

京都大学工学部 学生会員 ○石川 椋

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、不飽和土の等方圧縮試験を行い、せん断試験の限界状態とともに骨格応力を用いて e - $\log \sigma'_m$ 平面で整理した。

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、

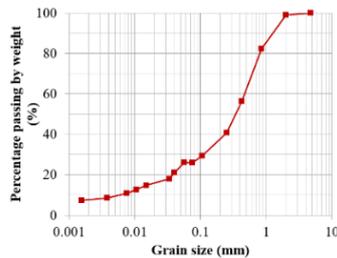


図-1 粒径加積曲線

表-1 に粒径加積曲線、物理特性を示す。

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、軸ひずみ 2% ごとに撮影した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。今回、初期サクシオンを変化させて試験を行った。結果の整理には応力変数として骨格応力 σ'_m を用いている。

$$\sigma'_m = \sigma_m - P^F \quad (1)$$

$$P^F = (1 - S_r)u_a + S_r u_w \quad (2)$$

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(a)~(c)に異なる初期サクシオンでの結果を示す。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。軸ひずみ-体積ひずみ関係より、Us10, Us50, Us200 では軸ひずみ 6% で体積圧縮ひずみが最大となり、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。軸ひずみ-サクシオン関係では、サクシオンは軸ひずみ増加とともに Us200 では減少、Us50, Us80 で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。これは、初期サクシオンの違いによる間隙空気、間隙水の量に起因していると考えられる。

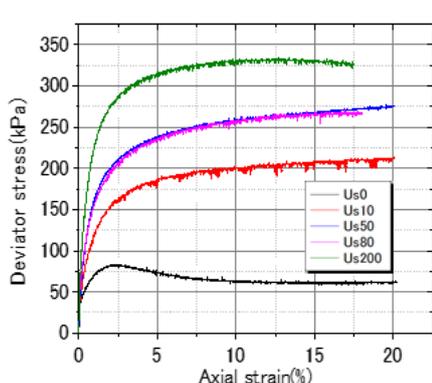


図 2(a) 応力-ひずみ関係

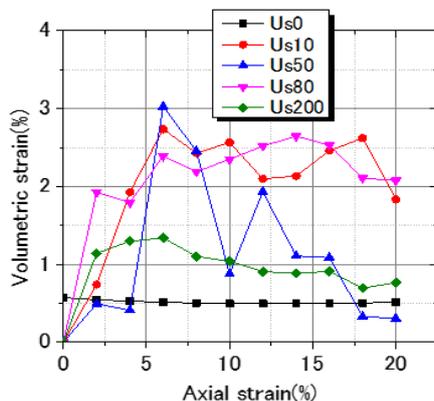


図 2(b) 軸ひずみ - 体積ひずみ関係

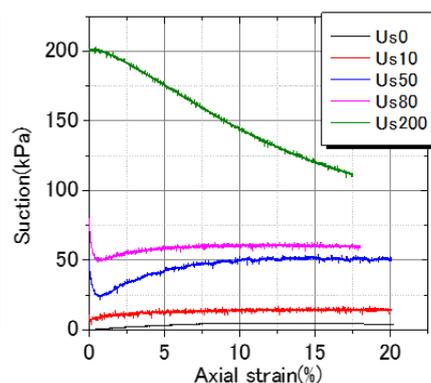


図 2(c) 軸ひずみ - サクション関係

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らず限界状態での応力比は 1.43 となった。

4. 等方圧縮試験

4.1 試験方法, 試験条件

初期セル圧を 120kPa, 間隙空気圧, 間隙水圧を一定とし, セル圧と間隙空気圧の差が 20→40→80→160→320→640kPa となるようにセル圧のみを上昇させた。

排気-排水条件での等方圧縮試験の試験条件を表-3 に示す。

表-3 試験条件および等方圧縮前の諸量

ケース名	セル圧 (kPa)	拘束圧 (kPa)	間隙空気圧 (kPa)	間隙水圧 (kPa)	サクション (kPa)	間隙比 e	含水比 w (%)	飽和度 S_r (%)
s10compress	120→740	20→640	100	90	10	0.628	10.90	45.77
s50compress	120→740	20→640	100	50	50	0.622	10.39	44.06

4.2 試験結果

図-4 に試験で得られた不飽和時の正規圧密線を, サクション 10kPa, 50kPa でのせん断試験から得られた限界状態での $e-\log \sigma'_m$ 関係, 狩野(2013)²⁾による飽和時の限界状態線とともに示す。

これより, 不飽和時の圧縮指数は, サクション 10kPa では $\lambda=0.080$, サクション 50kPa では $\lambda=0.092$ と求められ, サクションが大きいほど圧縮指数 λ は大きくなった。また, 圧縮指数 λ と同様に, サクションが大きいほど限界状態線の傾きは大きくなり, また飽和時よりも不飽和時で限界状態線の傾きは大きくなった。

5. 結論

不飽和砂質土を用いてせん断試験, 排気-排水等方圧縮試験を行い, 骨格応力を用いて, 限界状態に着目し結果を整理した。

せん断試験では, 初期サクション, セル圧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 とほぼ同一の値なった。

等方圧縮試験では, 骨格応力で整理した $e-\log \sigma'_m$ 平面の圧縮指数 λ はサクションが大きいほど大きくなった。圧縮指数 λ と同様に, 限界状態線の傾きはサクションが大きいほど大きくなった。

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三軸圧縮試験, 土木学会全国大会, pp.193-194, 2013.

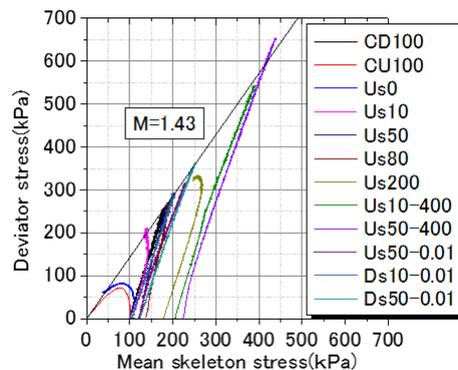


図-3 骨格応力径路

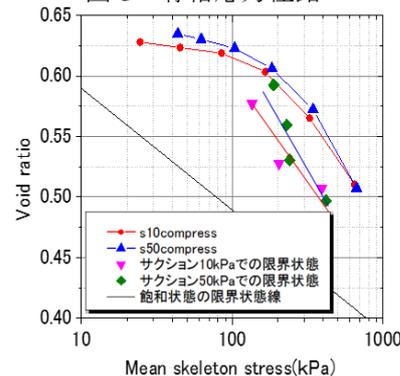


図-4 不飽和時の正規圧密線

および限界状態での $e-\log p'$ 関係