

# 過圧密された粘性土の非排水強度異方性の評価手法

地盤工学研究室 樺澤 駿治

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、地盤内の応力は場所により様々な方向から作用している。また、その時の圧密応力比  $K$  や過圧密比も各地点によって異なる。そのため、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、ベールラムらにより、地盤の強度とそれに対応する室内試験方法が提案され、実地盤に適した試験方法を選択しなければ、正確に地盤強度を判定できないことが指摘されている。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、非排水強度異方性を容易に評価できることは実務的に重要である。

そこで、本研究では、三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、様々な方向から異方過圧密された粘性土に対して、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ていくものとする。また、二次元問題を検討するために非排水平面ひずみ試験も行った。さらに、異方圧密時の  $K$  も変化させてその影響を調べた。

## 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。この試料を十分脱気した後、予圧密セルに導き  $50(\text{kPa})$  の圧力で予圧密を行い、その土塊を外径  $80(\text{mm})$ 、内径  $50(\text{mm})$ 、高さ  $160(\text{mm})$  の中空円筒形供試体に作成し試験を行った。

Tabel.1 過圧密粘土の試験ケース

過圧密比 (OCR)	K一定圧密		せん断載荷過程			
	$\alpha_c(\text{deg})$	$b_c$	非排水せん断		非排水平面ひずみ	
			$\alpha_s(\text{deg})$	$b_s$	$\alpha_s(\text{deg})$	$b_s$
1	45	0	45	0	45	
	0					
	-45					
2	45	0	45	0	45	
	0					
	-45					
6	45	0	45	0	45	
	0					
	-45					

## 3. 試験および試験ケース

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ていく。以後、 $K$  一定圧密と呼ぶ。 $K$  一定圧密された試料の作製には、まず予備圧密を  $p'=50\text{kPa}$  で行い、その後  $p'(50\text{kPa})$  を一定に保ち任意の  $K$  値になるまで排水せん断を行い  $q$  を発生させる。その後、任意の  $K$  値に達したら、制御を切り替え  $K$  値一定のまま任意の有効応力まで圧密を行う。

本試験で行った過圧密粘土に対する試験ケースを Tabel.1 に示す。過圧密粘土の試料作製は、上記と同様任

Tabel.2  $K$  値を変化させた試験ケース

k値	K一定圧密		せん断載荷過程	
	$\alpha_c(\text{deg})$	$b_c$	$\alpha_s(\text{deg})$	$b_s$
0.8	45	0	45	0
	0			
	-45			
0.6	45	0	45	0
	0			
	-45			
0.43	45	0	45	0
	0			
	-45			
0.35	45	0	45	0
	0			
	-45			

意の  $K$  値に達するまでせん断を行い、 $p'=600\text{kPa}$  まで圧密を行った。尚、 $K$  一定圧密過程の  $K$  値は三軸試験よりもとめた  $K_0=0.43$  を用いた。その後、三軸試験より得られた  $K_0$  除荷と同じ応力比で  $p'=100$  or  $300(\text{kPa})$  まで除荷を行った。試験条件は、 $K$  一定圧密時の主応力方向  $\alpha_c$  を変化させた。さらに過圧密粘土に関しては、二次元問題を検討するために非排水平面ひずみ試験も行った。

また、 $K$  一定圧密時の  $K$  値を変化させた試験も実施した。試験条件を Tabel.2 に示す。 $K$  一定圧密時に用いる  $K$  値を変化させ、 $p'=300\text{kPa}$  まで圧密を行う。さらに、 $K$  一定圧密時の最大主応力方向  $\alpha_c$  を変化させ異方性の検討も行う。尚、中間主応力係数  $b_c=0$  と固定した。せん断過程の最大主応力方向  $\alpha_s=45(\text{deg})$ 、中間主応力係数  $b_s=0$  と固定し、非排水せん断を行った。

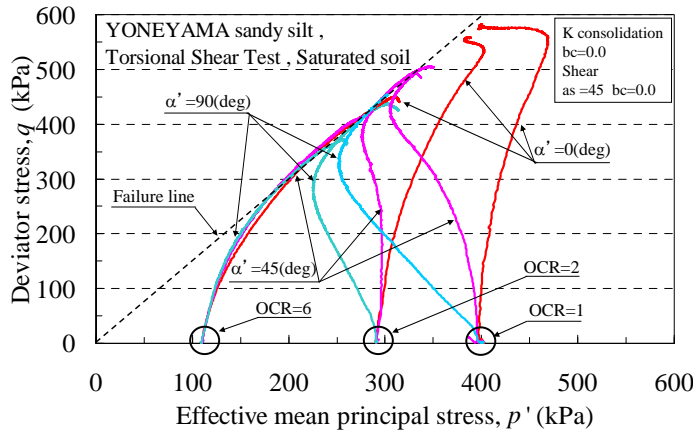


Fig.1 有効応力経路(非排水せん断試験)

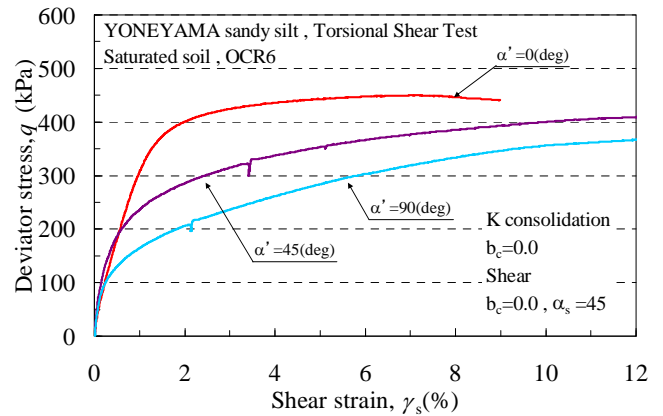


Fig.2 応力-ひずみ関係(非排水せん断試験)

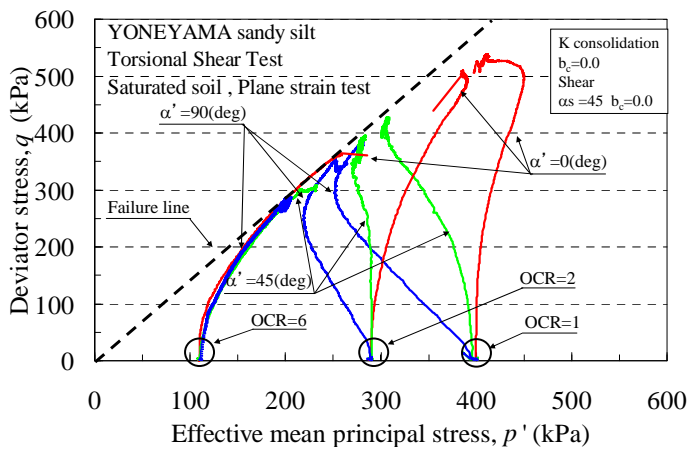


Fig.3 有効応力経路(非排水平面ひずみ試験)

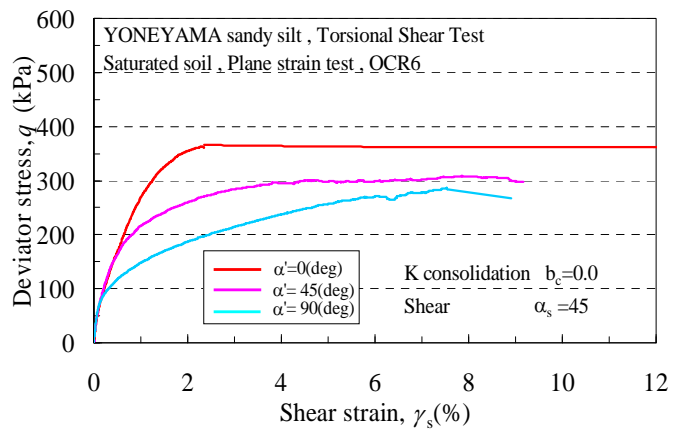


Fig.4 応力-ひずみ関係(非排水平面ひずみ試験)

#### 4. 過圧密比、最大主応力方向の変化の影響

本研究で実施した、過圧密粘土に対する試験のうち、非排水せん断試験より得られた有効応力経路を Fig.1 に、過圧密比=6 の時の応力-ひずみ関係を Fig.2 に示す。また、非排水平面ひずみ試験より得られた有効応力経路を Fig.3 に、過圧密比=6 の時の応力-ひずみ関係を Fig.4 に示す。

Fig.1 を見ると、過圧密比が大きくなるに従い、非排水強度が小さくなっていく事が確認できる。この傾向は  $K$  一定圧密時とせん断時の最大主応力方向の差が変化しても同様の傾向を示した。また、圧密時とせん断時の最大主応力方向の差に注目すると、差が大きくなると非排水強度が小さくなっていく事が確認できる。これは、過圧密比を変化させた場合においても同様の傾向を示している。

Fig.2 を見ると、 $K$  一定圧密時とせん断時の最大主応力方向の差が大きくなると、非排水強度が小さくなる事が分かる。これは、過圧密比を変化させても同様の傾向を示した。

Fig.3, Fig.4 を見ると平面ひずみ試験でも、有効応力経路、応力-ひずみ関係共に非排水せん断試験と同様の傾向を示した。

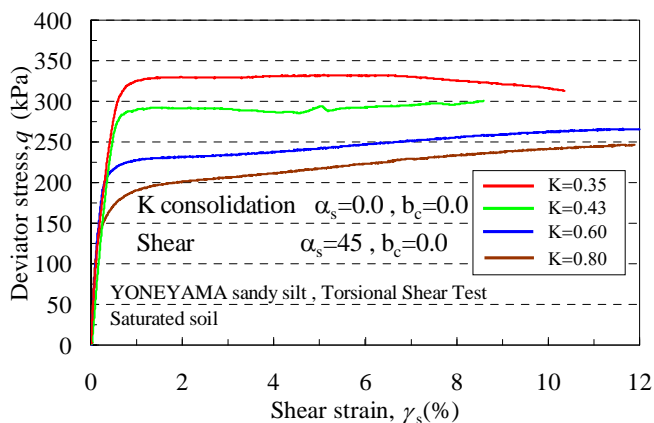


Fig.5 応力-ひずみ関係( $\alpha'=0(\text{deg})$ )

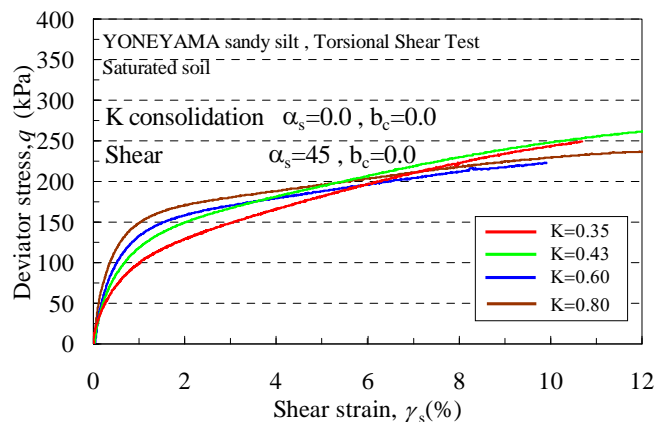


Fig.6 応力-ひずみ関係( $\alpha'=90(\text{deg})$ )

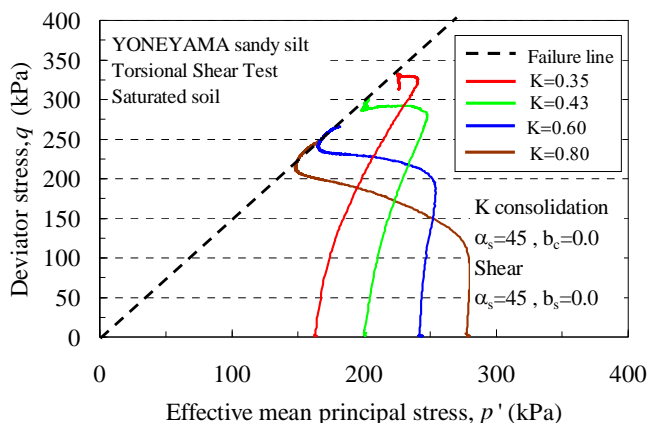


Fig.7 応力経路( $\alpha'=0(\text{deg})$ )

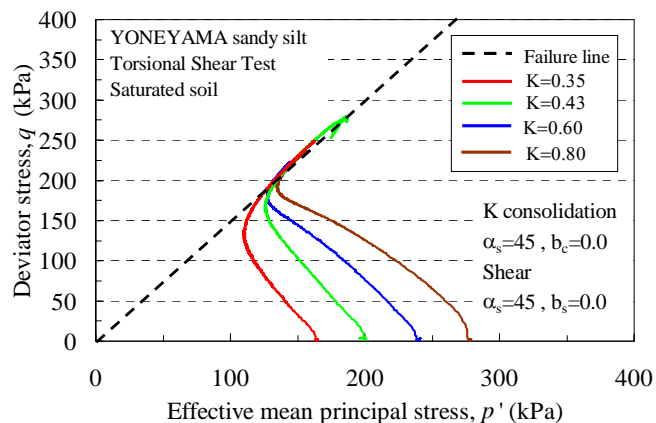


Fig.8 応力経路( $\alpha'=90(\text{deg})$ )

## 5. $K$ 値、最大主応力方向の変化の影響

$K$  一定圧密過程で用いる  $K$  値を変化させたケースで得られた、最大主応力方向の差 $\alpha'=0(\text{deg})$ の時の有効応力経路を Fig.5 に、応力-ひずみ関係を Fig.6 に示す。また、最大主応力方向の差 $\alpha'=90(\text{deg})$ の時の有効応力経路を Fig.7 に、応力-ひずみ関係を Fig.8 に示す。

Fig.5 を見ると、 $\alpha'=0(\text{deg})$ のケースでは、 $K$  値が小さくなると偏差応力は大きくなっている。一方、Fig.6 を見ると、 $\alpha'=90(\text{deg})$ のケースでは  $K$  値が小さくなるとせん断ひずみが小さい領域では、偏差応力も小さくなっていることが確認できる。これは、異方性が偏差応力に影響を及ぼしているためであると考えられる。

次に Fig.7 を見ると、まず異方圧密時の  $K$  値を変化させるとせん断開始時の有効応力に変化が出る事が確認できる。その傾向は、 $K$  値が小さくなるのに伴い、せん断開始時の有効応力は小さくなっている。また、異方圧密時の  $K$  値を変化させると、間隙水圧の発生の仕方にも変化が出ている。さらに、変相点

の大きさを見ると、Fig.7ではK値が小さくなるに従い変相点は大きくなっている。最終的には、どのケースにおいても破壊線にのっている。一方、Fig.8を見ると、K値が小さくなるに従い変相点は小さくなっている。

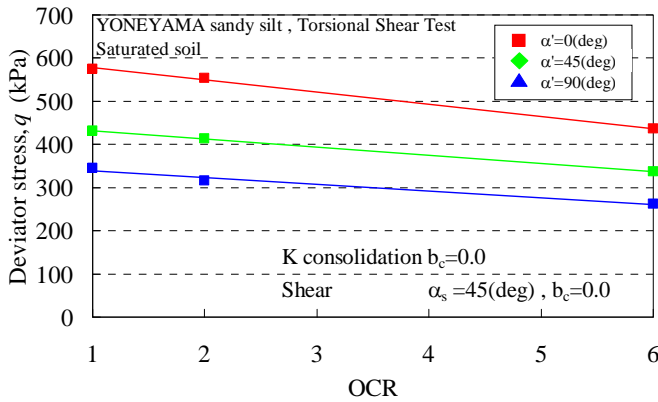


Fig.9 過圧密比と非排水強度の関係

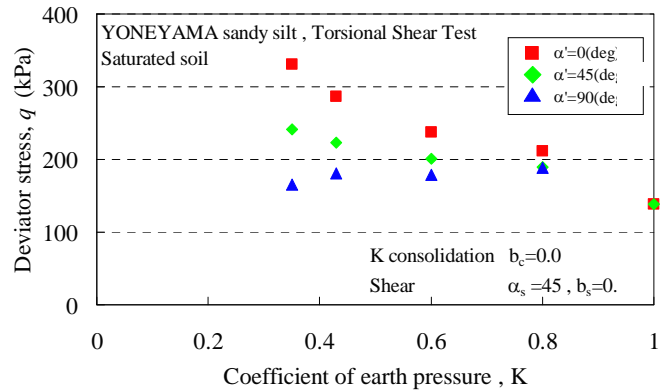


Fig.10 K値と非排水強度の関係

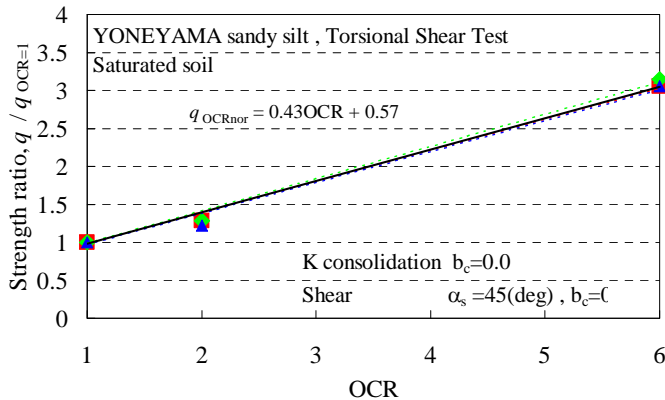


Fig.11 過圧密比と非排水強度の関係

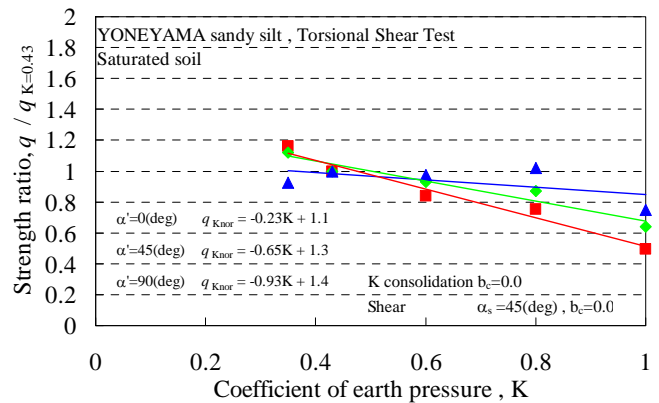


Fig.12 K値と非排水強度の関係

## 6. 結果整理と正規化

これまでの試験結果を整理するため非排水強度を定める。その方法は、各ケースにおける試験結果のせん断ひずみが4.63%時の偏差応力を非排水強度とした。

非排水強度と各パラメータについて考察する。そこで、Fig.9に過圧密比と非排水強度の関係を示す。また、K値と非排水強度の関係をFig.10に示す。

Fig.9を見ると過圧密比が増加するし、せん断開始時の有効応力が小さくなると、非排水強度は減少している。この傾向は、K一定圧密過程とせん断過程の最大主応力方向の差 $\alpha'$ が変化しても同様である。また、この傾向は非排水平面ひずみ試験においても同様であった。

次にFig.10を見ると、K値が変化すると非排水強度が変化している事が確認できる。この傾向は $\alpha'$ の影響を受けている事が分かる。 $\alpha'=0(\text{deg})$ のケースでは、K値が小さくなると共に非排水強度は増加している。一方、 $\alpha'=90(\text{deg})$ のケースでは、K値の影響による非排水強度の変化が小さくなっている。

これらの結果をさらに明確に整理するために、正規化を行った。正規化の方法は、過圧密比と非排水強度の関係では、ある $\alpha'$ のケースにおける非排水強度を、ある $\alpha'$ における過圧密比が1のケースでの非

排水強度で除した。この結果を Fig.11 に示す。

Fig.11 を見ると、過圧密比による非排水強度への影響は、 $\alpha'$ の影響によらず過圧密比と線形関係となることを確認した。その傾向は、過圧密比が1から6になり、せん断開始時の有効応力が変化すると、非排水強度は6倍程度に増加する。また、正規化した結果を近似化することにより、 $\alpha'$ の影響によらず過圧密の影響を線形で表せることを確認した。また、非排水平面ひずみ試験においても同様の傾向を示した。

次に、K 値と非排水強度の関係では、ある $\alpha'$ のケースにおける非排水強度を、ある $\alpha'$ におけるK値が1のケース(等方圧密)での非排水強度で除した。この結果を Fig.12 に示す。Fig.12 を見ると、K 値の影響は $\alpha'$ の影響を受け、非排水強度が変化していることを確認した。正規化した結果を近似化することにより、 $\alpha'$ 別にK 値が非排水強度に与える影響を推定する事を可能にした。

### 7. 非排水強度に与える影響の三次元表現

正規化により、求めた近似式を元に、それぞれのパラメータが非排水強度に与える影響を三次元表現した。過圧密比、 $\alpha'$ と非排水強度の関係を Fig.13 に、非排水平面ひずみ試験の結果を Fig.14 に示す。また、K 値、 $\alpha'$ と非排水強度の関係を Fig.15 に示す。Fig.13 を見ると、せん断ひずみにより多少の差があるもの、近似式により求めた平面は、過圧密比、 $\alpha'$ が非排水強度に及ぼす影響を表せている。Fig.14 より、非排水平面ひずみ試験においても非排水せん断試験の結果と同様、近似式により求めた平面は、過圧密比、 $\alpha'$ が非排水強度に及ぼす影響を表せている。また、非排水せん断試験の結果、非排水平面ひずみ試験の結果を比較すると、ほぼ同様の平面であることが分かる。このことから、平面ひずみ問題においても同様の整理が可能であることが分かる。

Fig.15 を見ると、せん断ひずみにより多少の差があるもの、近似式により求めた平面は、異方

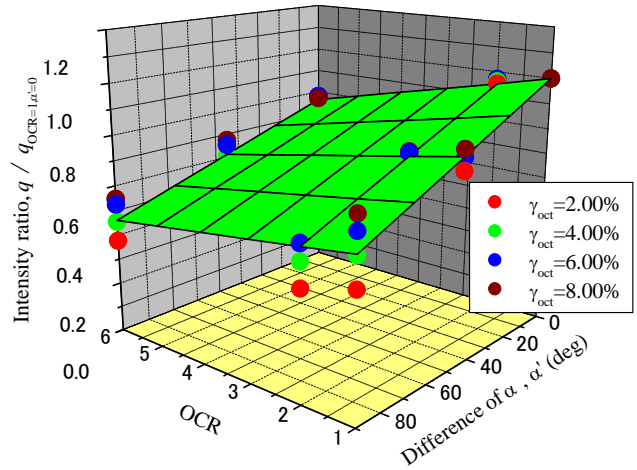


Fig.13 三次元表現(非排水せん断試験)

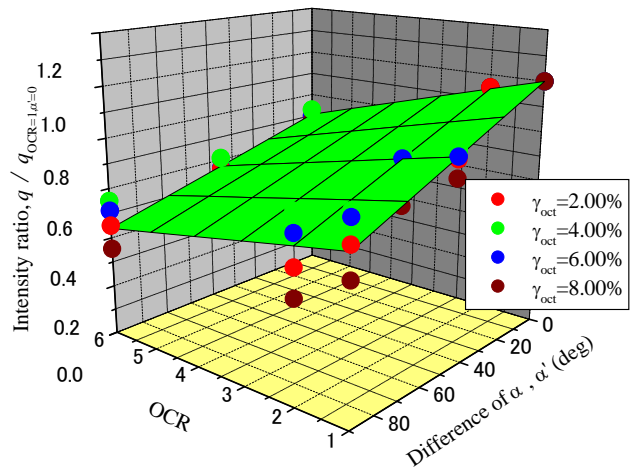


Fig.14 三次元表現(非排水平面ひずみ試験)

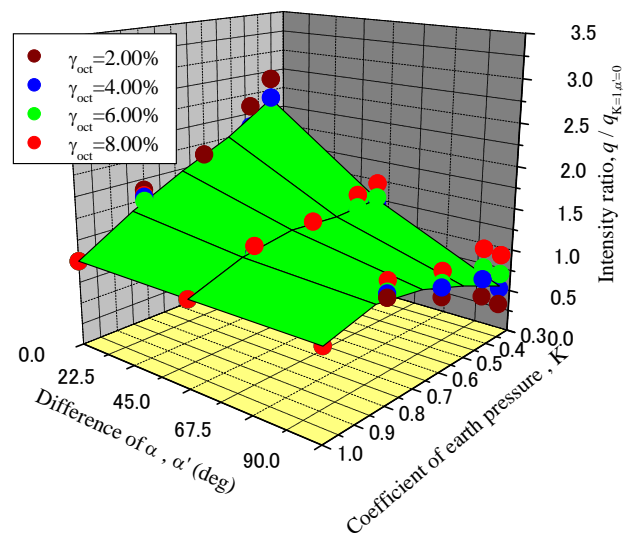


Fig.15 三次元表現

圧密時の K 値,  $\alpha'$  が非排水強度に及ぼす影響を表せている.

以上の事より, 各パラメータの非排水強度に与える影響を三次元表現できる事が確認できた.

## 8. 非排水強度の推定

既往の研究により, 非排水強度に及ぼす最大主応力方向  $\alpha$ , 中間主応力係数  $b$  の影響を推定する提案式が求められている. さらに本研究より過圧密比, 異方圧密時の K 値の影響を推定する提案式を導いた. これらの提案式を評価した非排水強度を推定する式を Eq.(1) に示す. Eq.(1) を用いる事で, 三軸試験の結果から各パラメータの影響を考慮した非排水強度を推定することを可能とした.

$$q = C_{\alpha'} \cdot C_b \cdot C_{OCR} \cdot C_K \cdot q_{tri}$$

$$\cdot \alpha \text{ の影響 : } C_{\alpha'} = -0.0041\alpha' + 1.0$$

$$\cdot b \text{ の影響 : } C_b = -0.25b' + 1.0 \quad \text{Eq.(1)}$$

$$\cdot OCR \text{ の影響 : } C_{OCR} = 0.43OCR + 0.57$$

$$\cdot K \text{ 値の影響 : } C_K = A_K(K - 0.43) + 1 \\ A_K = 0.0077\alpha' - 0.95$$

## 8. 結論

1. 過圧密比の変化は, せん断過程における間隙水圧の発生に影響を与える事を確認した. また, K 一定圧密過程とせん断過程の最大主応力方向の差  $\alpha'$  の変化も, せん断過程における間隙水圧の発生に影響を与える事を確認した.
2. 過圧密比による非排水せん断強度への影響は, 過圧密比が 1 から 6 になり, せん断開始時の有効応力を同じとすれば, 非排水強度は 3 倍程度に増加することが確認できた.
3. 上記 1 と 2 の傾向は, 非排水平面ひずみ試験においても同様の傾向を示した.
4. 正規化することにより, 過圧密比の影響は  $\alpha'$  によらず線形関係になる事を確認した. また, この関係は平面ひずみ状態であっても同様である.
5. 異方圧密時の K 値の変化による影響は,  $\alpha$  の影響を受け非排水強度に影響を及ぼす.
6. 正規化することにより,  $\alpha'$  別に異方圧密時の K 値が非排水強度に与える影響を推定する事が可能となった.
7. 三次元表現を用いる事により, 各パラメータの影響を視覚的に捉える事を可能とした.
8. 提案式により, 三軸試験の結果から  $\alpha$ ,  $b$ , 過圧密比, K 値の非排水強度に及ぼす影響を推測する事が可能となった.