

飽和粘性土の強度異方性に及ぼす排水条件の影響

地盤工学研究室 橋本 詩穂
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、既往の力学試験、例えば三軸圧縮試験のみでは正確な強度を推定することができない。Bjerrum (ベーラム)¹⁾らは、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。

そこで、樺澤²⁾らは中空ねじりせん断試験装置を用いて、飽和粘性土の非排水強度に異方性が存在することを示した。しかし、長期安定性を議論するときには、排水強度を求める必要がある。特に過圧密粘土では、非排水強度は排水強度より大きくなる傾向があるため、危険側である排水強度を把握しておくことは重要である。そのため、本研究では飽和粘性土に対して排水せん断試験を行い、排水強度を求めることとした。

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、 σ_z 、 $\sigma_{z\theta}$ 、 σ_r 、 σ_θ 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て実験を行った。この試験では、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ため、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 α 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 α と呼ぶ。 α 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 α_c 、せん断時の最大主応力方向を α_s と定義する。 α_c と α_s の差を最大主応力方向差 α' 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 σ_1 、最小主応力 σ_3 に対する中間主応力 σ_2 の大きさを示す係数で、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、飽和粘性土について排水せん断試験を行った。以下に試験の概要と試験ケースを示す。

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作製した。

Table.1 米山粘性土の物性値

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.746
液性限界 w_L (%)	46.2
塑性限界 w_P (%)	31.0
塑性指数 I_P (%)	15.2
粘土分 (%)	23.6
シルト分 (%)	57.0
砂分 (%)	19.4

試験は、供試体を装置に設置後飽和させ $p'=50$ 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。その後 $p'=300$ kPa または 600 kPa まで K 一定圧密を行い、この際に最大主応力方向 α_c を変化させることで様々な方向性を再現することとする。この後、 $p'=600$ kPa まで K 圧を行ったケースでは OCR を 1, 2, 6 と変化させる。また、今後は $p'=300$ kPa まで K 圧を行った試験を CASE.1, $p'=600$ kPa まで K 圧を行った試験のうち OCR1 のケースを CASE.2, OCR2 のケースを CASE.3, OCR6 のケースを CASE.4 と呼ぶこととする。CASE.1 および CASE.2 では K 一定圧密後すぐに非排水除荷を、CASE.3 および CASE.4 では過圧密状態を再現するために、過圧密比 2 (OCR2) で $p'=300$ kPa, 過圧密比 6 (OCR6) で $p'=100$ kPa まで K_0 除荷を行った後に非排水除荷を行い、同様に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。米山粘性土の正規圧密状態の K_0 値は 0.43 である。

本研究の試験ケースを Table.2 および Table.3 に示す。

Table.2 試験条件 ($p'=300\text{kPa}$ まで K 圧のケース)

OCR	除荷後 p' (kPa)	K 一定圧密		せん断載荷過程 排水せん断試験	
		α_c (deg)	bc	α_s (deg)	bs
1	300	45	0	45	0.5
		22.5			
		0			
		-22.5			
		-45			

Table.3 試験条件 ($p'=600\text{kPa}$ まで K 圧のケース)

OCR	除荷後 p' (kPa)	K 一定圧密		せん断載荷過程 排水せん断試験	
		α_c (deg)	bc	α_s (deg)	bs
1	600	45	0	45	0
		0			
		-45			
2	300	45	0	45	0
		0			
		-45			
6	100	45	0	45	0
		0			
		-45			

4. 試験結果

CASE.1 の排水せん断過程の偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.1 に示す。また、CASE.2 の排水せん断過程の偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.2 に、CASE.3 の偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.3 に、CASE.4 の偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係を Fig.4 に示す。今後、 K 一定圧密過程の平均有効主応力を p'_c 、 K_0 除荷終了後の平均有効主応力を p'_u 、せん断載荷過程の平均有効主応力を p'_s と呼ぶ。

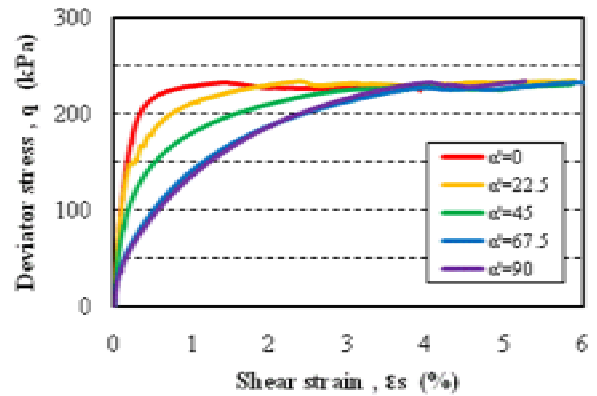


Fig.1 偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係 (CASE.1)

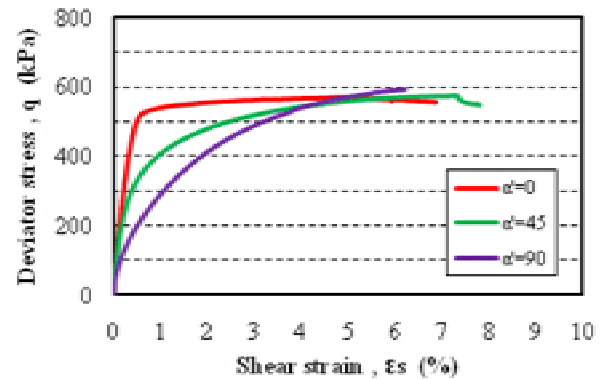


Fig.2 偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係 (CASE.2)

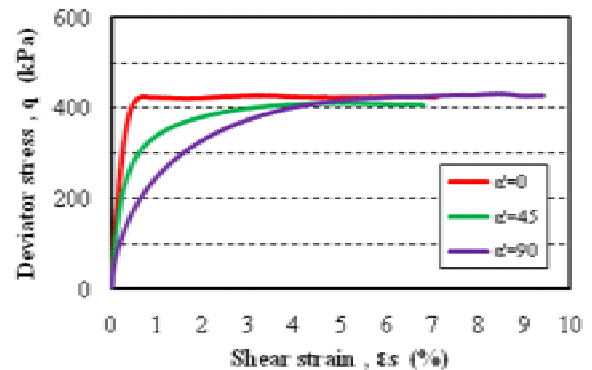


Fig.3 偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係 (CASE.3)

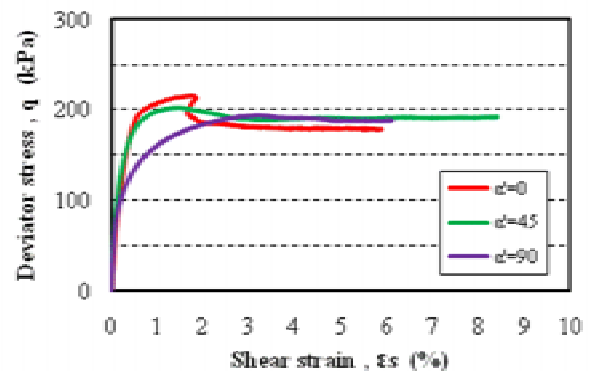


Fig.4 偏差応力 q せん断ひずみ ε_s 関係 (CASE.4)

5. せん断弾性係数の異方性

(1) せん断弾性係数の算出

せん断弾性係数の算出には、正八面体せん断剛性の式 Eq.(2)を用いる。

$$G = G_{oct} = \frac{\Delta q}{3\Delta\varepsilon_s} \quad (2)$$

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 $q_0, q_{0.1}$ を用いて割線せん断弾性係数 G を算出する。

(2) せん断弾性係数の異方性

Table.4 に全ケースにおけるせん断弾性係数 G を示す。また、CASE.1 のせん断弾性係数 G 主応力方向差 α' 関係を Fig.5 に、CASE.2~CASE.4 のせん断弾性係数 G 主応力方向差 α' 関係を Fig.6 に示す。Fig.5 および Fig.6 を見ると、主応力方向差 α' の増加に伴ってせん断弾性係数 G が減少する傾向にあることがわかる。

Fig.5 より、減少の割合は主応力方向差 α' が 0 から 22.5 (deg) と 67.5 から 90 (deg) の範囲では小さく、22.5 から 67.5 (deg) の範囲では大きくなっていることから緩やかな S 字を描く曲線関係になっている。CASE.2~CASE.3 (Fig.6) では、22.5 および 67.5 (deg) のケースを行っていないため直線関係に見えるが、こちらも S 字を描く曲線関係になると思われる。また、CASE.4 においては、 α' によらずほぼ一定の値となっている。

Table.4 せん断弾性係数 G (MPa)

	最大主応力方向差 α' (deg)				
	0	22.5	45	67.5	90
CASE.1	36.5	35.2	25.2	14.8	13.4
CASE.2	60.3	-	46.9	-	27.1
CASE.3	48.2	-	36.1	-	24.0
CASE.4	25.1	-	27.7	-	24.4

(3) せん断弾性係数の正規化

Table.4 に示したせん断弾性係数を基に、CASE.2, CASE.3, CASE.4 について、以下の Eq.(3)を用いて正規化する。この正規化したせん断弾性係数を $G_{\alpha'nor}$ と呼ぶこととする。

$$G_{\alpha'nor} = \frac{G_{\alpha'}}{G_{\alpha'=0}} \quad (3)$$

ここで、 $G_{\alpha'}$: 任意の α' でのせん断弾性係数 (MPa), $G_{\alpha'=0}$: $\alpha'=0$ (deg) の時のせん断弾性係数 (MPa) で

ある。

この $G_{\alpha'nor}$ を求めた結果を Fig.7 に示す。Fig.7 を見ると、CASE.4 では $G_{\alpha'nor}$ が α' によらずほぼ一定となっているのに対し、CASE.2 および CASE.3 では α' が大きくなるほど $G_{\alpha'nor}$ が小さくなっていることがわかる。

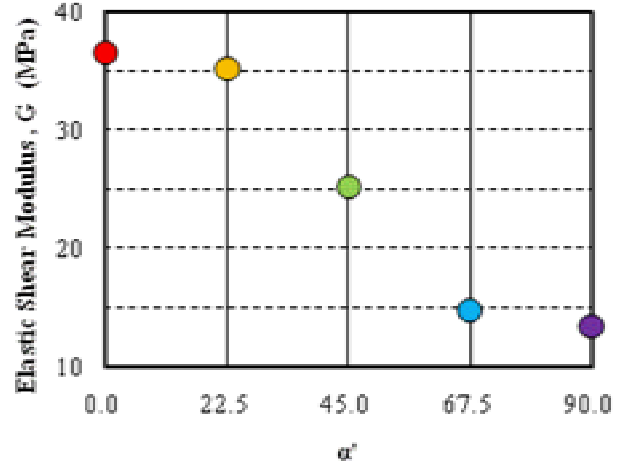


Fig.5 せん断弾性係数 G 主応力方向差 α' 関係 (CASE.1)

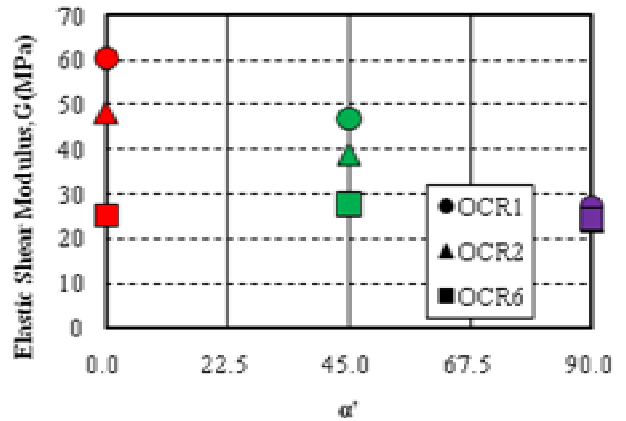


Fig.6 せん断弾性係数 G 主応力方向差 α' 関係 (CASE.2~4)

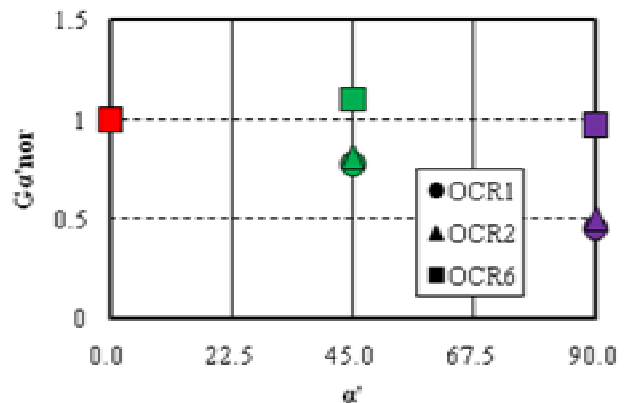


Fig.7 正規化したせん断弾性係数 $G_{\alpha'nor}$

6. 排水強度の異方性

(1) 排水強度の決定

一般的に、中空ねじりせん断試験をはじめとするせん断試験による強度は、偏差応力 q の最大値をとる。しかし、飽和試験の偏差応力はせん断ひずみの増加に伴って漸増するため、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排水強度と定める事とする。Table.5 に全ケースにおけるせん断強度を示す。また、CASE.1 の排水強度 q

主応力方向差 α' 関係を Fig.8 に、CASE.2 の排水強度 q 主応力方向差 α' 関係を Fig.9 に、CASE.3 の排水強度 q 主応力方向差 α' 関係を Fig.10、CASE.4 の排水強度 q 主応力方向差 α' 関係を Fig.11 に示す。

Table.5 排水強度 (kPa)

	最大主応力方向差 α' (deg)				
	0	22.5	45	67.5	90
CASE.1	232.7	234.1	229.1	228.8	233.7
CASE.2	569.2	-	556.9	-	570.4
CASE.3	422.4	-	416.7	-	409.6
CASE.4	215.8	-	201.6	-	194.8

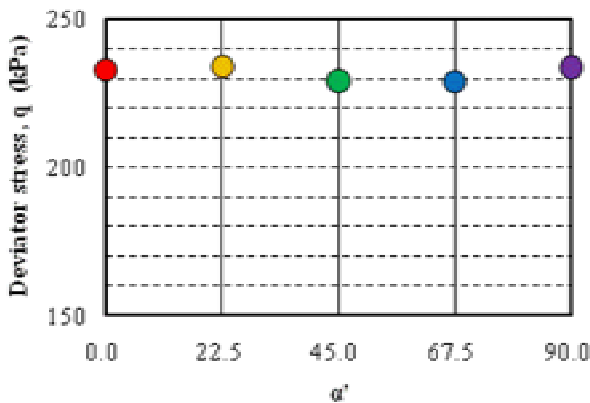


Fig.8 排水強度 q 主応力方向差 α' 関係 (CASE.1)

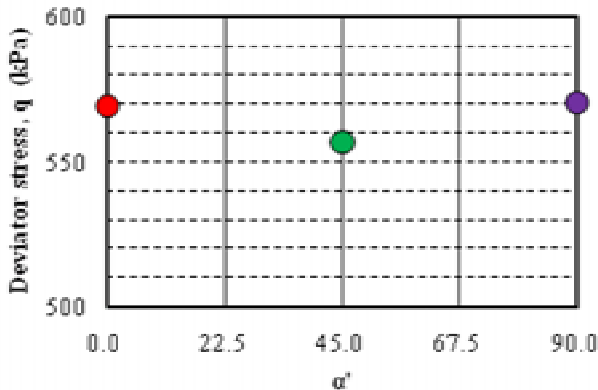


Fig.9 排水強度 q 主応力方向差 α' 関係 (CASE.2)

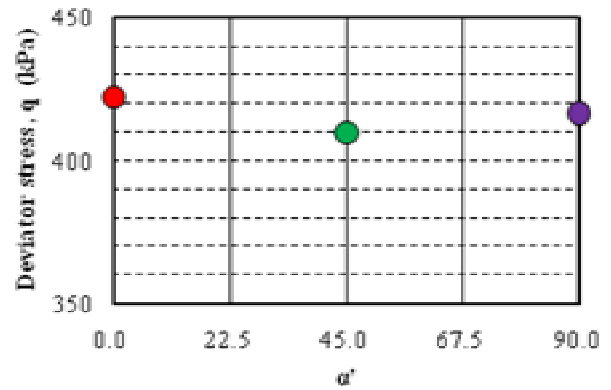


Fig.10 排水強度 q 主応力方向差 α' 関係 (CASE.3)

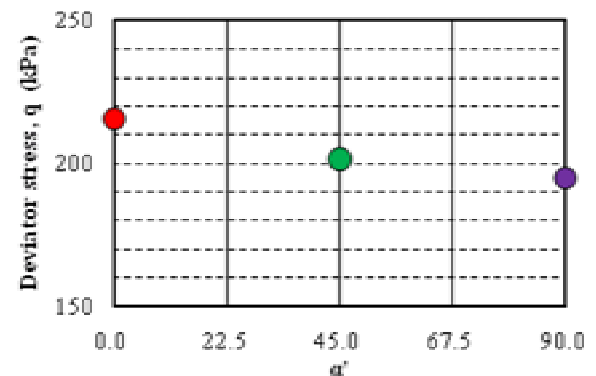


Fig.11 排水強度 q 主応力方向差 α' 関係 (CASE.4)

(2) 排水強度の正規化

Table.5 に示した排水強度を基に、CASE.2、CASE.3、CASE.4 について、以下の Eq.(4)を用いて正規化する。この正規化したせん断強度を $q_{\alpha'nor}$ と呼ぶこととする。

$$q_{\alpha'nor} = \frac{q_{\alpha'}}{q_{\alpha'=0}} \quad (4)$$

ここで、 $q_{\alpha'}$: 任意の α' での排水強度 (kPa)、 $q_{\alpha'=0}$: $\alpha'=0$ (deg) の時の排水強度 (kPa) である。

この $q_{\alpha'nor}$ を求めた結果を Fig.12 に示す。Fig.12 を見ると、CASE.2 および CASE.3 では $q_{\alpha'nor}$ が α' によらずほぼ一定となっているのに対し、CASE.4 では α' が大きくなるほど $q_{\alpha'nor}$ が小さくなっていることがわかる。

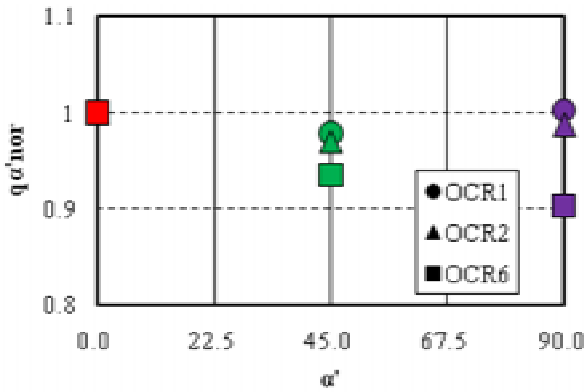


Fig.12 正規化した排水強度 $q_{\alpha' nor}$

7. 試験結果の考察および利用

(1) せん断弾性係数異方性

せん断弾性係数 G は、過圧密比 OCR が小さいとき (OCR1, OCR2) は主応力方向差 α' が大きくなるにつれ G は小さくなる傾向にある。これは、圧密とせん断の方向の差が大きいことで、せん断時に土粒子が大きく動き、同じ偏差応力でもひずみが大きくなるのが原因だと考えられる。Fig.13 を用いて説明すると、まず、最初はバラバラの方向を向いていた扁平な土粒子が、 K 一定圧密過程において、圧密応力の载荷によって Fig.13(a) のように向きを変える。その後のせん断载荷過程において、Fig.13(b) のようにせん断応力の方向が圧密応力の方向と同じ ($\alpha'=0$ (deg)) 場合は、土粒子は向きを変えないため、ひずみは小さくなり、結果、せん断弾性係数 G は大きくなる。それに対し、Fig.13(c) のようにせん断応力の方向が圧密応力の方向と異なる ($\alpha' \neq 0$ (deg)) 場合は、土粒子はせん断応力の方向に合わせて向きを変えようとするため、土粒子が動くことによってひずみは大きくなり、結果、せん断弾性係数 G は小さくなる。 α' が大きいほど、土粒子が動こうとする角度 (距離) が大きくなるため、ひずみは大きくなり、せん断弾性係数 G はより小さくなる。

また、OCR が大きくなる (OCR6) と、 G は主応力方向差 α' によらず一定となる傾向にある。これは、OCR が大きいほど、圧密応力に対しせん断応力が小さくなるため、Fig.13(d) のように小さなせん断応力では土粒子が動きにくく、ひずみが小さくなり、 α' によらずせん断弾性係数 G はほぼ一定の値になるのだと考えられる。ただし、この場合もせん断応力が大きくなるにつれ、土粒子が動きだし、 α' が大きいほどひずみは大きくなってゆく。

(2) 排水強度の異方性

排水強度 q は、過圧密比 OCR が小さい (OCR1,

OCR2) ときは、主応力方向差 α' によらずほぼ同じ値となるが、OCR が大きい (OCR6) ときは、 α' が大きくなるにつれ排水強度 q は小さくなる。ここでは、排水強度の発現とその異方性について考察を行う。

Fig.4 に示した CASE.4 の偏差応力 q - せん断ひずみ ε_s 関係を見ると、 α' が小さいケースほど、明確なピーク強度の発現があり、その後残留強度に至っている。これは、過圧密によって粘性土が密になり、弾性域が大きくなった (Fig.10(a)) ことで、せん断初期に急激に偏差応力 q が上がり、その後、ダイレイタンスーで供試体が膨張して弾性域が小さくなりながら、破壊に至ったと考えられる。このとき、 α' が小さいと、土粒子はせん断による膨張のみの影響

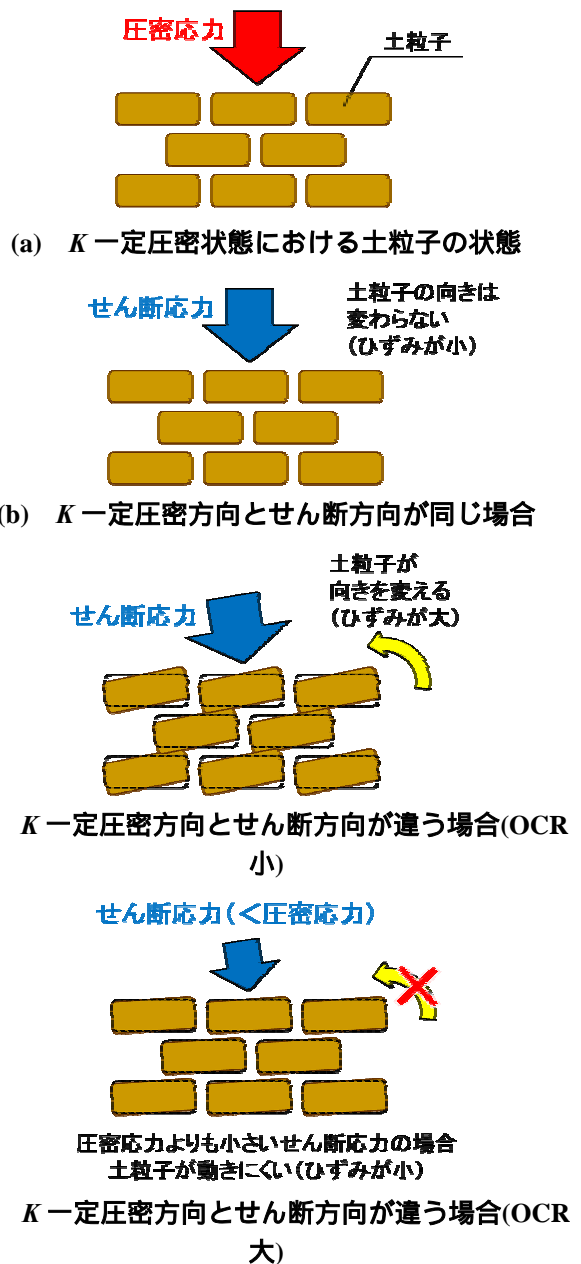


Fig.13 主応力方向差 α' の違いによる土粒子の動き

を受けるが、 α' が大きくなると、Fig.10(b)～Fig.10(c)のように土粒子はせん断方向に合わせて向きを変えようとするため、 $\alpha'=0$ (deg) のケースに比べると、早い段階で変形が発生しやすくなり（弾性域も小さくなり）、ピーク強度も小さくなってしまふのだと考えられる。 $\alpha'=90$ (deg) においては、ピーク強度と残留強度がほぼ一致してしまっているが、これは、粒子が動きやすい配向性をしているため、もともと弾性域は小さく、ピーク強度を示す前に、塑性変形が卓越するため、強度が残留強度とほぼ一致してしまっただと思われる。

(3) 排水強度とせん断弾性係数の傾向

Fig.11 に排水強度 q - 平均有効主応力 p' 関係および破壊線を示す。このとき用いた p' はせん断時の平均有効主応力 p'_s である。この破壊線を描くために、せん断時の中間主応力係数 $bs=0$ (deg) の場合の排水せん断試験 (CASE.2～CASE.4) と、非排水せん断試験 (OCR1, $p'_c=300$ kPa まで K 一定圧密, $\alpha'=0, 22.5, 45, 67.5, 90$ (deg)) の結果を用いた。

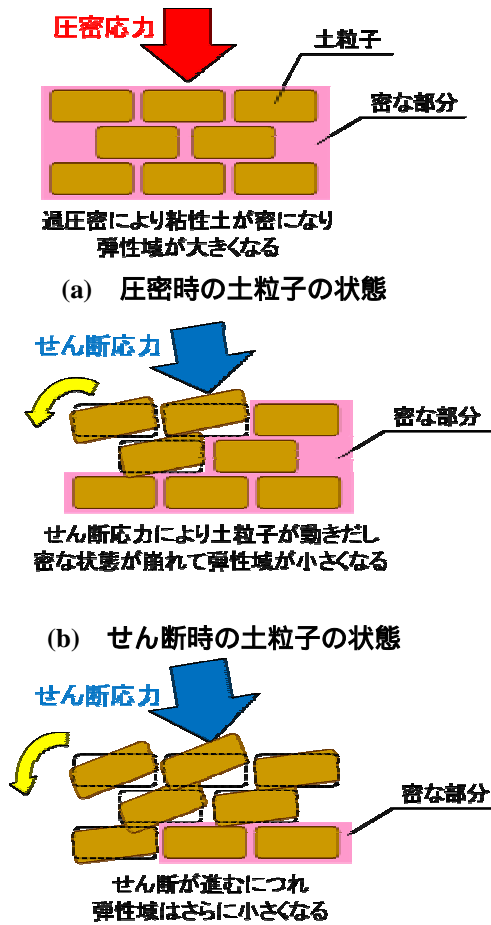


Fig.10 過圧密粘性土の圧密～せん断時の土粒子の動き

黒色の点線は OCR1 における破壊線であり、これは K 一定圧密時の p'_c および α' に依存しない。すなわち、正規圧密粘性土であれば、破壊はこの線上となる。また、赤色の点線は $p'_c=600$ kPa まで K 一定圧密した過圧密粘性土の破壊線である。こちらはわずかではあるが、 α' が大きくなるにつれ、破壊線の傾きが小さくなると思われる。この破壊線を用いることで、 $p'_c=600$ kPa まで K 一定圧密した供試体の異なる過圧密比 OCR の試験についても排水強度の推測が可能である。

また、Fig.12 に、せん断剛性係数 G - 平均有効主応力 p' 関係を示す。Fig.11 と同様に、せん断時の中間主応力係数 $bs=0$ (deg) の場合の排水せん断試験と、非排水せん断試験の結果を用いて整理を行った。OCR1 におけるせん断剛性係数 G の傾向を実線で表したが、これは直線関係となり、 α' が大きくなるにつれ、傾きは小さくなる。また、過圧密粘性土の傾向を点線で表した。OCR6 のせん断弾性係数 G は α' によらず一定と考えて点線を描いた結果、点線は α' が大きくなるにつれ、傾きは緩やかになり、 $\alpha'=90$ (deg) では一定の G を取る平行線となる。

さらに、正規圧密粘性土における排水強度 q およびせん断弾性係数 G と α' との関係が直線関係となったため、 q および G に対し、Eq.(5)、Eq.(6)を用いてせん断時の平均有効主応力 p'_s との比をとった後に、Eq.(7)、Eq.(8)を用いて OCR1, $\alpha'=0$ を基準として正規化を行った。この正規化した排水強度比を R_{qnor} 、せん断弾性係数比を R_{Gnor} と呼ぶこととする。

$$R_q = \frac{q}{p'_s} \quad (5)$$

$$R_G = \frac{G}{p'_s} \quad (6)$$

$$R_{qnor} = \frac{R_q}{R_{q0}} \quad (7)$$

$$R_{Gnor} = \frac{R_G}{R_{G0}} \quad (8)$$

ここで、 q : 任意の α' , OCR での排水強度 (kPa), G : 任意の α' , OCR でのせん断剛性係数 (kPa), p'_s : せん断時の平均有効主応力 (kPa), R_q : 任意の α' , OCR での R_q , R_{q0} : $\alpha'=0$ (deg), OCR1 の時の R_q , R_G : 任意の α' , OCR での R_G , R_{G0} : $\alpha'=0$ (deg), OCR1 の時の R_G である。Fig.13 にせん断強度比 R_{qnor} - 過圧密比 OCR 関係を、Fig.14 にせん断剛性係数比 R_{Gnor}

- 過圧密比 OCR 関係を示す。

Fig.13 において, OCR1 のケース (CASE.2) における排水強度 q をほぼ一定と見なすと, 各 α' における排水強度比は OCR1 で $R_{qnor}=1$ を通る比例関係になると考えられる (実際は OCR2 における q もほぼ一定だったため, 正確には直線関係ではないが, 実用的には直線近似が可能である)。 α' が大きくなるにつれ, 傾きは緩やかになり, OCR6 においては $\alpha'=0$ (deg) で $R_{qnor}=1.38$, $\alpha'=45$ (deg) で $R_{qnor}=1.29$, $\alpha'=90$ (deg) で $R_{qnor}=1.24$ となる Fig.14 においては, OCR6 のケース (CASE.4) におけるせん断弾性係数 G をほぼ一定と見なすと, 各 α' におけるせん断弾性係数比は α' が大きくなるにつれ, 傾きは急になる。Fig.13 および Fig.14 を用いると, 任意の過圧密比 OCR および最大主応力方向差 α' における排水強度, せん断弾性係数の推定が可能である。

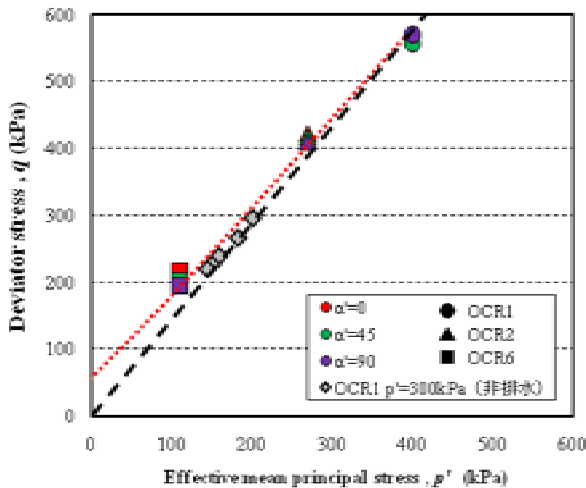


Fig.11 排水強度 q - 平均有効主応力 p' 関係

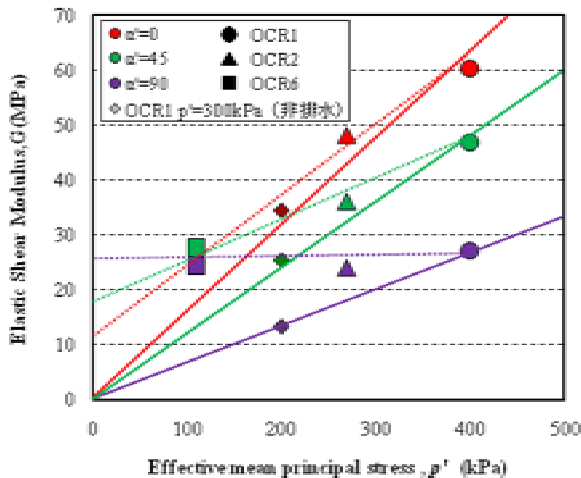


Fig.12 せん断弾性係数 G - せん断時の平均有効主応力 p' 関係

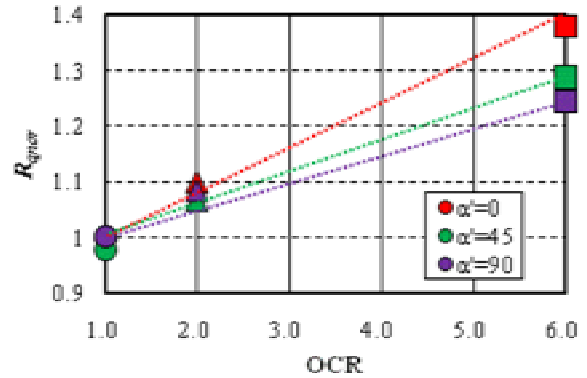


Fig.13 排水強度比 R_{qnor} - 過圧密比 OCR 関係

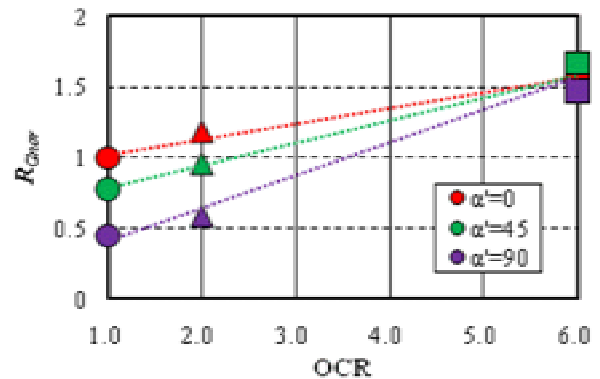


Fig.14 せん断弾性係数比 R_{Gnor} - 過圧密比 OCR 関係

(4) 排水強度とせん断弾性係数の定式化

排水強度とせん断弾性係数について, Fig.13, Fig.14 で直線関係を得られたので, これを利用して, 過圧密比 OCR および最大主応力方向差 α' の2つを変数とする排水強度比 R_{qnor} とせん断弾性係数比 R_{Gnor} の定式化を行う。

Fig.13 の3本の直線は, a_q, b_q を定数として, Eq.(9) で表すことができる。

$$R_{qnor} = (a_q + b_q \cdot OCR) \quad (9)$$

この a_q, b_q を求める。3本の直線は OCR=1 で b_q は $R_{qnor}=1$ を通るため,

$$b_q = 1 - a_q \quad (10)$$

となる。Eq.(9)に Eq.(10), OCR=6, $R_{qnor} = R_{qnor(OCR=6)}$: OCR=1 のときの R_{qnor} を代入し, a_q についての式に変形すると以下ようになる。

$$a_q = \frac{6 - R_{qnor(OCR=6)}}{6} \quad (11)$$

Eq.(11)を用いて, 各 α' における a_q を求めると, Fig.15

のようになり、 α' と a_q の関係式はEq.(12)になる。

$$a_q = 3.0 \times 10^{-4} \alpha' + 0.93 \quad (12)$$

Eq.(9), Eq.(10), Eq.(12)を用いて変形すると、排水強度比 R_{qnor} の式はEq.(13)となる。

$$R_{qnor} = \frac{R_q}{R_{q0}} = 3.0 \times 10^{-4} \alpha' \cdot (1 - OCR) + 0.074 \cdot OCR + 0.93 \quad (13)$$

同様に、せん断剛性係数比 R_{Gnor} に対しても式の整理を行うと、各 α' における a_G を求めると、Fig.16のようになり、せん断剛性係数比 R_{Gnor} の式はEq.(14)となる。

$$R_{Gnor} = \frac{R_G}{R_{G0}} = 7.3 \times 10^{-3} \alpha' (0.17OCR - 1) + 0.14OCR + 0.91 \quad (14)$$

Eq.(13)およびEq.(14)を用いることで、最大主応力方向差 α' が0(deg), OCR1の時の R_{q0} や R_{G0} を実験により求めれば、各 α' , OCRにおける R_q や R_G の推定が可能となる。

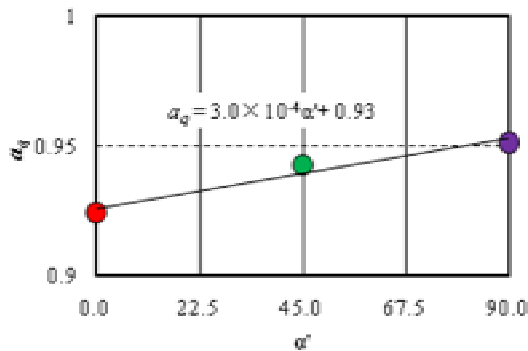


Fig.15 最大主応力方向差 α' - a_q 関係

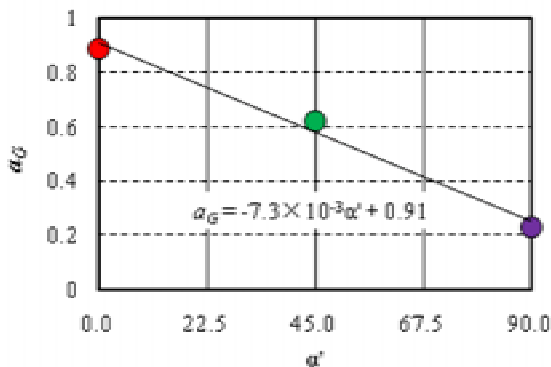


Fig.16 最大主応力方向差 α' - a_G 関係

8. 結論

本研究より得られた、 K 一定圧密過程・せん断載荷過程における飽和粘性土の排水せん断試験結果より、以下の結論に達した。

1. 正規圧密粘性土および過圧密比OCRの小さい過圧密粘性土においては、せん断弾性係数の異方性が確認できた。最大主応力方向差 α' が大きくなるにつれ、せん断弾性係数は減少する。減少の割合は主応力方向差 α' が0から22.5(deg)と67.5から90(deg)の範囲では小さく、22.5から67.5(deg)の範囲では大きくなるという、緩やかなS字を描く曲線関係になる。
2. 過圧密比OCRの大きい過圧密粘性土においては、最大主応力方向差 α' の変化に関わらず、せん断弾性係数の差異は確認できなかった。
3. 正規圧密粘性土および過圧密比OCRの小さい過圧密粘性土においては、最大主応力方向差 α' の変化に関わらず、排水強度の差異は確認できなかった。つまり、これらの試料において、異方圧密による強度異方性は発現しない。
4. 過圧密比OCRの大きい過圧密粘性土においては、排水強度の異方性の発現が確認できた。最大主応力方向差 α' が大きくなるにつれ、排水強度は減少する。

参考文献

- 1) Bjerrum, L. : Problems of soil mechanics and construction on soft clays, State of the Art Report, Session 4, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 3, pp. 109-159, 1973.
- 2) 樺澤駿治, 豊田浩史: 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建設工学専攻論文概要, 2007