

不飽和粘性土の力学特性に及ぼす応力・サクシオン履歴の影響

地盤工学研究室 水石 舞衣子
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

実地盤上に構造物や盛土、擁壁を施工した場合を考えると、地盤内に作用する応力は場所により様々な方向から作用している。そのため、構造物による地盤内応力は地点ごとに異なり、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となってくる。そこで、ベラムなどにより、地盤の強度とそれに対応する室内試験方法が提案され、試験方法の違いにより、非排水強度に相違（非排水強度異方性）が生じることが確認されている。従って、安定問題において、どれか一つの試験方法で地盤強度を決定することは不可能であり、非排水強度異方性の合理的な評価を検討することは重要である。

前年度までは、3次元応力状態を再現できる中空ねじりせん断試験装置を用いて、飽和粘性土に対して様々な方向から異方圧密を行い、非排水強度異方性について検討し、合理的な評価方法を提案した¹⁾。しかし、実地盤では、不飽和粘性土も数多く存在する。そこで、本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、不飽和粘性土に対して様々な方向から異方圧密を行い、強度異方性の発現を確認するとともに、異方性が生じるメカニズムの解明を目的として検討を行う。

2. 試験概要

(1) 試験装置

本研究では、コンピューターによるフィードバック自動制御・自動計測が可能な中空ねじりせん断試験装置を用いて試験を実施した。供試体の不飽和化については、サクシオンを加圧板法で制御し、供試体上部より空気圧を載荷し、供試体下部に設置したセラミックディスク(AEV=400, 200kPa)より排水させる方法とした。中空ねじりせん断試験装置では、Fig.1 に示すように鉛直軸力 F_v 、ねじり力 T 、外圧 P_o 、内圧 P_i の4つの外力を作用することが可能である。その結果、3つの直応力（鉛直応力 σ_z 、半径方向応力 σ_r 、円周方向応力 σ_θ ）とねじりせん断応力 $\sigma_{z\theta}$ の独立制御が可能となり実地盤内の様々な応力状態を再現することができる。また、主応力方向 σ_1 の傾きである α を $0 \sim 90(\text{deg})$ 間で連続的に設定することができ、様々な方向に異方応力条件を与えることができる。

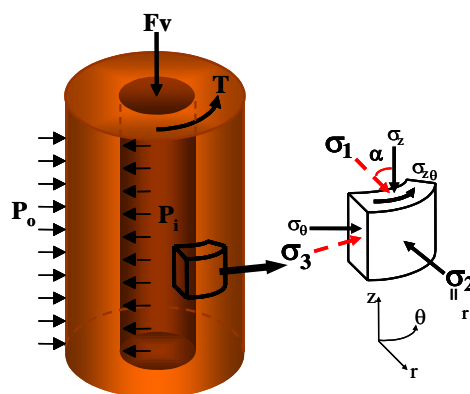


Fig.1 中空ねじりせん断装置

(2) 試料

本研究で使用した試料は、新潟県柏崎市米山付近より採取した米山粘性土である。応力履歴を明確にするため、気乾状態の試料に蒸留水を加えてスラリー状にした。この試料を充分脱気した後、予圧密セルを用いて 50(kPa)の圧力で予圧密を行い、その土塊から外径 80(mm)、内径 50(mm)、高さ 160(mm)の中空円筒形供試体を作製し試験を行った。

3. 試験および試験ケース

(1) 試験手順

本研究では、強度異方性の発現を確認するため、飽和粘性土の排水せん断試験、サクシオンの値、試験経路を変化させた不飽和粘性土の排水せん断試験を行った。ここでは、不飽和粘性土の排水せん断試験手順について記述する。不飽和粘性土の排水せん断試験における各試験経路を Fig.2 に示

す。まず、不飽和粘性土の排水せん断試験の試験経路 1 では、飽和状態で成形した供試体を試験機に設置し、予備圧密を等方状態で $p'=50\text{kPa}$ で行い、その後 $p'(50\text{kPa})$ を一定に保ち $q=48\text{kPa}$ まで応力履歴を載荷し、 $K=0.43$ になるまで排水せん断を行った（図中黄色線）。目的の K 値に達したら、制御を切り替え K 値一定のまま $p'=300\text{kPa}$ まで K 一定圧密を行う（図中青線）。この K 一定圧密時の最大主応力方向 α_c を様々な方向へ変化させ、地点ごとに異なる応力状態を再現しているものとする。 K 一定圧密については、本節の (2) において詳細に示す。その後、加圧板法によりサクシオン $s=400\text{kPa}$ を載荷し、供試体を不飽和化させる（図中ピンク丸）。不飽和化させた後、排水除荷し（図中緑線）、等方状態にしてから $\alpha_s=45(\text{deg})$, $b_s=0.5$ の条件で排水せん断を行った（図中赤線）。次に試験経路 2 は、予備圧密を $p'=50\text{kPa}$ で行った後、等方状態のままサクシオン $s=400$, 200kPa を載荷し、供試体を不飽和化させた（図中オレンジ丸）。供試体を不飽和化させた後、 $q=48\text{kPa}$ ($K=0.43$) まで排水せん断を行い、その後、試験経路 1 と同様の手順を経た。

飽和粘性土の排水せん断試験の試験ケースを Table.1 に、不飽和粘性土の排水せん断試験の試験ケースを Table.2 に示す。Table.2 の飽和度から分かるように、供試体を不飽和化させる段階が異なるとせん断載荷過程前の飽和度に 10% 前後の違いが生じていることが分かる。

(2) K 一定圧密

本研究では、原地盤応力状態を再現するために K 値を一定に保持しながら圧密を行った（以後、 K 一定圧密と呼ぶ）。この K 一定圧密時の最大主応力方向 α_c を様々な方向へ変化させ、地点ごとに異なる応力状態を再現しているものとする。なお、 K 一定圧密過程の K 値は三軸試験より求めた $K=0.43$ を用いた。試験条件は、 K 一定圧密時の主応力方向 $\alpha_c=45, 22.5, 0, -22.5, -45$ 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 $b_s=0.5$ と固定した。ここで、本研究で K 一定圧密時の最大主応力方向を α_c 、せん断時の最大主応力方向を α_s とし、 α_c から α_s を引いた絶対値を α' とする。

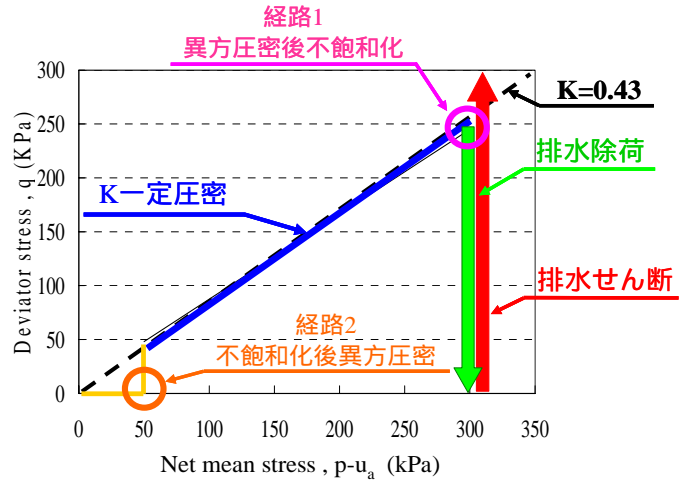


Fig.2 不飽和粘性土の排水せん断試験における試験経路

Table.1 飽和粘性土の排水せん断試験の試験ケース

| K一定圧密 ($p'=300\text{kPa}$) | | せん断載荷過程 排水せん断試験 | |
|---------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|
| 最大主応力方向 α_c (deg) | 中間主応力係数 b_c | 最大主応力方向 α_s (deg) | 中間主応力係数 b_s |
| 45 | 0 | 45 | 0.5 |
| 22.5 | | | |
| 0 | | | |
| -22.5 | | | |
| -45 | | | |

Table.2 不飽和粘性土の排水せん断試験の試験ケース

| サクシオン s (kPa) | 経路 No. | K一定圧密 ($p'=300\text{kPa}$) | | 飽和度 S_r (%) | せん断載荷過程 排水せん断試験 | |
|--------------------|-----------|---------------------------------|-------|------------------|--------------------|-------|
| | | α_c (deg) | b_c | | α_s (deg) | b_s |
| 400 | 1 | 45 | 0 | 97 | 45 | 0.5 |
| | | 22.5 | | 96 | | |
| | | 0 | | 95 | | |
| | | -45 | | 95 | | |
| | 2 | 45 | 0 | 86 | 45 | 0.5 |
| | | 22.5 | | 87 | | |
| | | 0 | | 90 | | |
| | | -22.5 | | 88 | | |
| 200 | 2 | 45 | 0 | 88 | 45 | 0.5 |
| | | 22.5 | | 89 | | |
| | | 0 | | 88 | | |
| | | -22.5 | | 91 | | |
| | | -45 | | 86 | | |

ここで、本研究で K 一定圧密時の最大主応力方向を α_c 、せん断時の最大主応力方向を α_s とし、 α_c から α_s を引いた絶対値を α' とする。

4. 試験結果

飽和粘性土の排水せん断試験における偏差応力 - せん断ひずみ関係, 体積ひずみ - せん断ひずみ関係を Fig.3(a), (b)に, 不飽和粘性土の排水せん断試験における経路 1 の偏差応力 - せん断ひずみ関係, 体積ひずみ - せん断ひずみ関係を Fig.4(a), (b), サクシオン $s=200\text{kPa}$ の経路 2 を Fig.5(a), (b), $s=400\text{kPa}$ の経路 2 を Fig.6(a), (b)に示す.

偏差応力 - せん断ひずみ関係より, 飽和粘性土, 不飽和粘性土ともに最大主応力方向差 $\alpha'=0$ 時 (deg) (K 一定圧密時の最大主応力方向 α_c とせん断時の最大主応力方向 α_s が一致) に立ち上がりの傾きが最も急になっていることが分かる. そして, 主応力方向 α' が増加するに伴い, 立ち上がりの傾きは穏やかになっている. また, Fig.3(a), Fig.4(a)より飽和粘性土と不飽和粘性土の排水せん断試験の経路 1 では, 最大主応力方向 α' の変化によるピーク時の偏差応力の差異は 5kPa 程度と誤差範囲内であり, 両試験においては最大主応力方向 α' の変化による偏差応力の差異は確認できなかった. しかし, 不飽和粘性土の排水せん断試験における低い拘束圧のもとで供試体を不飽和化させた後, 異方圧密を行う経路 2 においては, 最大主応力方向 α' の変化によるピーク時の偏差応力に差異を確認することができた. サクシオン $s=200\text{kPa}$ での最小値と最大値の差異は, 30kPa 程度, $s=400\text{kPa}$ では 42kPa 程度の差異が生じた. また, Fig.5(a), Fig.6(a)から見て取れるようにサクシオンの値によらず, 最大主応力方向 $\alpha'=45(\text{deg})$ でピーク時の偏差応力が最大となった.

体積ひずみ - せん断ひずみ関係においては, Fig.3(b), Fig.5(b), Fig.6(b)より飽和粘性土の排水せん断試験, 不飽和粘性土の排水せん断試験における経路 2 ではせん断時の体積ひずみは圧縮傾向にあることが分かる. 不飽和粘性土の排水せん断試験における経路 1 では, 最大主応力方向 $\alpha'=0$, $22.5(\text{deg})$ の試験結果においてせん断ひずみが増加するに従い, 体積ひずみは圧縮側から膨張側に変化した. 間隙比とサクシオンが関係していると考えられる. また, 飽和粘性土, 不飽和粘性土ともに最大主応力方向 α' が増加するに伴い体積ひずみは増加していることが分かる.

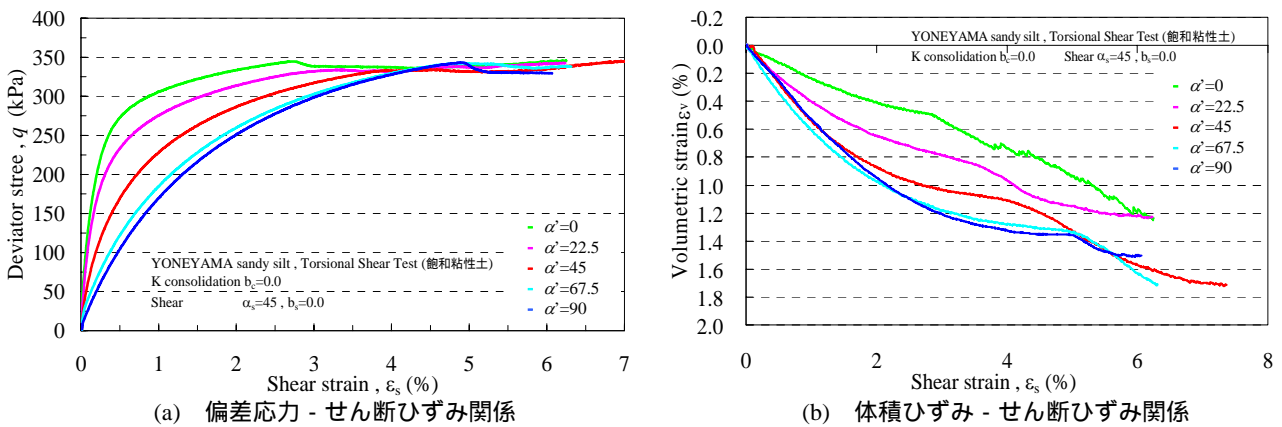


Fig.3 飽和粘性土の排水せん断試験

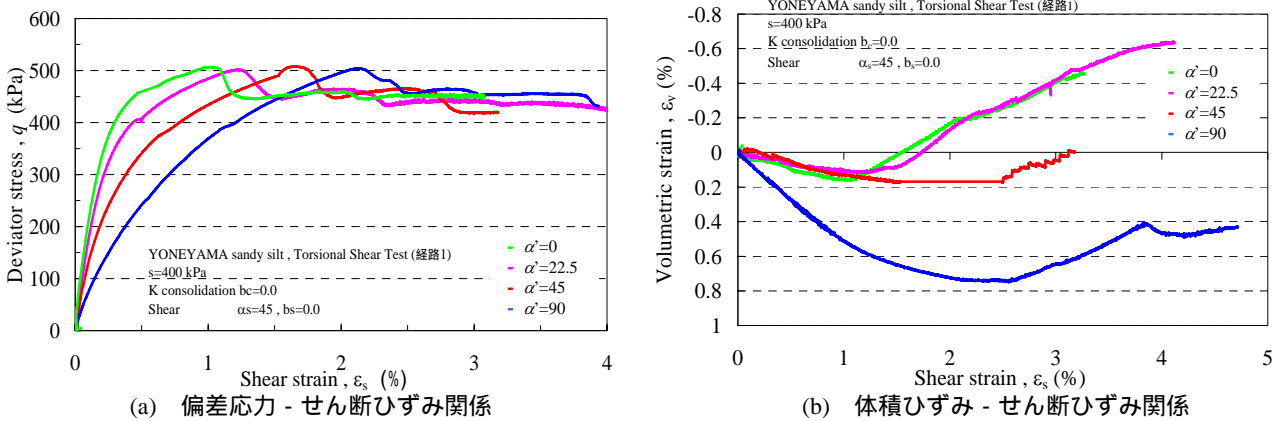
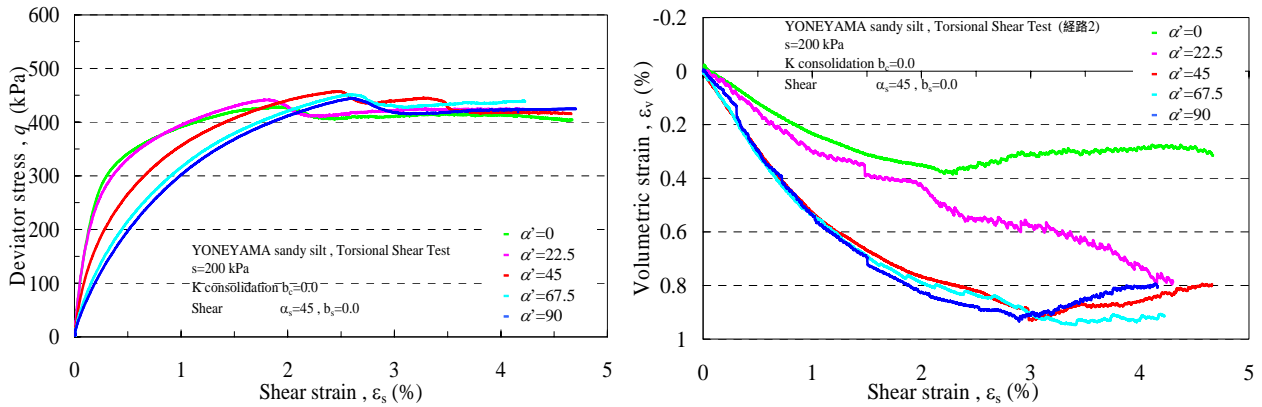
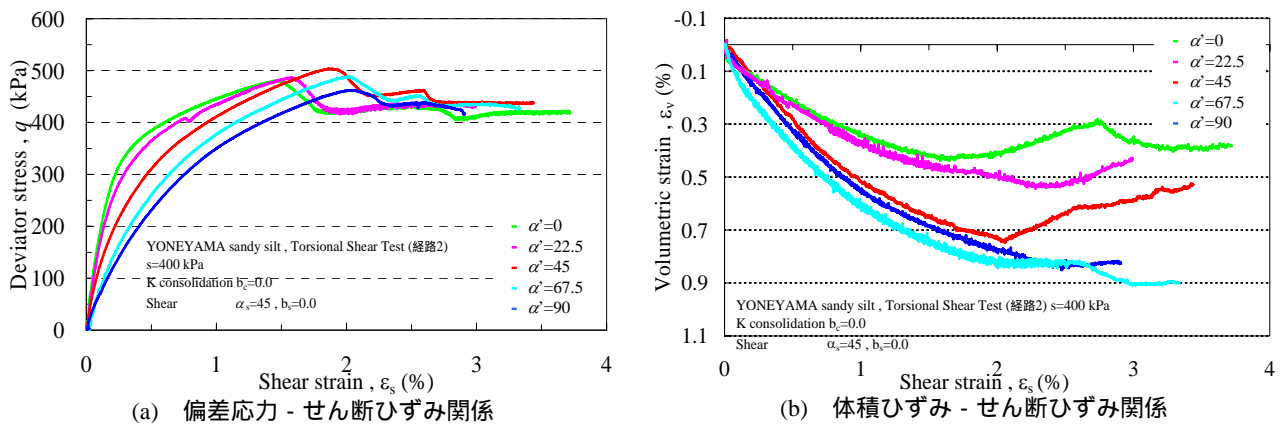


Fig.4 不飽和粘性土の排水せん断試験(経路 1)



(a) 偏差応力 - せん断ひずみ関係 (b) 体積ひずみ - せん断ひずみ関係

Fig.5 不飽和粘性土の排水せん断試験 (経路 2:s=200kPa)



(a) 偏差応力 - せん断ひずみ関係 (b) 体積ひずみ - せん断ひずみ関係

Fig.6 不飽和粘性土の排水せん断試験 (経路 2:s=400kPa)

5. 強度異方性の発現

Fig.7 に砂の固有異方性に関する既往の研究より得られた砂の強度異方性を示す²⁾。ここで、図中 δ (度) は $\delta=90-\alpha'$ で表すことができる。Fig.7 より砂の固有異方性では、最大主応力方向 $\alpha'=60(\text{deg})(\delta=30)$ 付近で応力比が最小の値を示していることがわかる。また、土のすべり面は、 $\theta=(\pi/4)+(\phi/2)$ で予測することができ、一般的な土のせん断抵抗角 ϕ は $30 \sim 40^\circ$ であることから、すべり面は $\theta=60^\circ$ 付近で入ると言える。これらより、平面ひずみ圧縮試験における砂の固有異方性では、すべり面と堆積面が一致した 60° 付近でせん断抵抗力が最も弱くなっている。これは、粒子の配向性により、堆積面方向がすべりやすくなっているためと理解できる。一方、三軸圧縮試験においては、 $60^\circ \sim 90^\circ$ でほぼ一定値となっており、明確な差異は確認できない。

本研究より得られた飽和粘性土、不飽和粘性土の経路 1 ($s=400\text{kPa}$)、2 ($s=400, 200\text{kPa}$) の排水せん断試験における排水強度 - 最大主応力方向 α' 関係を Fig.8 に示す。ここで、各試験のピーク時の最大偏差応力 $q(\text{kPa})$ を排水強度と決定し、結果の整理に用いた。Fig.3 より飽和粘性土の排水せん断試験では、最大主応力方向 α' の変化に伴う排水強度の差異は確認できなかった。よって、飽和粘性土の排水せん断試験では異方圧密による強度異方性は発現しないといえる。異方圧密による誘導異方性で、砂と同様な配向性が生じたと考えられるが、粘性土の場合は、せん断時の応力状態の変化により、容易に配向性が崩れるため影響がなかったと考えることができる。

また、不飽和粘性土の経路 1 による排水せん断試験においても最大主応力方向 α' の変化による排水強度の差異は確認できなかった。しかし、不飽和粘性土の経路 2 においては最大主応力方向 α' の変化による排水強度の差異を確認することができた。Fig.3 より分かるように最大主応力方向 $\alpha'=45(\text{deg})$ までは α' の増加に伴い排水強度も大きくなり、 $\alpha'=45(\text{deg})$ 以降は α' の増加に伴い排水強度は小さくなり、山なりの傾向を示している。この傾向は、サクシオン $s=200\text{kPa}$ においても同様の

傾向を示した。不飽和粘性土の排水せん断試験の経路2で確認できた最大主応力方向 α' の変化による排水強度の差異は、サクシオンがもたらす強度異方性であると考えられる。この様に、粘性土の排水強度異方性は、砂のそれとは全く異なった傾向を示している点が興味深い。不飽和土の異方性発現のメカニズムについては、7節において考察する。

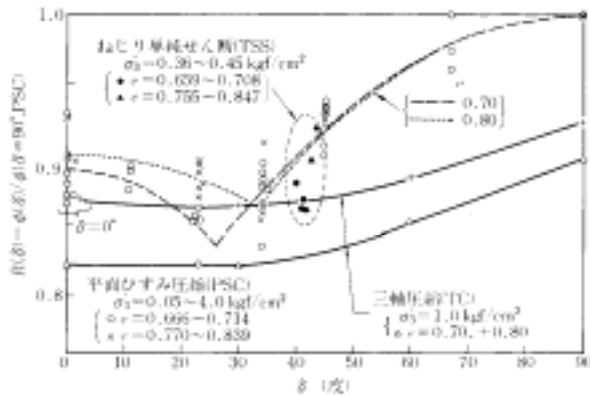


Fig.7 空中落下法で作成した豊浦砂の強度異方性 (Tatsuoka et al., 1986.)

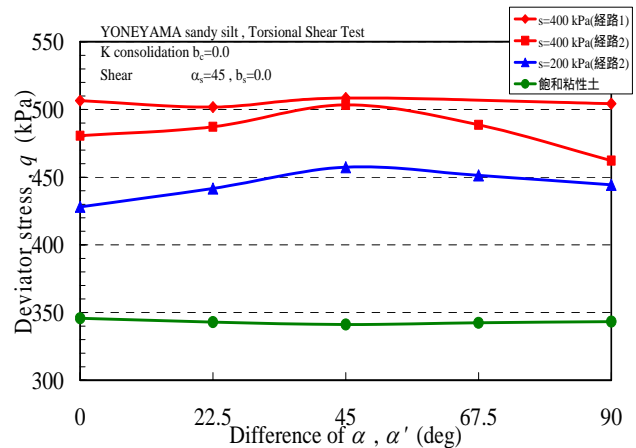


Fig.8 全試験ケースの排水強度 - 最大主応力方向 α' 関係

6. 正規化

本研究で得られた試験結果を Eq.(1)を用いて正規化を行った。

$$q_{\alpha' nor} = \frac{q_{\alpha'=0(unsat)} - q_{\alpha'=0(sat)}}{q_{\alpha'=0(unsat)} - q_{\alpha'=0(sat)}} \quad \text{Eq.(1)}$$

ここで、 $q_{\alpha'=0(unsat)}$ ：不飽和粘性土の最大主応力方向 $\alpha'=0(\text{deg})$ 時での排水強度、 $q_{\alpha'(unsat)}$ ：不飽和粘性土の最大主応力方向 α' の変化に対応する排水強度、 $q_{\alpha'=0(sat)}$ ：飽和粘性土の最大主応力方向 $\alpha'=0(\text{deg})$ 時での排水強度とする。正規化の結果を Fig.9 に示す。この結果から異方圧密を行うことで最大主応力方向 $\alpha'=0(\text{deg})$ 時に対して、サクシオン $s=200\text{kPa}$ では最大で約 1.4 倍、 $s=400\text{kPa}$ では約 1.2 倍強度が増加することが本研究において分かった。また、サクシオンの値によらず最大主応力方向 $\alpha'=45(\text{deg})$ 付近で応力比が最大となることが分かり、先に示した最大主応力方向 $\alpha'=60(\text{deg})$ 付近で応力比が最小となる砂の固有異方性の傾向とは逆の傾向を示している。

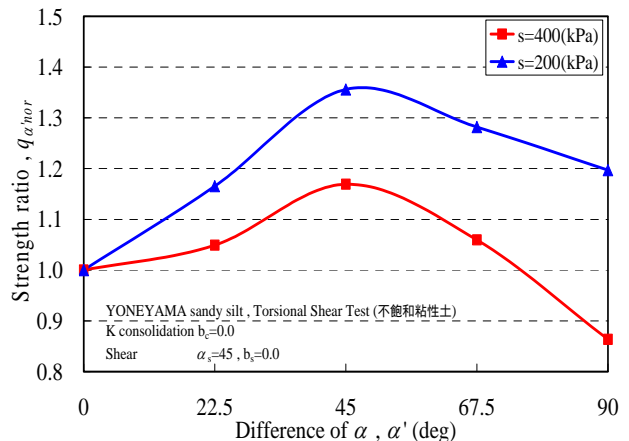


Fig.9 正規化による結果の整理

7. サクシオンによる強度異方性のメカニズム

前述した結果が得られた理由として、考えられる強度異方性のメカニズムを Fig.10(a), (b)の土粒子の模式図を用いて説明する。 σ_1 の方向に対して圧密されている状態を考えた場合、飽和粘性土では間隙水圧 $u_w=0$ であり、サクシオンによる力は作用しない。この時の飽和粘性土の有効応力 σ' は図中の(1)式で表すことができる。さらに σ_1 の方向に圧密が進行すると A 面における土粒子同士の接触点が増えることになるが、有効応力は変化しない(図中(2)式)。よって、飽和粘性土では接触点数による有効応力の変化はないため、粒子接触力による異方性は発現しない。しかし、不飽和粘性土の場合では、飽和粘性土の全応力に加えてサクシオンにより形成されるメニスカスにより、土粒子同士が引きつけられる。概念的な有効応力(骨格応力) σ_e は図中(3)式で表すことができる。さらに σ_1 の方向に対して圧密が進行すると A 面における土粒子同士の接触点が増え、サクシオンによる

作用力は接触点数とともに増加し、有効応力（骨格応力）は増加する(図中(4)式)．そして、この A 面の角度が破壊面と一致した時、この面で有効応力（骨格応力）が最も大きいため、せん断抵抗も強くなると考えられる．よって、理論的には最大主応力方向 $\alpha'=60(\text{deg})$ 付近で最大になると考えられるが、実験においてもほぼ近い値、 $\alpha'=45(\text{deg})$ 付近で最もせん断抵抗が大きくなったと思われる．また、試験経路 1 において差が出なかった理由は、圧密後に脱水しているため、あまり水が抜けずに高い飽和度を保っており、十分なメニスカスが形成されなかったためと考えられる．

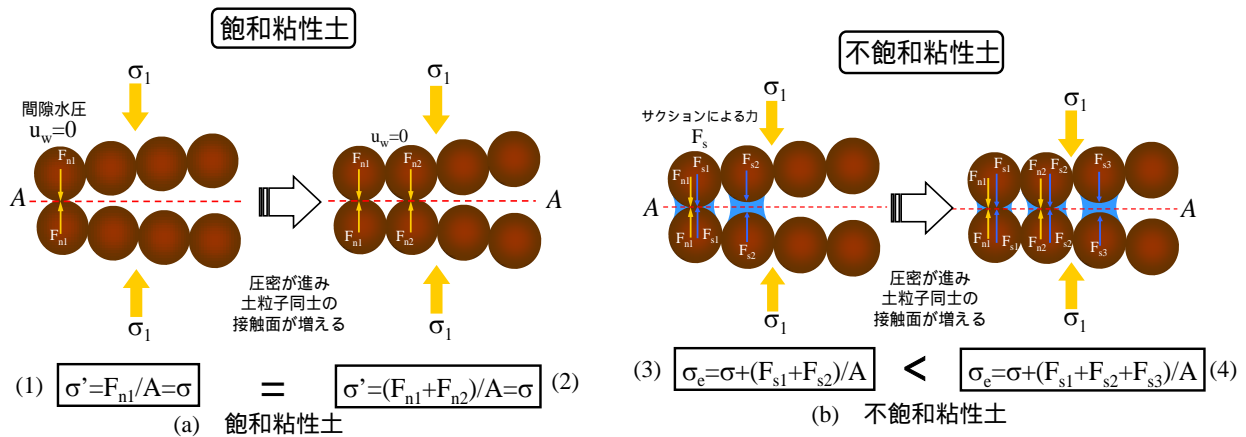


Fig.10 サクシヨンによる強度異方性のメカニズム

8. 結論

- (1) 飽和粘性土の排水せん断試験においては、最大主応力方向 α' の変化による排水強度の差異は確認できなかった．つまり、飽和粘性土は排水条件において、異方圧密による強度異方性は発現しない．
- (2) 不飽和粘性土の排水せん断試験では、低い拘束圧のもとで供試体を不飽和化させた後、異方圧密を行った供試体において強度異方性の発現が確認できた．これは、サクシヨンがもたらす強度異方性と考えることが出来る．しかしながら、異方圧密終了後に不飽和化した供試体には、強度異方性を確認することはできなかった．これは、異方圧密が終了した供試体からは、十分な不飽和化（排水）が行えなかったためと考えられる．
- (3) 排水強度と最大主応力方向 α' の関係において、 $\alpha'=45(\text{deg})$ までは最大主応力方向 α' が増加するとともに排水強度は大きくなる．そして、 $\alpha'=45(\text{deg})$ 以降は、 α' の増加にともない排水強度は小さくなり、山なりの傾向を示した．これらの傾向は、サクシヨンの値によらず同じ傾向を示した．
- (4) 応力比と最大主応力方向 α' の関係において、供試体を不飽和化させ異方圧密を行うことにより、サクシヨン $s=200\text{kPa}$ では最大主応力方向 $\alpha'=0(\text{deg})$ に対して最大 1.4 倍程度、 $s=400\text{kPa}$ では 1.2 倍程度強度が増加することが確認できた．

参考文献

- 1) 樺澤駿治(2008)：過圧密された粘性土の非排水強度異方性の評価手法，長岡技術科学大学修士論文．
- 2) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S.(1986): Strength and deformation characteristics of sand in lane strain compression at extremely low pressures, Soils and Foundations, 26-1, pp.65-85.