

# 応力・サクシオン履歴により発現する不飽和粘性土の強度異方性

地盤工学研究室 星野 笑美子  
指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

従来の地盤の安定解析では実地盤から採取した試料で単純化した力学試験を行い、その結果を利用することが多い。しかし、構造物を施工した後の地盤内では地点によって異なる方向から応力が作用しており、既往の単純な力学試験のみでは正確な強度を推定することができない。Bjerrum (ベールム)<sup>1)</sup> はそれぞれの地点の応力状態に対応するせん断試験を行うべきであると指摘し、各試験の結果から実地盤における土の強度異方性を確認している。また、実地盤には不飽和土も数多く存在しているが、不飽和土を対象とした各応力状態を再現した試験はあまり実施されていないのが現状である。

そこで、昨年度水石<sup>2)</sup>は中空ねじりせん断試験装置を用いて応力履歴とサクシオンを変化させ、不飽和粘性土の排水強度に異方性が存在することの可能性を示した。本研究では、このような異方性が生じるメカニズムを解明するため、土の状態量(空隙比  $e$ , 飽和度  $S_r$ )がどのように変化しているかを検討する。

## 2. 試験概要

本研究では、内圧、外圧、鉛直軸力、ねじり力を載荷することにより  $\sigma_z$ ,  $\sigma_{z0}$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  と四つの応力を制御することができる、中空ねじりせん断試験装置を用いた実験的検討を行った。この試験では、最大主応力方向  $\alpha$  と中間主応力係数  $b$  を任意に設定することができることから土の強度異方性を求める試験として最適である。

### (1) 最大主応力方向 $\alpha$ について

中空ねじりせん断試験装置の鉛直方向と最大主応力とのなす角を、最大主応力方向  $\alpha$  と呼ぶ。 $\alpha$  は  $K$  一定圧密過程とせん断過程において設定可能であり、圧密時の最大主応力方向を  $\alpha_c$ 、せん断時の最大主応力方向を  $\alpha_s$  と定義する。 $\alpha_c$  と  $\alpha_s$  の差の絶対値を  $\alpha'$  とし、これを変化させることで実地盤の異方性を再現することができる。

### (2) 中間主応力係数 $b$ について

中間主応力係数  $b$  とは、最大主応力  $\sigma_1$ 、最小主応力  $\sigma_3$  に対する中間主応力  $\sigma_2$  の大きさを示す係数で、式(1)で定義される。

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (1)$$

これを変化させることで様々な三次元応力状態を再現することができる。

## 3. 試験および試験ケース

本研究では不飽和粘性土の排水せん断試験と、その比較対象として飽和粘性土の排水せん断試験を行った。

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。米山粘性土の物性値を Table.1 に示す。乾燥した試料に蒸留水を加えスラリー状にしたものを脱気し、圧密容器内で一次元圧密をしてできた土塊を外径 80mm、内径 50mm、高さ 160mm の中空円筒形供試体に成形した。

Table.1 米山粘性土の物性値

土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.746
液性限界 $w_L$ (%)	46.2
塑性指数 $I_p$	15.2
粘土分 (%)	23.6
シルト分 (%)	57.0
砂分 (%)	19.4

本研究では、供試体の不飽和化に加圧板法を用いた。供試体上部より空気圧を与え、供試体下部のセラミックディスクより排水させ、供試体にサクシオンを与えた。排水面のセラミックディスクは、AEV=200kPa, 500kPa の二種類を用い、異なる飽和度を再現した。

ここで、本研究で取り扱うサクシオン  $s$  とは不飽和状態を表す重要なパラメータであり、式(2)の通り空隙空気圧  $u_a$  と空隙水圧  $u_w$  の差で表す。

$$s = u_a - u_w \quad (2)$$

試験は、供試体を装置に設置後飽和させ  $p'=50\text{kPa}$  で圧密を行い、 $K$  値が 0.43 になるまで排水せん断の制御で  $q$  を載荷した（飽和・不飽和共通）。ここで、不飽和試験では供試体上部から空気圧を載荷し脱水させる加圧板法で不飽和化を行った。その後両試験とも  $p'=300\text{kPa}$  まで  $K$  一定圧密を行い、この際に最大主応力方向  $\alpha_c$  を変化させることで様々な応力状態を再現することとする。そして排水除荷を行い、等方状態から排水せん断を行った。ここで  $K$  値とは、水平方向と鉛直方向の圧密応力比で、特に  $K_0$  値とは水平方向にひずみが生じないときの  $K$  値で、実地盤に近い状態を表す。また  $K_0$  値は試料により固有で米山粘性土（正規圧密状態）の  $K_0$  値は 0.43 である。

本研究の試験ケースを Table.2 に示す。圧密時の最大主応力方向  $\alpha_c$  を変化させた試験を計 3 ケース行った。

Table.2 試験ケース

	$s$ (kPa)	$K$ 一定圧密		せん断載荷過程	
		$\alpha_c$ (deg)	$b_c$	$\alpha_s$ (deg)	$b_s$
飽和試験	-	45	0	45	0.5
		22.5			
		0			
		-22.5			
		-45			
不飽和試験	200 or 400	45	0	45	0.5
		22.5			
		0			
		-22.5			
		-45			

#### 4. 試験結果

##### (1)飽和粘性土の排水せん断試験結果

飽和粘性土の排水せん断過程の偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.1 に示す。せん断過程開始直後の偏差応力  $q$  は、主応力方向差  $\alpha'$  が小さいほど増加が多く、せん断剛性が大きい傾向にある。その後、せん断が進むと偏差応力  $q$  が一定に収束することが読み取れる。偏差応力  $q$  はせん断ひずみ  $\varepsilon_s$  が増加するにつれて増加し続けるか、最大値に達した後に急激に減少することはなく一定に落ち着くかのどちらかである。

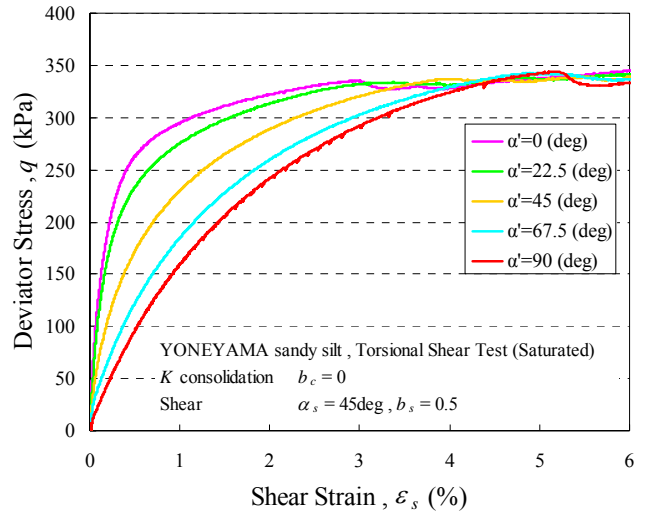


Fig.1 偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係 (saturated)

##### (2)不飽和粘性土の排水せん断試験結果

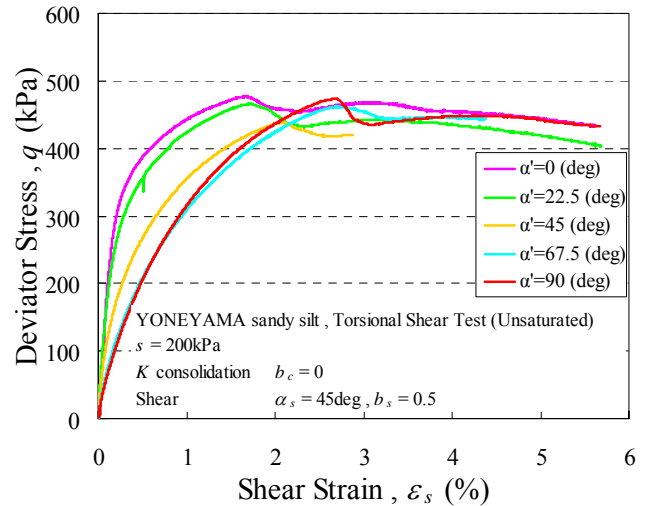


Fig.2 偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係 ( $s=200\text{kPa}$ )

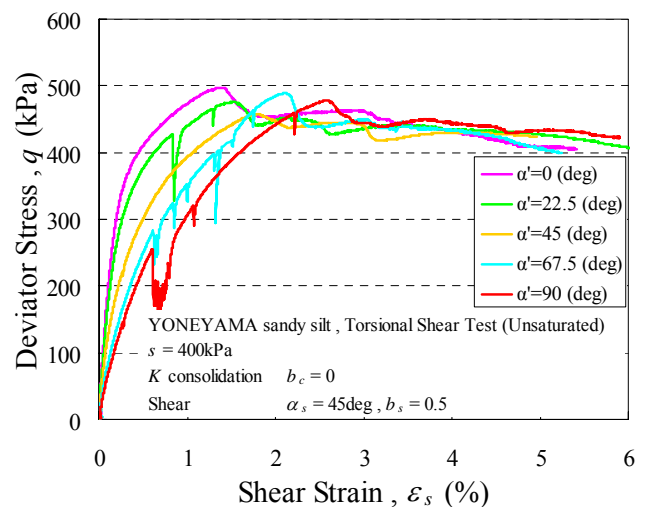


Fig.3 偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係 ( $s=400\text{kPa}$ )

不飽和粘性土の排水せん断過程の偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を、サクシオン  $s=200\text{kPa}$  を Fig.2 に、サクシオン  $s=400\text{kPa}$  を Fig.3 に示す。せん断過程開始直後の偏差応力  $q$  は、主応力方向差  $\alpha'$  が小さいほど増加が多く、せん断剛性が大きい。これは Fig.1 の飽和粘性土と同じ傾向である。偏差応力  $q$  は最大値に達した後に緩やかに減少する。

## 5. せん断剛性の異方性

### (1)せん断剛性係数の算出

Fig.1, Fig.2, Fig.3 より、せん断過程開始直後は主応力方向差  $\alpha'$  が小さいほどせん断剛性が大きい傾向にあることがわかる。そこでせん断剛性係数  $G$  を算出する。せん断剛性係数の算出には Eq.(3)の正八面体せん断剛性の式を用いる。

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

本研究ではせん断ひずみ  $\varepsilon_s=0.0\%$  と  $\varepsilon_s=0.1\%$  の間の偏差応力増分  $\Delta q$  を用いて割線せん断弾性係数  $G$  を算出する。

### (2)せん断剛性係数の異方性

せん断剛性係数  $G$  主応力方向差  $\alpha'$  関係を Fig.4 に示す。

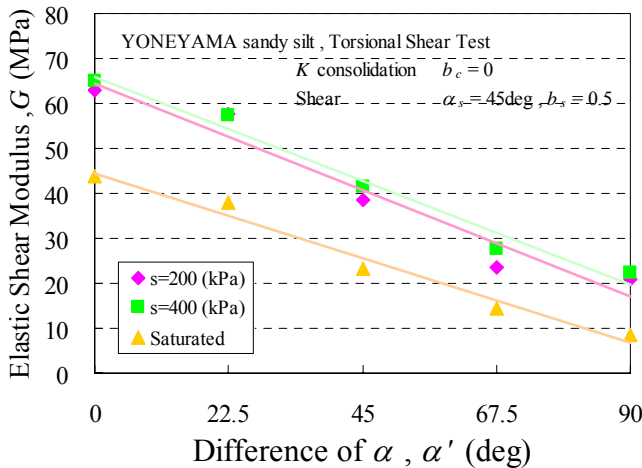


Fig.4 せん断剛性係数  $G$  主応力方向差  $\alpha'$  関係

主応力方向差  $\alpha'$  の増加に伴ってせん断剛性係数  $G$  が減少する傾向にある。減少の割合は供試体の飽和度によらず、主応力方向差  $\alpha'$  が 0 から 22.5deg と 67.5 から 90deg の範囲では小さくなっている。このこと

から Fig.4 の曲線は緩やかな S 字を描くことが予想されるが、実用的には直線近似が可能と考えられ、せん断剛性係数  $G$  は線形に減少するといえる。また、せん断剛性係数  $G$  そのものは、サクシオン  $s$  が増加（飽和度  $S_r$  が減少）すると増加する。

### (3)せん断剛性の低下率

せん断剛性の最大差において、最大せん断剛性に対する割合で低下率を求める。つまり低下率は、主応力方向差  $\alpha'=0\text{deg}$  と  $\alpha'=90\text{deg}$  のせん断剛性係数  $G_0, G_{90}$  を Eq.(4)に代入して算出する。

$$\frac{G_0 - G_{90}}{G_0} \times 100 \quad (4)$$

各低下率を Table.3 に示す。飽和試験では約 81%、不飽和試験では約 66%の低下率である。

飽和試験	%	80.9
不飽和試験 ( $s=200\text{kPa}$ )	%	67.0
不飽和試験 ( $s=400\text{kPa}$ )	%	65.6

## 6. 排水強度の異方性

### (1)排水強度の決定

本研究の飽和試験ではせん断ひずみの試験限界を考慮して、 $\varepsilon_s=5\%$ までの範囲での  $q$  の最大値を排水強度と定める事とする。また、不飽和試験では試験を行った範囲での  $q$  の最大値を排水強度とする。

最大偏差応力  $q$  主応力方向差  $\alpha'$  関係を Fig.5 に示す。

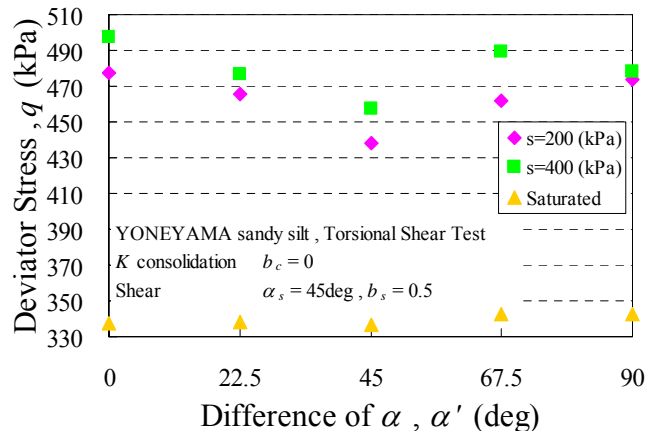


Fig.5 最大偏差応力  $q$  主応力方向差  $\alpha'$  関係

まず、飽和粘性土の排水強度は主応力方向差 $\alpha'$ によらず一定であり、異方性の発現は確認できない。一方不飽和粘性土の排水強度は主応力方向差が $\alpha'=0\text{deg}$ から増加すると、排水強度は減少していき、 $\alpha'=45\text{deg}$ で最小の値をとる。さらに $\alpha'$ が増加すると排水強度は増加していき、 $\alpha'=90\text{deg}$ で $\alpha'=0\text{deg}$ とほぼ同じ強度となる。Fig.5 に示すように、下に凸の曲線になる。

(2)排水強度の低下率

不飽和試験の、排水強度の最大差において、最大排水強度に対する割合で低下率を求める。低下率は、主応力方向差 $\alpha'=0\text{deg}$ と $\alpha'=45\text{deg}$ の排水強度 $q_0, q_{45}$ を Eq.(5)に代入して算出する。一方、飽和試験は強度差が無いので低下率は算出しない。

$$\frac{q_0 - q_{45}}{q_0} \times 100 \quad (5)$$

各低下率を Table.4 に示す。どちらも小さい低下率であることがわかる。

試験条件	単位	値
不飽和試験 ( $s=200\text{kPa}$ )	%	8.2
不飽和試験 ( $s=400\text{kPa}$ )	%	8.0

(3)排水強度と間隙比の関係

Fig.6 にせん断時の間隙比 $e$  主応力方向差 $\alpha'$ 関係を示す。

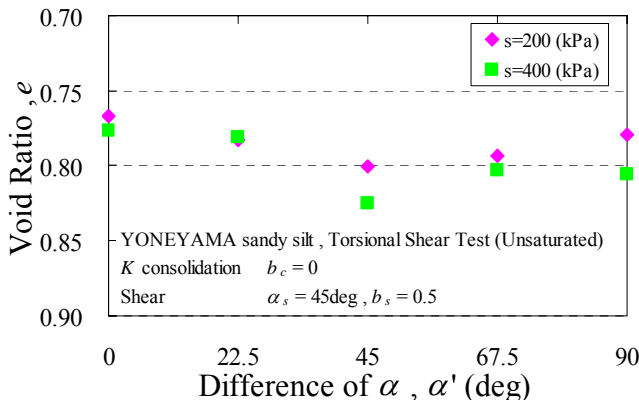


Fig.6 間隙比 $e$  主応力方向差 $\alpha'$ 関係

Fig.5 と Fig.6 から排水強度と間隙比の相関を検討する。間隙比は主応力方向差が $\alpha'=0\text{deg}$ から増加する

と増加していき、 $\alpha'=45\text{deg}$ で最大の値をとる。さらに $\alpha'$ が増加すると間隙比は減少していき、 $\alpha'=90\text{deg}$ で $\alpha'=0\text{deg}$ とほぼ同じ値となる。Fig.6 は Fig.5 と同様に下に凸の曲線になる。一般的に間隙比が低いと強度が高くなることからみても、不飽和粘性土の排水強度の大きさは間隙比の影響を大きく受けていると考えられる。

(4)不飽和試験の間隙比の推移

不飽和中空ねじりせん断試験の各過程における間隙比の推移を、サクシヨン $s=200\text{kPa}$ を Fig.7 に、サクシヨン $s=400\text{kPa}$ を Fig.8 に示す。Fig.7 と Fig.8 で、過程1は予圧密後、過程2は圧密後、過程3は $q$ 載荷後、過程4は脱水後、過程5は $K$ 一定圧密後、過程6は排水除荷後、過程7はせん断強度発現時を示している。

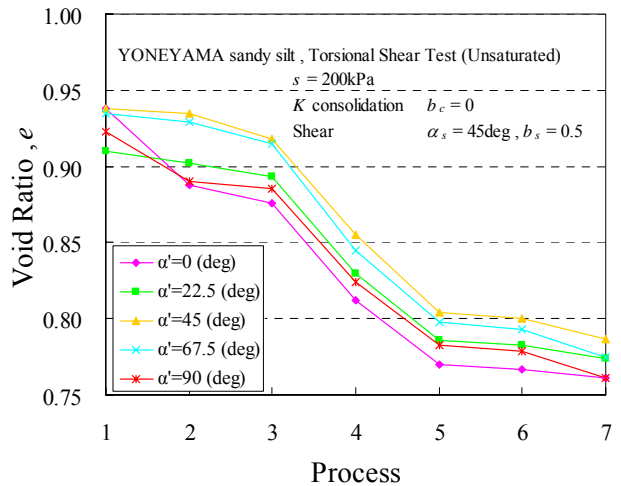


Fig.7 不飽和試験の間隙比の推移 ( $s=200\text{kPa}$ )

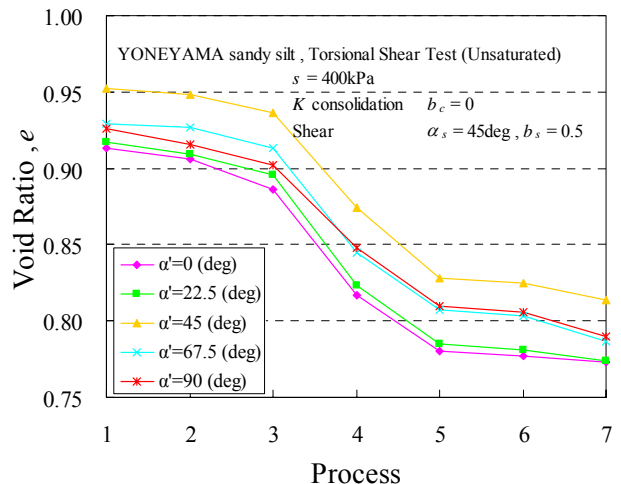


Fig.8 不飽和試験の間隙比の推移 ( $s=400\text{kPa}$ )

間隙比が平行に推移していることから、せん断時の間隙比は初期の間隙比によって決まることになる。しかし、過程2までは試験ケースによらず同じ手順なので、理想的には間隙比のばらつきは発生しないはずである。

(5) 間隙比に影響する測定誤差の検討

中空ねじりせん断試験は供試体内径を直接測定しにくいという特徴がある。本試験では、試験後に求まる供試体土粒子と間隙水の体積から、過程1の予圧密後の内径を算出している。そのため間隙比を求めるために重要である内径は各体積変化量測定値の誤差の影響を受けやすい。つまり間隙比は測定誤差の影響を受けやすいといえる。

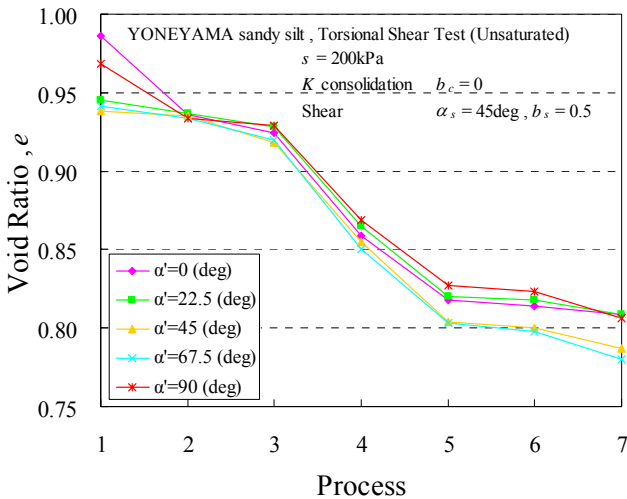


Fig.9 調整後の間隙比の推移 ( $s=200\text{kPa}$ )

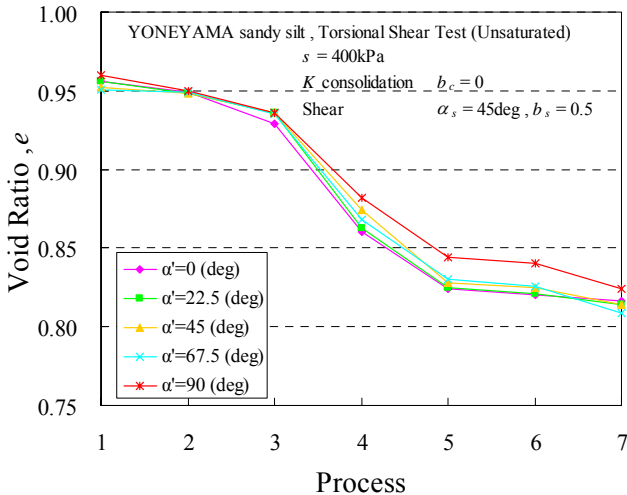


Fig.10 調整後の間隙比の推移 ( $s=400\text{kPa}$ )

そこで、試験中に測定誤差が生じたと想定して排水量の調整によって間隙比のばらつきを除いた。過

程2までは試験条件によらず共通の手順であること、過程2の間隙比のほうが制御の精度が高いことを考慮して、過程2の圧密後で間隙比が等しくなるように再計算する。

再計算後の間隙比の推移を Fig.9, Fig.10 に示す。調整前後の初期内径の差は、間隙比  $e$  を  $+0.048$  補正したときが最大で、補正前  $5.000\text{cm}$  から補正後  $4.906\text{cm}$  の  $-0.094\text{cm}$  であった。これは理想内径  $5.000\text{cm}$  の約  $1.9\%$ にあたる。

Fig.9, Fig.10 から、間隙比のばらつきが十分抑えられたことがわかる。この結果から算出した排水強度をまとめたものを Fig.11 に示す。

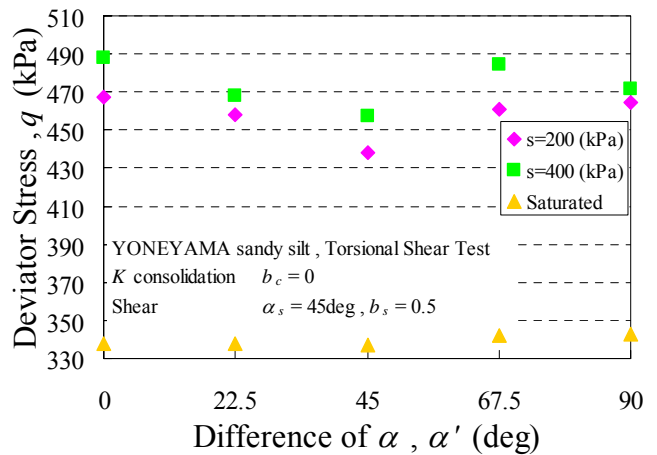


Fig.11 最大偏差応力  $q$  主応力方向差  $\alpha$  関係

Fig.11 と Fig.5 を比較すると、排水強度差が最大で  $10\text{kPa}$  程度縮まっているが、依然として主応力方向差  $\alpha'$  による下に凸の傾向が見られる。このことから、測定誤差による間隙比の変動は異方性を無視できるまでは影響していないといえる。

7. 試験の再現性

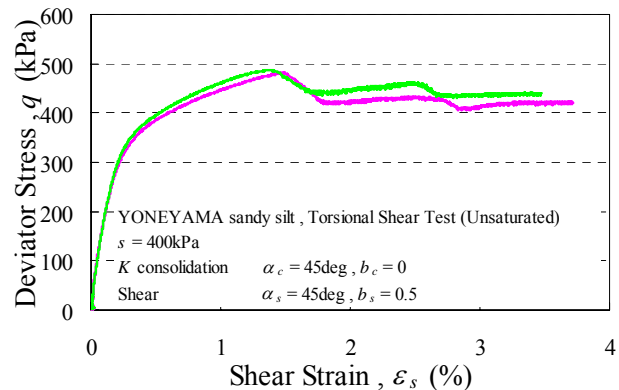


Fig.12 偏差応力  $q$  せん断ひずみ  $\epsilon_s$  関係

Table.5 せん断剛性と排水強度の再現性

	せん断剛性			排水強度		
	G MPa	差 MPa	誤差 %	$q_{max}$ kPa	差 kPa	誤差 %
不飽和 $\alpha'=0deg$	60.4	0.7	1.16	481.4	6.3	1.31
	61.1			487.7		
飽和 $\alpha'=0deg$	45.5	1.6	3.64	345.2	1.8	0.52
	43.9			347.0		
飽和 $\alpha'=45deg$	22.1	1.2	5.43	346.7	5.6	1.64
	23.3			341.1		
飽和 $\alpha'=90deg$	8.4	1.1	13.1	344.0	0.8	0.23
	9.5			343.2		

中空ねじりせん断試験の再現性を検討する。同等条件下で行った二つの不飽和試験の結果を Fig.12 に示す。せん断剛性,排水強度共によく再現できている。同様に飽和試験でも再現性の検討を行った。全試験の誤差を Table.5 に示す。

せん断剛性の誤差は,最大 13.1%と無視できないように見える。しかしせん断剛性係数  $G$  の大小にかかわらず剛性差が 1MPa 前後であることから,せん断剛性には 1MPa 程度の誤差は生じる可能性があると言える。

排水強度の誤差は,排水強度  $q_{max}$  の大小によらず 0.23%から 1.64%と小さく,試験に再現性があるといえる。これは,強度の最大が 477.1kPa のサクシオン  $s=200kPa$  不飽和試験では 7.8kPa, 497.6kPa の  $s=400kPa$  不飽和試験では 8.2kPa, 342.7kPa の飽和試験では 5.6kPa 程度の強度差は生じる可能性があるということである。

## 5. 結論

本研究ではせん断剛性異方性の発現を確認した。剛性差が 35MPa から 43MPa と誤差の範囲を大きく超えている。飽和粘性土,不飽和粘性土共に主応力方向差  $\alpha'$  の増加に伴ってせん断剛性係数  $G$  が減少し,その割合は供試体の飽和度  $S_r$  によらずほぼ一定である。最大低下率は 66%から 81%と高く,変形解析においては剛性の異方性を考慮する必要がある。

また,排水強度異方性の発現を確認した。飽和粘性土では主応力方向差  $\alpha'$  によらず強度は一定であり,不飽和粘性土では主応力方向差  $\alpha'$  による強度差が見

られた。試験中に生じる測定誤差の影響の可能性を除去し,試験の再現性を考慮しても,今回の強度差は有意であるといえる。この異方性の傾向は不飽和土であればサクシオンの値によらず同様である。最大低下率が 8%以下と低いことから,簡易的な安定解析においては異方性を考慮する必要性は低いと言える。

## 参考文献

- 1) Bjerrum,L. : Problems of soil mechanics and construction on soft clays , State of the Art Report , Session4 ,Proc.8th ICSMFE ,Vol.3 ,pp.109-159 ,1973 .
- 2) 水石舞衣子: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,平成 20 年度長岡技術科学大学建設工学専攻修士論文,2008 .