

# 不飽和土のサクシオンによる強度異方性に関する研究

地盤工学研究室 須佐見 朱加

指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

土の異方性に関しては、古くから実験的・理論的に研究が行われている。特に粘性土については、堆積時の粒子配列の卓越性や異方的な応力を受けたことが原因となって、その強度や変形特性が異方性を示すことが知られている。しかしながら、不飽和土を対象として異方性を論じたものはほとんど存在しない。

そこで本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて、不飽和粘性土の強度異方性の有無を確認することを目的とする。

## 2. 試験材料

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。Table 1.に米山粘性土の物理特性を示す。

Table 1. 米山粘性土の物性値

土粒子密度	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.740
液性限界	$w_L$ (%)	52
塑性指数	$I_p$	23
粘土分	(%)	23.6
シルト分	(%)	47
砂分	(%)	19.4

## 3. 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 $\alpha$ と中間主応力係数 $b$ を任意に設定することができ、複雑な応力条件下での土の強度・変形特性を明らかにすることができる。そのため、土の強度異方性を求めるのに適している。

### ①最大主応力方向 $\alpha$

最大主応力方向 $\alpha$ は、最大主応力の鉛直軸からの傾きである。 $\alpha$ は $K$ 一定圧密とせん断過程で設定可能であり、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。また、 $\alpha_c$ と $\alpha_s$ の差の絶対値を最大主応力方向差 $\alpha'$ とし、これを変化させることにより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 $b$

中間主応力係数 $b$ 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あり、Eq.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3次元応力状態を再現することができる。

### ③サクシオン

本研究で取り扱うサクシオン $s$ とは、不飽和状態を表わす重要なパラメータであり、Eq.2に示すとおり、間隙空気圧 $u_a$ と間隙水圧 $u_w$ の差で定義される。

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

## 4. 試験方法および試験条件

供試体は、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1次元圧密した。そして、できた土塊を外径8cm、内径5cm、高さ16cmの中空円筒形に成形した。

Fig.1に本研究の試験経路を示す。

試験の手順は、出来上がった供試体を装置に設置し、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。そして、不飽和試験では、供試体上部から空気圧を  $400 \text{ kPa}$  载荷し、供試体下部のセラミックディスクから排水させる加圧板法により不飽和化を行った。Fig.2 は、不飽和化後の供試体の含水比分布を示したものである。供試体の高さによらず含水比が均一に分布していることを確認することができる。その後、両試験とも  $K$  値を一定に保ったまま  $p' = 300 \text{ kPa}$  まで圧密を行った。この時、 $\alpha_c$  を変化させることにより、土粒子の配向性を再現することとする。そして、排水状態で  $q$  を除荷してから等方状態にし、飽和試験では排水せん断、不飽和試験は緩速せん断および急速せん断を行った。

本試験で行った試験ケースを Table 2. に示す。

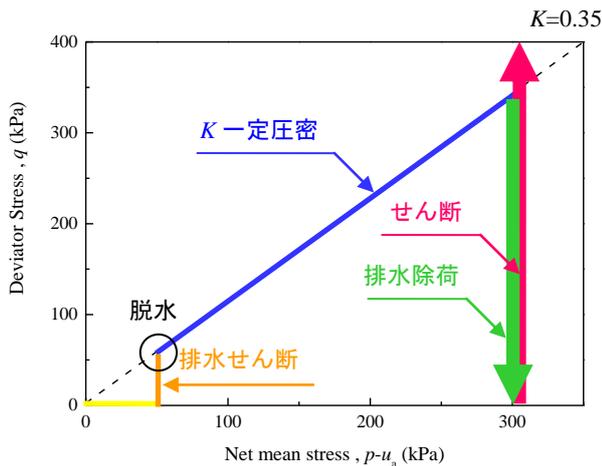


Fig.1 試験経路

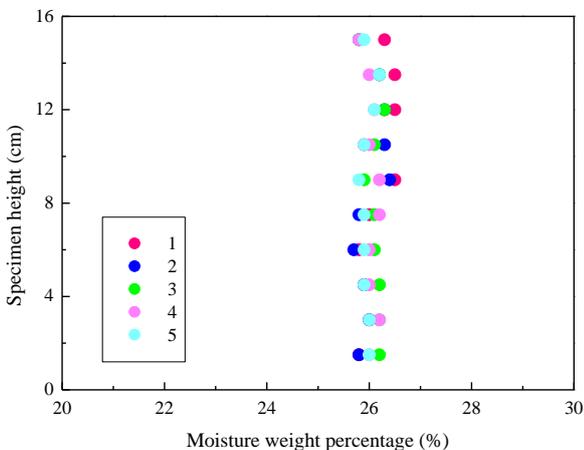


Fig.2 不飽和化後の供試体の含水比

Table 2. 試験ケース

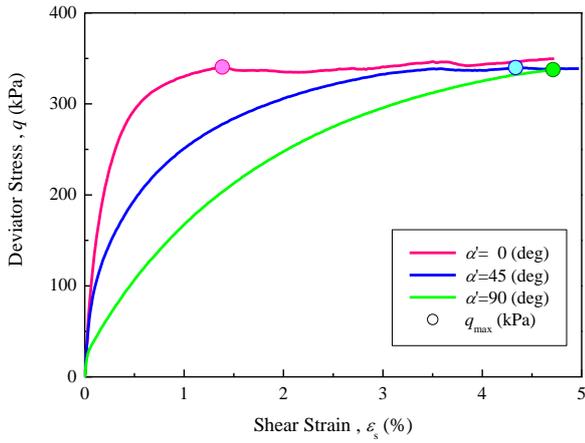
	サクシオン $s$ (kPa)	$K$ 一定圧密		せん断試験	
		$\alpha_c$ (deg)	$b_c$	$\alpha_s$ (deg)	$b_s$
排水せん断	-	45	0	45	0.5
		0			
		-45			
緩速せん断	400	45	0	45	0.5
		0			
		-45			
急速せん断	400	45	0	45	0.5
		22.5			
		0			
		-22.5			
		-45			

## 5. 試験結果

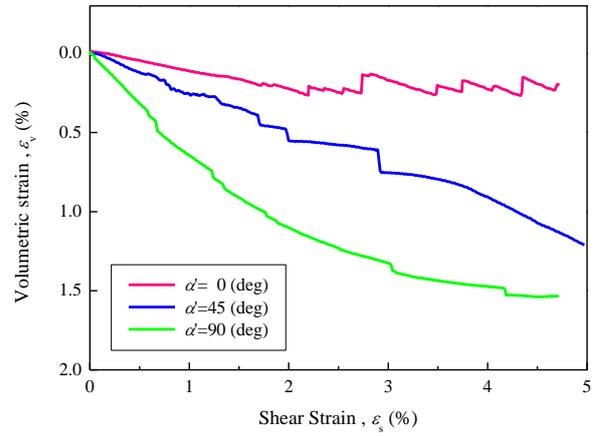
各せん断過程の偏差応力  $q$  - せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.3~Fig.5 を、体積ひずみ  $\varepsilon_v$  - せん断ひずみ  $\varepsilon_s$  関係を Fig.6~Fig.8 に示す。なお、本研究における飽和土試験では、偏差応力  $q$  がせん断ひずみの増加にともない漸増するため、最大値を定めることが難しい。そこで、せん断ひずみの試験限界を考慮し、 $\varepsilon_s = 5\%$  までの範囲で最大値を求め、それをせん断強度と定めることとする。

飽和粘性土の  $q - \varepsilon_s$  関係は、最大主応力方向差  $\alpha'$  が小さいほど初期の立ち上がりが急であり、明確なピークを示さない。不飽和粘性土の  $q - \varepsilon_s$  関係は飽和粘性土と同様、 $\alpha' = 0$  (deg) の時の立ち上がりが最も急であり、 $\alpha'$  が増加するにともない立ち上がりが穏やかになっている。また、 $\alpha'$  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。

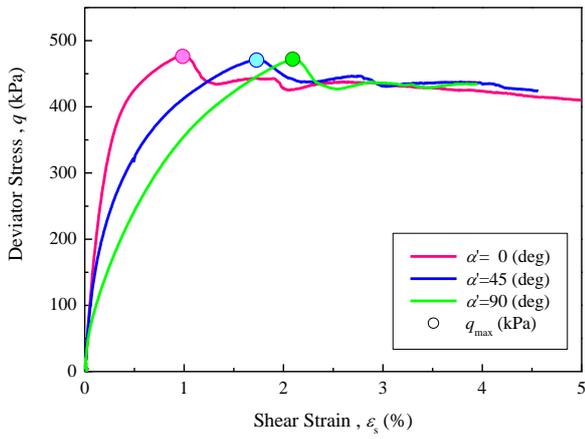
排水せん断および緩速せん断の  $\varepsilon_v - \varepsilon_s$  関係は、最大主応力方向差  $\alpha'$  によらず、体積ひずみは圧縮傾向にある。また、 $\alpha'$  の増加にともない  $\varepsilon_v$  も小さくなっている。その一方、急速せん断の  $\varepsilon_v - \varepsilon_s$  関係は、ピーク強度を迎えて以降、体積ひずみは圧縮側から膨張側に転じている。また、その体積ひずみは他のケースと比較して最も小さい。このような体積ひずみ挙動は、せん断強度が現れるせん断ひずみの大きさに関連が深そうである。



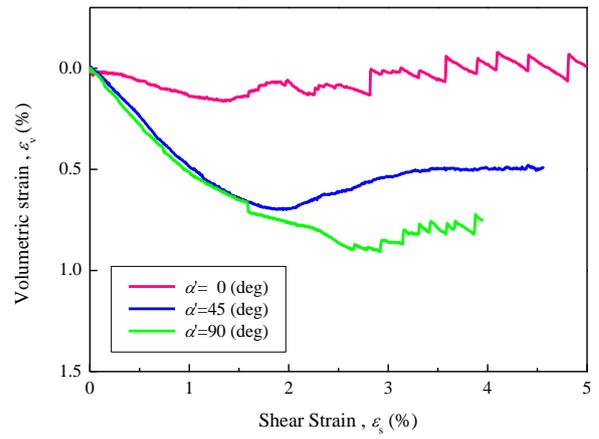
**Fig.3**  $q-\varepsilon_s$  関係 (排水せん断)



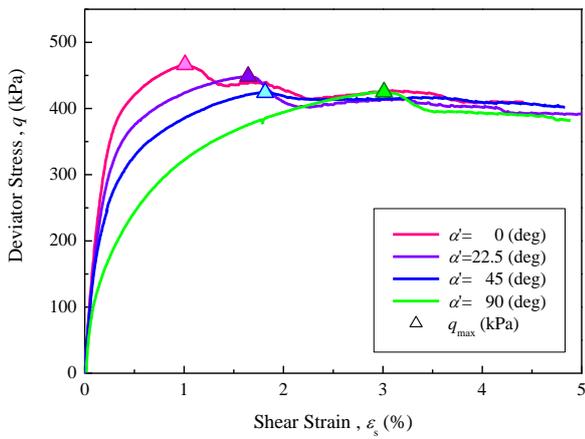
**Fig.6**  $\varepsilon_v-\varepsilon_s$  関係 (排水せん断)



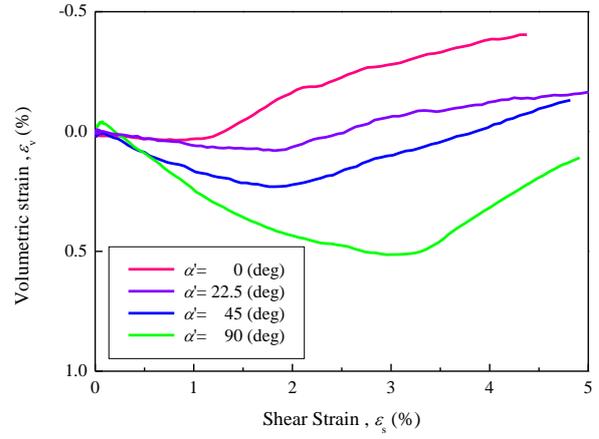
**Fig.4**  $q-\varepsilon_s$  関係 (緩速せん断)



**Fig.7**  $\varepsilon_v-\varepsilon_s$  関係 (緩速せん断)



**Fig.5**  $q-\varepsilon_s$  関係 (急速せん断)



**Fig.8**  $\varepsilon_v-\varepsilon_s$  関係 (急速せん断)

## 6. せん断強度

### 6.1 せん断強度異方性

Fig.9, Fig.10 に飽和度別の最大偏差応力  $q_{\max}$  - 最大主応力方向差  $\alpha'$  の関係を示す。図中には、権沢 <sup>1)</sup> が行った飽和粘性土の非排水せん断試験の結果も合わせて示す。

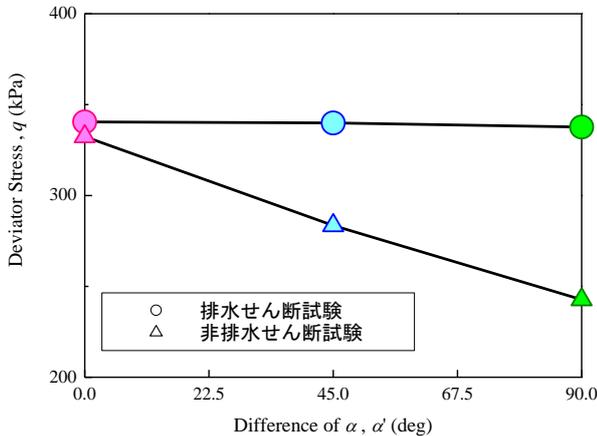


Fig.9  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係 (飽和粘性土)

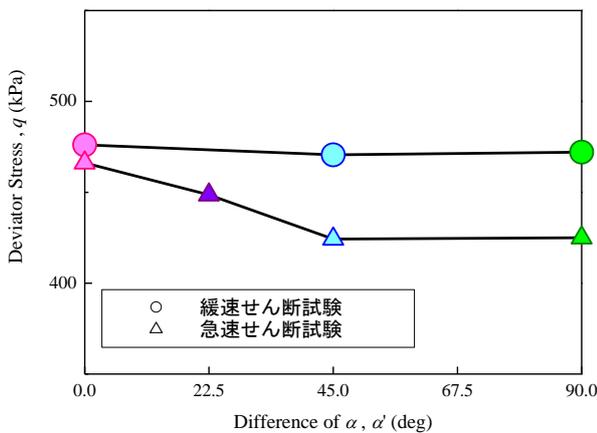


Fig.10  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係 (不飽和粘性土)

飽和粘性土の  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係は、排水せん断試験は  $\alpha'$  の増加に関わらず一定値を示すのに対し、非排水せん断試験は  $\alpha'$  の増加にともない強度が低下していることがわかる。不飽和粘性土の  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係においても、緩速せん断試験では  $\alpha'$  の増加に関わらず一定値を示すのに対し、急速せん断試験では  $\alpha'=0\sim 45$  (deg) までは強度が急激に低下し、それ以降は一定値を示している。

これより飽和度に関わらず、急速にせん断する

ことにより異方性が発現することがわかった。

### 6.2 サクションによる強度増加

Fig.11, Fig.12 に飽和試験および不飽和試験のピーク強度  $q_{\max}$  - 最大主応力方向差  $\alpha'$  関係を示す。

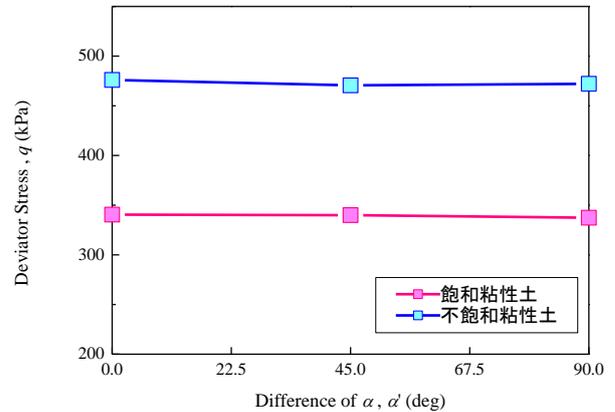


Fig.11  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係 (排水, 緩速せん断試験)

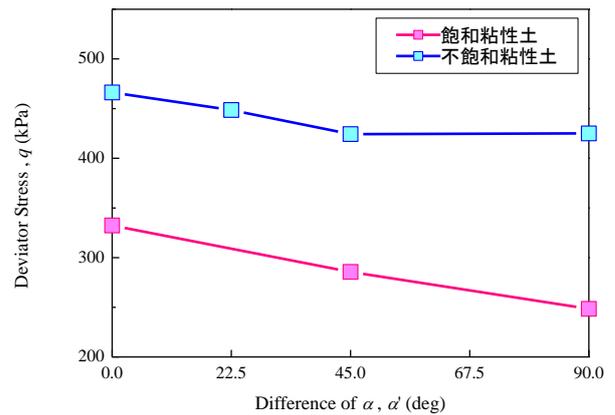


Fig.12  $q_{\max}$  -  $\alpha'$  関係 (非排水, 急速せん断試験)

初期サクションが増加することにより、強度も 140kPa 程度増加することがわかる。しかしながら、非排水せん断試験と急速せん断試験の  $q_{\max}$  は  $\alpha'=45$  (deg) 以降は傾向がことなることから検討が必要である。

## 7. せん断剛性

### 7.1 せん断剛性の異方性

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。

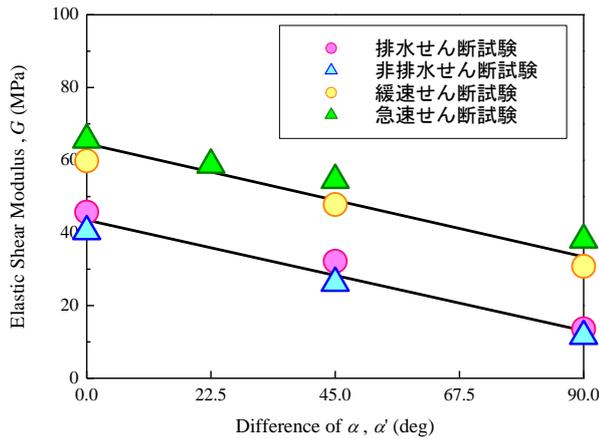
$$G = G_{\text{oct}} = \frac{\Delta q}{3\Delta\varepsilon_s} \quad (3)$$

本研究では、せん断ひずみ $\varepsilon_s=0.0\%$ と $\varepsilon_s=0.1\%$ の時の偏差応力 $q_0, q_1$ を用いて、割線せん断弾性係数を算出する。

全ケースにおけるせん断弾性係数 $G$ を Table 3. に、せん断弾性係数 $G$ –最大主応力方向差 $\alpha'$ 関係を Fig.13 にそれぞれ示す。

**Table 3.** せん断弾性係数  $G$  (MPa)

	$\alpha'$ (deg)			
	0	22.5	45	90
排水せん断試験	45.7	—	32.2	13.6
非排水せん断試験	40.4	—	26.2	11.6
緩速せん断試験	59.8	—	47.8	30.8
急速せん断試験	65.6	58.7	54.5	38.1



**Fig.13**  $G$ – $\alpha'$ 関係

飽和度やせん断速度によらず、 $\alpha'$ の増加にともない $G$ が線形に減少していることから、実用的には直線近似が可能と考えられる。また、サクシヨンの増加にともない、一定の割合でせん断弾性係数 $G$ が増加する。

## 7.2 せん断剛性の低下率

せん断剛性の低下率の算出には、Eq.4 を用いる。

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

本研究では、 $\alpha'=0$  (deg)と $\alpha'=90$  (deg)の時のせ

ん断弾性係数 $G_0, G_{90}$ を Eq.4 に代入して算出する。

各試験別の低下率を Table 4. に示す。飽和試験では 70%程度、不飽和試験では 40~50%程度低下することがわかる。

**Table 4.** せん断剛性低下率

非排水せん断試験 (%)	71.3
排水せん断試験 (%)	70.2
急速せん断試験 (%)	41.9
緩速せん断試験 (%)	48.5

## 8. せん断強度とせん断弾性係数の定式化

せん断強度とせん断弾性係数について、 $\alpha'=0$  (deg)の時の排水せん断試験の結果を基準に $\alpha'$ を変数とするせん断強度比 $R_{q \text{ nor}}$ とせん断弾性係数比 $R_{G \text{ nor}}$ の定式化を行う (Eq.5, Eq.6) .

$$R_{q \text{ nor}} = \frac{q - q_0}{q_0 - q_{0-CD}} \quad (5)$$

$$R_{G \text{ nor}} = \frac{G - G_0}{G_0 - G_{0-CD}} \quad (6)$$

ここで、 $q$ : 各試験の $\alpha'=0$  (deg)の時の非排水強度 (kPa),  $q_0$ : 任意の $\alpha'$ での非排水強度 (kPa),  $q_{0-CD}$ : 飽和 CD 試験の $\alpha'=0$  (deg)の時の排水強度 (kPa),  $G$ : 各試験の $\alpha'=0$  (deg)の時のせん断弾性係数 (MPa),  $G_0$ : 任意の $\alpha'$ でのせん断弾性係数 (MPa),  $G_{0-CD}$ : 飽和 CD 試験の $\alpha'=0$  (deg)の時のせん断弾性係数 (MPa)である。

Fig.14 にせん断強度比 $R_{q \text{ nor}}$ –最大主応力方向差 $\alpha'$ 関係を、Fig.15 にせん断弾性係数比 $R_{G \text{ nor}}$ –最大主応力方向差 $\alpha'$ 関係を示す。

Fig.14 より、飽和土および不飽和土の任意の主応力主応力方向 $\alpha'$ におけるせん断強度は、下記の式より推定することができる。

$$R_{q \text{ nor}} = -0.0028\alpha' + 0.0025 \quad (7)$$

Fig.15 で直線関係が得られたので、各試験におけるせん断弾性係数は下記の式より推定することができる。

$$R_{G \text{ nor}} = -0.0074\alpha' + 0.0152 \quad (8)$$

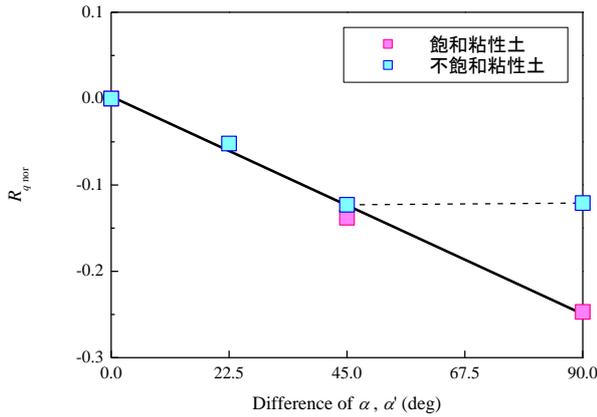


Fig.14  $R_{q\text{ nor}} - \alpha'$ 関係

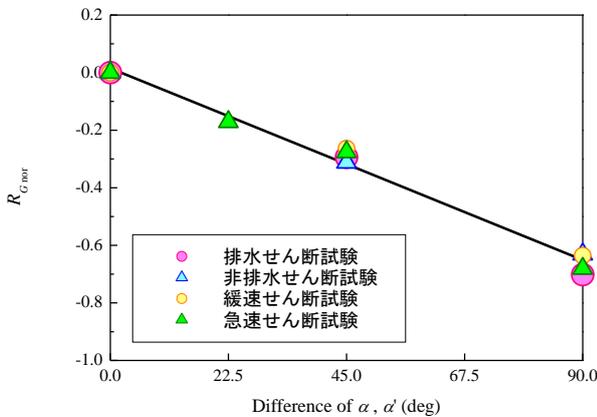


Fig.15  $R_{G\text{ nor}} - \alpha'$ 関係

## 9. 結論

本研究で行った飽和および不飽和粘性土のせん断試験の結果より、以下に示す主要な知見が得られた。

1. 飽和度に関わらず、最大主応力方向差 $\alpha'=0$  (deg)の時 ( $K$ 一定圧密時の主応力方向 $\alpha_c$ とせん断時の主応力方向 $\alpha_s$ が一致)、応力-ひずみ曲線の初期の立ち上がりが最も急である。また、 $\alpha'$ の増加にともない立ち上がりの傾きが緩やかになる。
2. 不飽和土は明確なピーク強度を示すのに対し、飽和土は明確なピークを示さない。
3. せん断時の体積ひずみ $\epsilon_v$ は、 $\alpha'$ が増加するにともない、圧縮傾向にある。
4. 不飽和土では、急速にせん断を行うことによ

り、異方圧密による強度異方性の発現が確認できた。その異方性は、最大主応力方向差 $\alpha'$ が $0\sim 45$  (deg)の範囲では強度が大きく低下するが、それ以降はほぼ一定値を示す。一方、飽和土では、最大主応力方向差 $\alpha'$ の増加にともない強度は低下し、その低下率は大きい。

5. 粘性土の強度は、せん断条件の違いによらず、サクシオンが増加することにより著しく増加する。
6. 飽和土、不飽和土とも、せん断剛性の異方性を確認できた。最大主応力方向差 $\alpha'$ の増加にともないせん断弾性係数  $G$  が線形に減少しており、その割合はほぼ一定である。

## 参考文献

- 1) 樺沢駿治：過圧密された粘性土の非排水強度異方性の評価手法，平成 19 年度長岡技術科学大学修士論文，2007。