

# 異方圧密された粘性土の非排水強度異方性

地盤工学研究室 伊原 章正  
指導教官 豊田 浩史

## 1. はじめに

我が国においては、原地盤より採取した試料を用いて一軸圧縮試験を行いその結果を設計に用いるのが一般的である。しかしながら、実地盤上に構造物や盛土を施工した場合を考えると、地盤内に作用する応力は様々な方向から作用すると考えられている。そのため、構造物による地盤内応力は地点ごとに異なり、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、ベラムなどは、地盤の強度とそれに対応する室内試験方法を提案している。しかし、異なった試験方法で実施された試験結果を比較すると、試験方法の違いにより非排水強度に相違(非排水強度異方性)が生じることが確認されている。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、非排水強度異方性の合理的な評価を検討することは重要である。そこで、本研究では、中空ねじりせん断試験装置を用いて非排水強度異方性に関する合理的な評価方法を提案していくものとする。

## 2. 試料

本研究で使用した資料は、新潟県柏崎市米山付近より採取した米山粘性土である。また、一般性の検討を行うためにカオリン粘土を用いた。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。この試料を十分脱気した後、予圧密セルに導き 50(kPa)の圧力で予圧密を行い、その土塊を外径 80(mm)、内径 50(mm)、高さ 160(mm)の中空円筒形供試体を作成し試験を行った。

## 3. 試験方法および試験ケース

本研究では、原地盤応力状態を再現するために  $K_0$  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以下の手順を経た。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。任意の  $K$  値に達したら、制御を切り替え  $K$  値一定のまま  $p'=300\text{kPa}$  まで圧密を行う。この  $K$  一定圧密時の最大主応力方向  $\alpha c$  を様々な方向へ変化させ、地点ごとに異なる応力状態を再現しているものとする。尚、 $K$  一定圧密過程の  $K$  値は三軸試験よりもとめた  $K=0.43$  を用い、中間主応力係数  $bc=0$  と固定し、せん断過程の主応力方向  $\alpha s=45(\text{deg})$  と固定した。本試験で行った試験ケースを Table.2 に示す。また、過圧密粘土の非排水強度異方性の検討も行った。過圧密粘土の試料作製は、上記と同様任意の  $K$  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。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  $\alpha c=45,0,-45$  と変化させ、せん断時の主応力方向  $\alpha s=45(\text{deg})$  と固定した。中間主応力係数に関しては、 $bc=bs=0$  とした。

Table.2 試験ケース

K一定圧密		せん断载荷過程		試料
$\alpha c(\text{deg})$	bc	$\alpha s(\text{deg})$	bs	
45	0	45	0	米山粘性土 Kaolin粘土
22.5				
0				
-22.5				
-45				
45	0	45	0.25	米山粘性土
22.5				
0				
-22.5				
-45				
45	0	45	0.5	米山粘性土 Kaolin粘土
22.5				
0				
-22.5				
-45				
45	0	45	0.75	米山粘性土
22.5				
0				
-22.5				
-45				
45	0	45	1	米山粘性土 Kaolin粘土
22.5				
0				
-22.5				
-45				

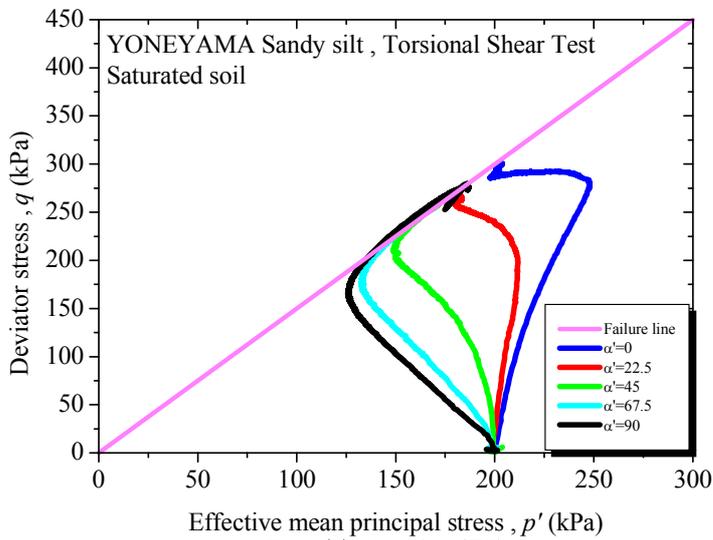


Fig.1(a) 米山応力経路

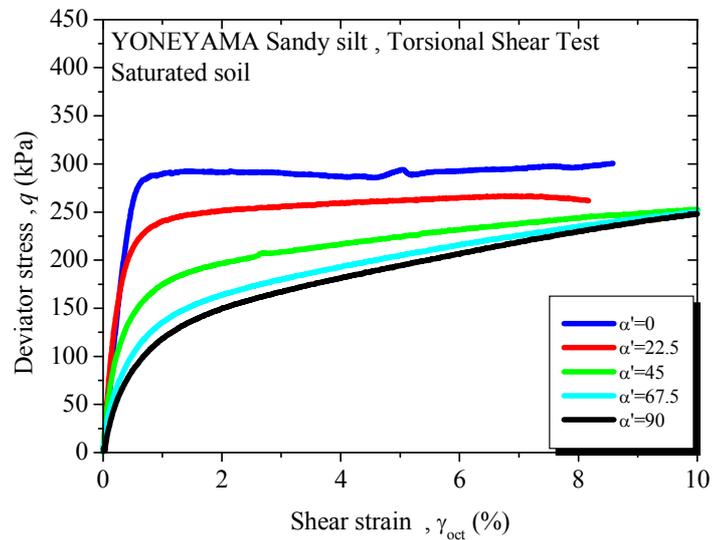


Fig.1(b) せん断ひずみ-偏差応力関係

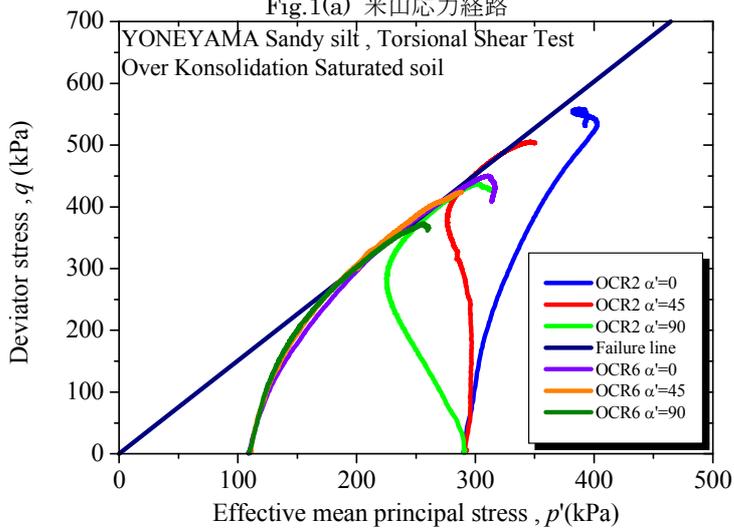


Fig.2(a) 過圧密応力経路(米山粘性土)

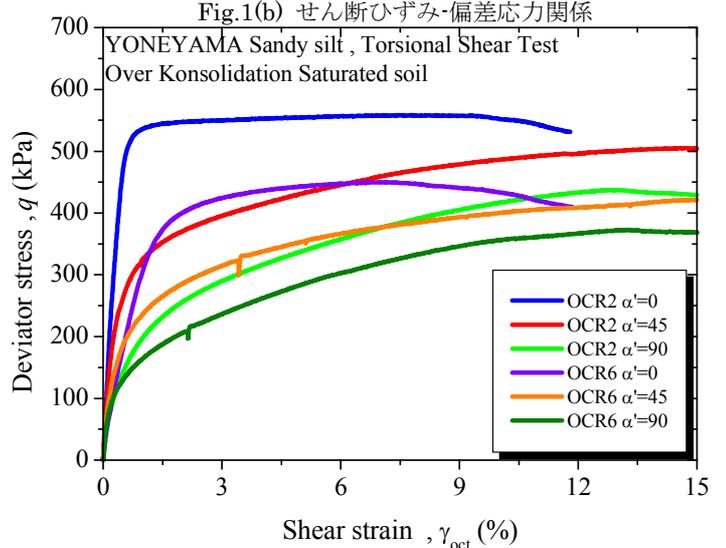


Fig.2(b) 過圧密ひずみ-偏差応力関係

#### 4. 試験結果

本研究で実施した試験ケースで、米山粘性土  $b'=0$  と固定し  $\alpha$  の違いによる影響の応力経路を Fig.1(a) にひずみと偏差応力の関係を Fig.1(b) に示す。また、過圧密の試験結果の応力経路の結果を Fig.2(a) に、ひずみ-偏差応力の関係を Fig.2(b) に示す。Fig.1(a) より K 圧密時とせん断時の主応力方向が等しい時に最も大きい偏差応力で破壊線に達しており、K 圧密時とせん断時の主応力方向の差が大きくなるほど小さい偏差応力で破壊線に達している。Fig.1(b) のひずみと偏差応力の関係では応力経路と同様、主応力方向の差が大きくなるのに従い、偏差応力は小さくなっていることがわかる。これらの傾向は、カオリン粘土においても同様な傾向を示した。過圧密粘土に関しては、Fig.2(a) より、OCR2 のケースでは、正規圧密粘土と同様 K 圧密時とせん断時の主応力方向が等しい  $\alpha'=0$  の時に最も大きい偏差応力で破壊線に達して、K 圧密時とせん断時の主応力方向の差が大きくなるに従い、偏差応力は小さくなっている。また、過剰間隙水圧の発生の仕方も正規圧密粘土の時と同様な傾向を示し、 $\alpha'=0$  の時に負の間隙水圧が発生し  $\alpha'$  が大きくなるに従い、正の間隙水圧が発生している。一方、OCR6 に関しては、 $\alpha'$  の影響を受けることなくほぼ等しい点で破壊線に達しており、過剰間隙水圧の発生の仕方もほぼ同じであることがわかる。しかし、最終的な偏差応力では、 $\alpha'$  の増加に伴い減少していることが確認できる。Fig.2(b) の過圧密試験のひずみレベルでは、OCR2、OCR6 ともに  $\alpha'=0$  の時に最も大きな偏差応力を示し、 $\alpha'$  の増加に伴い  $q$  は減少していることが確認できる。

#### 5. $\alpha$ と $b$ が非排水強度に及ぼす影響

米山粘性土の非排水強度は、 $\alpha'=0$ 、 $b'=0$  時の破壊線に達した偏差応力  $q(286.1\text{kPa})$  とし、そのときのひずみレベル  $\gamma_{\text{oct}}=4.63\%$  を固定し、各  $q$  の値を非排水強度とした。また、カオリン粘土では、全ケース  $\gamma_{\text{oct}}=9.90\%$  の  $q$  の値を非排水強度とした。 $\alpha$  と  $b$  の変化に伴う非排水強度の結果を Fig.3(a)、Fig.3(b) に示す。Fig.3(a)、および Fig.3(b) から、 $\alpha'$ 、 $b'$

の増加に伴い非排水強度は減少していることがわかる。この傾向は、カオリン粘土でも同じ傾向を示した。最大主応力方向 $\alpha$ と中間主応力係数 $b$ の影響を3次元空間に表現したグラフをFig.4(a)に米山粘性土に示す。この図から、非排水強度は $\alpha'$ および $b'$ の変化に影響を受けることが確認できる。また、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3次元空間に表現でき、平面ひずみ試験、過圧密粘土(OCR6, OCR2)の結果もこの平面状にのることを確認した。

## 6. 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、 $\alpha'$ と $b'$ による非排水強度の変化を最小二乗法により近似化した。 $\alpha$ による非排水強度の変化と近似線をFig.5(a)に米山, Fig.5(b)にカオリンの結果をそれぞれ示す。また、 $b$ による非排水強度の変化と近似線をFig.6に示す。Fig.5(a), Fig.5(b)より $\alpha'$ による非排水強度の変化は直線近似(Eq.(3))により表現でき、 $b'$ による非排水強度の変化は線形近似(Eq.(4))で表すことができる。この近似線を用い、三軸試験を行うことで、 $\alpha$ と $b$ による影響を予測することが可能となる。また、異なった試験料を用いても同様の近似線で表現できることを確認した。

$$q_{\alpha'nor} = \frac{q_{\alpha'}}{q_{\alpha'=0}} \quad Eq.(1)$$

$$q_{b'nor} = \frac{q_{b'}}{q_{b'=0}} \quad Eq.(2)$$

$$q_{\alpha'nor} = -0.00408\alpha' + 1.00 \quad Eq.(3)$$

## 7. 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 $\alpha$ 、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。安定解析には、一般分割法(スライス法)による円弧すべりを用いた場合と、有限差分法によって得られた解析結果とを比較する。一般分割法によって得られた解析結果をFig.7(a)に、有限差分法によって得られた結果をFig.7(b)に示す。Fig.7(a)の緑の破壊面が等方強度によって得られた結果で、赤の破壊面が強度異方性を考慮した結果である。この結果から、異方性を考慮した場合とそうでない場合を比較すると、ほぼ同じ破壊面になることが確認できた。安全率に関しては、強度異方性を考慮した解析結果の方が2割程度低下している。また、有限差分法による結果に関しても、同様な結果を得ることができた。このことから、両解析ともに同じ傾向を示していることを確認した。

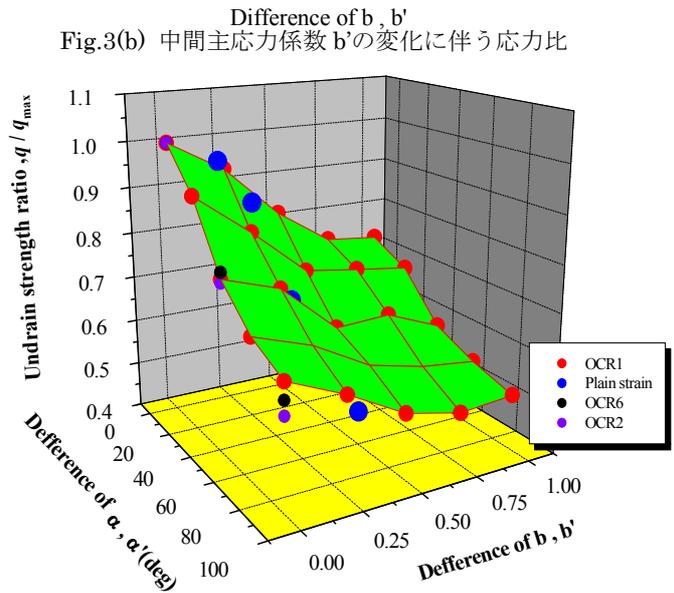
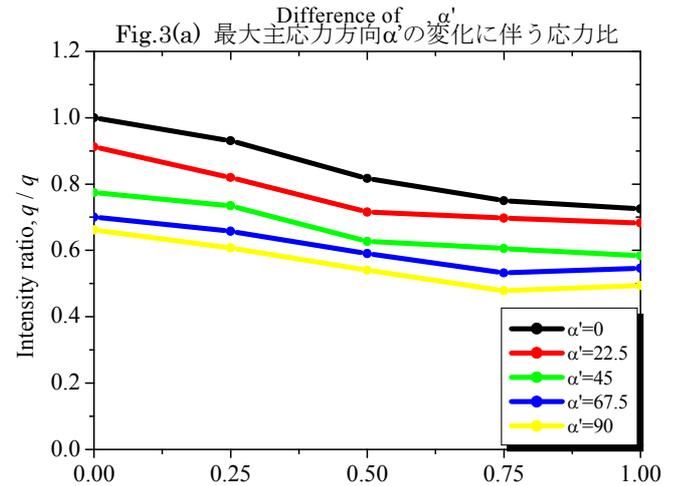
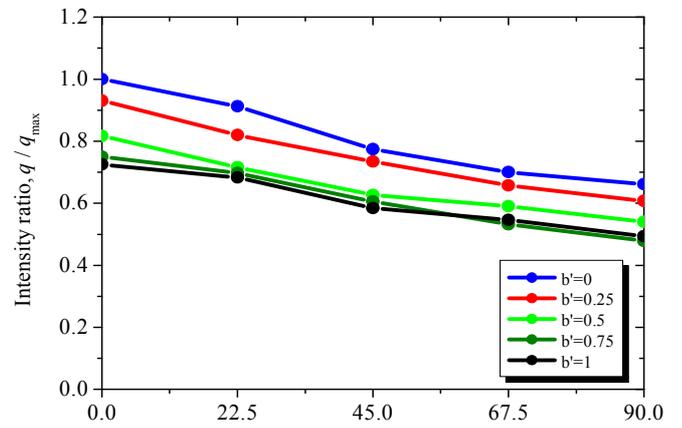


Fig.4(a)  $\alpha$ と $b$ の変化に伴う非排水強度

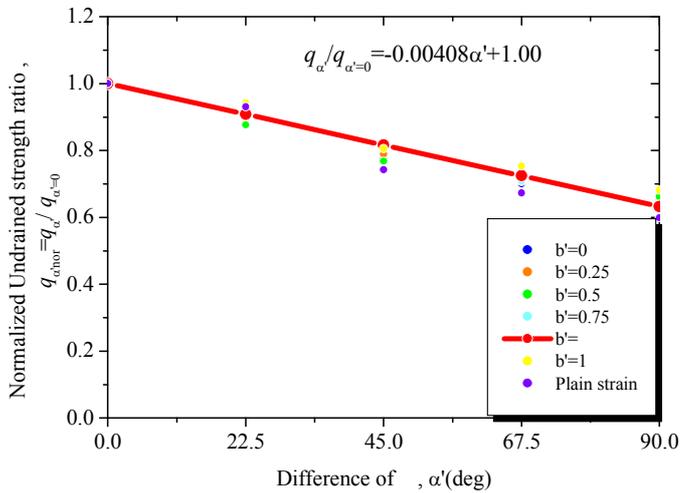


Fig.5(a) 米山粘性土の正規化

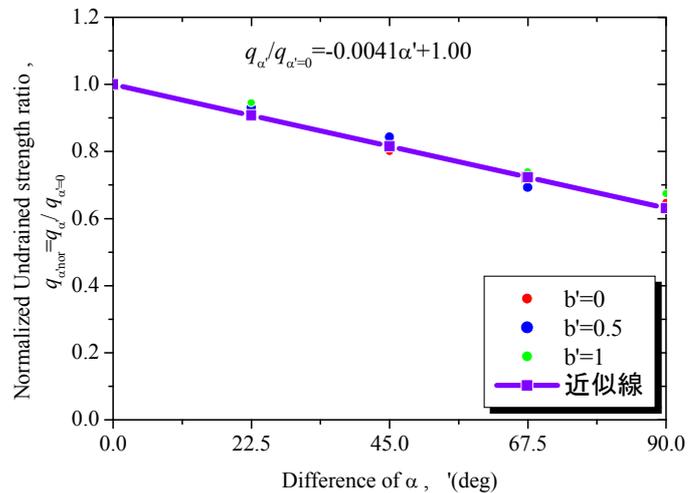


Fig.5(b) カオリン粘土の正規化

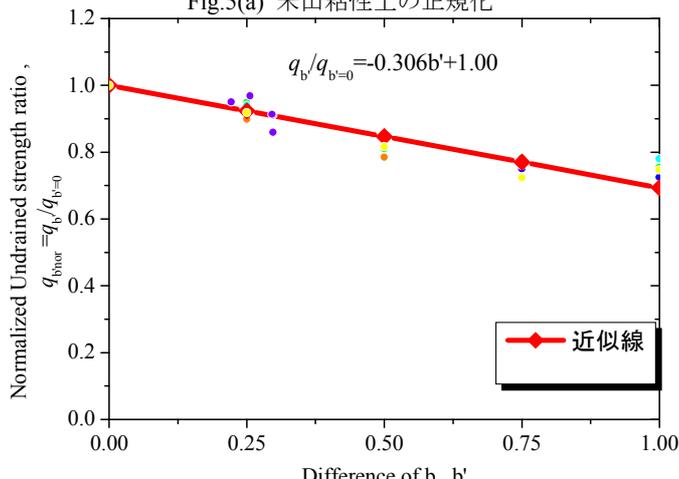


Fig.6 中間主応力係数 b の正規化

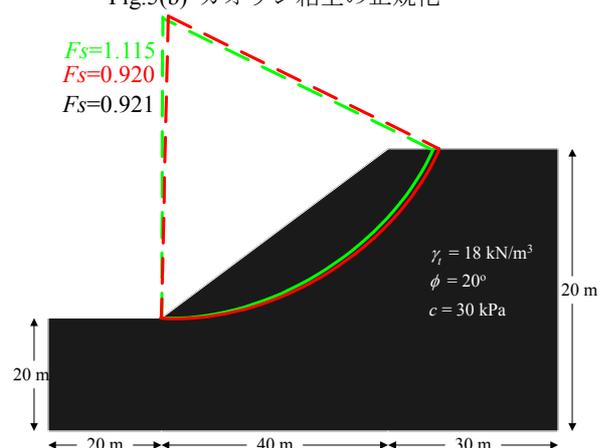


Fig.7 一般分割法の解析結果

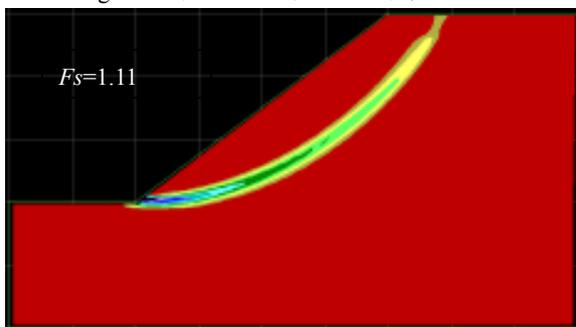


Fig.8(a) 等方強度を用いた有限差分法結果

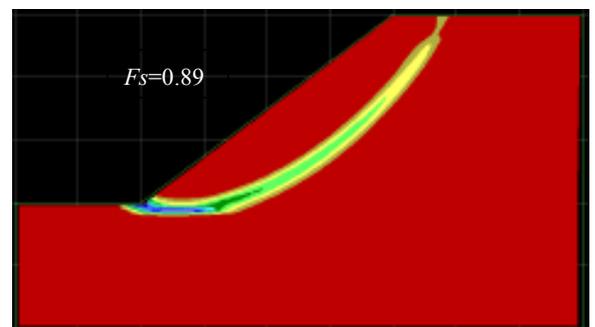


Fig.8(b) 強度異方性を用いた有限差分法結果

## 7. 結論

- せん断载荷過程における最大主応力方向 $\alpha_s$ は、せん断载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 $\alpha_c$ 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、非排水強度は小さくなる。この傾向は、非排水平面ひずみ試験、過圧密試験においても同様の傾向を示した。
- 最大主応力方向 $\alpha$ と中間主応力係数  $b$  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。平面ひずみ試験および過密試験の結果もこの平面上にのることを確認した。
- 実験より得られた非排水強度を正規化することで最大主応力方向 $\alpha$ 、中間主応力係数  $b$  が非排水強度に与える影響を直線近似により表せる。この近似式より、三軸圧縮試験を行うだけで、 $\alpha$ と  $b$  の変化に伴う非排水強度の変化を推定することを可能とした。
- 今回の二次元斜面安定解析においては、最大主応力方向 $\alpha$ 、中間主応力係数  $b$  を考慮すると両解析ともに安全率が2割程度低下する傾向を示した。このことから、強度異方性を考慮した解析結果を用いなければならないことを示唆している。