

不飽和粘性土の強度特性に及ぼすせん断速度の影響

地盤工学研究室 武田 成史
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

地盤の安定解析にはそれぞれの地点の応力状態に対応するせん断強度を用いることが重要である。不飽和土の場合、土中のサクシジョンの大きさ、軸圧縮中の排気・排水条件、土質材料の物理的性質などの影響因子は多数あると考えられる。昨年の研究では、あるせん断速度において強度異方性が発現することが確認されている。

そこで、本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、せん断中の中間主応力および平均応力が一定の条件のもとで応力～ひずみ関係や最大偏差応力に与えるせん断速度の影響に注目し、不飽和粘性土のせん断試験を行う。その結果をもとに不飽和粘性土の強度特性に及ぼすせん断速度の影響を解明することを目的とする。

2. 試験概要

(1) 試験装置

本研究では、3次元応力状態を再現できる中空ねじりせん断装置を用いて実験を行った。この装置は、最大主応力方向 α と中間主応力係数 b を任意に設定することができる。また、供試体上部から空気圧を400kPa 載荷し、供試体下部で接しているセラミックフィルターより脱水させる加圧板法により不飽和化を行った。

(2) 試料

本研究で用いた試料は、新潟県柏崎市米山付近より採取したラテライト系粘土（以下、米山粘性土と称する）である。米山粘性土の物性値は、土粒子密度 $\rho_s=2.74\text{g/cm}^3$ 、液性限界 $W_L=52(\%)$ 、塑性限界 $W_P=29(\%)$ 、塑性指数 $I_P=23(\%)$ 、粘土分 23.6(%)、シルト分 57.0(%)、砂分 19.4(%)である。供試体の作製は、乾燥した試料に蒸留水を加え、スラリー状にしたものを圧密容器内で一次元圧密した。そして、できた土塊を外径 80mm、内径 50mm、高さ 160mm の中空円筒形に成形した。

3. 試験手順および試験ケース

(1) 試験手順

まず、飽和状態で成形した供試体を試験機に設置し、飽和させ、 $p'=50\text{kPa}$ で圧密を行う。そして、 $p'=50\text{kPa}$ を一定に保ったまま K 値が 0.35 に達するまで排水せん断を行った後、供試体を不飽和化させた。不飽和化させた後、 K 値を一定に保ったまま $p'=300\text{kPa}$ で圧密を行った。この時、最大主応力方向 α' を変化させることにより、異方圧密を行っている。そして、排水状態で q を除荷し等方状態でせん断を行った。実験条件では、 K 一定圧密時の主応力方向を $\alpha_c=45,0,45(\text{deg})$ と変化させ、圧密時の中間主応力係数 $b_c=0$ と固定し、せん断時の主応力方向 $\alpha_s=45(\text{deg})$ 中間主応力係数に関しては $b_c=0.5$ で一定とした。

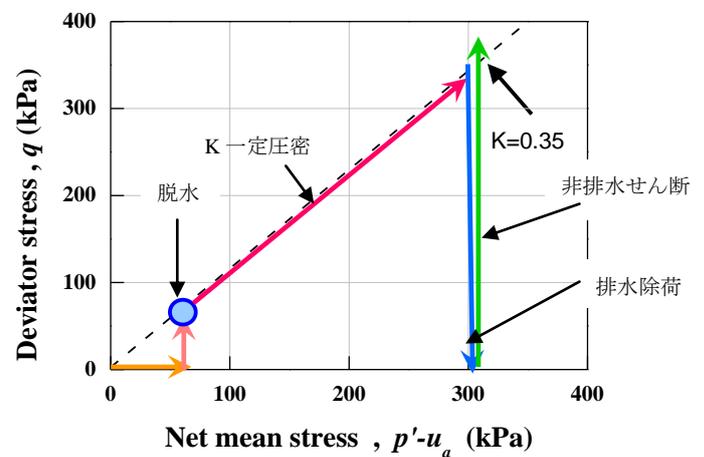


Fig.1 不飽和粘性土の試験経路

(2) 試験ケース

本研究では、不飽和土非排水せん断試験 $\alpha'=0,45,90(\text{deg})$ の 3 パターンの試験を行った。その時、せん断速度を毎分 5%、毎分 0.5%、毎分 0.05%、毎分 0.005% と変化させ実験を行った。また、飽和土非排水せん断試験も行った。

4. 試験結果

一般的に、中空ねじりせん断試験をはじめとす

せん断試験による強度は q の最大値をとるが、飽和試験の偏差応力は、せん断ひずみの増加とともに漸増するため、最大値を定めることが難しい。本研究では、せん断ひずみの試験限界を考慮して、せん断ひずみが 5% までの範囲での最大値を最大偏差応力 q_{max} と定めている。

Fig.2 より、最大主応力方向差 $\alpha'=0(\text{deg})$ の時 q の値が一番大きく、最大主応力方向差 $\alpha'=45(\text{deg})$ 、最大主応力方向差 $\alpha'=90(\text{deg})$ ではほぼ同じ値に収束している。これより、 $q-\varepsilon_s$ 関係は、 α_c が変化することで強度異方性があり、 α' により影響を受けることがわかる。**Fig.3** に飽和非排水せん断試験の応力経路を示す。 $\alpha'=0(\text{deg})$ の時では p' はほぼ 300kPa を保っているが、 $\alpha'=45, 90(\text{deg})$ では p' の値が大きく下がっていることがわかる。この結果より、 α' を変化させることで p' の値が変化し、間隙水圧の変化は α' によって変わることが確認できる。この間隙水圧の発生により、有効応力が低下して、強度異方性を引き起こしていることがわかる。

不飽和土の $q-\varepsilon_s$ 関係では、偏差応力に最大値が存在することから、本研究ではその最大値を最大偏差応力 q_{max} と定めている。**Fig.4,5,6** より、 α_c が $q-\varepsilon_s$ 関係に影響を与えていることを確認することができた。また、 K 一定圧密過程における最大主応力方向 α_c とせん断载荷過程における最大主応力方向 α_s の差が小さくなるにしたがい、ピーク時に対するせん断ひずみが大きくなっていることがわかる。偏差応力に関しては、 α' の違いにより差異を確認することができた。 $\alpha'=0(\text{deg})$ の時に最大値を取り、 $\alpha'=45(\text{deg})$ までは減少傾向を示すが、それ以降はほぼ一定な値を示す。これより、 α' が変化することにより、初期勾配の立ち上がり、ピーク強度に対するせん断ひずみおよび q_{max} が影響を受けることがわかった。

Fig.7,8,9 より、せん断にともなう体積ひずみは圧縮傾向にあるが、ピーク強度以降は減少傾向にあることがわかる。また、 α' の増加にともなう ε_v も圧縮性が大きくなっていることから、 α_c が ε_v に影響を及ぼしているといえる。

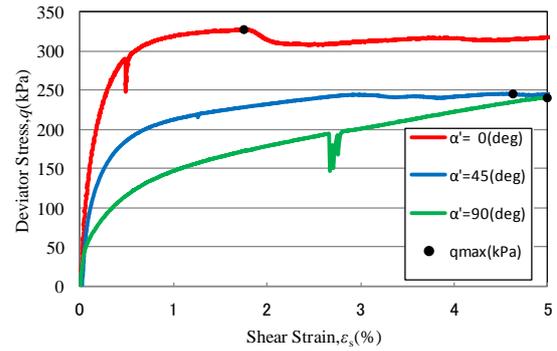


Fig.2 $q-\varepsilon_s$ 関係 (飽和非排水せん断)

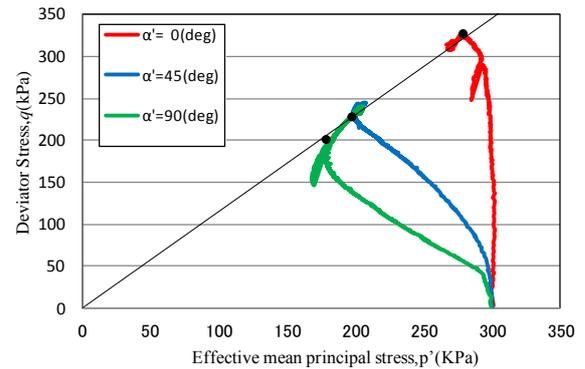


Fig.3 $q-p'$ 関係 (飽和非排水せん断)

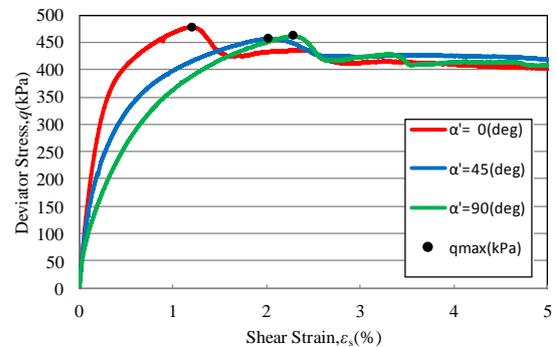


Fig.4 $q-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 0.005%)

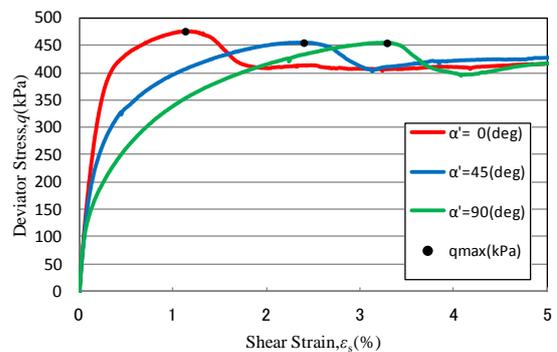


Fig.5 $q-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 0.5%)

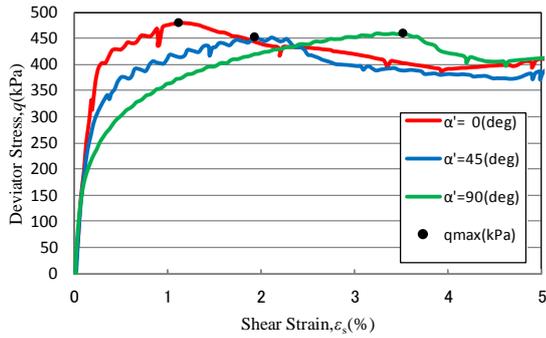


Fig.6 $q-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 5%)

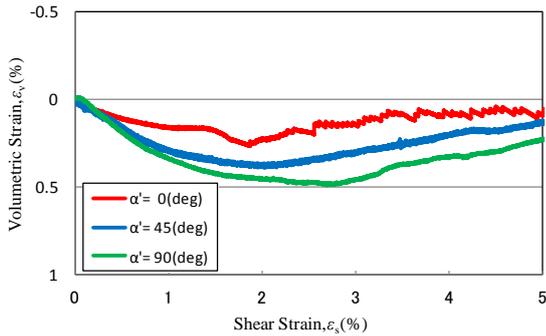


Fig.7 $\varepsilon_v-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 0.005%)

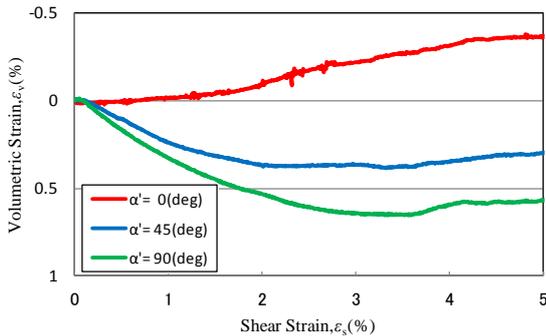


Fig.8 $\varepsilon_v-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 0.5%)

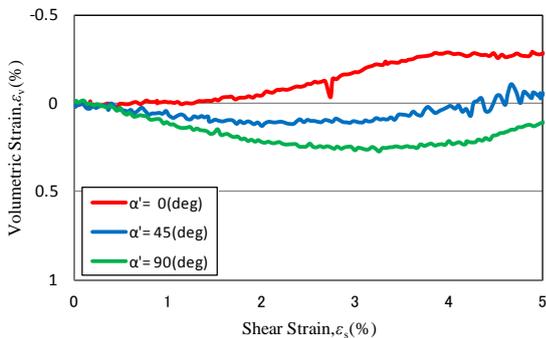


Fig.9 $\varepsilon_v-\varepsilon_s$ 関係 (不飽和非排水せん断毎分 5%)

5. 最大主応力方向差の影響

せん断弾性係数の算出には、正八面体せん断剛性の式 Eq.3 を用いる。本研究では、せん断ひずみ

$\varepsilon_s=0.1\%$ の時の偏差応力 q_1 を用いて割線せん断弾性係数 G を算出する。全ケースにおけるせん断弾性係数 G を Table1.に、示す。

$$G = G_{oct} = \frac{\Delta q}{3\Delta \varepsilon_s} \quad (3)$$

Table1.せん断弾性係数 G(MPa)

		α'		
		0	45	90
不飽和非排水せん断試験	せん断速度0.005%/min	57.9	46.0	33.4
不飽和非排水せん断試験	せん断速度0.05%/min	60.6	53.3	36.5
不飽和非排水せん断試験	せん断速度0.5%/min	65.7	56.8	45.1
不飽和非排水せん断試験	せん断速度5%/min	65.8	65.0	56.8

Fig.11 より最大主応力方向差 α' を変化させることで強度異方性が発生する。Fig.12 より最大主応力方向差が大きくなるほどせん断弾性係数が低下していることがわかる。

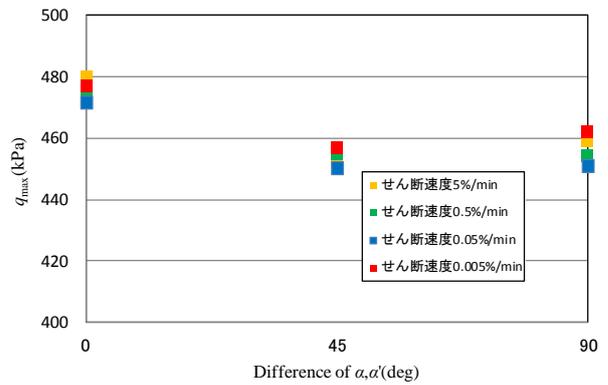


Fig.11 $q_{max}-\alpha'$ 関係

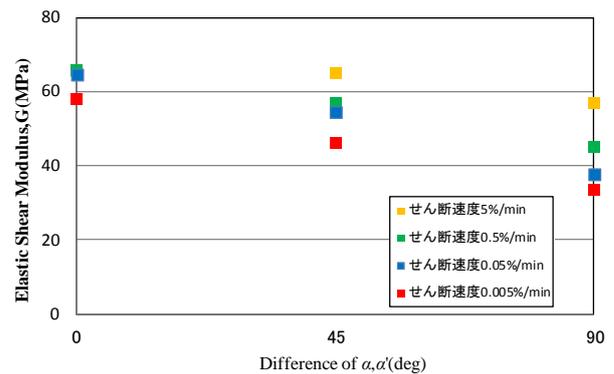


Fig.12 $G-\alpha'$ 関係

6. せん断速度の影響

Fig.13 よりせん断強度は、せん断速度によらず一定となっており、強度異方性の発現も、せん断速度に影響しないことがわかる。Fig.14 よりせん断速度

が大きくなるほどせん断弾性係数が増加していることがわかる。

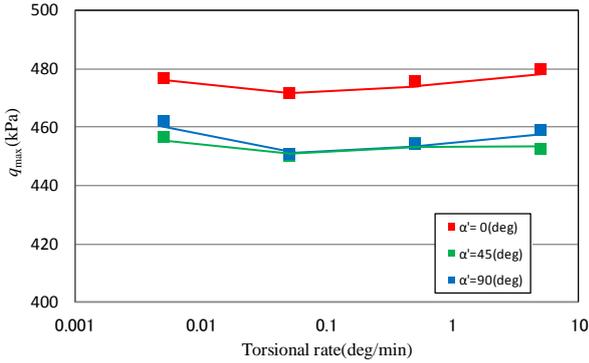


Fig.13 q_{max} - t 関係

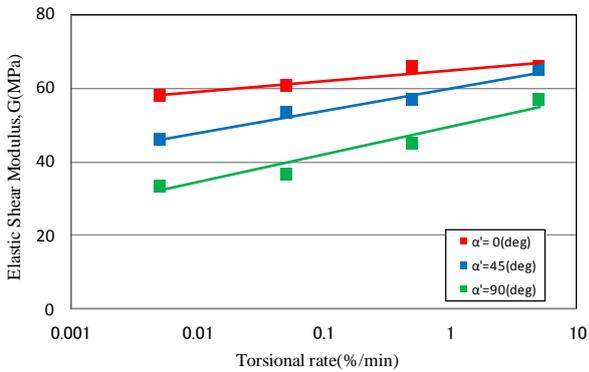


Fig.14 G - t 関係

7. 排水条件の違いによる異方性

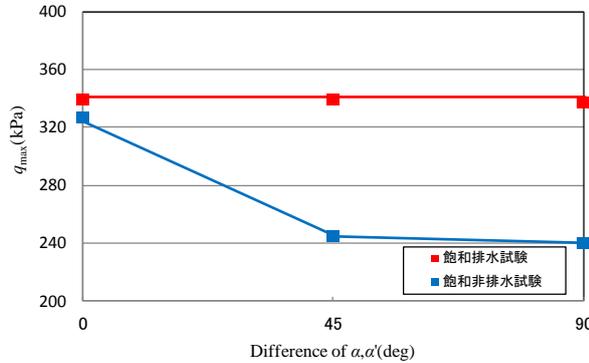


Fig.15 q_{max} - α 関係

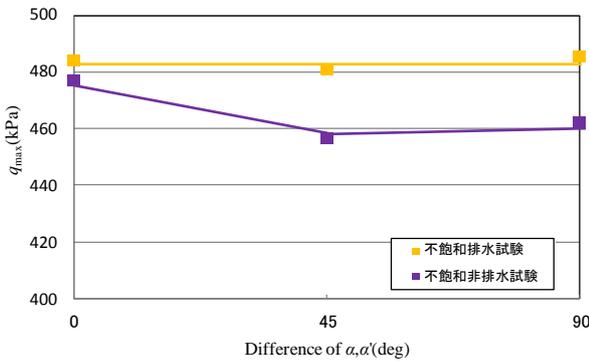


Fig.16 q_{max} - α 関係

Fig.15 に飽和土での結果を示す. 排水試験では強度異方性が発現していないが, 非排水試験では強度異方性が発現している. Fig.16 に不飽和土での結果を示す. こちらも同様, 排水試験では強度異方性が発現していないが, 非排水試験では強度異方性が発現していることがわかる.

8. 不飽和土強度異方性の予測

Fig.17 に飽和土のせん断中における間隙水圧の増分, Fig.18 に不飽和土のせん断中における間隙水圧の増分を示す. 不飽和土の間隙水圧の増分と飽和土の間隙水圧の増分量がよく似ているため, 不飽和土のサクシヨンの変化を飽和土の間隙水圧から推定可能という仮説を立てた.

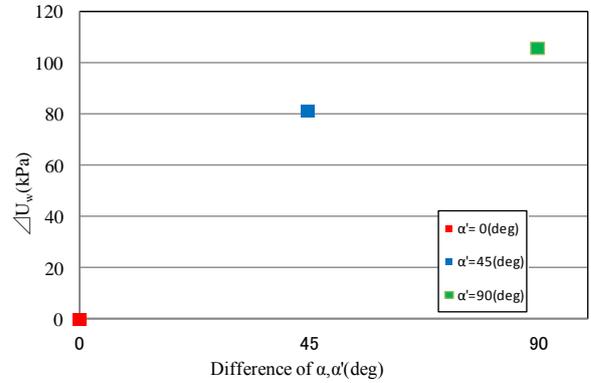


Fig.17 ΔU_v - α 関係(飽和土)

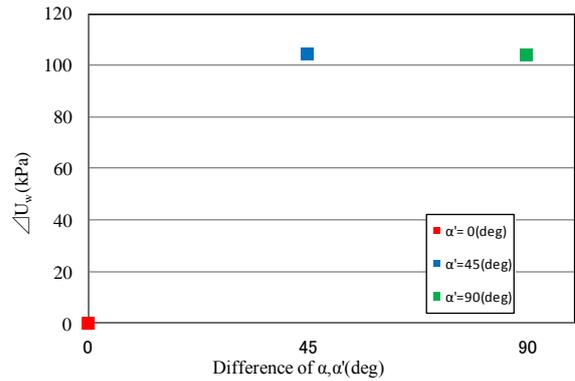


Fig.18 ΔU_v - α 関係(不飽和土)

Fig.19 に, 破壊時のサクシヨンの値と最大偏差応力の値の関係を示す. 同図には, 不飽和土の破壊規準に基づいた, 飽和状態から不飽和状態へ変化する破壊線も示してある. この破壊線によると, 試料の AEV は約 100kPa と予測できる. Fig.20 に米山粘性土の AEV を示す. $p_{net}=300kPa$ のときの飽和度が変

化する値が $s=100\text{kPa}$ 程度であることより, Fig.19 の AEV とほぼ一致していることがわかる. したがって, Fig.19 で整理した結果は, 不飽和土の破壊規準にも適合していると考えられる. つまり, 不飽和土強度異方性は, サクシオン変化によるものと考えられる. さらに, Fig.17 と Fig.18 より, そのサクシオン変化は, 飽和土の間隙水圧変化から予測できる可能性がある.

用いて, 不飽和土の強度異方性の予測法を提案した.

参考文献

- 1) 須佐見朱加: 不飽和土のサクシオンによる強度異方性に関する研究, 平成 24 年度長岡技術科学大学修士論文, 2012

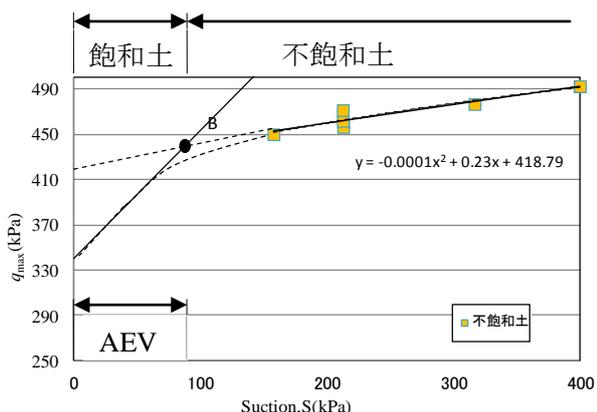


Fig.19 q_{\max} - s 関係

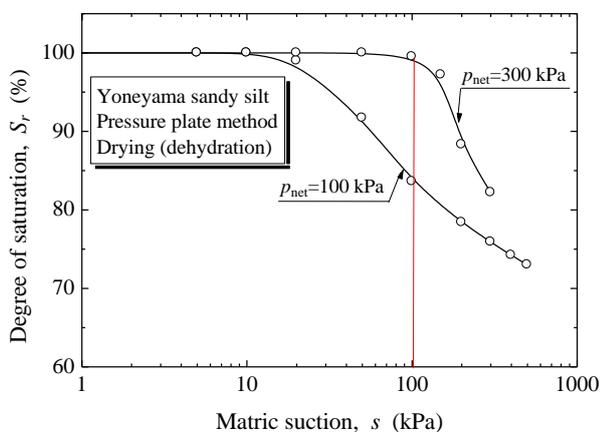


Fig.20 S_r - s 関係

9. 結論

本研究では, 不飽和粘性土の強度特性に及ぼすせん断速度の影響について実験的検討を行った. その結果, せん断速度 (不飽和土非排水試験) は, せん断強度や強度 (異方性) 特性にほとんど影響しなかった. また, 割線せん断弾性係数はせん断速度とともに大きくなった. 最終的に, この強度異方性がサクシオンによりもたらされていること, サクシオン変化は, 飽和土の間隙水圧変化と同等であることを