレーション

京都大学大学院 学生会員 ○石川 棕

京都大学大学院 正会員 木元 小百合

(現 鉄道・運輸機構) 京都大学大学院 学生会員 森本 恭弘

1. 研究の背景および目的

近年、台風や集中豪雨により多くの不飽和地盤で土砂災害が発生しており、不飽和土の力学特性の解明、不飽和モデルの構築が求められている。

本研究では、河川堤防で採取した砂質土を用いて非排気-非排水条件での不飽和土の三軸圧縮試験を行った。また、限界状態の応力比について骨格応力を用いて整理した。さらに、空気-水-土連成有限要素解析により不飽和土の非排気-非排水三軸圧縮試験のシミュレーションを行った。

2. 試験試料

本研究で使用した試料は、京都府城陽市にある木津川右岸堤防で採取した土を 2mm 以下にふるい分けしたものである。図-1、表-1 に粒径加積曲線、物理特性を示す。

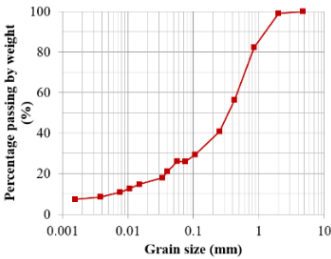


図-1 粒径加積曲線

表-1 物理特性

土粒子密度 (g/cm ³)	2.637
最大間隙比 e_{max}	1.221
最小間隙比 e_{min}	0.716
平均粒径 D_{50} (mm)	0.354
細粒分含有率 F_c (%)	26.0
砂 (%)	74.0
シルト (%)	16.8
粘土 (%)	9.2
最適含水比 w_{opt} (%)	10.5
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.898

3. 不飽和土のせん断試験

3.1 供試体作製方法

供試体の作製には、最適含水比 10.5%となるように蒸留水を混合させた試料を静的締固め装置を用いることで成型した。供試体は、高さ 10cm、直径 5cm の円柱形であり、締固め度は 85%とした。

3.2 体積ひずみ測定方法

本研究では、軸変位計と側方に設置した非接触変位計 (ギャップセンサー) を用いた方法、供試体の写真から画像処理を行う方法により、直接供試体を計測することで体積ひずみを測定している。軸ひずみ-体積ひずみ関係では画像解析による結果を示す。

3.3 試験条件、応力変数

非排気-非排水三軸圧縮試験の試験条件を表-2 に示す。応力変数には平均骨格応力 σ'_m を用いている。

$$\sigma'_m = \sigma_m - P^F \tag{1}$$

$$P^F = (1 - S_r)u_a + S_ru_w \tag{2}$$

ここで、 σ_m : 平均全応力、 P^F : 平均間隙圧、 S_r : 飽和度、 u_a : 間隙空気圧、 u_w : 間隙水圧である。

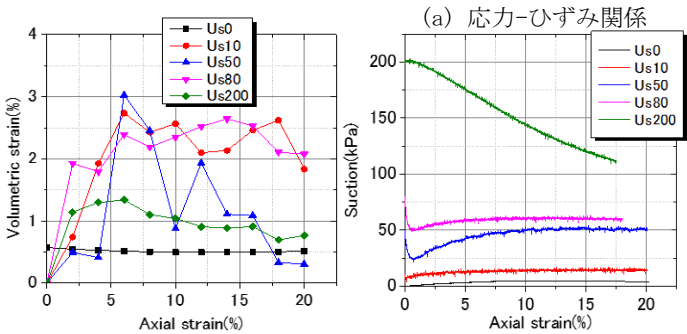
表-2 試験条件およびせん断前諸量(※は狩野(2013))²⁾

ケース名	セル圧 (kPa)	間隙空気圧 (kPa)	間隙水圧 (kPa)	サクシオン (kPa)	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)	ひずみ速度 (%/min)
Us0 ※	300	200	200	0	0.583	17.16	77.63	0.1
Us10 ※	300	200	190	10	0.607	10.69	46.43	0.1
Us50	300	200	150	50	0.597	10.21	45.08	0.1
Us80 ※	300	200	120	80	0.613	9.98	42.97	0.1
Us200 ※	300	200	0	200	0.592	8.96	39.91	0.1

3.4 試験結果 (初期サクシオンの影響)

図-2 に結果を示す。(a) 応力-ひずみ関係より、初期サクシオンが大きいほど軸差応力が大きくなる傾向にある。(b) 軸ひずみ-体積ひずみ関係より、限界状態の体積圧縮ひずみは Us80 で最大、Us50 で最小となった。

(c) 軸ひずみ-サクシオン関係では、サクシオン Us200 は減少、Us50、Us80 は減少してから増加し一定に、Us0、Us10 はあまり変化しなかった。



(b) 軸ひずみ-体積ひずみ関係 (c) 軸ひずみ-サクシオン関係

図-2 非排気-非排水三軸圧縮試験結果

キーワード 不飽和土、サクシオン、三軸圧縮試験、有限要素法

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 4 C クラスター C1 棟 TEL 075-383-3193

3.5 試験結果 (限界状態での応力比)

図-3 に骨格応力径路を飽和土 (CD, CU) および排気-排水試験結果²⁾と併せて示す。これより、飽和時、不飽和時、排気-排水条件、非排気-非排水条件などに関わ

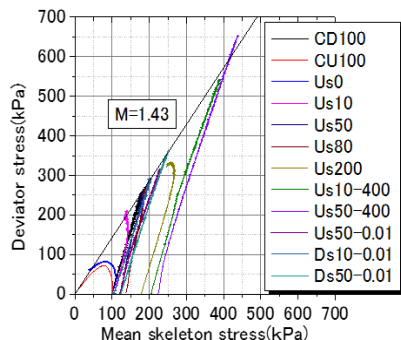


図-3 骨格応力径路

らず限界状態での応力比はほぼ 1.43 となった。

4. 弾粘塑性構成式による空気-水-土連成有限要素解析

4.1 概要

不飽和土の弾粘塑性構成式を導入した空気-水-土連成有限要素解析を用い、サクシオン 10kPa の非排気-非排水三軸圧縮試験の再現を試みた。

4.2 解析モデル

解析モデルは図-4 の通りで、各層 1cm×10 層としており、本研究の試験で使用している直径 5cm の円柱供試体の 4 分の 1 をモデル化している。

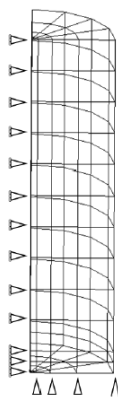


図-4 解析モデル

4.3 水分特性モデルの改良

本研究では、新たにせん断中の体積変化に伴う飽和度の変化を考慮した水分特性モデルを導入した。用いたモデルは Gallipoli *et al.*³⁾を参考にしており、次式で表される。

$$S_{re} = \left\{ 1 + (\phi e \psi s)^{n'} \right\}^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n'} \quad (3)$$

$$S_r = S_{rmin} + (S_{rmax} - S_{rmin}) S_{re} \quad (4)$$

ここで、 S_{re} : 有効飽和度、 e : 間隙比、 s : サクシオン、 ϕ , ψ , n' , m : 水分特性に関するパラメータ、 S_{rmin} : 最小飽和度、 S_{rmax} : 最大飽和度である。

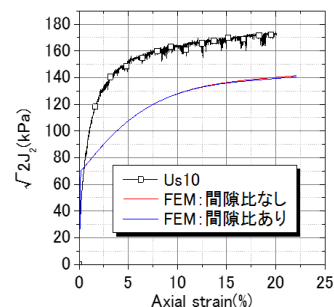
4.4 解析結果

本研究の解析に用いたパラメータを表-3 に、非排気-非排水三軸圧縮試験の再現解析の結果を図-5 に示す。材料定数は排気-排水試験の要素シミュレーションより決定した。なお、ここには間隙比の影響を考慮したモデルと考慮しない従来のモデルの双方から得られた結果を併せて示している。また、これらの結果は全要素平均から求めたものであり、偏差応力の第 2 不変量 $\sqrt{2J_2}$ を用いている。(a) 軸ひずみ- $\sqrt{2J_2}$ 関係では $\sqrt{2J_2}$ が過小

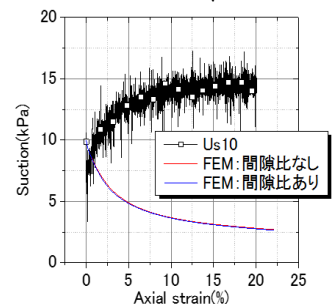
評価されたほか、(b) 軸ひずみ-サクシオン関係では試験結果に見られたサクシオンの上昇を評価することが出来なかった。(c) サクシオン-飽和度関係に関しては、改良モデルによりせん断に伴う飽和度の上昇をより大きく評価することが出来た。

表-3 解析に用いたパラメータ

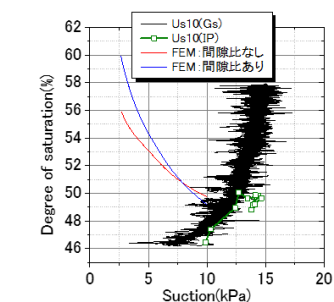
初期サクシオン (kPa)	10
ひずみ速度 (%/min)	0.1
圧縮指数 λ	0.080
膨潤指数 κ	0.009
初期間隙比 e_0	0.597
初期せん断弾性係数 G_0	2.667×10^4
初期平均骨格応力 σ'_{m0} (kPa)	1.048×10^2
擬似過圧密比 $\sigma'_{mb}/\sigma'_{m0}$	1.2
変相応力比 M'_m	1.17
粘塑性パラメータ m'	39
粘塑性パラメータ C_{01} (1/s)	3.0×10^{-15}
粘塑性パラメータ C_{02} (1/s)	5.0×10^{-15}
内部構造パラメータ σ'_{maf} (kPa)	25.261
内部構造パラメータ β	1.0
サクシオンパラメータ S_f	0.3
サクシオンパラメータ s_d	0.25
透水性係数 k^w (m/s)	1.0×10^{-5}
透気係数 k^g (m/s)	1.0×10^{-4}
水分特性パラメータ α (1/kPa)	20
水分特性パラメータ n'	1.084
水分特性パラメータ ϕ	4.0×10^3
水分特性パラメータ ψ	13.344
形状パラメータ a	3.0
形状パラメータ b	2.3
最大飽和度 S_{rmax}	0.776
最小飽和度 S_{rmin}	0.0



(a) 軸ひずみ- $\sqrt{2J_2}$ 関係



(b) 軸ひずみ-サクシオン関係



(c) サクシオン-飽和度関係

図-5 解析結果 (非排気-非排水、初期サクシオン 10kPa)

5. 結論

非排気-非排水三軸圧縮試験では、初期サクシオンの増加による強度の増加を確認した。また、骨格応力で整理した限界状態での応力比は、実験条件に関わらず 1.43 とほぼ同一の値となった。

体積変化による飽和度の変化を考慮した水分特性モデルを新たに導入し、不飽和土の弾粘塑性構成式を用いた空気-水-土連成有限要素解析を実施した。非排気-非排水三軸圧縮試験の再現解析を行い、せん断に伴う飽和度の上昇をより大きく評価することが出来た。

参考文献

- 1) Jommi, C., Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils, Tarantio, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, pp.139-153, 2000.
- 2) 狩野修志, 飽和および不飽和砂質土の非排気-非排水条件下における力学特性, 京都大学大学院修士論文, 工学研究科, 2013.
- 3) Gallipoli, D., Wheeler, S. J., Karstunen M., Modelling the variation of degree of saturation of a deformable unsaturated soil, *Géotechnique*, 53, No.1, pp105-112, 2003.