

粘性土の非排水強度に与える異方圧密の影響

地盤工学研究室 宇野 忠浩
指導教員 豊田 浩史

1. 研究目的

わが国に広くみられる飽和沖積粘土地盤においては、原位置から採取した試料の一軸圧縮強度（非排水強度）を設計に用いることが多い。また、斜面の崩壊を考えたとき、せん断方向は崩壊位置において変化するため、強度異方性の影響を受けることは周知の事実である。しかしながら、試験で異方圧密が非排水強度にどのように影響するかは、限られた条件でしか検討されていない。そこで、本研究では中空ねじりせん断試験装置を用い、様々な方向に対して異方圧密である K 一定圧密を行い、強度異方性が非排水強度に与える影響について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体

試料は、新潟県柏崎市米山付近より採取した粘性土（ラテライト系粘土）を用いた。この米山粘性土の物性値は、土粒子密度 $\rho_s=2.746$ (g/cm^3)、塑性指数 $I_p=22.5$ (%)、粘土 23.6 (%)、シルト 57.0 (%)、砂 19.4 (%) である。そして、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後脱気して、試料圧密器により 50 (kPa) の圧力で予圧密した。その後、その土塊を外径 80 (mm)、内径 50 (mm)、高さ 160 (mm) の中空円筒形に成形し、中空ねじりせん断試験装置にセットした。中空ねじりせん断試験装置を Fig.1 に示す。供試体の飽和には二重負圧法を用いた。

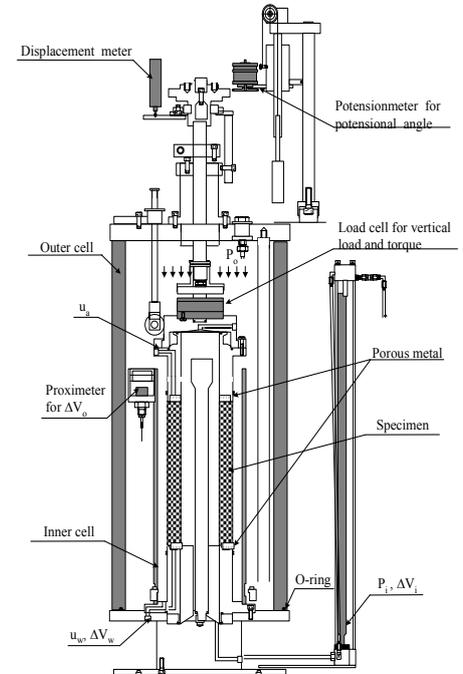


Fig.1 中空ねじりせん断試験装置

2.2 試験方法および試験条件

原地盤の応力状態を再現するため静止土圧係数 K_0 を一定に保持しながら圧密する。以下この圧密を K 一定圧密と呼ぶ。本研究では供試体への応力履歴を明確にするため、 K_0 圧密された供試体の作製には以下のような手順を経た。予備圧密時の有効応力から p' 一定 (=50kPa) のせん断を行い、任意の K 値に達したら K 一定圧密に制御を切り替え、所定の平均有効主応力 (=300kPa) まで圧密する。 K 値には、三軸試験より求めた K_0 値 0.43 を用い、圧密時の最大主応力方向 α_c は 45 (deg)、中間主応

Table.1 試験条件

K consolidation		Shear	
α_c	b_c	α_s	b_s
45	0.0	45	0.0
45	0.0	45	0.5
45	0.0	45	1.0
45	0.0	22.5	0.0
45	0.0	22.5	0.5
45	0.0	22.5	1.0
45	0.0	0	0.0
45	0.0	0	0.5
45	0.0	90	1.0
45	0.0	-22.5	0.0
45	0.0	-22.5	0.5
45	0.0	-22.5	1.0
45	0.0	-45	0.0
45	0.0	-45	0.5
45	0.0	-45	1.0

力係数 b_c は 0.0 と固定して行った。K 一定圧密後，等方応力状態（200kPa）まで除荷し，せん断時の最大主応力方向 α_s ，中間主応力係数 b_s を変化させて非排水せん断を行った。本研究で実施した試験条件を **Table.1** に示す。

また，二次元問題として，せん断載荷過程において半径方向ひずみ ε_r を生じさせず，非排水せん断試験を行う非排水平面ひずみ試験も行った。試験条件は最大主応力方向が $\alpha_s=45, 22.5, 0, -22.5, -45$ (deg) である。

3. 試験結果

3.1 最大主応力方向 α が及ぼす影響

せん断載荷時の試験条件の中間主応力係数 b_s を 0.0 と固定し，最大主応力方向 α_s の変化に伴う非排水強度への影響を考察する。

$\alpha_s=45, 22.5, 0, -22.5, -45$ (deg)， $b_s=0.0$ とした試験結果を **Fig.2-(a)**，**Fig.2-(b)** に示す。**Fig.2-(a)** は偏差応力-せん断ひずみ関係，**Fig.2-(b)** は応力経路を示す。また，非排水平面ひずみ試験の試験結果を **Fig.3-(a)**，**Fig.3-(b)** に示す。

まず **Fig.2-(a)** を見ると，せん断載荷過程の最大主応力方向 α_s の変化に伴い，初期勾配の折れ曲がり点が変わっていることが挙げられる。その傾向は，K 一定圧密過程における最大主応力方向 α_c とせん断載荷過程における最大主応力方向 α_s が一致している $\alpha_c=\alpha_s=45$ (deg) の時に最も大きい q まで初期勾配を維持している。逆に，K 一定圧密過程における最大主応力方向 α_c に対して 90 (deg) 回転している $\alpha_s=-45$ (deg) のケースにおいては最も小さい q で折れ曲がっている。K 一定圧密過程における最大主応力方向 $\alpha_c=45$ (deg) とせん断載荷過程における最大主応力方向 α_s との差が大きくなるに伴い，初期勾配の折れ曲がり点が小さくなっていることが分かる。強度に関しても初期勾配の変化同様，K 一定圧密過程における最大主応力方向 $\alpha_c=45$ (deg) とせん断載荷過程における最大主応力方向 α_s との差が大きくなるにしたがい，小さくなっていることが分かる。

次に **Fig.2-(b)** を見ると，せん断載荷過程における最大主応力方向 α_s が変化するのに伴い，応力経路にも影響を与えていることがわかる。その傾向は， $\alpha_c=\alpha_s=45$ (deg) の時，最も大きい変相点を示し，負の過剰間隙水圧が発生していることが分かる。そして，最大主応力方向が $\alpha_s=22.5, 0, -22.5, -45$ (deg) と変化するのに伴い，徐々に変相点が小さくなり，正の過剰間隙水圧の発生量が大きくなる。この中で， $\alpha_s=-22.5$ (deg) と -45 (deg) のケースだけは過剰間隙水圧の発生量はほぼ同程度である。しかし，変相点は 10 (kPa) 程度ではあるが差異が見られる。K 一定圧密過程における最大主応力方向 α_c とせん断載荷過程における最大主応力方向 α_s の差が 67.5 (deg) 以上大きくなると変相点と過剰間隙水圧の発生量の差異はそれほど大きな差は見られなくなると

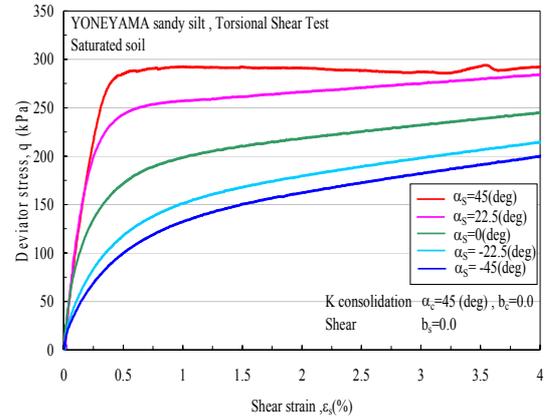


Fig.2-(a) 偏差応力-せん断ひずみ関係 ($b_s=0.0$)

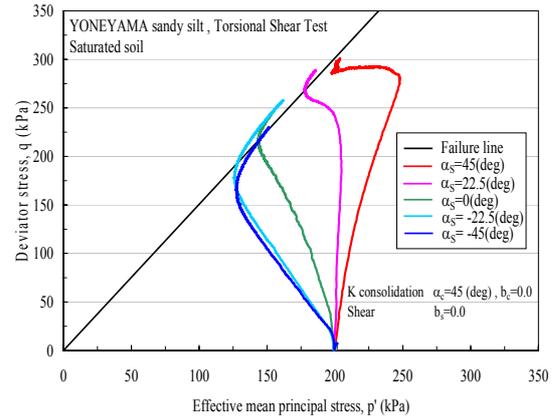


Fig.2-(b) 応力経路 ($b_s=0.0$)

推測される。

以上のことから、せん断载荷過程における最大主応力方向 α_s が変化すると、それに伴い強度や応力経路に影響を及ぼすことが分かる。せん断载荷過程での中間主応力係数 b_s が異なるケース ($b_s=0.5, 1.0$) においても同様の傾向が確認できた。

Fig.3-(a), Fig.3-(b)に示している非排水平面ひずみ試験の試験結果を見ても、同様の傾向が確認できる。

3.2 中間主応力係数 b が及ぼす影響

ここではせん断载荷時の試験条件の最大主応力方向 α_s を 45 (deg) に固定し、中間主応力係数 b_s の変化に伴う非排水強度への影響を考察する。

Fig.4-(a)は偏差応力-せん断ひずみ関係、**Fig.4-(b)**は応力経路を示す。

Fig.4-(a)を見ると、せん断载荷過程の中間主応力係数 b_s の変化に伴い、初期勾配の折れ曲がり点も変化していることが挙げられる。K 一定圧密過程とせん断载荷過程の中間主応力係数 b が一致している $b_c=b_s=0.0$ の時、最も大きな q まで初期勾配を維持し、K 一定圧密過程とせん断载荷過程の中間主応力係数 b の差が最も大きい $b_s=1.0$ の時、初期勾配の折れ曲がり点は最も小さい q で起こる結果となった。

また、強度も K 一定圧密過程での中間主応力係数 b_c とせん断载荷過程での中間主応力係数 b_s との差が大きくなるのに伴い小さくなっていくことが分かる。

次に **Fig.4-(b)**を見ると、せん断载荷過程における b_s が変化するのに伴い応力経路にも影響を与えていることがわかる。K 一定圧密過程とせん断载荷過程の中間主応力係数 b が一致している $b_c=b_s=0.0$ の時、最も大きな非排水強度 (変相点) を示し、K 一定圧密過程とせん断载荷過程の中間主応力係数 b の差が最も大きい $b_s=1.0$ の時、変相点は最も小さくなる結果となった。

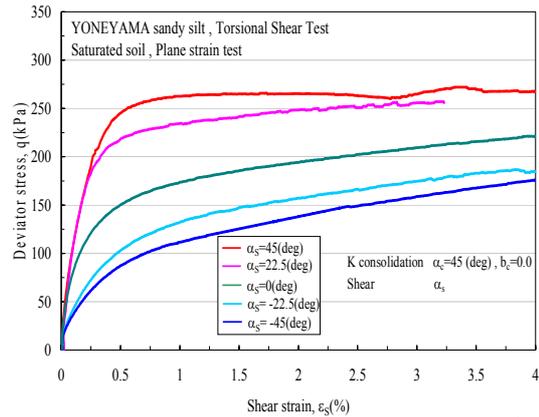


Fig.3-(a) 偏差応力-せん断ひずみ関係 (非排水平面ひずみ試験)

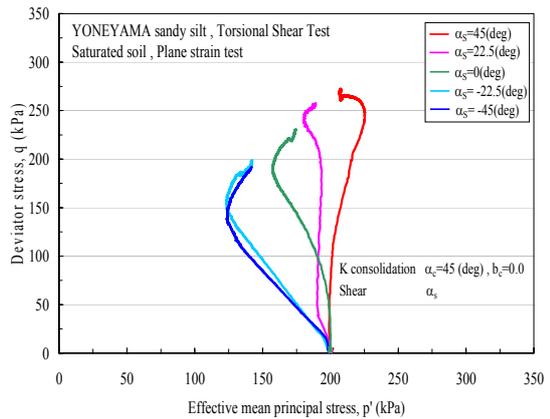


Fig.3-(b) 応力経路 (非排水平面ひずみ試験)

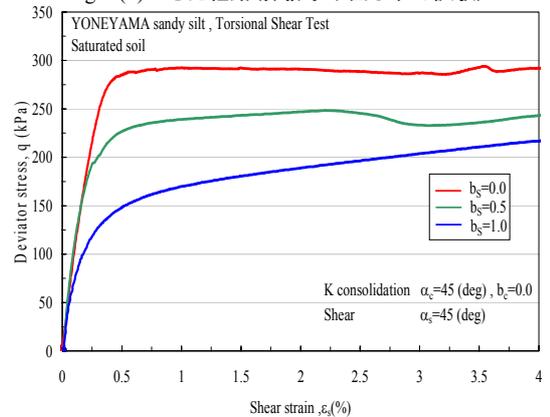


Fig.4-(a) 偏差応力-せん断ひずみ関係 ($\alpha_s=45$ (deg))

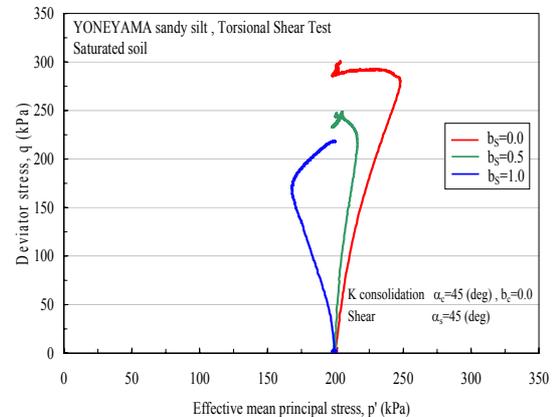


Fig.4-(b) 応力経路 ($\alpha_s=45$ (deg))

また、せん断载荷時に発生する過剰間隙水圧に関しては $b_s=0.0, 0.5$ の時、負の過剰間隙水圧が発生していることが分かる。これに対して $b_s=1.0$ のケースでは正の過剰間隙水圧が発生している。これは、 K 一定圧密過程での中間主応力係数 b_c とせん断载荷過程での中間主応力係数 b_s との差が大きくなるにつれ、過剰間隙水圧が発生しやすくなっていくということである。

これらの事から、最大主応力方向 α と同様に中間主応力係数 b が変化するのに伴い、応力経路における非排水強度（変相点）、過剰間隙水圧の発生に影響を及ぼすことが分かる。せん断载荷過程での最大主応力方向 α_s が異なるケース ($\alpha_s=22.5, 0, -22.5, -45$ (deg)) においてもほぼ同様の傾向を確認した。

3.3 α と b が非排水強度に及ぼす影響

非排水強度は応力経路における変相点（偏差応力 q ）とした。また、全ケースの中で非排水強度が最大となる $\alpha_s=45$ (deg), $b_s=0.0$ のケースにおける非排水強度を 1.0 とし、各ケースにおける非排水強度比を算出しプロットしたものが **Fig.5-(a)**, **Fig.5-(b)** である。

横軸に $\alpha'=45-\alpha_s$ (K 一定圧密過程とせん断载荷過程における最大主応力方向差)をとったものを **Fig.5-(a)**, 横軸に b' (K 一定圧密過程とせん断载荷過程における中間主応力係数差)をとったものを **Fig.5-(b)** にそれぞれ示す。また同じ図に非排水平面ひずみ試験の試験結果も示している。図から見てとれる様に最大主応力方向 α と中間主応力係数 b が非排水強度に影響を及ぼしていることが確認できる。また、非排水平面ひずみ試験結果もこれらの図にのっていることが確認できる。

最大主応力方向 α と中間主応力係数 b の影響を三次元空間に表現したものを **Fig.6** に示す。また同じ図に非排水平面ひずみ試験結果も示している。この図から最大主応力方向と中間主応力係数が非排水強度に与える影響を、三次元空間に曲面として表現でき、平面ひずみ試験の結果もこの曲面上にのることがわかる。

3.4 非排水強度の近似曲線化

試験結果から得られた非排水強度を **Eq.(1)**, **Eq.(2)** を用いて正規化し、 α' と b' による非排水強度の変化を近似曲線により表現した。 α' による非排水強度の変化と近似曲線を **Fig.7-(a)** に示す。また、 b' による非排水強度の変化と近似曲線を **Fig.7-(b)** に示す。**Fig.7-(a)**, **(b)** より α' による非排水強度の変化は余弦関数 (**Eq.(3)**) により表現でき、 b' による非排水強度の変化は線形 (**Eq.(4)**) で

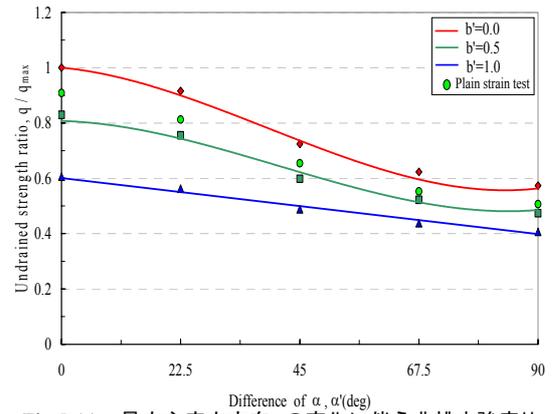


Fig.5-(a) 最大主応力方向 α の変化に伴う非排水強度比

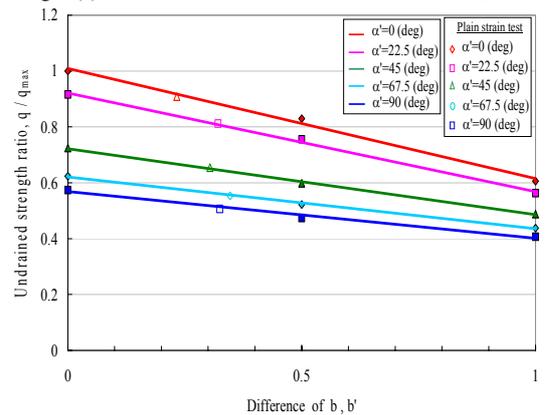


Fig.5-(b) 中間主応力係数 b の変化に伴う非排水強度比

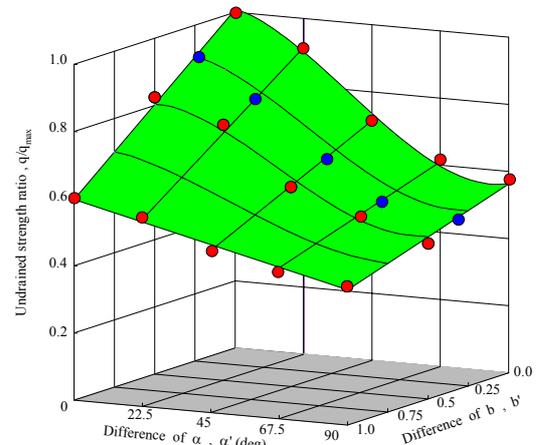


Fig.6 α と b による非排水強度変化の三次元表現

表すことができる。この近似式を用いることにより三軸圧縮試験を行うだけで、 α' と b' の変化に伴う非排水強度の変化を推定することができる。

$$q_{\alpha'_{nor}} = \frac{q_{\alpha'}}{q_{\alpha'=0}} \quad (1) \quad q_{b'_{nor}} = \frac{q_{b'}}{q_{b'=0}} \quad (2) \quad q_{\alpha'_{nor}} = 0.20 * \text{COS}2\alpha' + 0.80 \quad (3) \quad q_{b'_{nor}} = -0.34b' + 1.00 \quad (4)$$

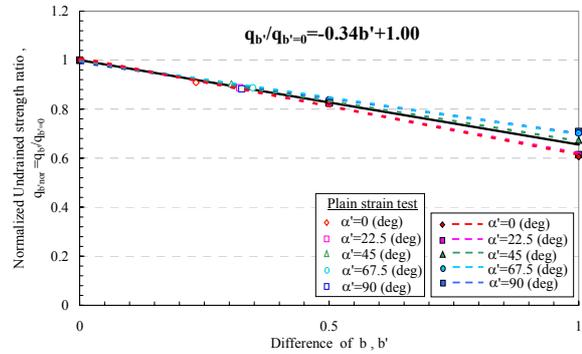
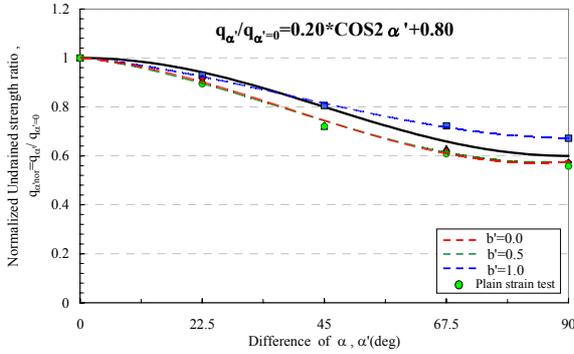


Fig. 7-(a) 正規化した最大主応力方向 α' の変化に伴う非排水強度比 Fig. 7-(b) 正規化した中間主応力係数 b' の変化に伴う非排水強度比

3.5 斜面安定解析

試験結果より得られた非排水強度を前項 3.4 において正規化を行い，最大主応力方向 α ，中間主応力係数 b が非排水強度に与える影響を近似式により表現することができた。

本項では実際に近似式より求めた非排水強度を用い斜面安定解析を行う。比較のため強度一様地盤における安定解析も行った。安定解析には，スライス法による円弧すべりを用い，解析はヤンプ（Janbu）法を用いた。解析領域は幅 200 (m)，法面高さ 25 (m)，法面傾き 45 (deg)，深さ 50 (m) とした。

強度一様地盤の安定解析において，三軸圧縮時の非排水強度 $q_u=170$ (kPa) を用いた。また，本研究で得られた近似式を用い，強度異方性の影響を考慮した安定解析における解析パラメータは最大主応力方向 α' (deg)，中間主応力係数 b' ，三軸圧縮時の非排水強度 q_u (kPa) である。異方性の算出方法の概略図を Fig8 に示す。最大主応力方向 α' は主応力面からすべり面までの角度を $45^\circ - \phi'/2$ から算出し，鉛直面からの角度とする。中間主応力係数 b' は二次元問題として行った非排水平面ひずみ試験結果より得られた $b=0.35$ を用いる。三軸圧縮時の非排水強度 $q_u=170$ (kPa) とした。

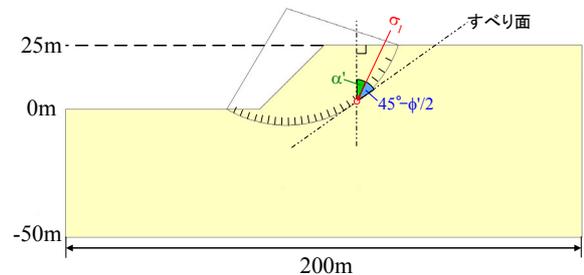


Fig. 8 最大主応力方向 α' の算定

Fig9-(a)に強度一様地盤の安定解析結果，Fig9-(b)に α ， b を考慮した安定解析結果を示す。まず，Fig9-(a)においては強度一様地盤に非排水強度 $q_u=170$ (kPa) を与えた結果，安全率 $F_s=1.127$ となる円弧が得られた。安全率が 1 を上回っていることから安定であるといえる。この解析結果から得られた円弧を 25 分割し最大主応力方向 α ，中間主応力係数 b の影響を考慮して安定解析を行った結果が Fig9-(b)である。この解析方法においては安全率 $F_s=0.869$ を得た。強度一様地盤におけ

る解析結果と異方性を考慮した解析結果を比較してみると、方向を考慮して強度を与え安定解析を行うことにより、安全率 F_s が 2~3 割程度小さくなり 1 を下回っており、不安定化していることがわかる。

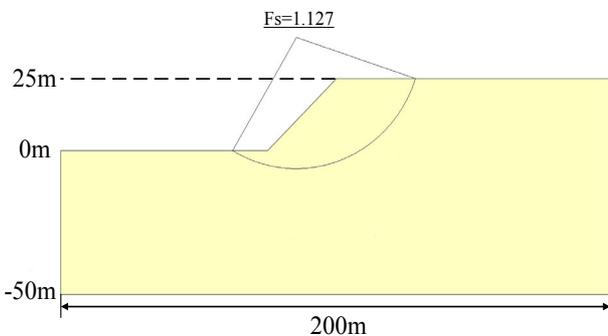


Fig.9-(a) 斜面安定解析(強度一様地盤)

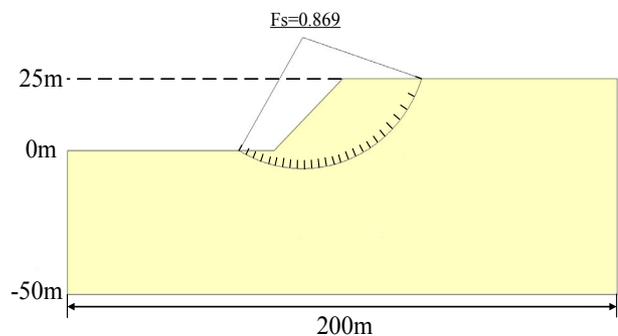


Fig.9-(b) 斜面安定解析(強度異方性を考慮)

4. 結論

1. 中空ねじりせん断試験において、様々な方向に K_0 圧密や K 一定圧密を行い、強度異方性の影響を調べることを可能にした。
2. せん断載荷過程における最大主応力方向 α_s は、せん断載荷過程における応力経路に影響を与える。その傾向は、 K 一定圧密過程における最大主応力方向 $\alpha_c = 45$ (deg) との差が大きくなるのに伴い、発生する過剰間隙水圧は大きくなり、非排水強度（変相点）は小さくなる。非排水平面ひずみ試験においても同様の傾向を確認できた。
3. せん断載荷過程における中間主応力係数 b_s は、せん断載荷過程における応力経路に影響を与える。その傾向は、 K 一定圧密過程における中間主応力係数 b_c との差が大きくなるに従い、非排水強度（変相点）は小さくなる。過剰間隙水圧に関しては、 K 一定圧密過程における最大主応力方向 α_c との差が大きくなるのに従い、中間主応力係数 b の影響は小さくなる。
4. 最大主応力方向と中間主応力係数が非排水強度に与える影響を、三次元空間に曲面として表した。平面ひずみ試験の結果も、この曲面上にのることがわかった。
5. 提案式により三軸圧縮試験を行うだけで、 α と b の変化に伴う非排水強度の変化を推定することができる。
6. 今回の二次元斜面安定解析においては、最大主応力方向 α 、中間主応力係数 b を考慮すると安全率が 2~3 割低下することがわかった。