

# 岩盤の力学特性の異方性に関する 調査方法の開発

Development of investigation methods for anisotropy of  
mechanical properties of rock masses

2014 年 3 月

富樫 陽太

## 概要

原子力発電所の基礎や長大橋の橋脚の基礎、山岳トンネルなどの岩盤構造物の建設の際には、岩盤の力学特性を調査する必要がある。岩盤はインタクトな岩と不連続面から構成され、一般的に不連続面が強度や剛性の弱い面となることが多いため、岩盤の力学特性は不連続面の力学挙動に支配される。例えば層理や節理群などの規則的な不連続面を含む岩盤は、外力と不連続面の方向の関係で力学特性が異なる異方性を示すことが多い。従来では、サンプリングの方向を変えたコアを用いた複数回の室内試験を行うことで力学特性の異方性を調査してきたが、一般的な原位置調査法の岩盤せん断試験や平板載荷試験ではコストや時間の制約で複数本の試験ができないため、原位置岩盤で異方性の調査は難しい。また、室内試験でも、複数回の試験を行うことで性状の異なる岩の力学特性を平均値化していることや試験コストが問題となっており、少ない試験回数で合理的に岩盤の力学特性の異方性を調査できる手法が必要である。

そこで、この研究では合理的に岩盤の力学特性の異方性を調査する手法を開発するために、まず三軸試験の供試体（要素）と中空ねじり試験の中空円筒試験体（非要素）の力学挙動を調べた。変形特性では、岩盤工学の分野で不連続面のモデル化にしばしば用いられる面内等方弾性体を用いた軟岩を想定した解析を行い、三軸試験などの要素試験における円柱供試体が不連続面の方向によっては、応力とひずみが非共軸になり軸対称性を満たさない「非三軸状態」となることを明らかにした。また、中空ねじり試験の解析では、ねじりせん断時に中空円筒試験体の内部で応力が非一様に分布することを理論解析と離散化解析の両方で明らかにした。強度異方性では、単一の弱面（すなわち不連続面）を含む岩盤を想定して、三軸試験時と中空ねじり試験時において不連続面の傾斜を変化させたときの強度特性を考察した。その結果、三軸試験などの要素試験では要素内の応力が一様となるため、応力経路が単一で複数の試験を行うことでしか強度異方性の調査ができないが、非要素試験である中空ねじり試験では、不連続面の応力分布を適切に評価すれば強度異方性が1回の試験で調査できることを、軟岩を想定しインターフェース要素で不連続面を模擬した弾塑性FEM解析によって明らかにした。

これらの試験条件や材料パラメータを適切に設定した基礎的な解析結果から、岩盤の変形特性の異方性を調査できる三軸試験および解析方法を発明した。この試験方法は2種類あって、1つは変位計測式キャップを用いた三軸試験で、異方性岩盤の変形に合わせてキャップあるいはペDESTALが載荷軸に直交する面内で可動できる機構を備えており、異方性に起因する変形を計測できる。2つ目は、荷重計測式キャップを用いた三軸試験で、供試体とキャップおよびペDESTALの境界が載荷軸方向に直交する方向に変形が拘束されている通常の三軸試験に近い条件で、異方性に起因する変形を抑え込むことで発生する反力を計測できる。これら2つの手法では、1回の試験で不連続面の方向と5つの弾性パラメータが安定して調査できる。

さらに、岩盤の強度と変形の異方性を 1 回の試験で調査できる原位置岩盤ねじりせん断試験および解析方法を発明した。この試験は、露頭などの岩盤を掘削して中空円筒の試験体を作製しねじりせん断する試験である。異方性に起因する応力分布を、試験体上端に設置した分割ロードセルで計測することで面内等方弾性体を仮定した岩盤の不連続面の方向と弾性パラメータ 5 つが安定して求められる。強度に関しても、破壊時の応力分布を適切に評価すれば強度異方性を調査できる。

# 目次

## 記号一覧

1. はじめに	1
1-1. 岩盤の力学特性の調査と課題	
1-2. 本研究の目的	
1-3. 本書の構成	
2. 岩盤の力学特性と調査方法	8
2-1. 岩盤の力学的性質	
2-2. 岩盤の力学特性の異方性を表す構成モデル	
2-3. 岩盤の力学特性の調査方法	
3. 面内等方性を仮定した岩盤の変形特性	28
3-1. 弾性パラメータの存在領域	
3-2. 弾性パラメータの設定	
3-3. 要素を対象とした解析	
3-4. 载荷の条件と主値の評価	
3-5. 等方圧密時の要素の変形	
3-6. 軸圧縮時の要素の変形	
3-7. 三軸試験の FEM 解析	
3-8. ねじりせん断時の中空円筒試験体の変形	
3-9. 中空円筒試験体の形状効果	
4. 不連続面を含む岩盤の強度異方性	64
4-1. 三軸試験における不連続面を含む要素の強度異方性の評価	
4-2. 中空ねじり試験における不連続面を含む中空円筒の強度異方性の評価	
4-3. 不連続面を含む中空円筒試験体の弾塑性解析	
5. 三軸試験で岩盤の変形特性の異方性を特定する手法の提案	92
5-1. 変形特性の異方性を特定するキャップの機構の提案	
5-2. 三軸試験で変形特性の異方性を特定する方法	
5-3. 実施の形態と実岩盤への適用する際の考察	

6. 原位置岩盤ねじりせん断試験の提案 . . . . .	115
6-1. 原位置岩盤ねじりせん断試験の提案	
6-2. 原位置岩盤ねじりせん断試験で変形特性の異方性を特定する方法	
6-3. 異方性の特定方法の検証および地山の拘束効果の検討	
6-4. 強度異方性の特定方法	
6-5. 実施の形態と実岩盤への適用する際の考察	
7. まとめ . . . . .	141
7-1. 結論	
7-2. 今後の課題	

謝辞

## 記号一覧

$(X, Y, Z)$ : 直交座標系

$(x', y', z')$ : 局所座標系

$(R, \Theta, Z)$ : 直交座標系の円筒座標系

$(r, \theta, z')$ : 局所座標系の円筒座標系

$(E, W, N, S)$ : 地理座標系

$\Delta$ : 増分

$i, j, k, l, m, n, p, q$ : フリーインデックスまたはダミーインデックス

[H]: 硬岩

[S]: 軟岩

{HM}: 硬岩系塊状岩盤

{HF}: 硬岩系葉状岩盤

{SM}: 軟岩系塊状岩盤

{SR}: 軟岩系礫質岩盤

$\alpha$ : 異方性パラメータ

$x'$ : 剛性の等方な面の走向

$\xi$ : 剛性の等方な面あるいは不連続面の傾斜

$y'$ : 剛性の等方な面の傾斜方位

$\zeta$ : 傾斜方位と  $Y$  軸の為す角度

$s$ : 不連続面の間隔

RQD: Rock Quality Designation

$u_\Theta$ : 円周方向変位

$\varepsilon_{ij}$ : ひずみテンソル

$\eta_{ij}$ : 工学ひずみ

$\varepsilon_c$ : 等方圧密時の直ひずみ

$\varepsilon_a$ : 軸ひずみ

$\varepsilon_i$ : 主ひずみ

$\varphi$ : 主ひずみ軸の傾斜

$Q$ : 軸圧縮力

$N$ : 直荷重

$T$ : トルク力

$p_o$ : 外圧

$p_i$ : 内圧

$\sigma_{ij}$ : 応力テンソル

$\sigma_a$ : 軸圧縮応力

$\sigma_c$ : 等方圧密応力

$\sigma_i$ : 主応力

$\theta$ : 主応力軸の傾斜

$q$ : 軸差応力

$C_{ijkl}$ : コンプライアンステンソル

$\hat{C}_{ijkl}$ : 座標変換後のコンプライアンステンソル

$D_{ijkl}$ : 剛性テンソル

$\hat{D}_{ijkl}$ : 座標変換後のコンプライアンステンソル

$E_i$ :  $i$  方向のヤング率

$E_D$ : 平板載荷試験の変形係数

$G_i$ :  $i$  方向のせん断剛性率

$\nu_i$ :  $i$  方向のポアソン比

$k_n$ : 垂直地盤反力係数

$k_s$ : せん断地盤反力係数

$q_u$ : 岩石の一軸圧縮強さ

$q_{um}$ : マトリックスの強さ

$c_r$ : 基質の粘着力

$c_d$ : 不連続面の粘着力

$\phi$ : 基質のせん断抵抗角

$\phi_d$ : 不連続面のせん断抵抗角

$\sigma_{t,r}$ : 基質の引張強さ

$\sigma_{t,d}$ : 不連続面の引張強さ

$\psi_r$ : 基質のダイラタンシー角

$\psi_d$ : 不連続面のダイラタンシー角

$r_{\sigma Z \Theta 90}$ :  $\Theta=90^\circ$  の位置のせん断応力に与える誤差

$h_s$ : 供試体と試験体の高さ

$d$ : 供試体の径

$\sigma_d$ : 標準偏差

$d_o$ : 中空円筒試験体の外径

$C_v$ : 変動係数

$d_i$ : 中空円筒試験体の内径

$D_i$ : 主小行列式の成分

$l_{ij}$ : 方向余弦を表す 2 階のテンソル

$\mathbf{k}$ : 応力とひずみの比の行列

$\mathbf{A}$ : 係数行列

$\mathbf{C}$ : コンプライアンステンソル成分で構成された行列

$\mathbf{D}$ : 剛性テンソル成分で構成された行列

$\boldsymbol{\varepsilon}$ : ひずみテンソル成分で構成される  $3 \times 3$  行列

$\boldsymbol{\sigma}$ : 応力テンソル成分で構成される  $3 \times 3$  行列

$\mathbf{e}$ : 主ひずみ方向を表す正規直交ベクトルで構成される  $3 \times 3$  行列

$\mathbf{e}'$ : 主応力方向を表す正規直交ベクトルで構成される  $3 \times 3$  行列

$\sigma_{Zat0}$ : ねじりせん断時の  $\Theta=0^\circ$  の位置の直応力

$\sigma_{Z\Theta at0}$ : ねじりせん断時の  $\Theta=0^\circ$  の位置のせん断応力

$\sigma_{Z\Theta at90}$ : ねじりせん断時の  $\Theta=90^\circ$  の位置のせん断応力

$n_i$ : 感度分析における試行回数

$r_{ij}$ : ひずみテンソルの各成分に与える誤差

$r_{\sigma Z 0}$ :  $\Theta=0^\circ$  の位置の直応力に与える誤差

$r_{\sigma Z \Theta 0}$ :  $\Theta=0^\circ$  の位置のせん断応力に与える誤差

# 1. はじめに

## 1-1. 岩盤の力学特性の調査と課題

原子力発電所の基礎や長大橋の橋脚の基礎，山岳トンネルなどの岩盤構造物の建設の際には，岩盤の力学特性を調査する必要がある．岩盤はインタクトな岩と不連続面から構成され，岩盤の力学特性は，不連続面の力学特性と分布状況に支配される．Hoek and Brown (1981) が図 1.1 に指摘するように，対象とする岩盤の規模が大きくなるに従って岩盤に含まれる不連続面の規模や種類が変化するため，力学特性が変化する性質，すなわち寸法効果が岩盤の力学特性を評価する上で懸念される<sup>1)</sup>．図は，室内および原位置試験の試験体寸法についても記載しており，例えば室内試験の岩石供試体の寸法はインタクトな岩に等しいのに対し，原位置岩盤試験の試験体の寸法は Jointed rock から Rock mass の間の寸法で，室内試験の供試体寸法よりも多くの不連続面を含む．岩盤の力学特性は，このような寸法効果に加えて，不連続面の方向により異なる異方性を示す．

岩盤の力学特性の寸法効果は，図 1.2 に示す原位置岩盤試験と同サイトで採取されたボーリングコアによる室内の力学試験と比較することで調査されてきた．しかし，強度特性を調査するための岩盤せん断試験は，せん断方向手前の岩盤内に発生する引張り応力の影響によって岩盤のせん断強さを過小評価している問題がある<sup>2)</sup>．また，変形特性を把握するための平板載荷試験は，軸対称条件下の剛板押し込み型の載荷モードの試験であって，要素試験でないために，載荷時の岩盤内の変位が非一様になることが問題である<sup>3)</sup>．さらに，強度特性と変形特性をこれら 2 つの試験によって別々に求めていることも試験費用の増大の原因である．

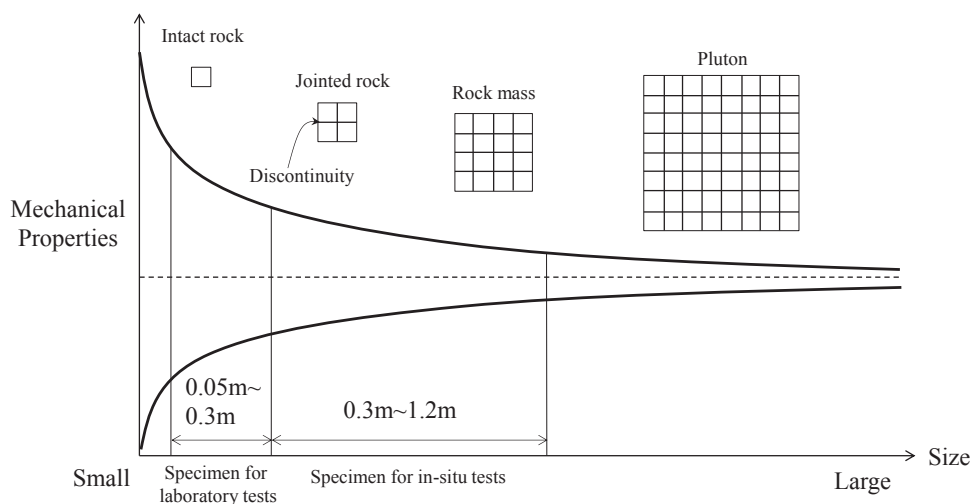


図 1.1 寸法効果 (Hoek and Brown(1981)に加筆)



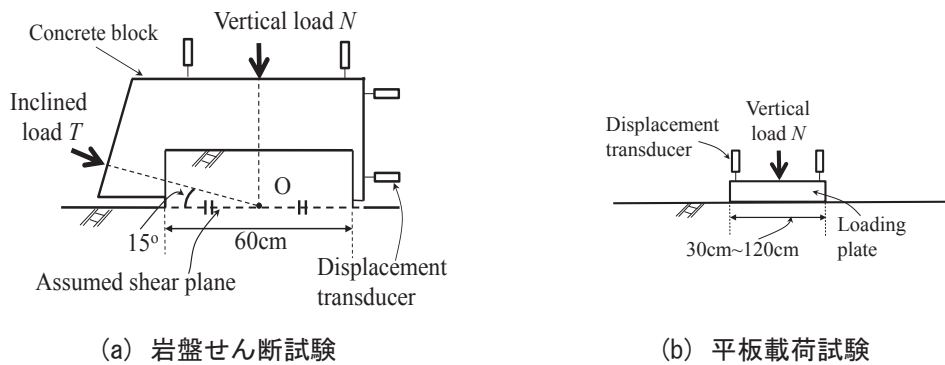


図 1.2 従来の原位置岩盤試験

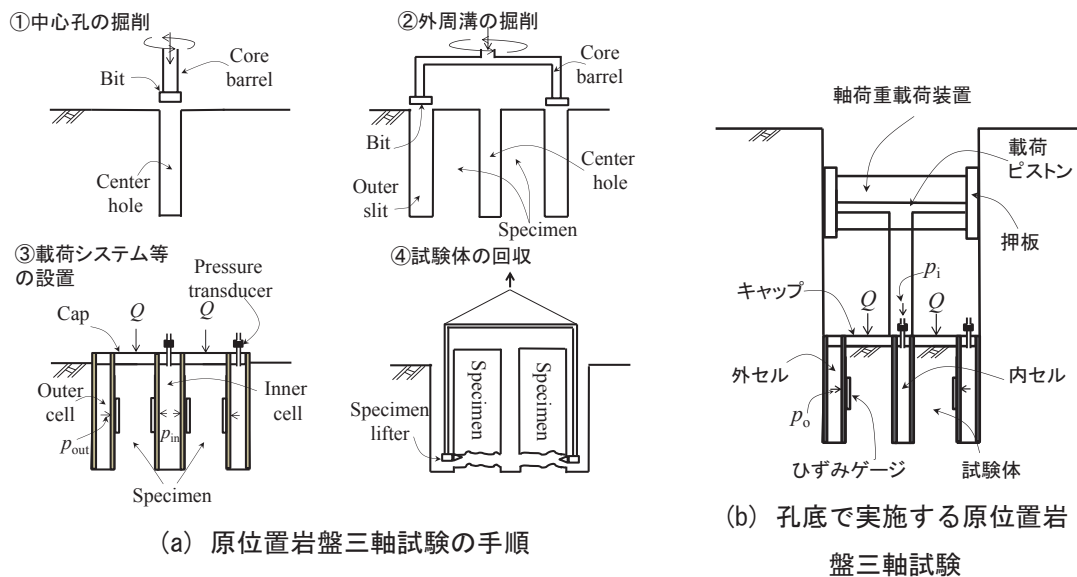


図 1.3 原位置岩盤三軸試験

このような、原位置岩盤試験の問題点を解決するために、谷(1998)は、岩盤の応力ひずみ関係を把握できる原位置岩盤三軸試験を図 1.3 に提案した<sup>4)</sup>。この原位置岩盤三軸試験は栃木県宇都宮市の採石場で均質な岩盤（大谷石）に対してはじめて行われ（岡田ら，2003）<sup>5)</sup>，その後，計測システムや試験体の掘削方法の改良を経て，不均質な礫岩や不連続性岩盤を対象として実施され（岡田ら，2006-2007）<sup>6)</sup>，さらに変形・減衰特性を把握するための繰返し荷重や，引張試験を行う機構も開発されている（岡田ら，2013）<sup>7)</sup>。Taheri and Tani(2008)は，相模原の地下空洞の均質な泥岩に対して，深部岩盤のための孔底で行う原位置岩盤三軸試験の実用性を示した<sup>8)</sup>。また，田中，谷（2011）は，今まで設置が難しく精度に問題のあった計測器の高度化を行った<sup>9)</sup>。特に，岡田ら（2003）の試験結果は，谷(2006)<sup>10)</sup>が現地採取したボーリングコアの結果と比較し，均質で不連続面を含まない大谷石の岩盤では室内試験と原位置試験の結果がほぼ等しいことを示した。

岩盤の力学特性の寸法効果が上述のように積極的に調査されてきた一方で、岩盤の力学特性の異方性は、例えば、石膏で作製した層状体を用いた室内の模擬岩盤せん断試験によって、せん断方向に流れ目と差し目でせん断強さが約 2 倍変化することが報告されている<sup>11)</sup>し、新 (2003) の第三紀シルト質の岩盤で行った静水圧試験<sup>12)</sup>では、堆積方向によってヤング率が約 2 倍異なることが報告された。赤井ら(1969)は、結晶片岩の超音波速度計測から算出したヤング率は、鉱物粒子の配列の傾斜によって、最大で約 3 倍異なることを示した<sup>13)</sup>。これらの検討結果が示すように、岩盤の力学特性の異方性は非常に大きいため、詳細に調査する必要があるが、力学特性の異方性を調査するには、**図 1.4** に示すように、方向を変えた複数の試験を行う必要があり手間と時間がかかる。室内試験と比べて非常に高価な原位置岩盤試験では、**図 1.4** のような複数の試験はほとんど行われ<sup>14)</sup>ない。既往の研究では、同一の岩盤分類に属する複数のサイトの試験結果の比較や、不連続面の方向をコントロールした室内の模型実験によって調査されるが、性質の異なる複数の岩盤の特性を平均化していることと単純にモデル化された模型岩盤の精度の問題を抱えている。室内試験による調査では、Amadei (1996) をはじめ、Hakala (2007) などが、岩盤を面内等方弾性体と仮定した試験で、最低 3 本の一軸試験によって変形特性の異方性の調査手法が考案している<sup>15), 16)</sup>。強度異方性に関しては、Farmer (1988) や Attewell & Sandford (1974) は、単一の不連続面を含む硬岩供試体の三軸試験を複数回行い、不連続面の方向によって異なる強度特性を調査した<sup>17), 18)</sup>。これらの手法は、いずれも多方向のひずみの計測し複数回の試験をする必要があるため、試験の手間や時間、また一つ一つ異なる性状を持つ岩石コア供試体の力学特性の性質を平均化する恐れがある。

こういった現状を踏まえて、岩盤の力学特性の異方性の調査では、少ない数の試験で、合理的に岩盤の変形・強度特性の異方性を調査する手法が必要である。

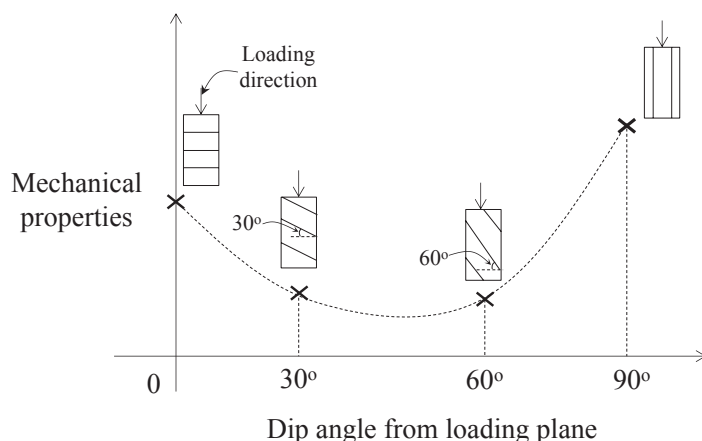


図 1.4 従来の異方性の調査方法

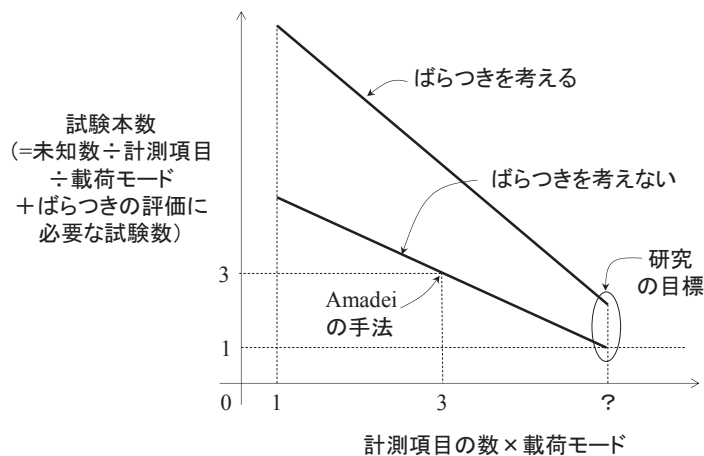


図 1.5 力学特性の異方性の調査における計測項目の数と試験本数の関係

## 1-2. 研究の目的とアイデア

そこで、この研究では、合理的に異方性が調査できる室内試験と原位置岩盤試験を開発することを目的とする。力学特性の異方性の調査においては、図 1.5 のような、計測項目の数と試験本数の関係が考えられる。例えば、変形の異方性の代表的なモデルである面内等方弾性体だと、弾性パラメータ 5 つと異方性の 2 方向で設定が必要な未知数が 7 つであり、等方な場合のヤング率とポアソン比の 2 つよりも 5 つ多く、必然的に試験本数あるいは計測項目数を増やす必要がある。ばらつきを評価したい場合には試験数はさらに増大する。この研究では、こういった未知数が多い異方性を表すパラメータを 1 回の試験で合理的に岩盤の力学特性の異方性を調査することを目標とする。

試験の形態としては表 1.1 に示すように、岩盤の要素を対象とした試験と谷(2003)が提案する中空円筒試験体の疑似プレッシャーメータ試験<sup>5)</sup>のような非要素試験が考えられる。一般的な要素試験の三軸試験では、軸圧縮と等方圧密の 2 種類の载荷モードが考えられ、载荷モード毎の要素のひずみあるいは応力を複数の方向で計測できれば 1 回の試験で異方性が調査できる。中空円筒試験体を用いた非要素試験では、ねじりせん断、内圧・外圧载荷を行えば、試験体内の応力とひずみが必ずしも一様にならず分布し、その分布を計測することができれば、1 回の試験で力学特性の異方性を調査できる。また、軸圧縮や等方圧密など中空円筒試験体が要素となるモードで载荷もできるため、様々な構成モデルのパラメータ（未知数）を求められる。特に、ねじりせん断の载荷モードを有する試験であれば、内圧外圧载荷と異なり異方性岩盤の破壊現象まで扱うことができる。

こうしたアイデアを元に本書では、図 1.6 の構成で力学特性の異方性の新しい調査手法を発明した。2章では、岩盤の性質と岩盤の力学的異方性を表す構成モデル及び従来の調査方法についてまとめ、この研究では、不連続面との相関性が非常に高い最も簡易な異方弾

表 1.1 異方性岩盤を調査する上での要素と非要素試験

	三軸試験	中空ねじり試験	
図			
载荷モード	等方圧密, 軸圧縮	等方圧密, 軸圧縮	ねじりせん断, 内圧・外圧载荷
試験体内の応力とひずみ	一様(要素)	一様(要素)	非一様(非要素)
計測対象	多方向のひずみと応力	多方向のひずみと応力	ひずみと応力の分布

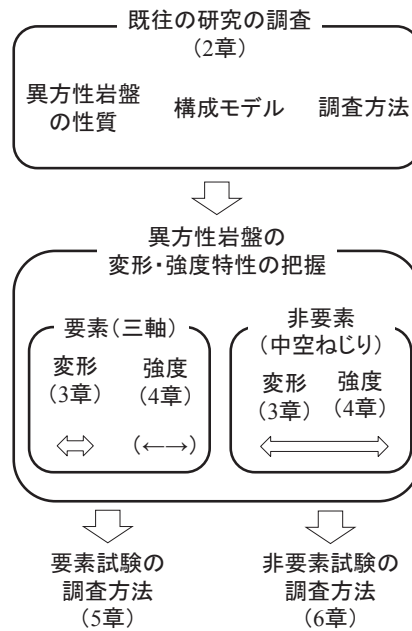


図 1.6 本書の構成

性体である面内等方弾性体と、強度異方性を議論する上でしばしば用いられている単一の不連続面を含む岩盤に着目することとした。3章では、面内等方弾性体の変形特性について、計測対象と载荷モードの関係を把握すべく、三軸試験時の要素と中空ねじり試験時の非要素の弾性解を算出して変形特性を調べ、その特徴について考察した。4章では、単一の不連続面を含む岩盤が示す強度異方性に関して、三軸試験と中空ねじり試験で得られる結果を比較し、特徴を調べた。5章では、三軸試験によって変形特性の異方性を調査するキャップの機構と手法を3章での検討に基づいて提案した。キャップの機構は2種類あって、異方性材料の変形が調査する「変位計測式キャップ」と、反力特性を調査する「荷重計測式キャップ」である。これらのキャップを用いた三軸試験によって3章で計算した面内等方弾性体の変形あるいは供試体内応力から、剛性が等方と推定される面（すなわち不連続面）の走向・傾斜と5つの弾性パラメータを算定できる。6章では岩盤の力学特性の異方性を調査する「原位置岩盤ねじりせん断試験」を提案した。これは岩盤に作製した中空円筒の試験体を所定の圧力下でねじりせん断する試験である。通常のねじりせん断試験と異なり、異方性材料である岩盤を対象とするため、試験体上端に2方向ロードセルを複数設置し、応力分布を計測し分析することによって力学的異方性の調査ができる。3章で検討した面内等方弾性体の変形と反力から、剛性が等方と推定される面（すなわち不連続面）の走向・傾斜と5つの弾性パラメータを算定できる。さらに、4章での検討を受けて、強度異方性の検討を行った。その結果、不連続面の塑性変形に伴って非一様になる円周方向のせん断応力比分布を評価することで、不連続面のせん断抵抗角が特定でき、不連続面の破壊規準で定式化された強度異方性が特定できる。7章では、1~6章で得られた知見をまとめる。

#### 参考文献

- 1) Hoek, E. and Brown, E. T.: Empirical strength criterion for rock masses, *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, 106, pp.1013-1035, 1980.
- 2) 地盤工学会：岩盤のせん断試験方法（JGS 3511-2004），2004.
- 3) 地盤工学会：原位置岩盤試験データベース，丸善，2009.
- 4) 谷和夫，三軸セル、三軸試験装置および三軸試験方法，特願平 10-252640，公開特許公報，1998.
- 5) 岡田哲実，野崎隆司，池見元宣，谷和夫：電中研式原位置岩盤力学試験法の開発，電力中央研究所報告，U02023，2003.
- 6) 岡田哲実，金谷守，小早川博亮，伊藤洋，大津仁史，谷和夫：原位置岩盤三軸試験法の開発（その2），電力中央研究所報告，U05049，2006.
- 7) 岡田哲実，納谷朋広，谷和夫：中空円筒形状の試験体を用いた岩盤の引張り試験方法の考案，第48回地盤工学研究発表会，pp.601-602，2013.
- 8) Taheri, A. and Tani, K.: Use of down-hole triaxial apparatus to estimate the mechanical properties of heterogeneous mudstone, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.45, pp.1390-1402, 2008.
- 9) 田中悠一，谷和夫：ひずみゲージの圧着を特徴とした原位置孔底三軸試験装置の室内検証実験，第40

回岩盤力学に関するシンポジウム, 2011. (CD-ROM)

- 10) 谷和夫：原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石のせん断強さの位置付け, 材料 55(5), pp.483-488, 2006.
- 11) 谷和夫:人工の泥質軟岩を用いた室内岩盤せん断試験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.767-772, 1998.
- 12) 新孝一：地盤の異方弾性係数の実用的な測定解析法, 土木学会論文集 No.722/III-61, pp.231-243, 2002.
- 13) 赤井浩一, 山本和夫, 有岡正樹：結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, 第170号, pp. 23-36, 1969.
- 14) 岡田哲実：原位置岩盤三軸試験法, 自然災害軽減・メンテナンス技術研究連絡会－平成19年度・地球工学研究所の知的財産に関する報告会－資料, pp.1-24, 2007.
- 15) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.33(3), pp.293-325, 1996.
- 16) Hakala, M., Kuula, H. & Hudson, J, A.: Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties, *Int. J. of Rock Mech, & Min. Sci.*, Vol.44, pp.14-46, 2007.
- 17) ファーマー, I. W. : 岩盤工学の基礎と応用, 鹿島出版会, 1988.
- 18) Attewell, P. B. and Sandford, M. R.: Intrinsic shear strength of a brittle anisotropic rock, *Int. J. of Rock Mech, & Min. Sci.*, Vol.11, pp.423-451, 1974.

## 2. 岩盤の力学特性と調査方法

### 2-1. 岩盤の力学的性質

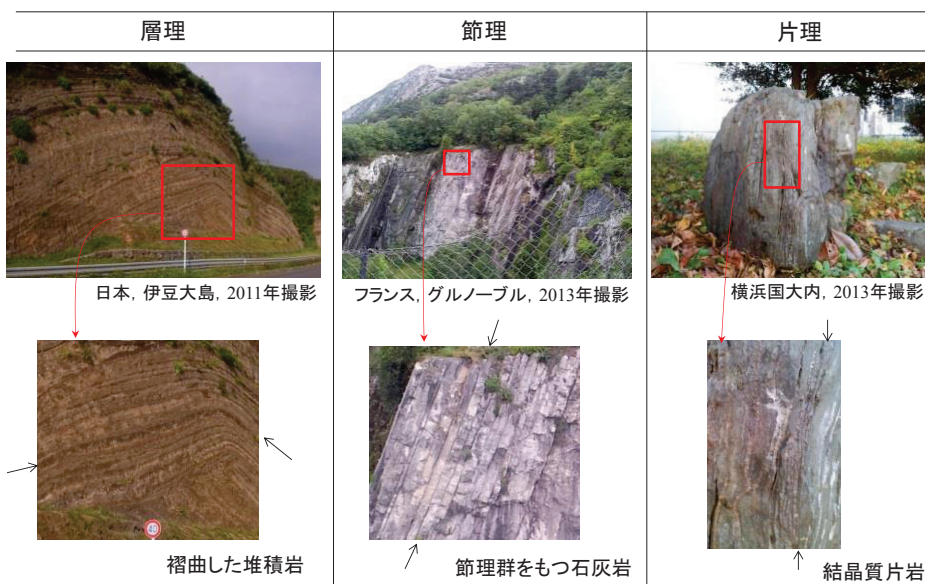
岩盤はインタクトな岩と不連続面とで構成される構造体で、岩盤の力学特性は不連続面の力学的性質に支配される。そこで、不連続面の力学特性を明らかにすることを目的として、不連続面の種類をまとめ、岩盤分類と地山分類の分類項目に基づいて評価すべき不連続面の特性を調査した。その後、岩盤の力学特性と不連続面の性質の関係の調査として、地盤工学会の岩盤分類による、不連続面に関する分類項目と岩盤の力学特性の関係を考察した。さらに、岩盤の力学特性の異方性に関する調査として、室内試験の結果から、不連続面の方向によって異方的になる岩盤の力学的性質を調査した。

#### (1). 岩盤の不連続面の種類

岩盤内の不連続面は表 2.1 のように岩種毎でいくつか考えられる<sup>1)</sup>。堆積岩では、他所から運搬されてきた破碎された各種岩石が層状に堆積し、層理と呼ばれる不連続面ができる。風化や地殻変動によって岩が割れてできる不連続面を節理と呼び、全ての岩種に存在する。変成岩では、最初に形成されたときと異なる化学的あるいは物理的な条件下で再結晶化することで鉱物粒子が一定の方向に配列して片理と呼ばれる不連続面ができる。他にも、広域な地層の食い違いによる断層がある。

表 2.1 岩盤の不連続面の種類

(a) 不連続面の例



(b) 岩種と不連続面の関係

不連続面の種類	堆積岩	火成岩	変成岩
層理	○	—	—
節理	○	○	○
片理	△ <sup>注1)</sup>	△ <sup>注2)</sup>	○
断層	○	○	○

注 1) : 頁岩などは、層理と呼ばれたり片理と呼ばれたりする。注 2) : 鉱物粒子の配列することで割れやすい面の石目がある場合もある。

## (2). 岩盤分類と地山分類による不連続面の評価

岩盤構造物の設計には必須な岩盤分類や地山分類における、不連続面の性質の評価項目を表 2.2 に示す<sup>2)~5)</sup>。評価項目がある場合を○，ない場合を×で表記した。なお，地山分類は主に山岳トンネルの建設の際に用いられ，トンネル周辺の岩盤だけでなく広い領域の岩盤条件を設定する目的で用いる。岩盤分類と地山分類による評価は，物理的性質と力学的性質と幾何学的性質の 3 つに大別される。物理的性質では，不連続面の間に粘土などの充填物や，礫の含有率や，風化や変質に関する項目がある。力学的性質では，不連続面の密着具合や，剥離性，また不連続面の粗度（ラフネス）の項目がある。幾何学的性質では，開口幅，間隔（*s*: spacing），断層の有無，などの項目がある。表 2.3 には，(1)で挙げた不連続面の種類とこれらの項目の関係を示す。関連性が高いものは○，関連性がやや高いものは△，関連性が低いものは×とした。不連続面の間隔 *s* と方向の分類が，全ての不連続面の種類に共通して関連する項目であり，これらは，1章で述べた力学特性の異方性と深く関係がある。

表 2.2 岩盤分類と地山分類における不連続面の評価項目

岩盤分類と地山の分類	不連続面を評価する項目										
	物理的性質			力学的性質			幾何学的性質				
	充填物	礫の含有率	風化・変質	密着	剥離性(変成)	ラフネス	断層の有無	開口	間隔	方向	コアのRQD
電力中央研究所方式岩盤分類 <sup>3)</sup>	○	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×
土木研究所方式岩盤分類 <sup>3)</sup>	×	○	×	○	×	×	×	○	○	×	×
岩盤の工学的分類方法 <sup>2)</sup>	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×
日本道路公団の地山分類 <sup>3)</sup>	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○
鉄道建設公団の地山分類 <sup>3)</sup>	×	×	○	×	○	×	○	×	×	×	×
RMR法 <sup>4),5)</sup>	○	×	○	×	×	○	×	○	○	○	○
Q値法 <sup>4),5)</sup>	○	×	○	○	×	○	×	×	○	×	○

表 2.3 不連続面の種類と不連続面を評価する項目の関係

不連続面を評価する項目	不連続面の種類				
	層理	節理	片理	断層	
物理的性質	充填物	×	○	×	△
	礫の含有率	○	×	×	○
	風化・変質	○	○	○	○
力学的性質	密着	×	○	×	○
	剥離性(変成)	×	×	○	×
	ラフネス	×	○	-	○
幾何学的性質	断層の有無	×	×	-	○
	開口	×	○	×	×
	間隔	○	○	○	○
	方向	○	○	○	○
	コアのRQD	-	○	-	△



従来から用いられてきた電中研式岩盤分類と土研式岩盤分類では、不連続面の評価項目が少ない。これは、熟練の技術者が打音などに基づいて経験的に岩盤を評価してきたためである。それに対し、近年基準化した地盤工学会の岩盤の工学的分類方法（JGS3811-2004）では従来の岩盤分類よりも多くの評価項目が含まれる。また、地山分類では、広域な岩盤を適切に評価するために、トンネル周りで採取されるボーリングコアによる RQD（Rock Quality Designation）を評価項目に含み、不連続面の力学的性質にも注視している。しかし、これらの分類のなかで、不連続面の方向に関する評価項目を持つ分類は、RMR（Rock Mass Rating）法のみで、他の分類には方向の項目がない。RMR 法では、トンネルの軸方向に対する不連続面の傾斜の項目がある。なお、RQD はボーリングコア 1m 当りの 0.1m 以上の健全なコア長の合計の比で定義される。

### (3). 岩盤の工学的分類方法（JGS3811-2004）

(2)で挙げた分類のなかで、不連続面の評価項目が一番充実していた、地盤工学会による岩盤の工学的分類方法を図 2.1 に示す<sup>2)</sup>。地盤工学会の岩盤分類では、大分類において、一軸圧縮強さ  $q_u$  が 25MPa 以上の岩を硬岩、以下の岩を軟岩と分類した後に、中分類において、顕著な不連続面を有無で、塊状か葉状、礫質、互層などと分類をする。次に、小分類において、 $q_u$  と不連続面の間隔あるいは卓越粒径、弱層の含有率などから、岩盤が分類される。なお、この岩盤分類では、不連続面の方向性に関しては構造物の方向性に依存するために岩盤分類の要素としない、と記載されている。

<u>First-step classifications</u>	<u>Second-step classifications</u>	<u>Third-step classifications</u>
Hard rock mass [H] $25\text{MPa} < q_u$	Massive Hard rock {HM}	Rock material strength $q_u$ A(~100)~F(5~)(MPa)
	Foliated Hard rock {HF}	Discontinuity spacing $s$ I(~2000)~VI(20~)(mm)
Soft rock mass [S] $q_u < 25\text{MPa}$	Massive Soft rock {SM}	Rock material strength $q_u$ D(~10)~F(1~)(MPa) Dominant grain size I(~2)~IV(0.002~)(mm)
	Redaceous Soft rock {SR}	Matrix strength $q_{um}$ D(~10)~F(1~)(MPa) Gradient content I(~50)~IV(10~)(%)

図 2.1 岩盤の工学的分類方法 (JGS3811-2004)

#### (4) 岩盤分類と力学特性の関係

次に、地盤工学会から出版された原位置岩盤試験データベース（2008年度版）<sup>6)</sup>による平板載荷試験と岩盤せん断試験による力学定数を参照，あるいは再整理して<sup>7)</sup>，力学定数と不連続面の間隔  $s$  の関係を調査した．このデータベースで記載されているデータは，日本で過去に行われた岩盤試験のデータを集め，地盤工学会の岩盤分類との関係を調査したものである．平板載荷試験に関して，岩盤分類の中分類毎の整理された試験サイト数  $N$  を表 2.4 に示す．

表 2.4 各岩盤分類において平板載荷試験が行われたサイトの数  
(地盤工学会(2009)に加筆・修正)

硬岩系塊状岩盤 {HM}			不連続面の間隔(mm)						計
			I ~2000	II 2000~600	III 600~200	IV 200~60	V 60~20	VI 20~	
岩石の強さ (MPa)	A ~100	N	0	12	59	190	27	2	290
	B 100~50	N	0	0	28	129	30	9	196
	C 50~25	N	0	4	17	93	65	2	181
	D 25~10	N	0	0	10	15	42	6	73
	E 10~5	N	0	0	3	5	17	3	28
	F 5~	N	0	0	14	4	7	20	45
計	N	0	16	131	436	188	42	813	

硬岩系葉状岩盤 {HF}			不連続面の間隔(mm)						計
			I ~2000	II 2000~600	III 600~200	IV 200~60	V 60~20	VI 20~	
岩石の強さ (MPa)	A ~100	N	0	0	9	31	0	0	40
	B 100~50	N	0	0	5	7	6	12	30
	C 50~25	N	0	2	9	24	11	11	57
	D 25~10	N	0	0	0	4	4	1	9
	E 10~5	N	0	2	0	0	3	0	5
	F 5~	N	0	0	0	0	0	0	0
計	N	0	4	23	66	24	24	141	

軟岩系塊状岩盤 {SM}			卓越粒径(mm)				計
			I ~2	II 2~0.063	III 0.063~0.002	IV 0.002~	
岩石の強さ (MPa)	D ~10	N	0	0	0	0	0
	E 10~5	N	0	0	0	0	0
	F 5~1	N	0	23	28	0	51
	G 1~	N	0	8	0	0	8
計	N	0	31	28	0	59	

軟岩系礫質岩盤 {SR}			礫の含有率(%)				計
			I ~50	II 50~20	III 20~10	IV 10~	
マトリックスの強さ (MPa)	D ~10	N	0	18	0	0	18
	E 10~5	N	4	9	5	5	23
	F 5~1	N	0	3	0	7	10
	G 1~	N	14	0	0	1	15
計	N	18	30	5	13	66	

平板載荷試験による変形係数  $E_D$  と岩盤分類の不連続面の評価項目の関係を図 2.2 に示す。これらは、岩盤分類の中分類毎にグラフを分けて表示した。軟岩[S]では不連続性の評価項目が大きくなるほど  $E_D$  が大きくなるが、礫の含有率に対しては、礫自体の変形係数が非常に大きい可能性がある。また、卓越粒径は変形特性にそれほど影響を与えない可能性がある。それに対し、硬岩[H]では  $E_D$  は  $s$  が短くなると小さくなる傾向がある。これは、不連続面の密度 (=  $s/B$ ,  $B$ : 載荷幅) が大きくなると、変形特性が小さくなるためと考えられ、さらに、2-2 で後述する Goodman(1989)によるモデル (図 2.9 と式(2-2), (2-3)) によると、著しい変形特性の異方性に起因するという説明もできる。なお、図のプロットは、岩盤分類の強度に関する小分類を表しており、 $E_D$  の算出は、等方弾性論による Boussinesq の解により下記で求められている<sup>8)</sup>。

$$E_D = \frac{P}{\delta} (1-\nu)^2 B I_p$$

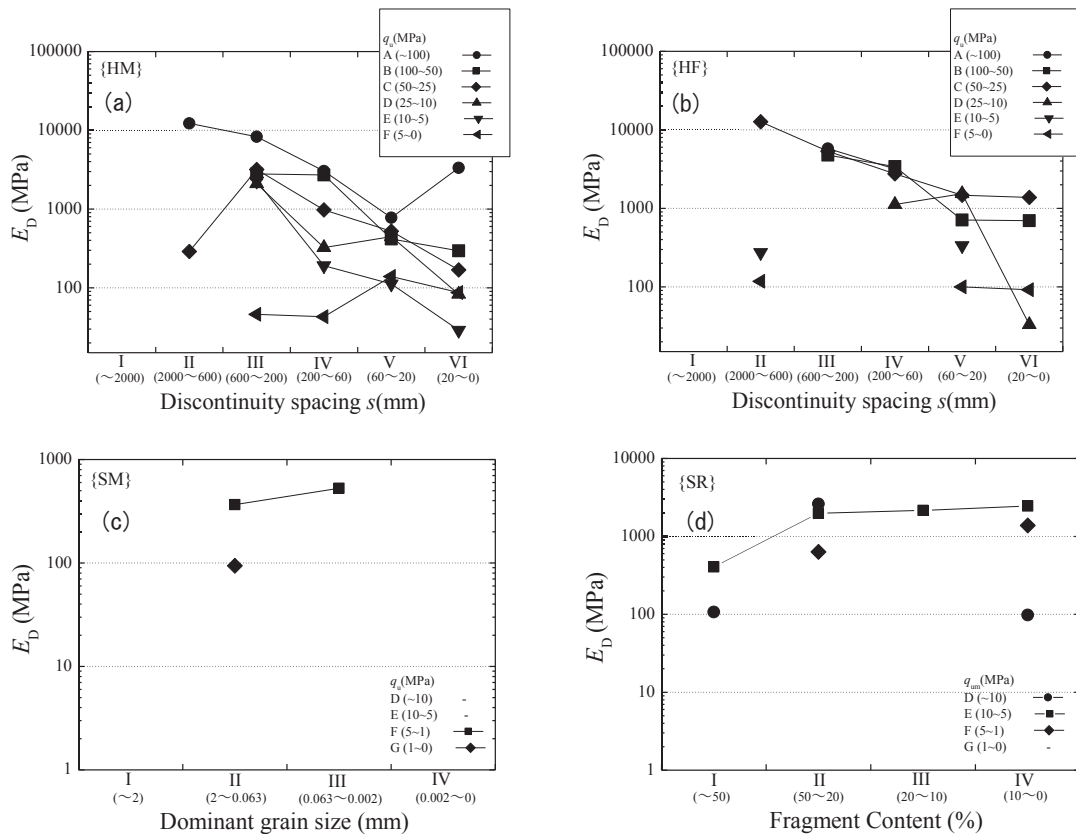


図 2.2 平板載荷試験による変形係数  $E_D$  と  
 岩盤分類の不連続面の評価項目の関係(地盤工学会(2009)を加筆)  
 ((a) : {HM}, (b) : {HF}, (c) : {SM}, (d) : {SR})

$p$  は荷重,  $\delta$  は  $p$  による沈下量,  $\nu$  は等方弾性体のポアソン比,  $B$  は載荷幅,  $I_p$  は形状係数である。

次に, 岩盤せん断試験に関して述べる<sup>7),9)</sup>。岩盤分類の中分類毎に整理された試験サイト数  $N$  と試験数  $n$  を表 2.5 に示す。日本では, 岩盤せん断試験は, 図 2.3 のようにロックせん断試験 (RST) とブロックせん断試験 (BST) に区別して行われる。前者は岩盤のせん断強度を求める試験で, 後者はコンクリートブロックと岩盤の境界の強度を求める試験であり, 本質的に異なる試験である。

表 2.5 各岩盤分類において岩盤せん断試験が行われたサイトの数

硬岩系塊状岩盤 {HM}			不連続面の間隔(mm)												計	
			I ~2000		II 2000-600		III 600-200		IV 200-60		V 60-20		VI 20~			
			RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST		
岩石の強さ (MPa)	A ~100	N n	0 0	0 0	1 3	3 8	4 12	8 40	8 62	13 57	0 10	3 0	0 0	13 77	27 115	
	B 100-50	N n	0 0	0 0	0 8	3 4	1 32	11 82	14 95	24 95	8 3	6 16	3 9	1 2	26 98	45 153
	C 50-25	N n	0 0	0 0	1 1	2 4	1 3	7 16	2 6	26 117	2 6	12 44	0 0	0 0	6 16	47 181
	D 25-10	N n	0 0	0 0	0 0	1 5	0 0	7 28	0 0	3 10	2 7	12 41	0 0	2 6	2 7	25 90
	E 10-5	N n	0 0	0 0	1 4	0 0	1 3	4 15	2 7	0 0	0 0	3 12	0 0	1 5	4 14	8 32
	F 5~	N n	0 0	0 0	3 16	0 0	1 2	2 6	4 14	1 6	0 0	1 12	0 0	4 23	8 32	8 47
計	N n	0 0	0 0	6 24	9 25	8 24	39 137	30 171	67 285	12 16	37 135	3 9	8 36	59 244	160 618	

硬岩系葉状岩盤 {HF}			不連続面の間隔 (mm)												計	
			I ~2000		II 2000-600		III 600-200		IV 200-60		V 60-20		VI 20~			
			RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST		
岩石の強さ (MPa)	A ~100	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2 8	3 20	0 0	1 2	0 0	0 0	2 8	4 22	
	B 100-50	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	3 6	1 10	5 16	1 4	2 14	0 0	1 4	2 14	11 40	
	C 50-25	N n	0 0	0 0	0 4	1 0	0 10	3 0	9 36	0 0	5 17	0 0	1 4	0 0	19 71	
	D 25-10	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 4	0 0	2 12	0 0	1 1	0 0	4 17	
	E 10-5	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 8	0 0	0 0	0 0	1 8	
	F 5~	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	
計	N n	0 0	0 0	0 4	1 0	0 16	6 18	3 18	18 76	1 4	11 53	0 0	3 9	4 22	39 158	

軟岩系塊状岩盤 {SM}			卓越粒径(%)								計	
			I		II		III		IV			
			RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST		
岩石の強さ (MPa)	D	N n	0 0	0 0	0 0	2 8	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	2 8
	E	N n	0 0	0 0	0 26	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	6 26
	F	N n	0 0	0 0	0 4	1 8	0 0	0 0	0 0	0 0	1 8	1 4
	G	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
計	N n	0 0	0 0	0 38	1 8	0 0	0 0	0 0	0 0	1 8	9 38	

軟岩系礫質岩盤 {SR}			礫の含有率(%)								計	
			I ~50		II 50-20		III 20-10		IV 10~			
			RST	BST	RST	BST	RST	BST	RST	BST		
マトリックスの強さ (MPa)	D ~10	N n	0 0	0 0	1 4	4 24	0 1	1 0	1 0	1 3	1 4	6 28
	E 10-5	N n	0 0	0 0	1 8	0 7	0 0	1 8	2 7	4 7	2 23	7 7
	F 5-1	N n	0 0	0 0	1 6	0 0	0 0	0 0	0 0	1 9	1 6	1 9
	G 1~	N n	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
計	N n	0 0	0 0	3 18	4 24	2 7	1 1	4 8	19	6 33	9 44	

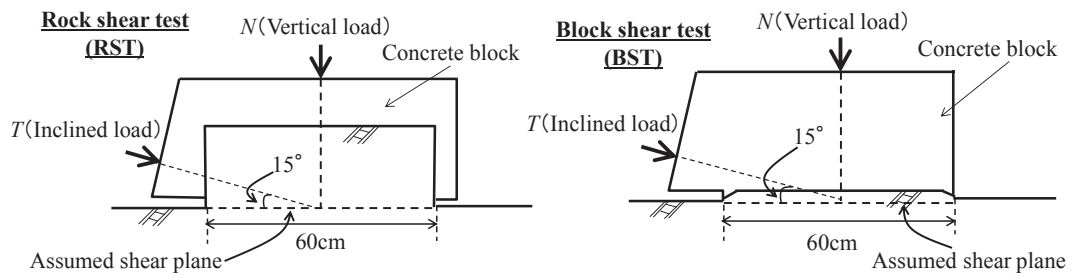


図 2.3 ロックせん断試験 (RST, 左) とブロックせん断試験 (BST, 右)

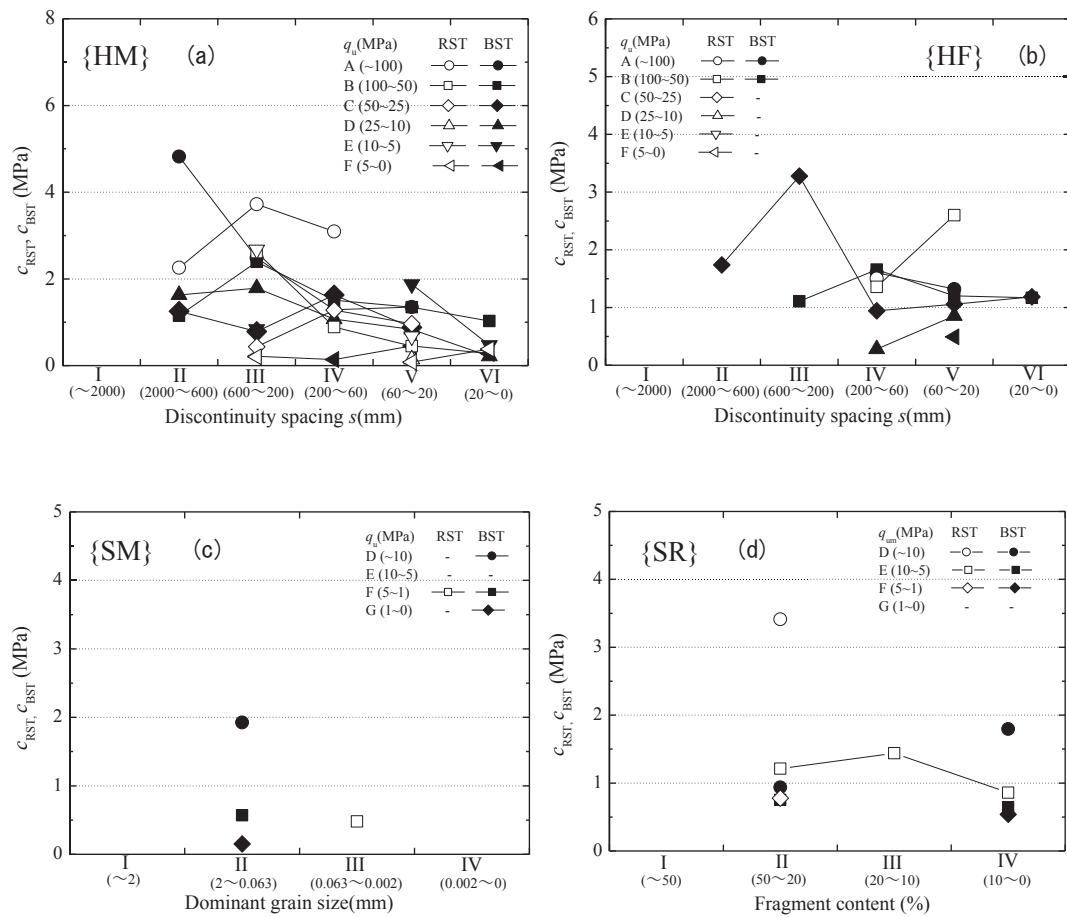


図 2.4 岩盤せん断試験による粘着力  $c$  と  
岩盤分類の不連続面の評価項目の関係

((a) : {HM}, (b) : {HF}, (c) : {SM}, (d) : {SR})

そのため、ロックせん断試験とブロックせん断試験による強度定数を  $(c_{RST}, \phi_{RST})$  と  $(c_{BST}, \phi_{BST})$  と区別した。また、岩盤せん断試験は試験回数を多少増減して行う場合もあるが、4回の試験を試験サイト毎に行うことが標準化されている。岩盤せん断試験による粘着力  $c$  と岩盤分類の不連続面の評価項目の関係を図 2.4 に示す。硬岩系岩盤では、不連続面の間隔  $s$  が小さくなるに従って、 $c$  は小さい値を示す。軟岩に関しても概ね、卓越粒径と礫の含有率が多くなるほど  $c$  は小さい値を示す。岩盤せん断試験によるせん断抵抗角  $\phi$  と岩盤分類の不連続面の評価項目の関係を図 2.5 に示す。こちらも  $c$  と同様の傾向を示している。このように、不連続面の存在によって岩盤の力学定数は非常に大きな影響を受け、一般的に不連続面の密度が大きくなるほど力学定数が低下する。

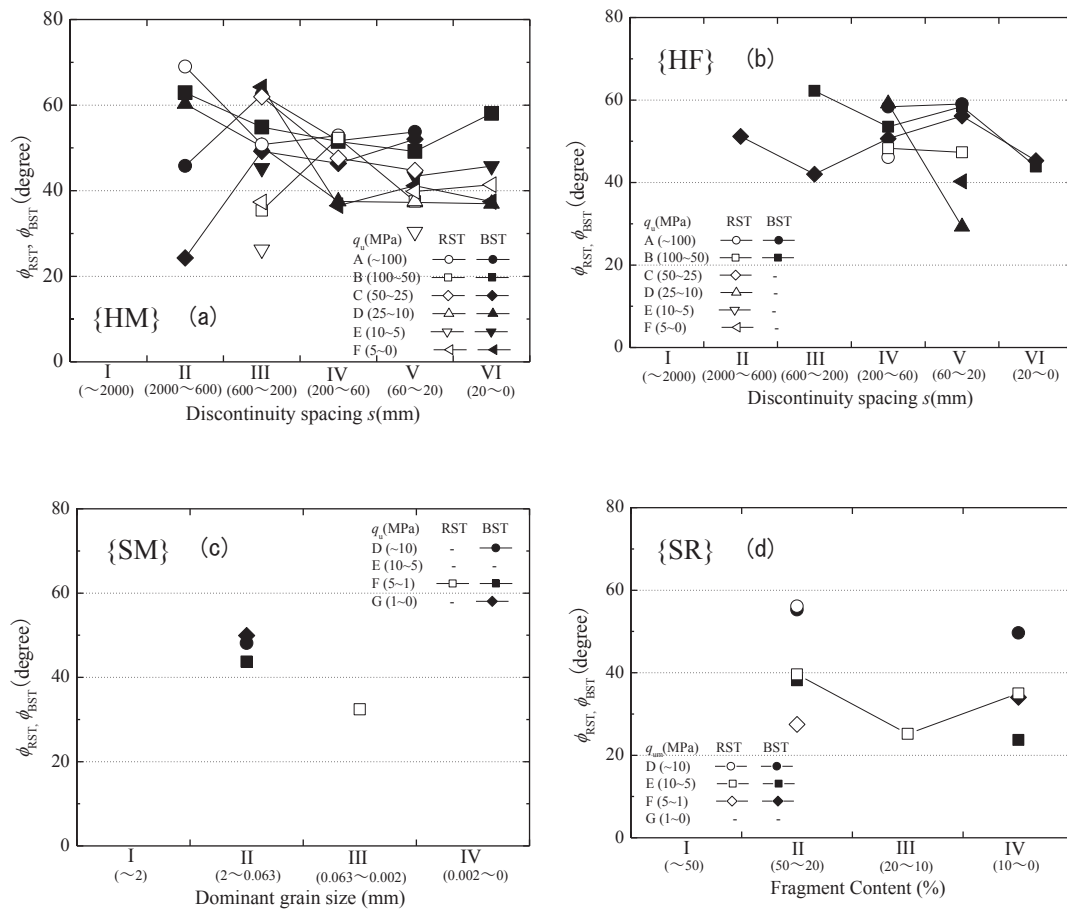


図 2.5 岩盤せん断試験によるせん断抵抗角  $\phi$  と  
岩盤分類の不連続面の評価項目の関係  
( (a) : {HM}, (b) : {HF}, (c) : {SM}, (d) : {SR} )

## (5). 不連続面の方向によって著しく異なる岩盤の力学特性

ここでは、(3)で述べた岩盤分類の評価項目の中でも、特に不連続面の方向に着目して、岩盤内の不連続面の方向と外力の方向の関係（異方性）に関して文献調査を行った。複数の方向にサンプリングしたコアの三軸試験による、砕屑性の堆積岩が示す変形特性の異方性を図 2.6 に示す<sup>10)</sup>。この検討では、サンプリング方向によって载荷軸方向のヤング率が最大で約 2 倍異なることが指摘されている。複数のコアの三軸試験による単一の不連続面を含む粘板岩が示す強度異方性を図 2.7 に示す<sup>11)</sup>。このように、方向によって三軸载荷時の軸差応力が最大で 250MPa も異なり、著しい強度異方性を示す。これらの結果は、室内試験によるもので、1 章で言及したように原位置試験によって岩盤の異方性を調査した事例はあまりない。また、図 2.6, 2.7 は、複数の試験によって異方性が調査された事例で、図は加筆修正してあるが、実際はばらつきを評価するために、図のプロットの 2 倍程度の試験数が行われている。試験の手間と時間によって、異方性の調査が普及しない原因の 1 つと考えられるため、室内試験でも合理的な異方性の調査が必要である。

## 2-2. 岩盤の力学特性の異方性を表す構成モデル

2-1 では、岩盤内の不連続面の間隔が岩盤の力学定数に大きな影響を与えることと、不連続面の方向によって力学特性が異方性になることを示した。1-1 で示したように、寸法効果の調査技術の開発が非常に進んでいるのに対し、異方性を調査する技術は未だ開発途上にある。そこで、不連続面に起因する力学特性の異方性を表現し、定式化できる構成モデルを、変形と強度特性に分けてまとめた。

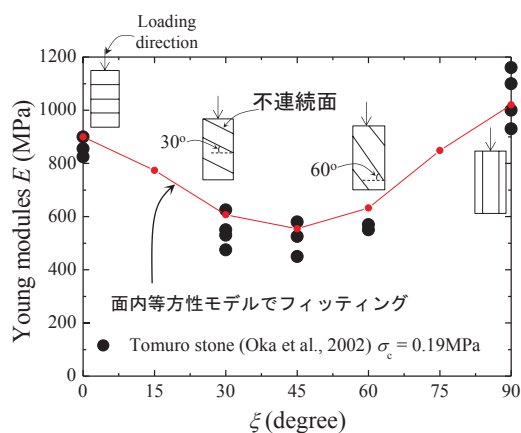


図 2.6 砕屑性の堆積岩（戸室石）  
が示すヤング率の異方性  
(Oka et al. (2002)に加筆)

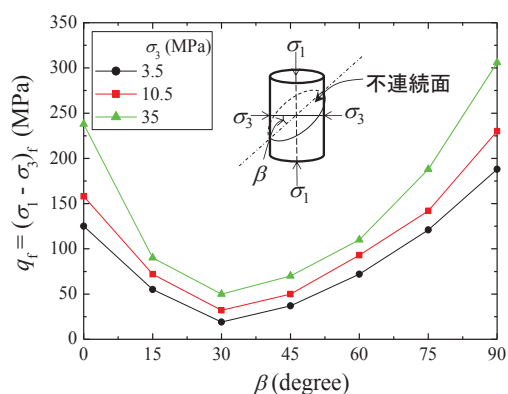


図 2.7 三軸試験による  
単一の不連続面を持つ粘板岩  
が示す強度異方性  
(Attewell and Sandford (1974)に加筆)

(1). 変形特性の異方性

変形の異方性は、面内等方弾性体と直交異方弾性体でモデル化されることが多い。面内等方弾性体とは、図 2.8 に示すように、剛性が等方な面 ( $x'y'$ 面) とその面に直交する  $z'$  方向で剛性が異なる弾性体である。  $x'$  と  $y'$  は走向と傾斜方位で、  $\xi$  と  $\zeta$  は剛性が等方な面の傾斜と  $Y$  軸と傾斜方位 ( $y'$  方向) が為す角度である。また面内等方弾性体の弾性パラメータは  $x'$  と  $y'$  方向のヤング率とポアソン比 ( $E_{x'}$ ,  $\nu_{x'}$ ) と  $z'$  方向のヤング率とポアソン比とせん断剛性率 ( $E_{z'}$ ,  $\nu_{z'}$ ,  $G_{z'}$ ) の 5 つで決まる<sup>12)</sup>。ここでは、  $\beta = 0^\circ$ ,  $\xi = 0^\circ$  における面内等方弾性体の構成関係を式 (2-1) に示す。

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{kl} \tag{2-1}$$

なお、  $\varepsilon_{ij}$  はひずみテンソル、  $C_{ijkl}$  は 5 つの弾性パラメータで構成されるコンプライアンステンソル、  $\sigma_{kl}$  は応力テンソルであり、応力とひずみの対称性を仮定して単純化したシンボリック表記をそれぞれ、  $\boldsymbol{\varepsilon}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\boldsymbol{\sigma}$  とすると、次式で表される。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{XX} \\ \varepsilon_{YY} \\ \varepsilon_{ZZ} \\ \varepsilon_{XY} \\ \varepsilon_{ZY} \\ \varepsilon_{ZX} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{z'}}{E_{x'}} & & & \\ & \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{z'}}{E_{x'}} & & & \\ & & \frac{1}{E_{z'}} & & & \\ & & & \frac{2(1+\nu_{x'})}{E_{x'}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{z'}} & \\ & \text{SYM.} & & & & \frac{1}{G_{z'}} \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{XX} \\ \sigma_{YY} \\ \sigma_{ZZ} \\ \sigma_{XY} \\ \sigma_{ZY} \\ \sigma_{ZX} \end{pmatrix}$$

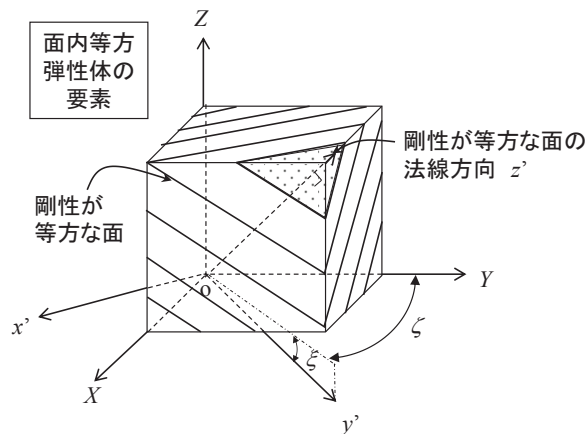


図 2.8 面内等方弾性体



面内等方弾性体は、剛性が等方な面を不連続面と見立ててモデル化することができるため、岩の成因や構造特性を考慮して、層理を持つ碎屑性の堆積岩や節理群を持つ火成岩あるいは変成岩のモデル化などにしばしば用いられている<sup>10), 12)~14)</sup>。例えば、Goodman (1989) は、図 2.9 に示すようにセットの節理を持つ岩盤のモデル化に用いた<sup>4)</sup>。このモデルでは、節理と節理の間隔を上述の硬岩[H]の岩盤分類の小分類、不連続面の間隔  $s$  とし、 $z$  方向の変形に対しては、図 2.9 上のように、等方弾性体の岩盤の変形  $(\sigma/E)s$  と節理の変形  $\sigma/k_n$  の和が面内等方弾性体の変形  $(\sigma/E_z)s$  と等しくなるよう、式(2-2)で表される。

$$\frac{1}{E_z} = \frac{1}{E} + \frac{1}{k_n s} \quad (2-2)$$

$k_n$  は不連続面の垂直剛性である。また、せん断に関して、図 2.9 下のように、岩盤の変形  $(\tau/G)s$  と不連続面の変形  $\tau/k_s$  の和が面内等方弾性体の変形  $(\tau/G_z)s$  に等しくなるよう、式(2-3)で表される。

$$\frac{1}{G_z} = \frac{1}{G} + \frac{1}{k_s s} \quad (2-3)$$

$k_n$  は不連続面の垂直剛性である。なお、 $z'$  方向のポアソン比  $\nu_z$  は等方弾性体のポアソン比  $\nu$  に等しく、 $x'$  方向のヤング率  $E_x$  は等方弾性体のヤング率  $E$  に等しく、応力ひずみ関係の対称性から、 $z'$  方向のポアソン比  $\nu_x$  は、それぞれ次式で表される。

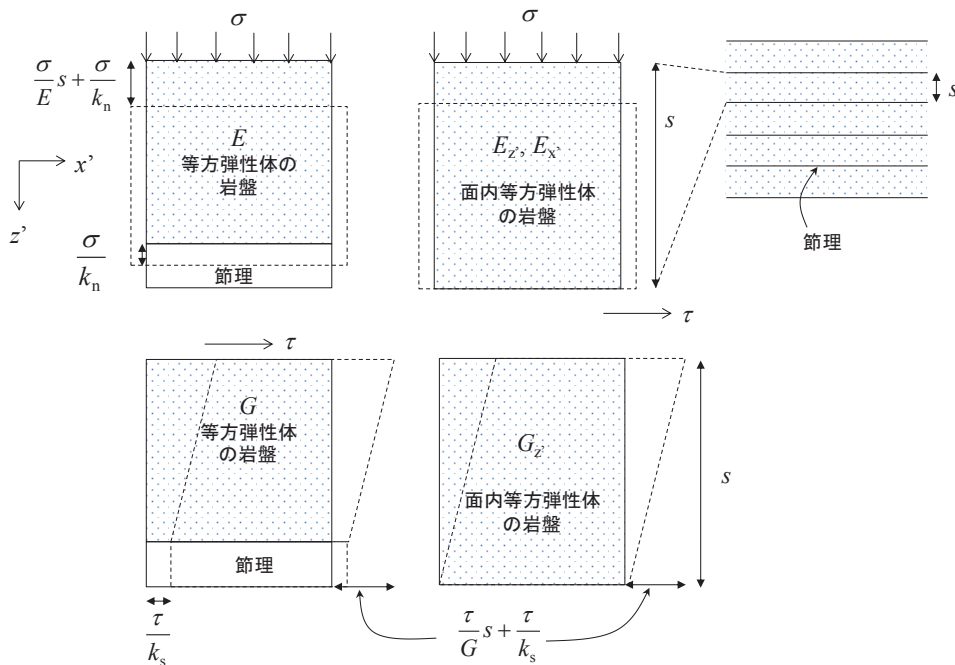


図 2.9 面内等方弾性体による節理群を持つ岩盤のモデル化

(Goodman (1987) に加筆)

$$\begin{aligned} \nu_{z'} &= \nu \\ E_{x'} &= E \\ \nu_{x'} &= \frac{E_{z'}}{E} \nu \end{aligned}$$

直交異方弾性体とは、図 2.10 に示すように異方性の方向  $(x', y', z')$  の三方向でそれぞれ剛性が異なる弾性体である。  $(\xi, \psi, \zeta)$  はオイラー角で、図 2.10 (b) のように、まず、直交座標系  $(X, Y, Z)$  を  $Z$  軸周りに右ねじの方向に  $\zeta$  だけ回転させる (Step1)。次に、Step1 の操作でできた直交座標系  $(x, Y, Z)$  を  $x$  軸周りに右ねじの方向に  $\xi$  だけ回転させる (Step2)。最後に、Step2 の操作でできた直交座標系  $(x, y, z')$  を  $z'$  軸周りに右ねじの方向に  $\psi$  だけ回転させ (Step3)、異方性の方向を表す直交座標系  $(x', y', z')$  を得る。直交異方弾性体の弾性パラメータは、 $x'$  方向と  $y'$  方向と  $z'$  方向のヤング率、ポアソン比、せん断剛性率をそれぞれ  $(E_{x'}, \nu_{x'}, G_{x'})$  と  $(E_{y'}, \nu_{y'}, G_{y'})$  と  $(E_{z'}, \nu_{z'}, G_{z'})$  の 9 つで表される<sup>12)</sup>。  $\xi = \psi = \zeta = 0^\circ$  における直交異方弾性体の構成関係は式 (2-1) とおなじで、コンプライアンステンソルの成分が下記のように異なる。

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{y'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{z'}}{E_{x'}} & & & \\ & \frac{1}{E_{y'}} & -\frac{\nu_{z'}}{E_{y'}} & & & \\ & & \frac{1}{E_{z'}} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{x'}} & & \\ & & & & \frac{1}{G_{y'}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{z'}} \end{pmatrix}$$

SYM.

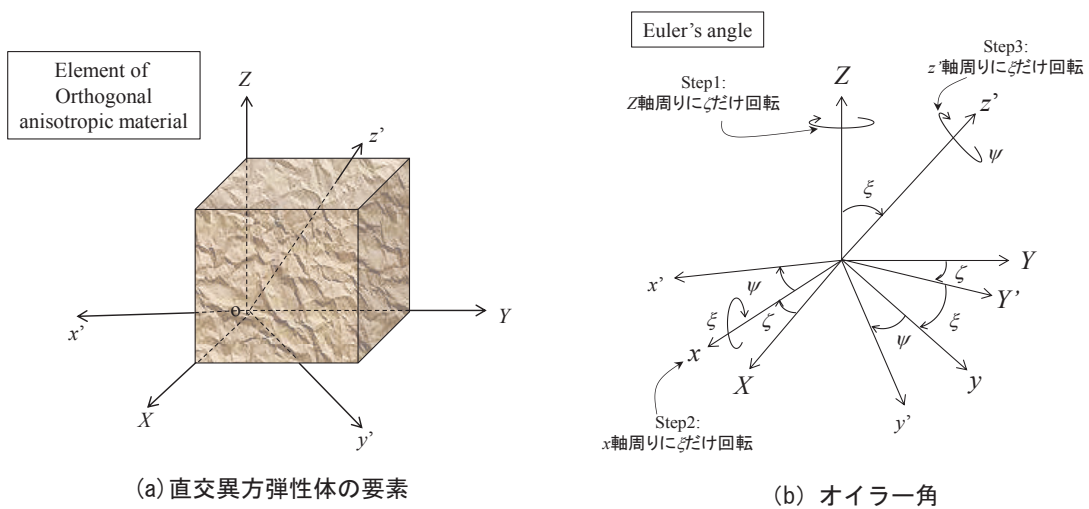


図 2.10 直交異方弾性体

直交異方弾性体は、複数の卓越する不連続面に起因するような複雑な異方性に対応できる弾性体である。しかし、異方性の方向も合わせると未知数が12個で、調査でこれらの未知数を把握するためには多くの試験本数とひずみの多方向計測を行う必要や、佐野ら(1988)の24角柱供試体を用いた超音波速度計測<sup>15)</sup>に代表されるように、特殊な形状の試験体を必要であったり、面内等方弾性体の調査と比べて、試験がさらに煩雑化する。そのため、このモデルが適用された岩は少なく、どのような種類の不連続面に適用できるかは定かでない。よって本研究では、不連続面を剛性が等方な面に見立ててシンプルにモデル化することのできる面内等方性を変形特性の異方性として用いる。

## (2). 強度特性の異方性

強度の異方性は、岩盤内に内在する1つの弱面の破壊現象が支配的になると考え、図2.11に示すように、単一の不連続面（弱面）を含む三軸試験において、式(2-4)で表される岩質部のモールクーロンの破壊規準と式(2-5)で表される不連続面の破壊規準の関係で記述される<sup>16)</sup>。

$$\tau = c_r + \sigma \tan \phi_r \quad (2-4)$$

$$\tau_d = c_d + \sigma_d \tan \phi_d \quad (2-5)$$

ここでは、不連続面を含む要素と不連続面に働く直応力とせん断応力を $(\sigma, \tau)$ と $(\sigma_d, \tau_d)$ とし、岩質部と不連続面の粘着力とせん断抵抗角を $(c_r, \phi_r)$ と $(c_d, \phi_d)$ とした。 $P_p$ は面に関する極(Pole of plane)で、 $P_d$ は方向に関する極(Pole of direction)である。载荷軸方向から不連続面が $\xi$ だけ傾くとすると、不連続面に働く直応力とせん断応力は式(2-6)で表される。

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \\ \tau_d &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \end{aligned} \quad (2-6)$$

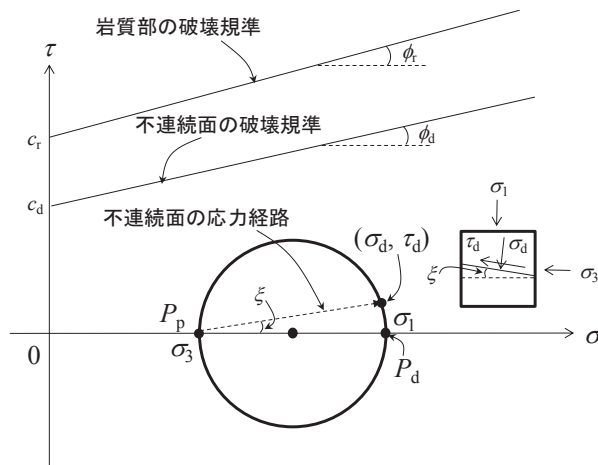


図 2.11 三軸試験における不連続面を含む岩質と不連続面の破壊規準

式(2-5)に式(2-6)を代入することで、式(2-7)の不連続面の強度定数、載荷軸からの傾斜角度、主応力の関係が記述される。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2c_d + 2\sigma_3 \tan\phi_d}{(1 - \cot\beta \tan\phi_d) \sin 2\beta} \quad (2-7)$$

この他にも、異方的な強度特性に関しては、Hill(1958)による異方性の降伏関数<sup>17)</sup>や、草深ら(1999)による静水圧依存型の異方性の降伏関数<sup>18)</sup>などが提案されているが、これらのモデルも適用事例が少なく、どのような種類の不連続面に適用できるかが明らかでない。

そこで、以後の章では、岩盤内での1つの不連続面の破壊が支配的になると考え、式(2-4)から式(2-7)でシンプルに表される強度異方性について議論する。

### 2-3. 岩盤の力学特性の調査方法

既往の文献を調査して、異方性の調査において必要な試験本数や提案されているアイデアをまとめ、考察する。また、従来の原位置試験の方法を列挙し、寸法効果を適切に評価できる試験体の寸法について考察する。

#### (1). 岩盤の力学特性の異方性の調査

従来の岩盤の力学的異方性の調査は、図 2.12 のように複数の室内試験によって行われてきたが、近年では、1本の供試体で異方性を調査できる手法がいくつか提案されている。室内試験と原位置試験における、変形特性の異方性の調査方法を表 2.6 にまとめる<sup>10), 13), 19)~30)</sup>。室内試験がほとんどであるが、中には原位置試験で異方性を調査した事例もある。要素試験が多いが、圧裂試験で非要素となる供試体の応力の分布特性を利用した調査事例もある。なお、表の検討のほとんどが面内等方弾性体の弾性パラメータ及び方向を求めた事例である。

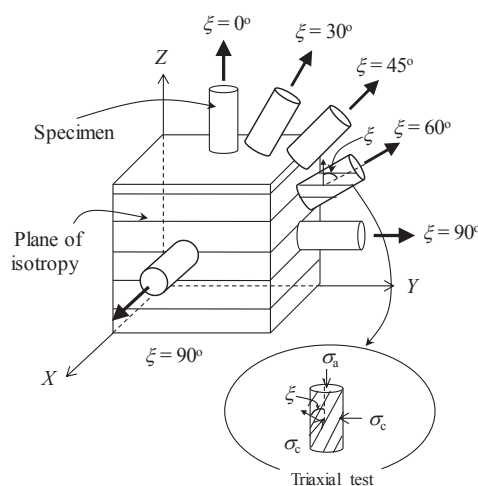


図 2.12 従来の異方性の調査方法  
(Oka et al. (2002) に加筆)

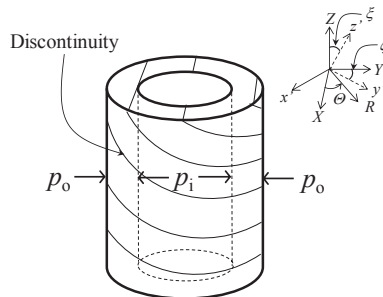
表 2.6 変形特性の異方性に関する既往の研究

	文献	試験方法	要素 or 非要素試験	岩種	試験本数	異方性の方向の求め方	構成モデル	備考
室内試験	赤井ら (1969)	超音波速度計測	要素	変成岩 (結晶片岩)	3本以上	目視観察	面内等方弾性	-
	下谷ら (1979)	一軸	要素	変成岩 (結晶質方解岩)	3本以上	目視観察	面内等方弾性	-
	Amadei (1996)	三軸	要素	堆積岩 (砂岩)	3	目視観察	面内等方弾性	-
	Liao et al. (1997)	超音波速度計測	要素	堆積岩 (珪質粘土岩)	1	目視観察	面内等方弾性	$\xi = 0^\circ$ と $90^\circ$ のみ
	Chen et al. (1998)	圧裂	非要素	堆積岩 (砂岩)	3本以上	目視観察	面内等方弾性	Lekhnitskiの弾性解
	Talesnick et al. (1999)	ねじりせん断	要素	堆積岩 (砂岩)	1	目視観察	面内等方弾性	$\xi = 0^\circ$ のみ
	Exadaktylos and Kaklis (2001)	圧裂	非要素	変成岩 (片麻岩)	3本以上	目視観察	面内等方弾性	弾性解 (平面応力)
	Oka et al. (2002)	三軸	要素	堆積岩 (凝灰岩)	3本以上	目視観察	面内等方弾性	-
	Claesson and Boholi (2002)	圧裂	非要素	-	3本以上	目視観察	面内等方弾性	弾性解 (平面応力), 計算のみ
	Hakala et al. (2007)	三軸	要素	変成岩 (片麻岩)	3	目視観察	面内等方弾性	-
	Gonzaga et al. (2008)	等方圧 + 三軸	要素	堆積岩 (凝灰岩)	1	等方圧載荷時の主ひずみ方向から特定する.	面内等方弾性	$\xi = 0^\circ$ と $90^\circ$ の場合はサンパナの経験式(2-8)を使う
	新(2009)	一軸	要素	堆積岩 (泥岩)	3本以上	非線形最小二乗法で求める <sup>注1)</sup>	面内等方弾性, 直交異方弾性	-
堤(2011)	圧裂	非要素	石膏	3本以上	目視観察	面内等方弾性	弾性解 (平面応力)	
原位置試験	新(2002)	静水圧	要素	変成岩 (片麻岩) 堆積岩 (シルト岩)	1	非線形最小二乗法で求める <sup>注1)</sup>	面内等方弾性, 直交異方弾性	独自のパラメータを減らす工夫
	Nunes (2002)	内圧と外圧	非要素	-	1	載荷時のひずみ分布特性を利用して求める <sup>注2)</sup>	面内等方弾性	サンパナの経験式(2-8)を使う, 計算のみ

注 1) : 応力とひずみとコンプライアンステンソルのシンボリック表記( $\sigma, \epsilon, C$ )および異方性の方向を表す( $\xi, \zeta$ )が次式の関係にあり, ( $\xi, \zeta$ )は式内で正弦あるいは余弦関数で非線形に含まれるため, 新(2002)は, 非線形最小二乗法で  $C$  と( $\xi, \zeta$ )を求めている.

$$f(\sigma, \epsilon) = g(C, \xi, \zeta)$$

注 2) : 表 1.1 で示した下図のような非要素となる中空円筒試験体の内圧・外圧を制御した試験を行い,



試験体内の円周 $\theta$ 方向のひずみ分布の最大値( $\epsilon_{\theta \max}, \epsilon_{z \theta \max}$ )と最小値 $\epsilon_{\theta \min}$ および $\epsilon_{z \theta \max}$ となる円周上の位置 $\theta_{\max}$ を計測して次式によって( $\xi, \zeta$ )求めている.

$$\tan \xi = \frac{\epsilon_{\theta \max} - \epsilon_{\theta \min}}{\epsilon_{z \theta \max}}$$

$$\zeta = \frac{\pi}{2} - \theta_{\max}$$

まず、要素試験として行われている手法に関して、Amadei (1996)は、図 2.13 のように $\xi=0^\circ, 90^\circ$   $\xi \neq 0, 90^\circ$  のサンプリング方向で得た角柱のコアで、計 3 回の一軸あるいは三軸試験を行うことで面内等方性の弾性パラメータ 5 つを求める手法を提案した<sup>20)</sup>。Hakala et al.(2007)は、これと同様の手法で、円柱の供試体で 5 つの弾性パラメータを求めた<sup>25)</sup>。Talesnick and Ringel (1999)は荷重面と不連続面が平行な中空円筒の供試体を用いて図 2.14 のように軸圧縮、外圧荷重、等方圧荷重の複数の荷重パターンを供試体に加えることで、弾性パラメータ 5 つを決定する手法を考案している<sup>22)</sup>。しかし、これらの手法では、異方性の方向（すなわち不連続面の方向）を堆積面やセットの節理の目視観察によって推定しているため、例えば、堆積面と卓越する弱面が共存している場合は異方性を特定できない。要素試験で、異方性の方向を目視観察に依らずに特定する手法を考案しているのは、Gonzaga et al.(2008)<sup>26)</sup>と新(2009)<sup>27)</sup>で、前者は、等方圧荷重時の主ひずみ方向が異方性の方向と共軸になる性質を利用して、剛性の等方な面の傾斜と走向を特定した。後者は、非線形最小二乗法によって、弾性パラメータとともに異方性の方向を求めた。なお、Gonzaga et al.(2008)の手法は、剛性の等方な面の傾斜 $\xi=0^\circ$  と  $90^\circ$  の供試体の場合は、軸対称条件が満足され、異方性特有の変形が計測できず、すべての弾性パラメータを求められない。そのため、 $\xi=0^\circ$  と  $90^\circ$  の供試体を用いる場合は、Saint-Venant(1863)によって提案されている弾性パラメータ間の経験式(2-8)<sup>31)</sup>を利用して弾性パラメータを求める。

$$\frac{1}{G_z} = \frac{1}{E_z} + \frac{1+2\nu_{x'}}{E_{x'}} \quad (2-8)$$

この式の妥当性には、様々な議論があり、例えば Talesnick and Ringel(1999)は、面内等方性を有する砂岩の試験結果から、式(2-8)を参考に式(2-9)を提案している<sup>22)</sup>。

$$\frac{1}{G_z} = \left( \frac{1}{E_z} + \frac{1+2\nu_{x'}}{E_{x'}} \right) \frac{E_z}{2E_z - E_{x'}} \quad (2-9)$$

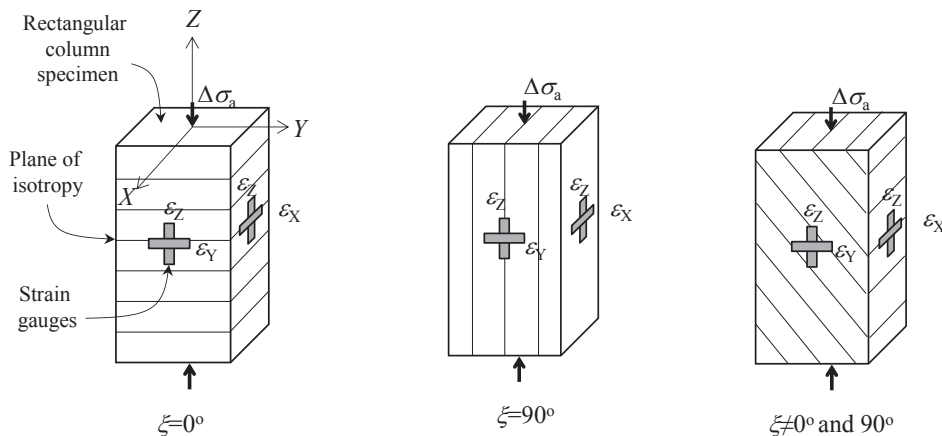


図 2.13 角柱供試体の一軸試験による面内等方性を仮定した調査方法

(Amadei (1996) に加筆)

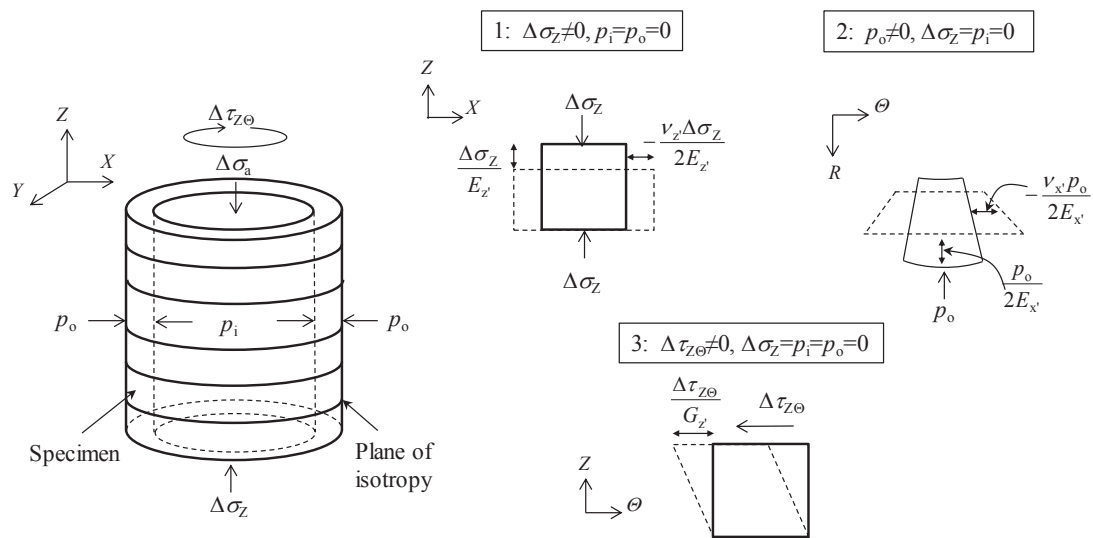


図 2.14 Talesnick and Ringel (1999)による中空円筒供試体を用いた  
面内等方弾性の調査

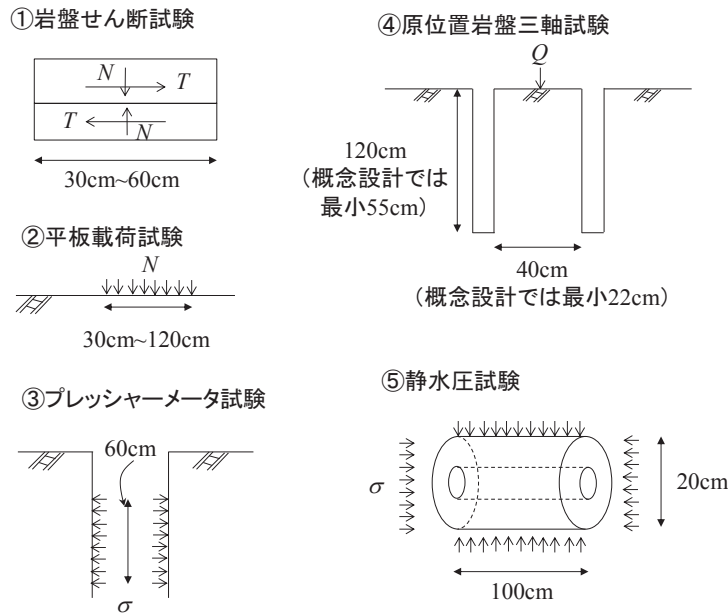
(左：面内等方性の中空円筒供試体 ( $\xi=0^\circ$ )， 右：载荷モード毎の単位要素の変形)

次に、面内等方弾性体の载荷時の非要素特性を利用して、異方性を特定しようとする試みは、主に圧裂試験で行われている。これらの検討では、平面応力条件の面内等方弾性体の円環の点载荷、あるいは载荷幅を考慮した分布荷重を与えた場合の弾性問題を解き、その解から異方性の方向と弾性パラメータを逆算したものである。一軸試験による結果と比較して、安定した結果が得られるという報告もあるが、これらの手法も試験本数が最低で3本必要である。それに対し、Nunes(2002)の手法は、中空円筒の試験体に、内圧と外圧を制御して作用させたときの非一様になるひずみの特性を計測することで、式(2-8)を用いるものの、1回の試験で、異方性の方向と弾性パラメータ5つを求めている<sup>30)</sup>。

強度異方性に関しても、少ない試験数で調査できる手法が好ましいが、式(2-5)の異方性を求めるために、不連続面の方向を変えた複数の三軸試験が行われている<sup>16)</sup>。

## (2) 原位置岩盤試験の試験体の寸法

従来の原位置岩盤試験の载荷モードと一般的な試験体の寸法を図 2.15 で示す<sup>29), 32) ~ 35)</sup>。原位置岩盤三軸試験においては、岩盤せん断試験のせん断面の最小面積 (=30cm × 30cm=900cm<sup>2</sup>) と平板载荷試験に最小载荷幅 (=30cm) を基準として、外径 22cm, 高さ 55cm の試験体が概念設計されている (実施されたのは、外径 40cm, 高さ 120cm の試験体)。これはせん断破壊面が载荷面から 65° 傾斜すると仮定して、破壊面の面積が約 900cm<sup>2</sup> として設計される。さらに、谷(2004)は、大谷石の採掘跡地にて実施された原位置岩盤三軸と室内の三軸試験のデータを比較し、寸法効果を議論している<sup>36)</sup>。その結果、大谷石の平均礫径



(a) 原位置試験の種類

(b) (a)の载荷モードなど

番号	文献	試験	载荷モード	载荷面・試験体の形状
①	JGS3511-2004	岩盤せん断	一面せん断に近い	四角
②	JGS1521-2003	平板載荷	剛板押し込み	四角・円
③	JGS1421-2003	プレッシャーメータ	孔壁拡張	円筒
④	岡田ら(2003)	原位置岩盤三軸	三軸	円柱または中空円筒
⑤	新(2012)	静水圧	等方圧	中空円筒

図 2.15 従来の原位置岩盤試験による载荷モードと試験体の寸法

(約 10mm) の 2~10 倍の範囲でせん断強さの寸法効果は小さい。大谷石の中でも戸室山周辺で採取できる戸室石は、面内等方性を示すという文献があり<sup>10)</sup>、仮に、戸室石で原位置試験を実施を計画するなら、原位置岩盤三軸試験で概念設計された最小の試験体寸法（外径 22cm，高さ 55cm）で、寸法効果に加えて異方性の調査が十分に可能である。

参考文献

- 1) 池田俊雄：わかりやすい地盤地質学，鹿島出版会，pp.5-13, 1986.
- 2) 公益社団法人地盤工学会：岩盤の工学的分類方法（JGS 3811-2004），2004.
- 3) 日本材料学会：ロックメカニクス，pp.94-95, pp.171, 技報堂出版，2002.
- 4) グッドマン, R. E.: わかりやすい岩盤工学，鹿島出版会，1984.
- 5) Harrison, J.P. and Hudson, J. A.: Engineering rock mechanics part1, pp. 193-197, Elsevier, 2000.
- 6) 地盤工学会：原位置岩盤試験データベース，丸善，2009.



- 7) 富樫陽太, 谷和夫: 原位置岩盤試験 DB に基づく岩盤せん断試験から得られる粘着力とせん断抵抗角の分析, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.190-195, 2010.
- 8) 海野隆哉, 垂水尚志: 地盤工学, コロナ社, 1993.
- 9) Togashi, Y. and Tani, K.: Statistical analysis of strength properties by rock shear tests based on rock mass classification systems of JGS, *Proc. 4th Korea-Japan Geotech. Workshop*, pp.91-98, 2011.
- 10) Oka, F., Kimoto, S. Kobayashi, H. and Adachi, T.: Anisotropic behavior of soft sedimentary rock, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.59-70, 2002.
- 11) Attewell, P. B. and Sandford, M. R.: Intrinsic shear strength of a brittle anisotropic rock, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.11, pp.423-451, 1974.
- 12) 山口柏樹: 弾・塑性力学, 森北出版, 1974.
- 13) 赤井浩一, 山本和夫, 有岡正樹: 結晶片岩の構造異方性に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, 第 170 号, pp. 23-36, 1969.
- 14) 粕谷憲司: 異方性層状岩の強度・弾性波速度・変形および破断面の特性等に関する実験的考察, 応用地質, 第 20 巻 3 号, pp.1-10, 1979.
- 15) 佐野修, 工藤洋三, 河嶋智, 水田義明: 異方性体としての花崗岩の弾性率に関する実験的研究, 材料, Vol.37, No.418, pp.84-90, 1987.
- 16) ファーマー, I. W.: 岩盤工学の基礎と応用, 鹿島出版会, 1988.
- 17) Hill, R.: A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.6, pp.236-249, 1958.
- 18) 草深守人, 武田洋, 向上拓美, 舎川徹: 岩石材料の異方性降伏関数と材料パラメータの評価, 土木学会論文集, No.631/ III-48, pp.205-220, 1999.
- 19) 下谷高瀧, 山富二郎, 山口梅太郎: 一軸圧縮試験による岩質材料の異方性弾性率の測定法について, 材料, Vol.28, No.307, pp.66-71, 1978.
- 20) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.33(3), pp.293-325, 1996.
- 21) Liao, J. J., Hu, T. and Chang, C.: Determination of dynamic elastic constants of transversely isotropic rocks using a single cylindrical specimen, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.34, pp.1045-1054, 1997.
- 21) Chen, C., Pan, E. and Amadei, B.: Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using brazilian tests, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.35, pp.43-61, 1998.
- 22) Talesnick, M. L. and Ringel, M.: Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.36, pp.627-639, 1999.
- 23) Exadaktylos, G. E. and Kaklis, K. N.: Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.38, pp.227-243, 2001.
- 24) Claesson, J. and Bohlooli, B.: Brazilian test: stress field and tensile strength of anisotropic rocks using an analytical solution, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.39, pp.991-1004, 2002.
- 25) Hakala, M., Kuula, H. & Hudson, J. A.: Estimating the transversely isotropic elastic intact rock properties, *Int. J.*

*of Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.44, pp.14-46, 2007.

26) Gonzaga, G. G., Leite, M. H. and Corthesy, R.: Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.45, pp.1420-1438, 2008.

27) 新孝一：堆積軟岩の異方性とその圧力依存性の測定, *J. MMIJ.*, Vol. 125, pp.429-436, 2009.

28) 堤隆：弾性主軸方向が確認できる材料に対する圧裂試験による縦弾性係数異方性の決定方法, *材料*, Vol.60, No.3, pp.229-234, 2011.

29) 新孝一：地盤の異方弾性係数の実用的な測定解析法, *土木学会論文集 No.722/III-61*, pp.231-243, 2002.

30) Nunes, A. L. L. S.: A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.39, pp.257-273, 2002.

31) Saint Venant, B.: Sur la distribution des élasticités autour de chaque point d'un solide ou d'un milieu de contexture quelconque, particulièrement lorsqu'il est amorphe sans être isotrope. *Journal de Math. Pures et Appliquées*, Tome VIII (2ème série) pp. 257-430, 1863.

32) 地盤工学会：岩盤のせん断試験方法 (JGS 3511-2004), 2004.

33) 地盤工学会：地盤の平板載荷試験方法 (JGS1521-2003), 2003.

34) 地盤工学会：孔内水平載荷試験方法 (JGS1421-2003), 2003.

35) 岡田哲実, 野崎隆司, 池見元宣, 谷和夫：電中研式原位置岩盤力学試験法の開発, *電力中央研究所報告*, U02023, 2003.

36) 谷和夫：原位置岩盤三軸試験によって評価された大谷石のせん断強さの位置付け, *材料*, Vol. 55, No.5, pp/483-488, 2006.

### 3. 面内等方性を仮定した岩盤の変形特性

面内等方弾性体は碎屑性の堆積岩などの不連続面を持つ岩盤のモデル化への利用の可能性が言及されているが、未だ基礎的な研究内容が多く、要素レベルの変形に関する検討もほとんどない。その中で、Boehler and Sawczuk (1977)<sup>1)</sup>は、図 3.1 に示すように、剛性の等方な面（すなわち不連続面）の傾斜方向に向かって、供試体がせん断変形する三軸供試体を示した。単一の不連続面を含む岩石コアの三軸試験<sup>2)</sup>では、図 3.2 のように不連続面の傾斜方向への変形が拘束されるため、この場合は傾斜方向にせん断応力が働く。

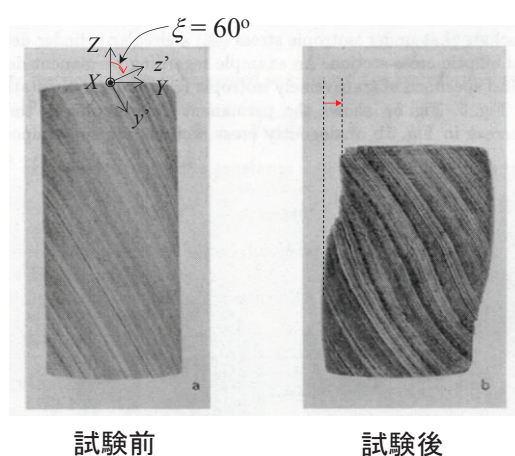


図 3.1 三軸試験による成層した軟岩の変形,  $\sigma_c=6.0\text{MPa}$  (Boehler and Sawczuk (1977)に加筆)

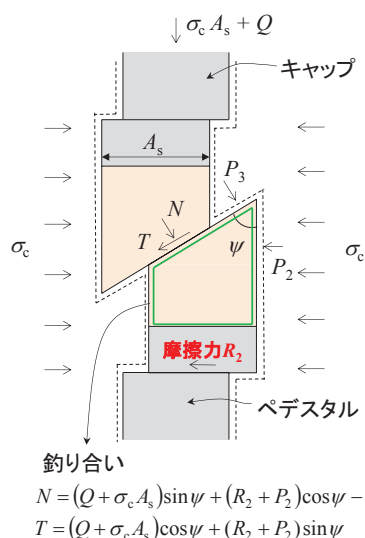


図 3.2 三軸試験による単一の不連続面を含む岩盤の変形 (Rosengren (1968)に加筆)

こういった異方性材料特有の変形と等方性材料の変形特性を図 3.3 に比較した<sup>3),4)</sup>. 等方性材料の変形特性(i)が軸圧縮時に軸対称に変形するのと比べて、面内等方材料の変形(ii)では、必ずしも軸対称に変形しない。図 3.3 の(a)は、供試体の上下端が自由に変形できる条件で、この場合、通常の等方性材料を対象として行われる三軸試験と同様で、主応力方向と载荷方向が一致する。しかし、面内等方弾性体の場合は、主ひずみ方向が一致しないため、せん断変形を起こす。それに対しケース(b)では供試体の上下端が拘束された条件であり、この場合は、主ひずみ方向と载荷方向が一致し、逆に主応力方向が一致しないため、せん断応力が発生する。三軸試験をはじめとする要素試験においても、このような異方性をもつ岩盤に特有の変形があり、異方性の程度によっては、载荷ロッドに载荷方向と直交した荷重がかかり、ロッドに作用する摩擦力が大きくなって、セル外部のロードセルが正しい荷重を示さない可能性もある。また、逆に、この異方性特有のひずみと応力の応答を適切に扱えば、簡易に異方性の計測ができる可能性もある。

2章でまとめた、既往の非要素試験では、Nunes(2002)の中空円筒の外圧・内圧载荷試験を変形特性の異方性を求める手法として紹介した。Nunes(2002)の手法は、外圧と内圧を载荷するため、強度特性を調査するのは難しいが、同様の発想で、中空ねじり試験においても、図 3.4 のように、载荷時に非要素となる特性を活かして、変形特性と強度特性の両方の異方性を特定できる可能性がある。この中空円筒の供試体は、図の展開のように、円周方向( $\theta$ 軸方向)に向かって、剛性が等方な面の局所的な傾斜 $\xi_\theta$ が正弦曲線で変化する。

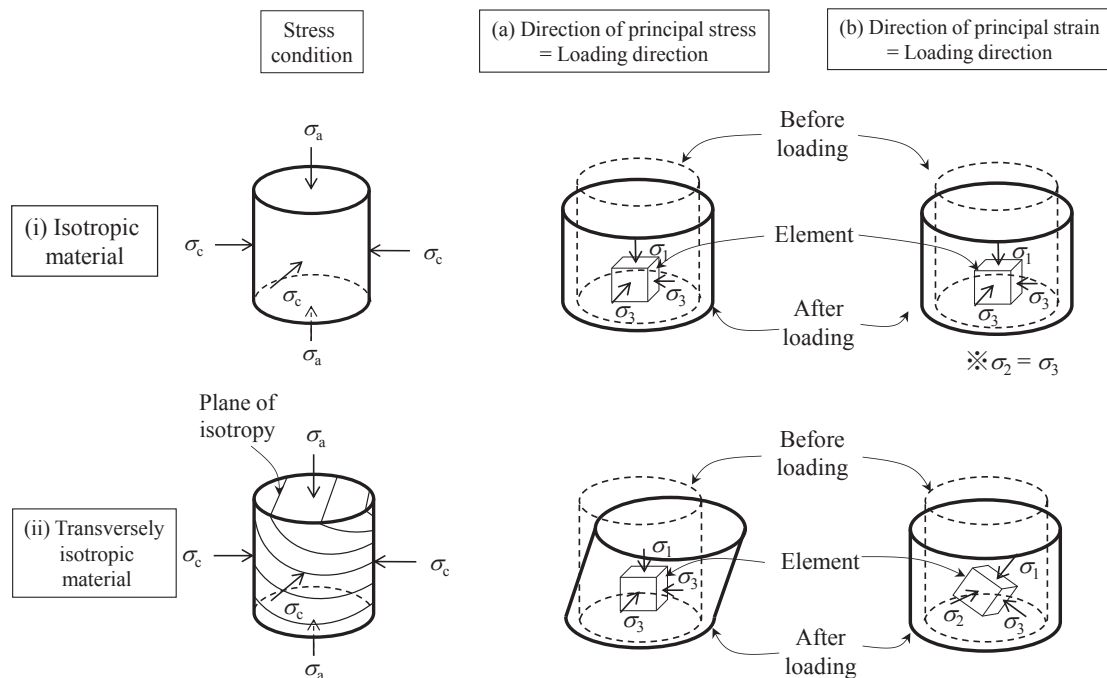


図 3.3 異方性材料特有の変形と等方性材料の変形特性の比較

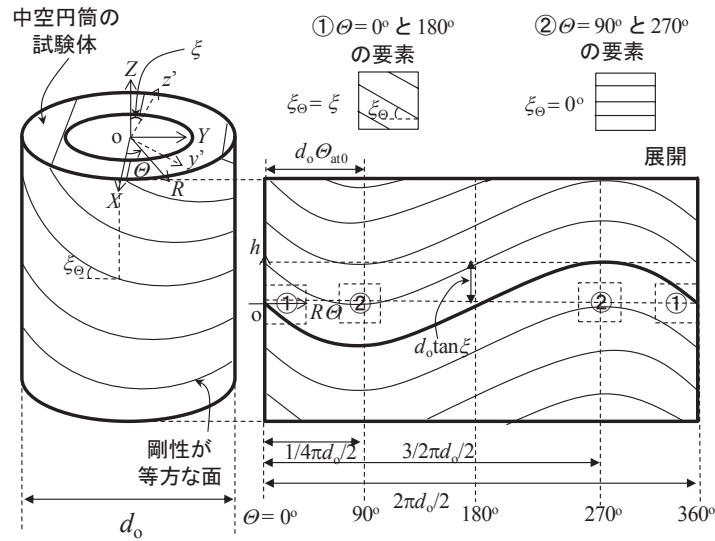


図 3.4 中空円筒試験体の  
直交座標系 $(X, Y, Z)$ と円筒座標系 $(R, \theta, Z)$

そのため、面内等方弾性体の中空円筒は、ねじりせん断時に非要素となる。なお、中空ねじり試験による強度異方性の検討は 4 章で言及する。

3 章では、異方性による要素試験の供試体の変形を具体的に調査するために、ひずみエネルギーが常に正であるために要請される、面内等方弾性体の弾性パラメータの取りうる値を導出した。その後、既往の文献から室内試験のデータを収集して、想定される弾性パラメータの適切な値を設定した。設定した弾性パラメータを用いて、原位置あるいは室内で行われる力学試験のうちの要素試験および非要素試験（ねじりせん断試験）に着目して、想定される载荷モードにおける要素と非要素である中空円筒の変形に関して調査した。

### 3-1. 弾性パラメータの存在領域

2-2 で言及した面内等方弾性体の 5 つの弾性パラメータは、2 つの拘束条件によって存在領域が定義される<sup>5)</sup>。1 つは式(3-1)に示すヤング率が正である条件とポアソン比の条件である。


$$\begin{aligned} 0 < E_z, & \quad -1 < \nu_z < 0.5 \\ 0 < E_{x'}, & \quad -1 < \nu_{x'} < 0.5 \end{aligned} \quad (3-1)$$

2 つ目は熱力学第一・第二法則において、ひずみエネルギーが常に正でなければならないため、弾性パラメータは拘束を受ける。まず、ひずみエネルギー $U$ は式(2-1)で示した応力とコンプライアンステンソルの行列表記 $\sigma$ と $C$ を用いて式(3-2)で表される。

$$U = \frac{1}{2} \sigma^T C \sigma \quad (3-2)$$

ひずみエネルギー $U$  が常に正であるためには、 $\mathbf{C}$  の主小行列式が正であればよいので、式(3-3)で表される  $D_i$  ( $i=1\sim 6$ )が全て正であればよい。

$$\begin{aligned}
 \left| \frac{1}{E_{x'}} \right| &= D_1 & \begin{vmatrix} D_3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{G_{x'}} \end{vmatrix} &= D_1 \\
 \begin{vmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'}}{E_{x'}} \\ -\frac{\nu_{x'}}{E_{x'}} & \frac{1}{E_{x'}} \end{vmatrix} &= D_2 & \begin{vmatrix} D_3 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{G_z} & 0 \\ \text{SYM.} & & \frac{1}{G_z} \end{vmatrix} &= D_2 \\
 \begin{vmatrix} \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_{x'}}{E_{x'}} & -\frac{\nu_z}{E_{x'}} \\ & \frac{1}{E_{x'}} & -\frac{\nu_z}{E_{x'}} \\ \text{SYM.} & & \frac{1}{E_z} \end{vmatrix} &= D_3 & \begin{vmatrix} D_3 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{G_{x'}} & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{G_z} & 0 \\ \text{SYM.} & & & \frac{1}{G_z} \end{vmatrix} &= D_3
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

式(3-3)を解き、 $D_i$ が常に正である条件を剛性比で表すと式(3-4)から(3-6)のようになり、 3.5 に剛性比で表した弾性パラメータの存在領域が定義される。

$$\begin{aligned}
 -\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^2 &< \nu_z < \left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^2 \\
 -\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^2 &< \nu_{x'} < \left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^2
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

$$-\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^{1.5} - \sqrt{\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^3 + 8\frac{E_{x'}}{E_z}} < 4\nu_z < -\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^{1.5} + \sqrt{\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^3 + 8\frac{E_{x'}}{E_z}} \tag{3-5}$$

$$-\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^4 - \sqrt{\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^8 + 8\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^4} < 4\nu_{x'} < -\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^4 + \sqrt{\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^8 + 8\left(\frac{E_{x'}}{E_z}\right)^4} \tag{3-6}$$

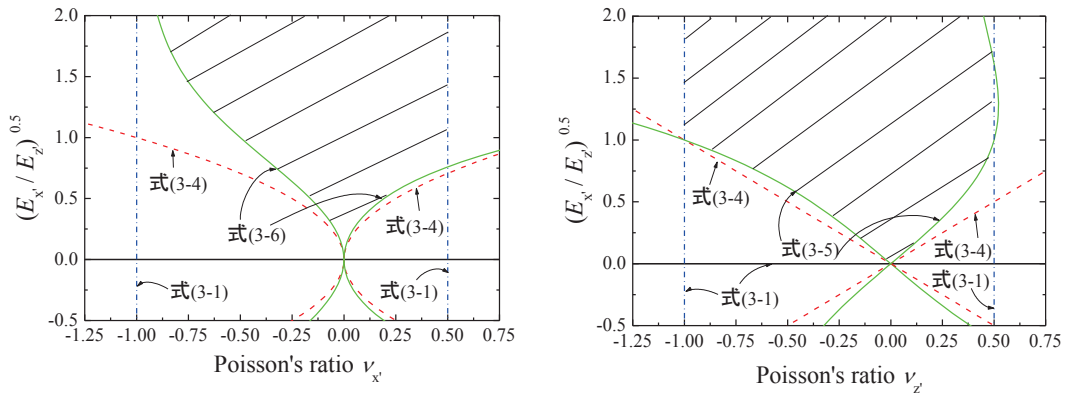


図 3.5 熱力学法則による剛性比の拘束条件

(上： $(E_{x'}/E_z)^{0.5}$ と $\nu_{x'}$ の関係，下： $(E_{x'}/E_z)^{0.5}$ と $\nu_z$ の関係)

### 3-2. 弾性パラメータの設定

弾性パラメータの設定に関して、簡易にパラメトリックなケーススタディができるように、この検討では Graham & Houlsby (1983)と同様の異方性パラメータ $\alpha^6$ を式(3-7)に示すように導入する。

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_{x'}}{E_{z'}}} = \frac{G_{x'}}{G_{z'}} = \frac{v_{x'}}{v_{z'}} \quad (3-7)$$

$z'$ 方向と $x'y'$ 面のヤング率の比の平方根が、ポアソン比とせん断剛性率の比に等しいことを仮定することにより、5つの弾性パラメータが $(E_{z'}, v_{z'}, \alpha)$ 3つになる。ここで、式(3-7)の妥当性について、変成岩と堆積岩の室内試験の結果<sup>7)~13)</sup>をまとめた図3.6により議論する。同図は、方向を変えた複数の試験から、面内等方性を仮定して5つの弾性パラメータを求めた結果をまとめており、直交する2方向のポアソン比およびヤング率の比の関係を示している。図3.6の各プロットが示す岩種と弾性パラメータ、試験方法を表3.1に示す。

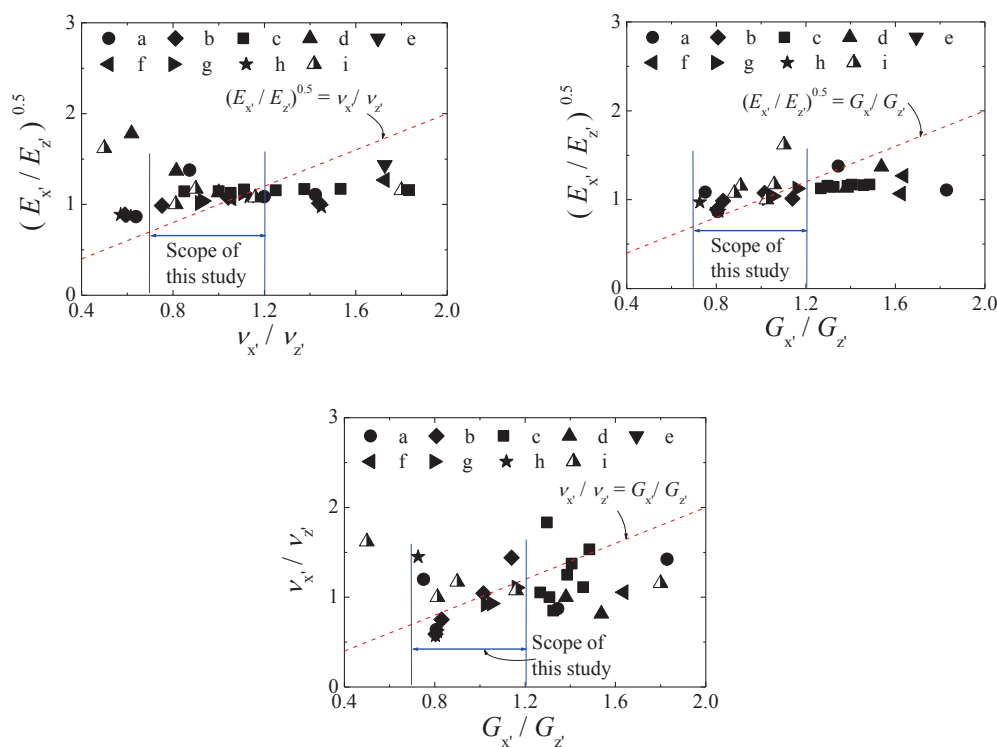


図 3.6 面内等方弾性体を仮定した岩石コアの試験結果による剛性比  
 (右上:  $(E_{x'}/E_{z'})^{0.5}$  と  $v_{x'}/v_{z'}$  の関係, 左上:  $(E_{x'}/E_{z'})^{0.5}$  と  $G_{x'}/G_{z'}$  の関係,  
 下:  $v_{x'}/v_{z'}$  と  $G_{x'}/G_{z'}$  の関係)

表 3.1 図 3.6 のプロットの岩種と弾性パラメータと試験方法

No.	Reference	Rock type	$E_{z',av}$ (GPa)	$E_{x',av}$ (GPa)	$\nu_{z',av}$	$\nu_{x',av}$	$G_{z',av}$ (GPa)	Testing method
a	Chen(1998)	sandstone	33.96	40.02	0.134	0.140	14.91	Uniaxial compression
b	Chen(1998)	sandstone	41.28	39.46	0.184	0.163	18.24	Brazilian test
c	Liao(1997)	Argillite	51.35	68.36	0.163	0.196	20.98	Ultrasonic mesurement
d	Wang(1998)	schist	45.17	78.57	0.250	0.207	18.53	Uniaxial compression
e	Wang(1998)	slate	58.90	121.30	0.110	0.190	15.10	Ultrasonic mesurement
f	Wang(1998)	argillite	42.05	55.45	0.140	0.205	14.10	Uniaxial compression
g	Gatelier(2002)	sandstone	20.10	21.80	0.173	0.168	8.80	Triaxial compression test, $\sigma_c=0\text{MPa}$
h	Amedai(1996)	sandstone	46.75	42.38	0.155	0.155	21.87	Uniaxial compression, Brazilian, True triaxial & hollow cylinder test
i	Oka(2002)	tuff	0.90	1.02	0.061	0.267	0.19	Triaxial compression test, $\sigma_c=0.19\text{MPa}$
j	Talesnick(1999)	sandstone	30.50	37.70	0.182	0.186	16.07	Uniaxial compression, Brazilian, True triaxial & hollow cylinder test

試験方法は、一軸圧縮試験が最も多く、弾性パラメータは、プロット毎に平均値 ( $E_{z',av}$ ,  $E_{x',av}$ ,  $\nu_{z',av}$ ,  $\nu_{x',av}$ ,  $G_{z',av}$ ) を示した。図中の破線は Graham & Houlsby (1983) の式(3-7)を満足する。図より、異方性岩盤の直交する 2 方向のポアソン比の比は 0.5 ~ 1.9 程度、せん断剛性率の比は 0.7 ~ 1.8 程度であり、いずれもヤング率の比と正の相関を持つことがわかる。式(3-7)は、実験値を必ずしも精緻には捉えていないものの、実験値と同様に正の相関を与えており、岩盤の材料パラメータのばらつきが非常に大きいこと<sup>14)</sup>を鑑みると、異方性パラメータ  $\alpha$  は異方性岩盤の弾性パラメータの数を減らしてパラメトリックスタディを行うための効果的なパラメータと言える。この研究では特に、式(3-7)を仮定した面内等方性モデルを用いて  $\alpha=0.7\sim 1.2$  の範囲で検討する。

### 3-3. 要素を対象とした解析

一軸、三軸試験をはじめとする要素試験において、面内等方性を仮定した岩石が示す変形特性について調べるために、要素を対象とした解析を行った。

面内等方弾性体と载荷軸方向に設定した直交座標系 ( $X, Y, Z$ ) および異方性の主軸方向に設定した局所座標系 ( $x', y', z'$ ) の関係を図 3.7 に示す。Z 軸は三軸試験の载荷軸方向であり、ここではこの方向を主応力軸あるいは主ひずみ軸として解析を実施する。Z 軸と主応力軸が一致した解析 (図 3.3(a)) では、Z 軸と主ひずみ方向のなす角度を  $\phi$ 、Z 軸と主ひずみ軸が一致した解析 (図 3.3(b)) では、Z 軸と主応力方向のなす角度を  $\theta$  とした。

なお、三軸試験では図 2.8 に示す剛性の等方な面の方向を表す傾斜  $\xi$  と傾斜方位と Y 軸のなす角度  $\zeta$  のうち、 $\xi$  のみが解析結果に影響を及ぼすので、 $\zeta=0^\circ$  に固定して、X 軸を回転軸とし、 $\xi$  を  $0\sim 90^\circ$  に変化させて検討を行った。まず、载荷軸 (Z 軸) と異方性の主軸 ( $z'$  軸) が一致する  $\xi=0^\circ$  における構成関係を式(3-8)に示す。

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3-8)$$



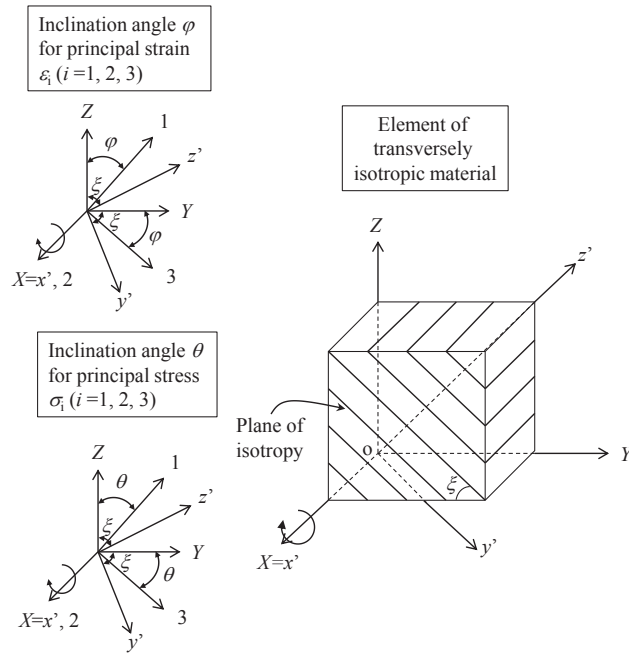


図 3.7 面内等方弾性体要素と直交座標系  $(X, Y, Z)$  および局所座標系  $(x', y', z')$  の関係

式の  $i, j$  はフリーインデックスで  $X, Y, Z$  のいずれかを代入する.  $k, l$  はダミーインデックスであり,  $X, Y, Z$  に対する総和をとる. また,  $\epsilon_{ij}$  はひずみテンソル,  $\sigma_{kl}$  は応力テンソル,  $C_{ijkl}$  はコンプライアンステンソルである. 応力テンソルとひずみテンソルの対称性を考慮すると, それぞれ独立な成分は 6 つである. また 4 階のコンプライアンステンソル  $C_{ijkl}$  の成分を, 先述のように式(3-7)の異方性パラメータ  $\alpha$  を用いると, 下記で表される.

$$C_{xxxx} = C_{yyyy} = \frac{1}{\alpha^2 E_z}, C_{zzzz} = \frac{1}{E_z}$$

$$C_{xxyy} = -\frac{\nu_z}{\alpha E_z}, C_{xxzz} = C_{yyzz} = -\frac{\nu_z}{E_z}$$

$$C_{yzyz} = \frac{C_{xyxy}}{\alpha} = \frac{1 + \alpha \nu_z}{2\alpha E_z}$$

なお, なお, 剛性が等方な面に直交する  $z'$  軸方向のヤング率  $E_z$  とポアソン比  $\nu_z$  は, 軟岩を想定して条件式(3-1)と(3-4)~(3-6)を満たすように 1000MPa と 0.3 の一定値で設定した.

载荷軸方向に対して異方性の主軸の方向が共軸でない場合 ( $\xi \neq 0^\circ$ ) は, 局所座標系  $(x', y', z')$  でのコンプライアンステンソル  $C_{ijkl}$  を与えた後, 式(3-9)のように全体座標系  $(X, Y, Z)$  に座標変換する.

$$\hat{C}_{mnpq} = C_{ijkl} l_{im} l_{jn} l_{kp} l_{lq} \quad (3-9)$$

$m, n, p, q$  はダミーインデックスで,  $X, Y, Z$  を代入する.  $l_{ij}$  は  $X$  軸周りの回転を表す 2 階のテンソルで, 成分を行列  $\mathbf{l}$  で表すと下記で表される<sup>15)</sup>.

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_{XX} & l_{XY} & l_{XZ} \\ l_{YX} & l_{YY} & l_{YZ} \\ l_{ZX} & l_{ZY} & l_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{pmatrix}$$

なお、応力テンソルとひずみテンソルの対称性から、コンプライアンステンソルも下記の対称性をもつ<sup>16)</sup>。

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij}$$

以上より、剛性が等方な面の傾斜が $\xi$ のときの面内等方弾性体の構成関係は式(3-10)になる。

$$\varepsilon_{ij} = \hat{C}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3-10)$$

なお、構成式(3-8)と(3-10)は、式(3-11)と(3-12)のように記述することもできる。

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3-11)$$

$$\sigma_{ij} = \hat{D}_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (3-12)$$

剛性テンソル $D_{ijkl}$ に関しても、式(3-9)と同様の式(3-13)の操作ができる。

$$\hat{D}_{mnpq} = D_{ijkl} l_{im} l_{jn} l_{kp} l_{lq} \quad (3-13)$$

このとき、 $D_{ijkl}$ は下記の対称性を持つ。

$$D_{ijkl} = D_{jikl} = D_{ijlk} = D_{klij}$$

なお、 $D_{ijkl}$ の成分は、式(3-7)の異方性パラメータ $\alpha$ を用いると、下記で表される。

$$\begin{aligned} D_{XXXX} = D_{YYYY} &= \frac{\alpha^2(1-\alpha\nu_z)E_z}{(1+\alpha\nu_z)(1-2\alpha\nu_z)}, D_{ZZZZ} = \frac{(1-\alpha\nu_z)E_z}{(1+\alpha\nu_z)(1-2\alpha\nu_z)} \\ D_{XXYY} &= \frac{\alpha^3\nu_z E_z}{(1+\alpha\nu_z)(1-2\alpha\nu_z)}, D_{XXZZ} = D_{YYZZ} = \frac{\alpha^2\nu_z E_z}{(1+\alpha\nu_z)(1-2\alpha\nu_z)} \\ D_{YZYZ} &= \frac{D_{XYYX}}{\alpha} = \frac{1+\alpha\nu_z}{2\alpha E_z} \end{aligned}$$

この解析によって得られる解を以後、弾性解と称す。

### 3-4. 载荷の条件と主値の評価

载荷の条件に関しては、三軸試験を想定し等方圧密と軸圧縮の条件を設定する。図 3.3 に示すような、従来の三軸試験で行われる载荷条件を設定した。また、図 3.4 のように非要素試験となる中空円筒試験体に関しても、中空ねじり試験を想定した条件を設定した。さらに、この要素を対象とした解析で得たひずみあるいは応力の応答を考察するために主ひずみあるいは主応力を求めた。

### (1). 三軸試験の载荷条件

次に、载荷軸が、主応力軸と一致した図 3.3(a)と主ひずみ軸と一致した図 3.3(b)の2つのケースの载荷条件を設定する。

図 3.3(a)に示す载荷軸が主応力軸と一致した条件では、式(3-14)のようにせん断応力が発生しない条件となる。

$$\sigma_{XY} = \sigma_{ZY} = \sigma_{ZX} = 0 \text{MPa} \quad (3-14)$$

一方、図 3.3(b)に示す载荷軸と主ひずみ軸が一致する条件では、式(3-15)のようにせん断ひずみを生じない条件となる。

$$\varepsilon_{XY} = \varepsilon_{ZY} = \varepsilon_{ZX} = 0 \quad (3-15)$$

いずれのケースでも、三軸試験で与える応力経路として、等方圧密（式(3-16)）と側圧一定条件下の軸圧縮（式(3-17)）の2種類をそれぞれ与える。

$$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = \sigma_c \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \sigma_Z &= \Delta\sigma_a \\ \Delta\sigma_X &= \Delta\sigma_Y = 0 \text{MPa} \end{aligned} \quad (3-17)$$

$\sigma_c$ は等方圧密応力で、 $\Delta\sigma_a$ は軸応力増分であるが、線形弾性体においては、応力増分で計算しても応力自体を与えて計算しても本質的な違いはない。

### (2). ねじりせん断の载荷条件

ねじりせん断の载荷条件では、図 3.4 に示した中空円筒試験体に対し、直交座標系( $X, Y, Z$ )と円筒座標系( $R, \theta, Z$ )を設定する。等方圧密後にねじりせん断する载荷状況を想定して、式(3-18)の条件を設定する。

$$\Delta\sigma_X = \Delta\sigma_Y = 0 \text{MPa} \quad (3-18)$$

加えて、ねじりせん断時の载荷は式(3-19)の条件を設定する。

$$\Delta\varepsilon_{Z\theta} \neq 0 \quad (3-19)$$

図 3.7 の展開のように、ねじりせん断時は円周方向（ $\theta$ 方向）に向かって剛性が等方な面の局所的な傾斜 $\xi_\theta$ がサイン曲線で変化する。この状況を再現するために、(3-19)で円筒座標系のせん断ひずみを設定した後に、下記の式によって直交座標系に変換した後に、式(3-12)に代入する。なお、以後の载荷時の応答の評価は、直交座標系で出力された結果を円筒座標系に変換して行うものとする。

$$\Delta\varepsilon_{Z\theta} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 0 & \cos\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY} & \varepsilon_{ZX} \\ & \varepsilon_Y & \varepsilon_{ZY} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix}$$

### (3). 主ひずみと主応力の評価

主応力軸と载荷軸が一致するケース（図 3.3(a)）では、主ひずみ軸が必ずしも载荷軸と一致せず、図 3.7 のように最大と最小主ひずみ方向が傾斜する。このとき、式(3-10)から得られるひずみテンソル $\varepsilon_{ij}$ を対角化（式(3-20)）して主ひずみ $\varepsilon_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )を求める。

$$\mathbf{e}^T \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

主ひずみ軸の基底ベクトルからなる正規直交行列  $\mathbf{e}$  とひずみテンソル成分で構成される行列  $\boldsymbol{\varepsilon}$  を次式で表す.

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY} & \varepsilon_{ZX} \\ & \varepsilon_Y & \varepsilon_{ZY} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix}$$

一方, 主ひずみ軸と載荷軸が一致しているケース (図 3.3(a)) では, 主応力軸が載荷軸と必ずしも一致せず, 図 3.7 のように最大と最小主応力方向が傾斜する. この場合, 式(3-10) で得られる  $\sigma_{ij}$  の成分を対角化 (式(3-21)) して主応力  $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$  を求める.

$$\mathbf{e}'^T \boldsymbol{\sigma} \mathbf{e}' = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (3-21)$$

主応力軸の基底ベクトルからなる正規直交行列  $\mathbf{e}'$  と応力テンソル成分で構成される行列  $\boldsymbol{\sigma}$  は次式となる.

$$\mathbf{e}' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_X & \sigma_{XY} & \sigma_{ZX} \\ & \sigma_Y & \sigma_{ZY} \\ \text{sym.} & & \sigma_Z \end{pmatrix}$$

### 3-5. 等方圧密時の要素の変形

ここでは, 上述した解析によって得た等方圧密時の要素の変形について説明する.

#### (1). 主応力軸と三軸試験の載荷軸が一致した解析の結果

等方圧密時の変形特性について剛性の等方な面の傾斜  $\xi$  とひずみテンソル  $\varepsilon_{ij}$  の各成分の関係を図 3.8 に示す. 図のプロットは異方性パラメータ  $\alpha$  ごとに示しており,  $\varepsilon_{ij}$  の各成分は  $E_Z/\sigma_c$  で規準化して図の左側に示し, 等方な時 ( $\alpha = 1.0$ ) のひずみテンソル成分  $\varepsilon_{ij, \alpha=1.0} \neq 0$  の場合は, 図の右側に  $\varepsilon_{ij, \alpha=1.0}$  で正規化して示す.  $E_Z$  は異方性主軸方向のヤング率,  $\sigma_c$  は等方圧密応力である. なお  $\varepsilon_{XY}, \varepsilon_{ZX}$  は常にゼロである.

$\alpha = 1.0$  の等方弾性体では, 直ひずみ成分が等しく  $\varepsilon_X = \varepsilon_Y = \varepsilon_Z$  となり, せん断ひずみ  $\varepsilon_{ZY}$  は発生しない. 一方, 異方性をもつ  $\alpha \neq 1.0$  では, 常に剛性が等方な面内に含まれる  $X$  軸方向の直ひずみ  $\varepsilon_X$  は, 剛性の等方な面の傾斜  $\xi$  に依らず一定値であるが,  $Y$  軸と  $Z$  軸方向の直ひずみ  $\varepsilon_Y$  と  $\varepsilon_Z$  は,  $\xi$  の変化に伴って変化する.  $\varepsilon_Y$  は  $\xi$  が大きくなるほど,  $\alpha < 1.0$  のケースでは小さく,  $1.0 < \alpha$  のケース大きくなり,  $\varepsilon_Z$  は  $\varepsilon_Y$  と逆の変化を示す. また,  $Y$  方向のせん断ひずみ  $\varepsilon_{ZY}$  は,  $\xi = 0^\circ, 90^\circ$  では  $Y$  軸および  $Z$  軸方向が主ひずみ軸になるため  $\varepsilon_{ZY} = 0$  となるが,  $0^\circ < \xi < 90^\circ$  では, 主ひずみ方向が  $\xi$  回転し,  $Y$  軸および  $Z$  軸が主ひずみ軸とならないため非零で変化する. なお  $\xi = 45^\circ$  のとき,  $1.0 < \alpha$  のケースでは  $\varepsilon_{ZY}$  が最大値,  $\alpha < 1.0$  のケースでは  $\varepsilon_{ZY}$  が最小値をとる.

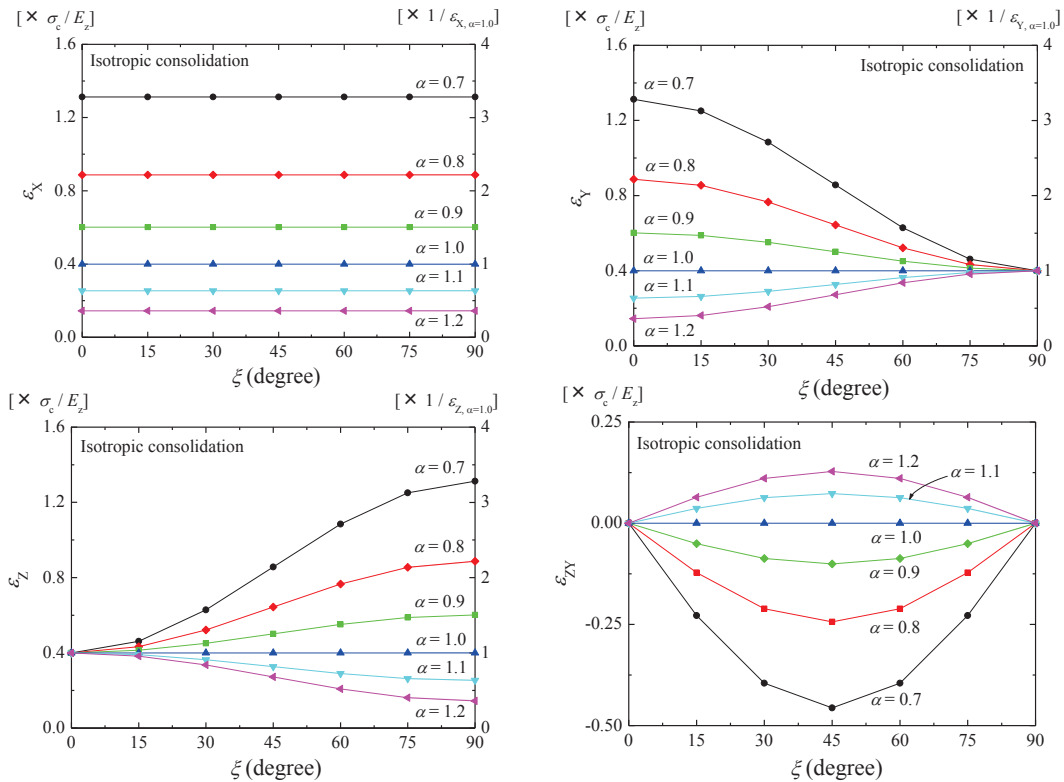


図 3.8 等方圧密時の  $\xi$  と  $\varepsilon_{ij}$  の関係 (载荷軸 = 主応力軸)

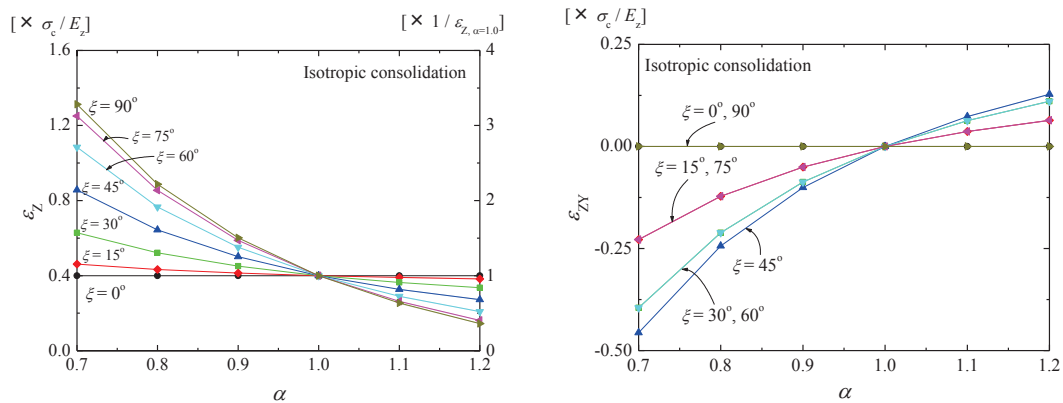


図 3.9 等方圧密時の  $\alpha$  と  $\varepsilon_z$  および  $\varepsilon_{ZY}$  関係 (载荷軸 = 主応力軸)

このように、異方性を持つ岩盤 ( $\alpha \neq 1.0$ ) では、载荷軸 (Z 軸) 方向が、剛性が等方な面と直交する方向になるとき以外は、通常の三軸試験が想定するような载荷軸を対称軸とする変形の軸対称性が満たされない。

次に、 $\alpha$  と  $\varepsilon_{ij}$  の関係を図 3.9 に示す。直ひずみ ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ ) は  $\alpha$  が大きくなるほど小さい値をとる。これは  $\alpha$  が大きくなるに連れて  $E_x$  が大きくなるためである。 $\varepsilon_{ZY}$  に関しては、 $\alpha < 1.0$  のときは Y 軸方向にせん断 ( $\varepsilon_{ZY} < 0$ ) しており、逆に  $1.0 < \alpha$  のときは -Y 軸方向にせ

ん断 ( $0 < \varepsilon_{ZY}$ ) する. こういった異方性材料に固有の性質から, 傾斜方向 ( $Y$  軸方向) や剛性が等方な面と直交方向 ( $z'$  軸方向) の剛性の大小が特定できる.

ここでは, 通常の三軸試験において排水量などから計測される体積ひずみ  $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  についても調べている. 等方圧密時の  $\xi$  と  $\varepsilon_v$  の関係を図 3.10 に示す.  $\varepsilon_v$  も図の右側に等方な時 ( $\alpha = 1.0$ ) の体積ひずみ  $\varepsilon_{v, \alpha=1.0}$  で正規化して示す.  $\varepsilon_v$  は  $\varepsilon_x$  同様に  $\alpha$  だけに依存し,  $\xi$  に依らない. 等方圧密時の  $\alpha$  と主ひずみ  $\varepsilon_i (i = 1, 2, 3)$  の関係を図 3.11 に示す.  $\varepsilon_i$  も図の右側に等方な時 ( $\alpha = 1.0$ ) の主ひずみ  $\varepsilon_{i, \alpha=1.0}$  で正規化して示す.  $\varepsilon_1$  は  $\alpha < 1.0$  において  $\alpha$  に依存し,  $1.0 < \alpha$  では  $\alpha$  に依存しない.  $\varepsilon_2$  と  $\varepsilon_3$  は逆に,  $\alpha < 1.0$  において  $\alpha$  に依存せず,  $1.0 < \alpha$  では  $\alpha$  に依存する. ここでは, 直交座標系 ( $X, Y, Z$ ) で等方的に応力を与えているため,  $C_{ijkl}$  の  $X$  軸に関する座標変換を行っても,  $\varepsilon_i$  は  $\xi$  に依らない.

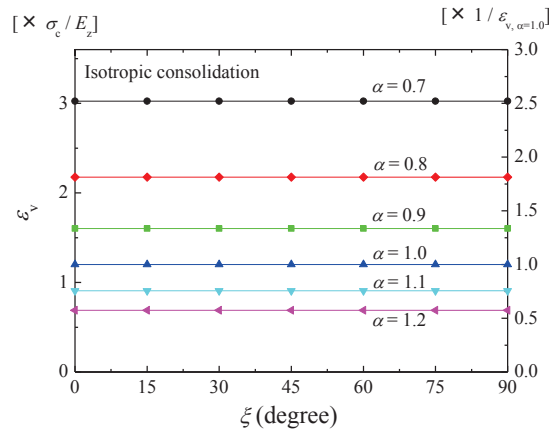


図 3.10 等方圧密時の  $\xi$  と  $\varepsilon_v$  の関係 (载荷軸 = 主応力軸)

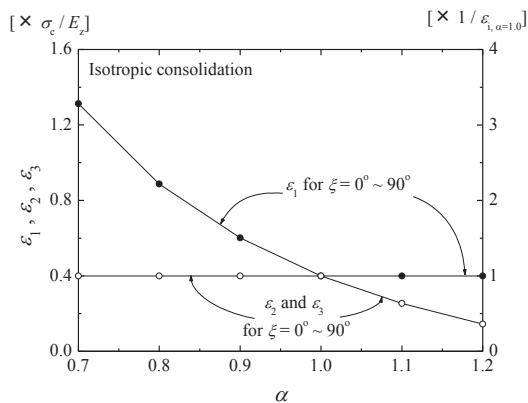


図 3.11 等方圧密時の  $\alpha$  と主ひずみテンソル  $\varepsilon_i$  の関係 (载荷軸 = 主応力軸)

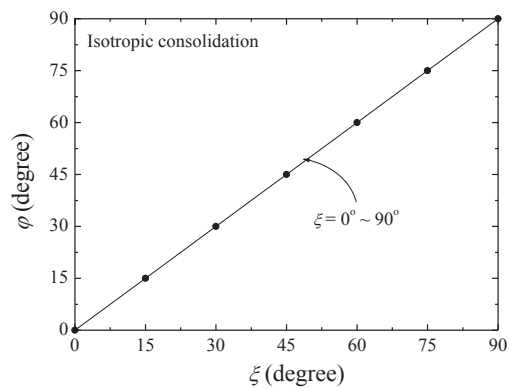
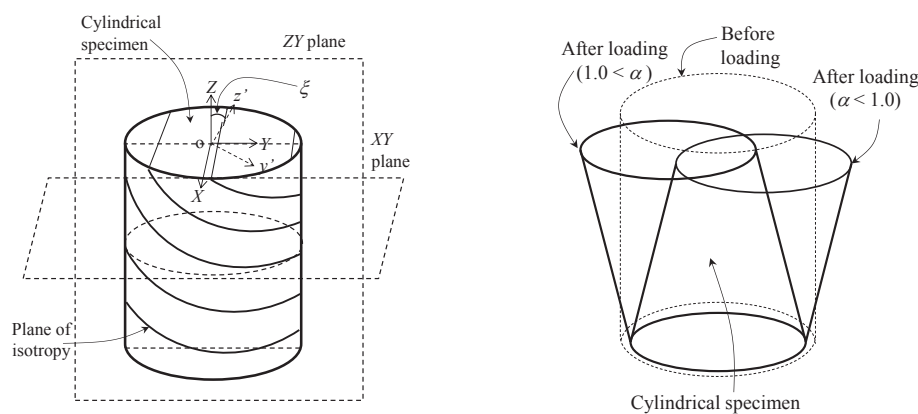


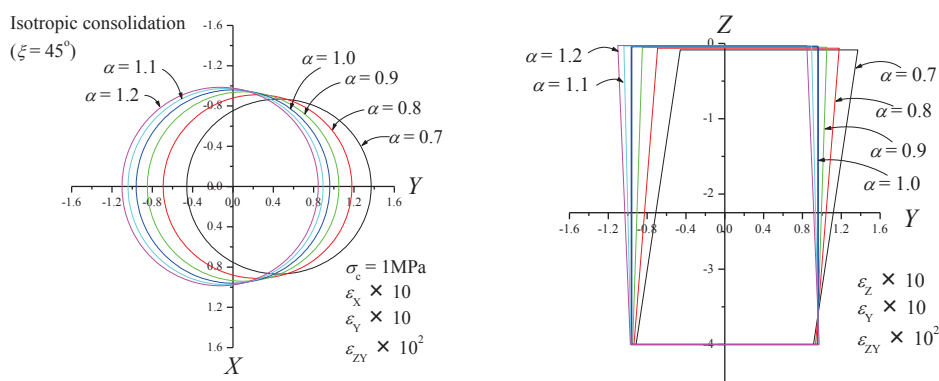
図 3.12 等方圧密時の  $\xi$  と  $\varphi$  の関係 (载荷軸 = 主応力軸)

$\xi$ と主ひずみ軸と载荷軸のなす角度 $\varphi$ の関係を図 3.12 に示す. 図 3.3(a)において, 等方圧密の条件では, 主ひずみ方向と異方性の主軸が一致または直交する. 通常の三軸試験では軸対称な変形を想定することが多く, 一般的には破壊に至る近傍で明確にせん断面が形成される状況になってはじめて軸対称条件が満足されないと考えられるが, 本解析の結果からは, 弾性変形が卓越する等方圧密時においても軸対称性が全く保障されないことを意味する.

最後に, 等方圧密時の面内等方弾性体の円柱供試体の変形を図 3.13 にまとめる. 図 3.13(a)は, 円柱供試体の変形の模式図で, 図 3.13(b)は $\alpha$ の変化に着目して整理したものである.  $\alpha$ と $\xi$ の変化に伴って, 面内等方弾性体の円柱供試体は, 等方な供試体の軸対称な変形と異なり, 傾斜方向(Y軸方向)にせん断する非三軸状態の変形を示す. ここでは, 直ひずみ( $\varepsilon_X, \varepsilon_Z$ )を10倍,  $\varepsilon_{ZY}$ を100倍に拡大している.



(a) 円柱供試体の変形の模式図



(b)  $\xi = 45^\circ$ の解析結果 (左: XY面, 右: ZY面)

図 3.13 等方圧密時の円柱供試体の変形 (载荷軸 = 主応力軸)

## (2). 主ひずみ軸と三軸試験の载荷軸が一致した解析の結果

等方圧密時の変形特性について、剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ とひずみテンソルの各成分 $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = X, Y, Z$ )および体積ひずみ $\varepsilon_v$ の関係を図 3.14 に示す. (1)と同様に、図のプロットは異方性パラメータ $\alpha$ 毎に表しており、 $\varepsilon_{ij}$ の各成分は $E_z/\sigma_c$ で規準化した. また、 $\varepsilon_{ij}$ は図の右側に等方な時 ( $\alpha=1.0$ ) のひずみテンソル成分 $\varepsilon_{ij, \alpha=1.0} \neq 0$  で正規化して示す. なお、载荷の条件式 (3-15)により、 $\varepsilon_{XY} = \varepsilon_{ZY} = \varepsilon_{ZX} = 0$  である. すべてのひずみテンソルの成分で、(1)での解析結果と同様の傾向を示すが、相違点は、座標変換軸である  $X$  軸方向の直ひずみ $\varepsilon_X$  と、体積ひずみ $\varepsilon_v$  が $\xi$ に依存して変化することである. これは式(11)の条件で、せん断ひずみの成分をゼロにすることで、主応力方向が回転しているためである.

この条件下では、図 3.15 に示すように、せん断応力 $\sigma_{ZY}$ が発生する. 図の $\sigma_{ZY}$ は等方圧密応力 $\sigma_c$ で除して示した. 弾性パラメータが等方 ( $\alpha=1.0$ ) なときは、4章で示したせん断ひずみ $\varepsilon_{ZY}$ と同様で、 $\sigma_{ZY}$ は発生しない. また、 $\xi = 0, 90^\circ$ のときには、载荷軸 ( $Z$ 軸) と異方性主軸 ( $z'$ 軸) が一致、または直交するため、同様に $\sigma_{ZY}$ は発生しない. それ以外のケースでは、 $\xi = 45^\circ$ の位置において、 $\alpha < 1.0$ のケースで最小値を、逆に  $1.0 < \alpha$ のケースでは最大値をとる.  $\alpha = 0.7, \xi = 45^\circ$ のときに最大で $\sigma_c$ の0.5倍の $\sigma_{ZY}$ が  $Y$ 軸方向に発生しており、

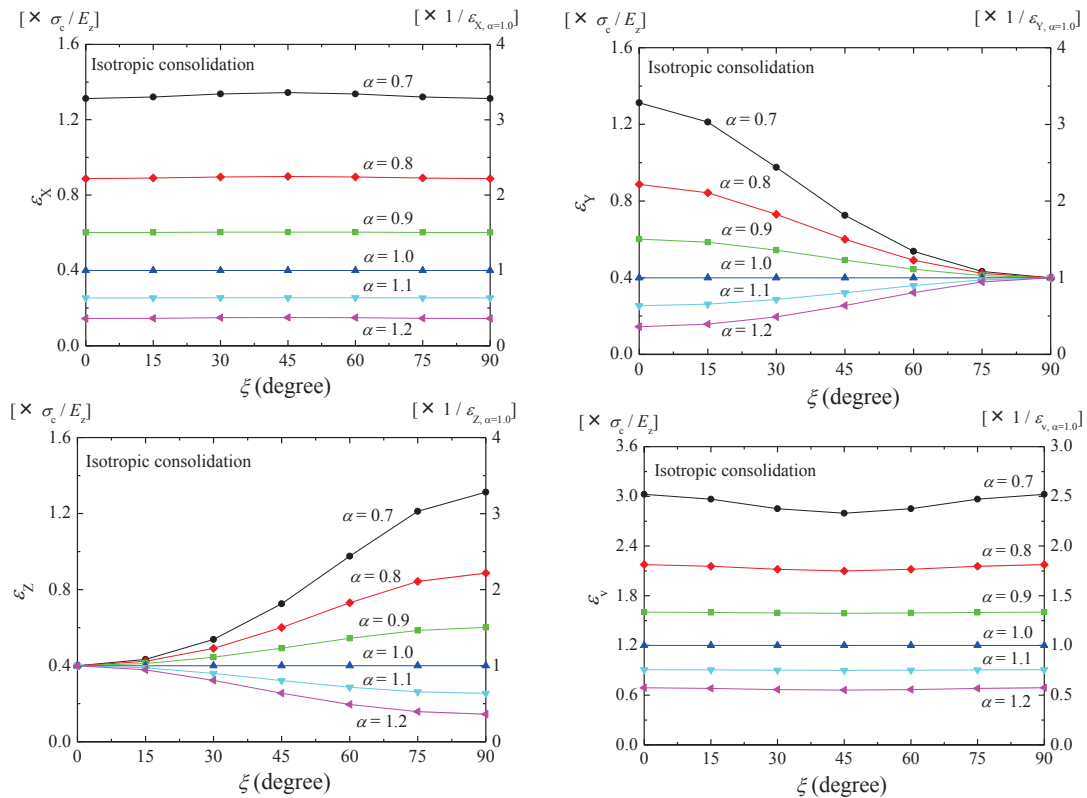


図 3.14 等方圧密時の $\xi$ と $\varepsilon_{ij}$ および $\varepsilon_v$ の関係 (载荷軸 = 主ひずみ軸)



非常に大きい値であると言える。通常の三軸試験において、軸対称条件を満たさない異方性材料を載荷する場合には、このように非常に大きい応力が載荷軸に直交する方向に働くことがある。そのため、三軸セルの載荷ロッドに過度の負担がかかる可能性がある。また、この異方性に起因するせん断応力を計測する機構を導入できれば、異方性の特定につながる可能性もある。なお、この解析では $\sigma_{ZX}$ と $\sigma_{XY}$ は常にゼロであった。

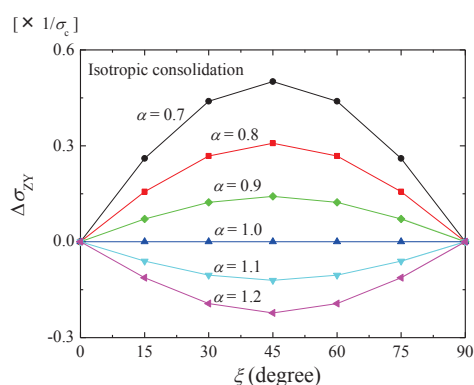


図 3.15 等方圧密時の $\xi$ と $\sigma_{ZY}$ の関係 (載荷軸 = 主ひずみ軸)

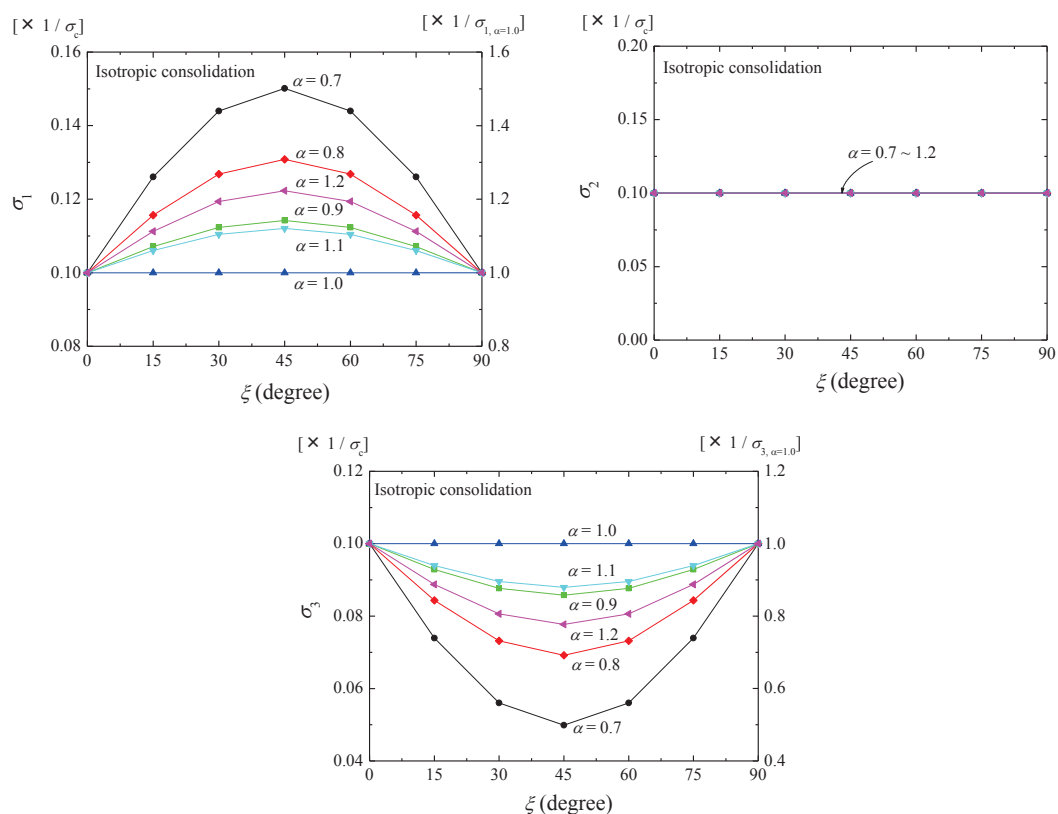


図 3.16 等方圧密時の $\xi$ と $\sigma$ の関係 (載荷軸 = 主ひずみ軸)

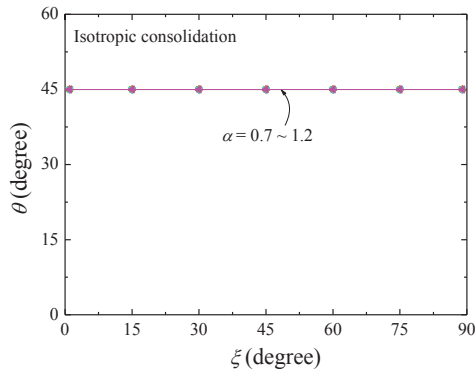


図 3.17 等方圧密時の $\xi$ と $\theta$ の関係(载荷軸 = 主ひずみ軸)

ところで、この主ひずみ軸と载荷軸が一致したケース(b)では、主応力軸が载荷軸と非共軸になると想定していた。そこで、剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ と主応力 $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$ の関係を図 3.16 に調べた。弾性パラメータが等方なとき ( $\alpha = 1.0$ ) は、せん断応力 $\sigma_{ZY}$ が発生しておらず、当然に $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ となり、 $\xi$  に対し一定値をとる。 $\sigma_2$  は $\sigma_{ZY}$ と同様の傾向を示し、 $\sigma_3$  は、 $\xi = 45^\circ$  の位置において、 $\alpha < 1.0$  のケースで最大値を、 $1.0 < \alpha$  のケースでは最小値をとる。 $\sigma_1$  は $\alpha$ と $\xi$  に対し常に一定値である。これは、図 3.7 で $\sigma_1$  の方向と座標変換軸である X 軸が共軸なためである。 $\sigma_1$  と $\sigma_2$  に関して、異方性を持つ場合 ( $\alpha \neq 1.0$ ) は、 $\sigma_2$  は $\sigma_{ZY}$ と同様の傾向を示し、 $\sigma_3$  は、 $\xi = 45^\circ$  の位置において、 $\alpha < 1.0$  のケースで最大値を、 $1.0 < \alpha$  のケースでは最小値をとる。また、 $\sigma_3$  は $\xi = 0, 90^\circ$  以外のケースで $\alpha$  が大きくなるほど大きい値を示す傾向がある。 $\xi = 0^\circ$  と $90^\circ$  においては、 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  となるが、これは 3-5 (1) で考察した、Z 軸と Y 軸が、それぞれ異方性の主軸 (z' 軸) と一致するためである。

主応力方向についても図 3.17 に $\xi$ と主応力方向と直交座標系のなす角度 $\theta$ の関係を調査しており、 $\theta$  は $\xi = 0, 90^\circ$  のときに $\varphi = 0^\circ$ 、それ以外で $\varphi = 45^\circ$  である。これは、等方圧密後にねじりせん断を行った場合の応力経路と同様である。異方性岩盤を対象として、通常の三軸試験を行う場合には、等方圧密時においても、主応力方向が回転し、軸対称性を満たさなくなることに留意する必要がある。

### 3-6. 軸圧縮時の要素の変形

ここでは、上述した解析によって得た軸圧縮時の要素の変形について説明する。

#### (1). 主応力軸と三軸試験の载荷軸が一致した解析の結果

軸圧縮時の変形について、剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ とひずみテンソル増分 $\Delta\varepsilon_{ij}$  の各成分の関係を図 3.18 に示す。図のプロットは、3-5 (1) と同様に、異方性パラメータ $\alpha$ 毎に表しており、 $\Delta\varepsilon_{ij}$  の各成分は $E_z/\sigma_c$  で規準化した。 $\varepsilon_{ij}$  は図の右側に等方な時 ( $\alpha = 1.0$ ) のひずみテンソル成分 $\varepsilon_{ij, \alpha=1.0} \neq 0$  で正規化して示す。なお $\Delta\varepsilon_{XY}, \Delta\varepsilon_{ZX}$  は常にゼロで、以後、ひずみテンソル増分の各成分は圧縮方向に正で表す。弾性パラメータが等方なとき ( $\alpha = 1.0$ ) は、等

方弾性体の構成関係から計算される軸載荷時の応答のひずみを考えたときに当然のごとく、載荷軸（Z軸）方向の直ひずみ増分は $\Delta\epsilon_Z = 1.0 \times \Delta\sigma_a / E_z$ となり、X軸とY軸方向の直ひずみ増分が等しく、 $\Delta\epsilon_X = \Delta\epsilon_Y = -\nu_z \times \Delta\sigma_a / E_z$ となる。なお、せん断ひずみ増分 $\epsilon_{ZY}$ は発生せず、 $\nu_z = 0.3$ である。それに対し、異方性を持つ場合（ $\alpha \neq 1.0$ ）は、等方圧密時と異なり、全てのひずみテンソル増分が $\xi$ の変化に対して非一様に変化する。 $\Delta\epsilon_X$ は $\alpha < 1.0$ のケースで $\xi$ が大きくなるほど、伸長方向に大きな値を示し、 $1.0 < \alpha$ のケースで $\xi$ が大きくなるほど小さな値を示す。 $\Delta\epsilon_Y$ は $\xi = 45^\circ$ で、伸長方向に最小値をとる傾向がある。 $\Delta\epsilon_Z$ は $\alpha < 1.0$ のケースで $\xi$ が大きくなるほど、圧縮方向に大きい値を取り、逆に $1.0 < \alpha$ のケースで $\xi$ が大きくなるほど小さい値を示す。 $\Delta\epsilon_{ZY}$ に関しては傾向が等方圧密時と同様で、これらのひずみテンソル増分における $\xi$ との関係は3-5で考察したことと同じことが言える。

異方的に発生するひずみ増分の程度を等方の場合と比較すると、 $\Delta\epsilon_X$ は $\alpha = 0.7$ 、 $\xi = 90^\circ$ のケースの値は、 $\alpha = 1.0$ のケースの値の、1.4倍を伸長方向にとる。 $\Delta\epsilon_Y$ は、 $\alpha = 0.7$ 、 $\xi = 45^\circ$ のケースの値は、 $\alpha = 1.0$ のケースの値の0.8倍の小さい値を伸長方向にとる。 $\Delta\epsilon_Z$ は $\xi = 0^\circ$ 、 $\alpha = 0.7$ のケースの値は、 $\alpha = 1.0$ のケース値の2.0倍の大きい値をとる。 $\Delta\epsilon_{ZY}$ は、 $\alpha = 0.7$ 、 $\xi = 45^\circ$ のときに最大で軸ひずみ増分 $\Delta\epsilon_Z$ の約0.2倍の $\epsilon_{ZY}$ がY軸方向に発生している。

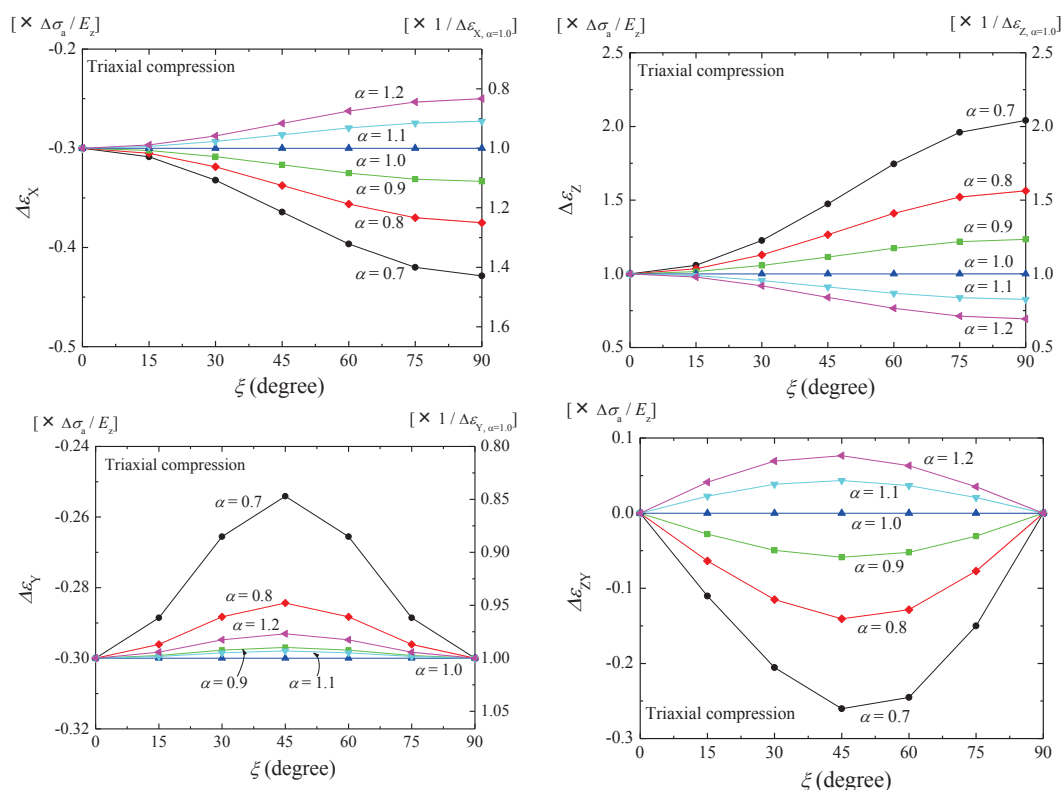


図 3.18 軸圧縮時の $\xi$ と $\Delta\epsilon_{ij}$ の関係（載荷軸 = 主応力軸）

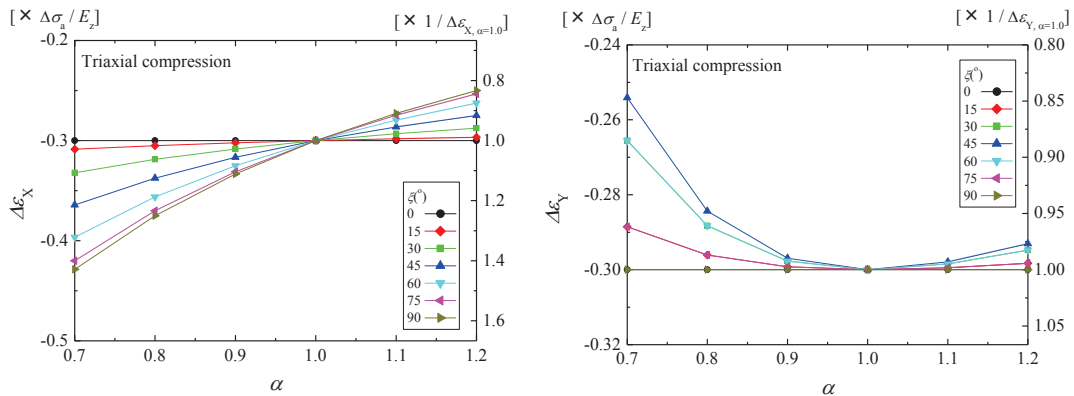


図 3.19 軸圧縮時の $\alpha$ と $\Delta\epsilon_X$ および $\Delta\epsilon_Y$ の関係（载荷軸 = 主応力軸）

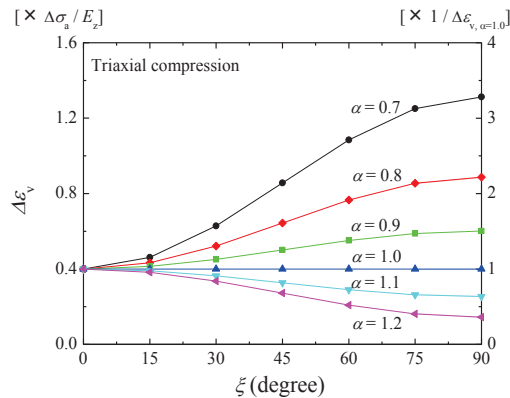


図 3.20 軸圧縮時の $\xi$ と $\epsilon_v$ の関係（载荷軸 = 主応力軸）

次に、 $\alpha$ と $\Delta\epsilon_{ij}$ の関係を見ると、図 3.19 に示すように、 $\Delta\epsilon_X$ は $\alpha$ が大きくなるほど伸長方向に小さい値を取り、 $\Delta\epsilon_Y$ は、 $\alpha=1.0$ のケースの値を最大値として、 $\xi=45^\circ$ のときに伸長方向に最大値を取る傾向がある。なお、 $\Delta\epsilon_Y$ は、 $\xi=90^\circ$ のときも、 $\alpha$ に依らず一定値となるが、これも 3-5 での議論と同様で、このとき、 $z$ 軸と  $Y$ 軸が一致するためである。体積ひずみ増分 $\Delta\epsilon_v$ と $\alpha$ および $\xi$ の関係を図 3.20 に示す。 $\alpha$ との関係と $\xi$ との関係の両方で $\Delta\epsilon_z$ と同様の傾向を示している。

主ひずみ増分 $\epsilon_i$  ( $i=1, 2, 3$ )と $\alpha$ および $\xi$ の関係を図 3.21 に示す。 $\Delta\epsilon_i$  ( $i=1, 2, 3$ )はそれぞれ $\Delta\epsilon_1$ が $\Delta\epsilon_X$ 、 $\Delta\epsilon_2$ が $\Delta\epsilon_Y$ 、 $\Delta\epsilon_3$ が $\Delta\epsilon_Z$ と同様の傾向を示す。

主ひずみ方向と直交座標系のなす角度の増分 $\Delta\varphi$ と $\alpha$ および $\xi$ の関係を図 3.22 に示す。 $\Delta\varphi$ の最大値は $8.4^\circ$ あった。 $\xi=0^\circ$ と $90^\circ$ のときで $\Delta\varphi=0^\circ$ である。 $\alpha=1.0$ に近づくに連れて $\Delta\varphi$ は小さくなるが、 $\alpha=1.0$ から離れ、異方性が大きくなるに連れて $\Delta\varphi$ は増加する。 $\Delta\varphi$ と $\xi$ の関係は $\xi=45^\circ$ で最大値をとる傾向がある。このように、等方圧密時と同様に弾性変形が卓越する初期せん断時においても、軸対称性が満足されない。

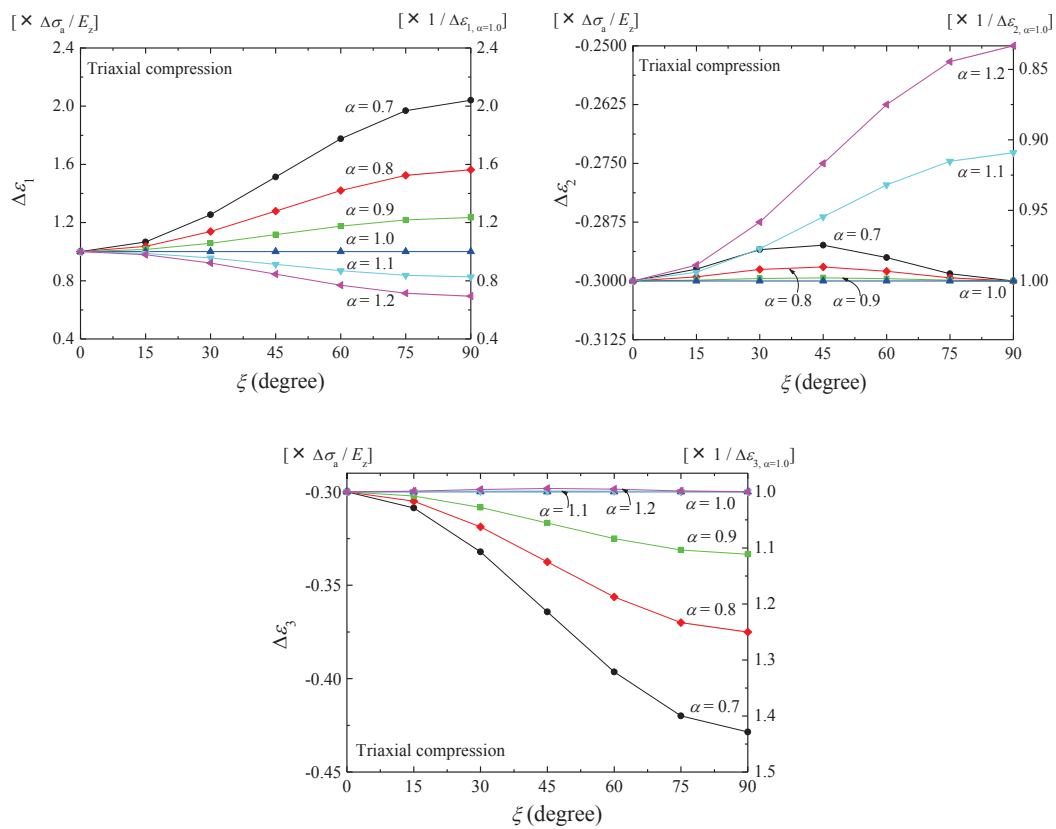


図 3.21 軸圧縮時の $\xi$ と $\epsilon_i$ の関係(載荷軸 = 主応力軸)

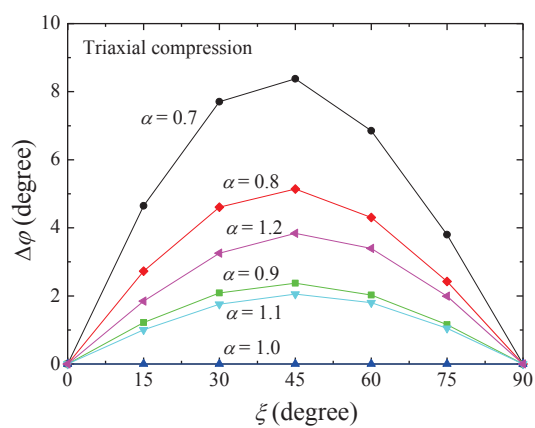
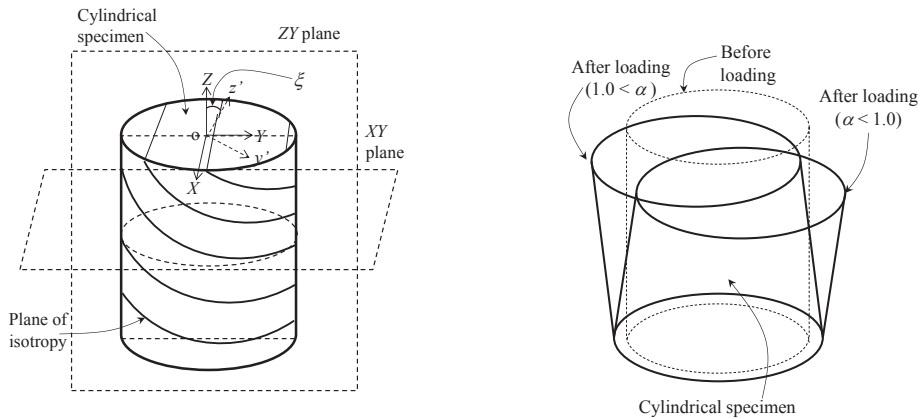
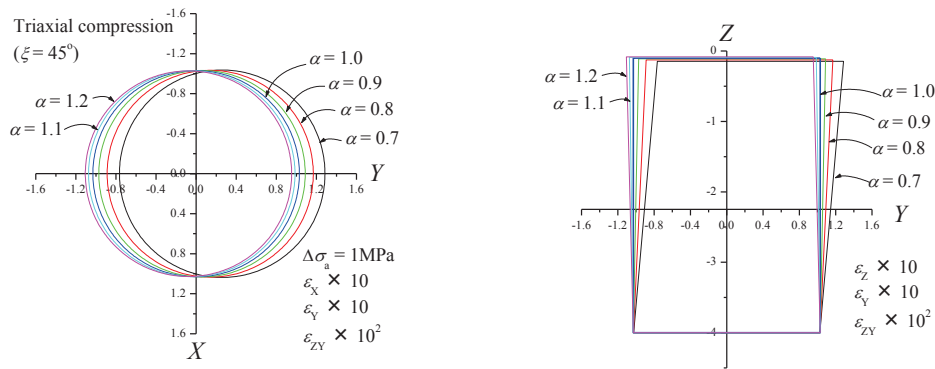


図 3.22 軸圧縮時の $\xi$ と $\phi$ の関係(載荷軸 = 主応力軸)



(a) 円柱供試体の変形の模式図



(b)  $\xi = 45^\circ$  の解析結果 (左: XY 面, 右: ZY 面)

図 3.23 軸圧縮時の円柱供試体の変形 (载荷軸 = 主応力軸)

軸圧縮時の面内等方弾性体の円柱供試体の変形を図 3.23 に示す。軸圧縮時も等方圧密時と同様に、等方な供試体の軸対称な変形と異なり、傾斜方向 ( $Y$  軸方向) にせん断する。ここでも、直ひずみ ( $\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$ ) を 10 倍,  $\varepsilon_{ZY}$  を 100 倍に拡大している。

## (2). 主ひずみ軸と三軸試験の载荷軸が一致した解析の結果

軸圧縮時の変形について、弾性主軸の傾斜  $\xi$  とひずみテンソル増分  $\Delta\varepsilon_{ij}$  ( $i, j = X, Y, Z$ ) および体積ひずみ増分  $\Delta\varepsilon_v$  の関係を図 3.24 に示す。(1)と同様に、図のプロットは異方性パラメータ  $\alpha$  毎に表しており、 $\Delta\varepsilon_{ij}$  の各成分は  $E_z/\Delta\sigma_a$  で規格化した。また、 $\varepsilon_{ij}$  は図の右側に等方な時 ( $\alpha = 1.0$ ) のひずみテンソル成分  $\varepsilon_{ij, \alpha=1.0} \neq 0$  で正規化して示す。なお、ここでも、载荷の条件式(11)により、 $\varepsilon_{XY} = \varepsilon_{ZY} = \varepsilon_{ZX} = 0$  である。

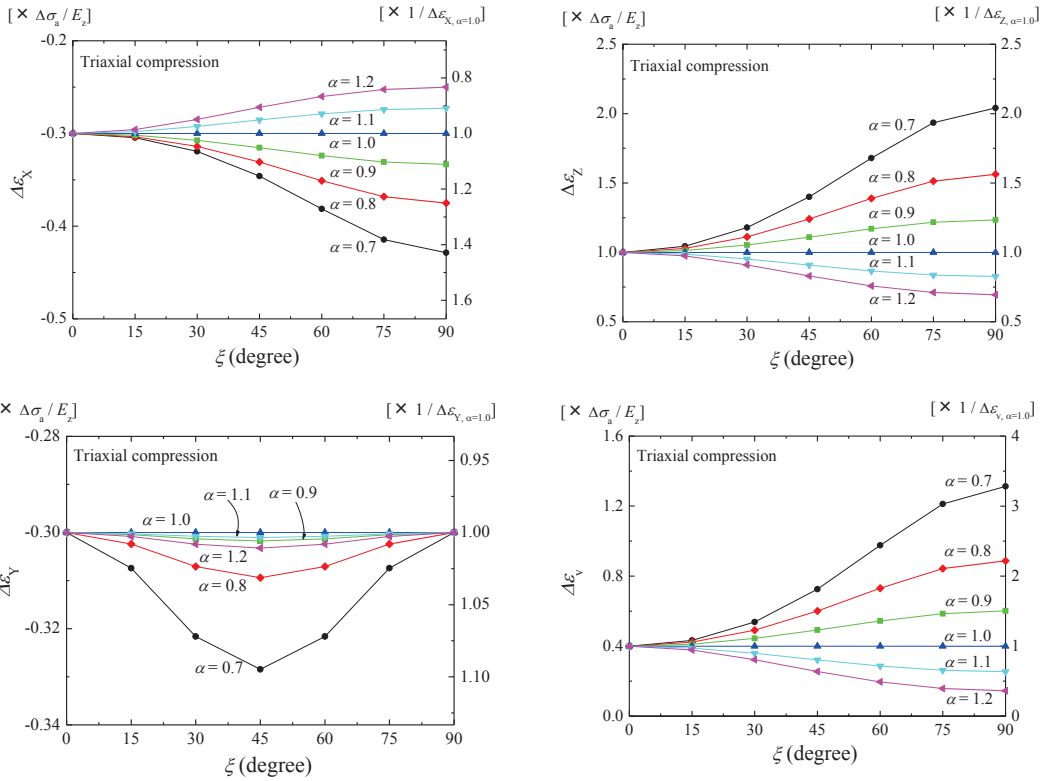


図 3.24 軸圧縮時の $\xi$ と $\Delta \epsilon_{ij}$ および $\Delta \epsilon_v$ の関係(載荷軸 = 主ひずみ軸)

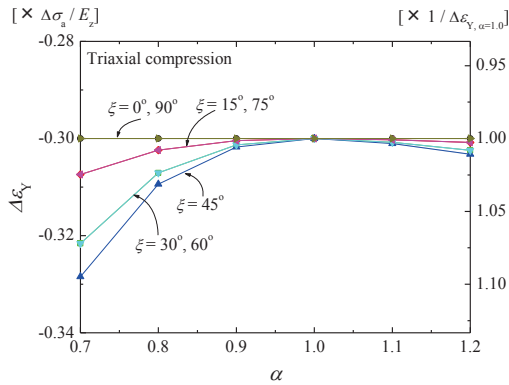


図 3.25 軸圧縮時の $\alpha$ と $\Delta \epsilon_y$ の関係  
(載荷軸 = 主ひずみ軸)

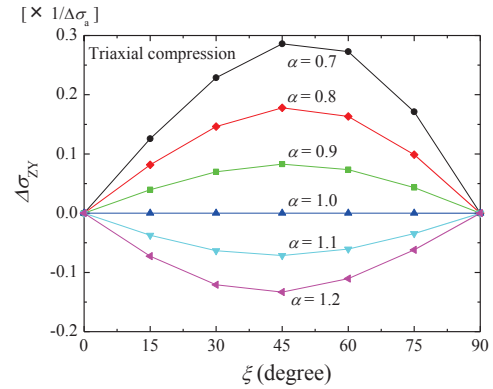


図 3.26 軸圧縮時の $\xi$ と $\Delta \sigma_{ZY}$ の関係  
(載荷軸 = 主ひずみ軸)

$Y$  軸方向の直ひずみ増分 $\Delta \epsilon_y$ を除く、すべてのひずみテンソル増分の成分で、3-6 (1)の解析結果と同様の傾向を示す。 $\Delta \epsilon_y$ に関しては、(1)の結果と異なり、 $\xi = 45^\circ$ で伸長方向に最大値を取り、図 3.25 のように、 $\alpha$ が小さいほど、この傾向は大きい。軸圧縮時も、3-5 の(2)の等方圧密時と同様に、せん断応力が発生しており、 $\xi$ とせん断応力増分 $\Delta \sigma_{ZY}$ の

関係を図 3.26 に示す。ここでは、 $\Delta\sigma_{ZY}$  を  $\Delta\sigma_a$  で除して示す。  $\Delta\sigma_{ZY}$  の傾向に関しては、3-5 の(2)での議論と同様のことが言える。  $\alpha = 0.7$ 、 $\xi = 45^\circ$  のときに最大で  $\Delta\sigma_a$  の 0.28 倍の  $\Delta\sigma_{ZY}$  が  $Y$  軸方向に発生しており、こちらも非常に大きい値である。 また、ここでも、 $\xi$  と主応力増分  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) の関係を図 3.27 に調べている。  $\sigma_1$  は、等方圧密時と同様で、常に一定値で、 $\sigma_2, \sigma_3$  も  $\xi = 0, 90^\circ$  のケースでは  $\Delta\sigma_{ZY}$  が発生しないため一定値である。 異方性を持ち ( $\alpha \neq 1.0$ )  $\xi = 0, 90^\circ$  以外のケースにおいては、 $\sigma_2$  は  $\xi = 45^\circ$  のときに引張方向に最大値を取る関係があり、 $\sigma_3$  は  $\xi = 45^\circ$  のときに、 $\sigma_2$  とは逆の、圧縮方向に最大値を取る関係がある。

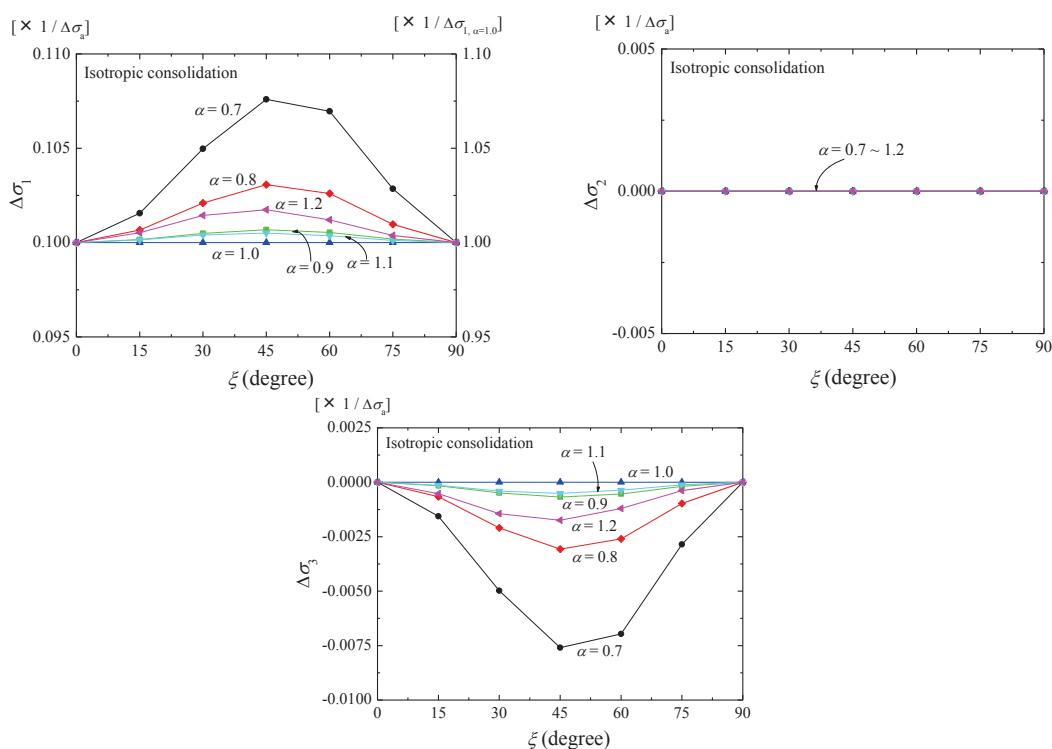


図 3.27 軸圧縮時の  $\sigma_i$  と  $\alpha$  及び  $\xi$  の関係 (载荷軸 = 主ひずみ軸)

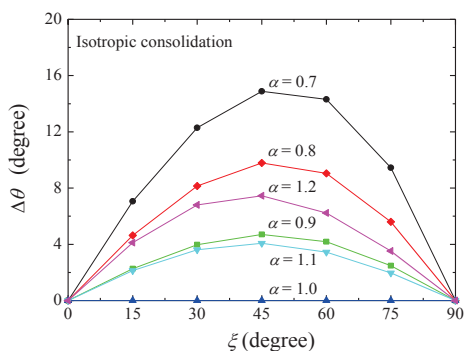


図 3.28 軸圧縮時の  $\xi$  と  $\theta$  の関係 (载荷軸 = 主ひずみ軸)



さらに、このときの主応力方向に関して、剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ と直交座標系のなす角度の増分 $\Delta\theta$ の関係を図 3.28 に示す。主応力方向は $\xi=45^\circ$ において、この検討で取り扱った最大の異方性を持つケース ( $\alpha=0.7$ ) で  $14.9^\circ$  载荷軸から傾斜する。

### 3-7. 三軸試験の FEM 解析

3-5 と 3-6 で計算した三軸試験時の主応力方向と载荷軸が一致したケースについて、FEM による離散化解析を行って、面内等方弾性体の円柱供試体が要素の挙動を示すかどうかを検討し、弾性解の妥当性を検討した。理想的な試験条件を想定して、図 3.29 に三軸試験の FEM 解析の解析領域と境界条件を設定した。これは、一般的な三軸試験を想定して、 $h=0.1\text{m}$ 、 $d=0.05\text{m}$  の円柱供試体の領域で、弾性パラメータは 3-5 と 3-6 と同様の異方性パラメータが  $\alpha=0.7\sim 1.2$  で、 $z'$  方向の剛性 ( $E_{z'}, \nu_{z'}$ ) = (1000MPa, 0.3) を設定した。剛性が等方な面の傾斜は  $\xi=0\sim 90^\circ$  で、有限要素メッシュの節点数と要素数は、2313 と 1920 である。 $\sigma_c$  は等方圧密応力で、 $\Delta\sigma_a$  は軸圧縮応力であり、弾性変形を想定して、 $\sigma_c=1.0\text{MPa}$  と  $\Delta\sigma_a=1.0\text{MPa}$  を設定した。図 3.30 に三軸試験の FEM 解析結果を示す。試験体の応力状態はほとんど一様になり、図 3.30 のようにひずみも一様である。等方圧密時と三軸圧縮時で、要素の解析結果と同様に  $Y$  軸方向にせん断変形している。なお、変形は 100 倍に拡大して表示している。図 3.31 に三軸試験時の FEM 解析結果と 3-5 と 3-6 で算出した弾性解をひずみテンソルの各成分で比較した。FEM 解析によるひずみテンソル成分の値は、全節点で応答したひずみの平均値を用いた。FEM 解析によるひずみテンソル成分  $\varepsilon_{ij,t}$  と弾性解によるひずみテンソル成分  $\varepsilon_{ij,t}$  はほとんど同じ値を示し、誤差は最大で約 0.2% である。

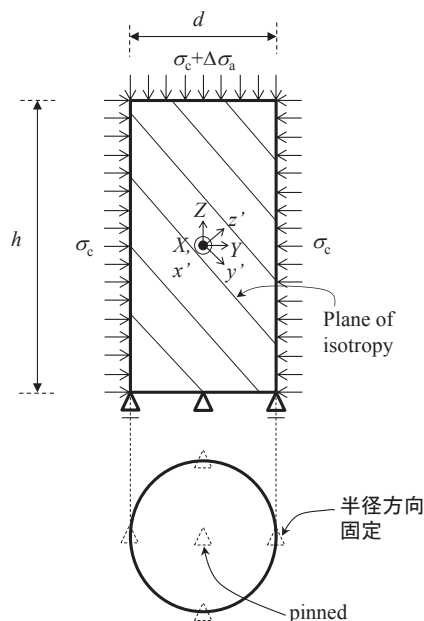


図 3.29 解析領域と境界条件（三軸試験の FEM 解析）

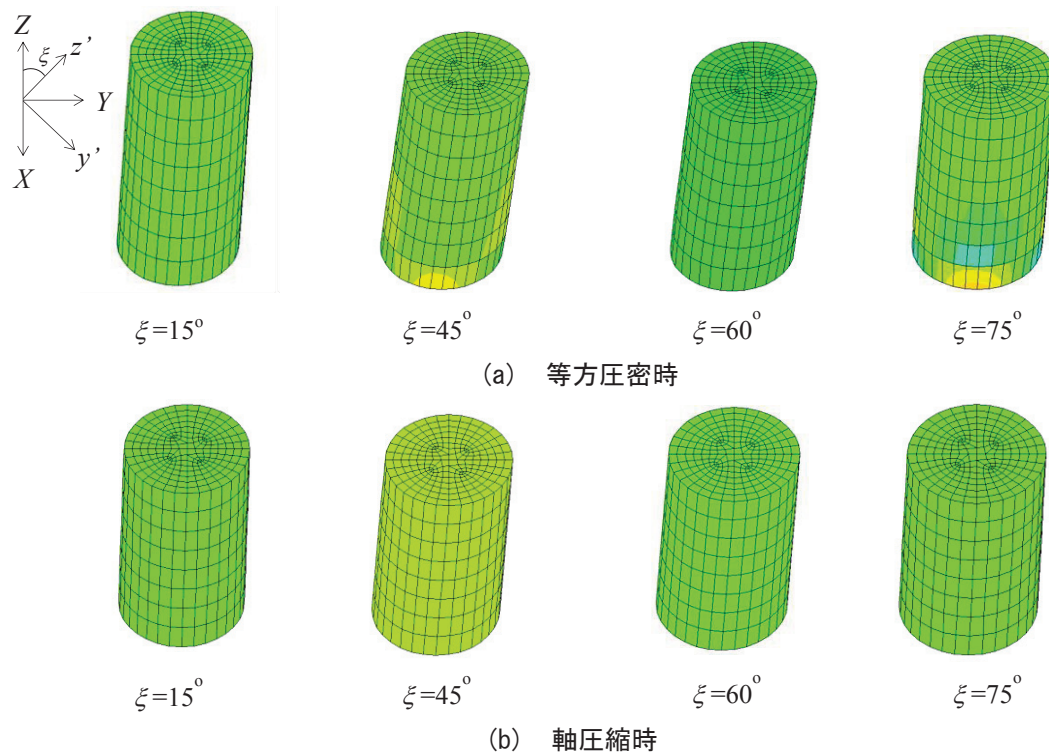


図 3.30 三軸試験時の FEM 解析結果 ( $\varepsilon_Z$  コンター,  $\alpha = 0.7$ )

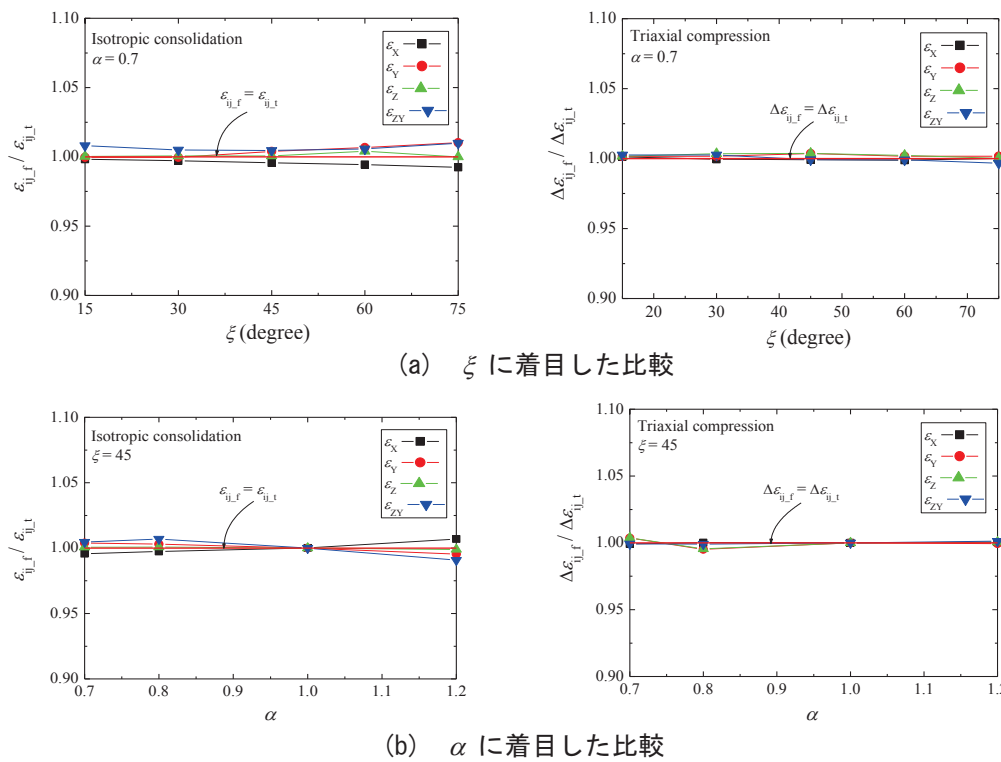


図 3.31 三軸試験時の FEM 解析結果と弾性解の比較

### 3-8. ねじりせん断時の中空円筒試験体の変形

ここでは、上述した解析によって得たねじりせん断時の中空円筒の変形について説明する。異方性パラメータ $\alpha=0.7$ に固定し、剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ の変化に着目して整理した応力テンソル増分 $\Delta\sigma_{ij}$ の各成分の円周方向の分布を図 3.32 に示す。 $\Delta\sigma_{ij}$ は円筒座標系で示し、 $\Delta\varepsilon_{z\theta}$ で正規化した。まず、軸対称条件が成立する $\xi=0^\circ$ のケースでは、中空円筒が要素として挙動するため、 $\Delta\sigma_{z\theta}$ 以外はゼロとなる。 $\xi \neq 0^\circ$ のケースでは、 $\Delta\sigma_{ij}$ の各成分で、波形は同じで、 $\xi$ の変化によって振幅が変化している。いずれの $\Delta\sigma_{ij}$ も、式(9)から予想されるがごとく、正弦・余弦関数あるいはそれらの合成関数となっている。また、 $\Delta\sigma_{z\theta}$ 以外は、ゼロを振幅の中心として分布している。

$\xi=45^\circ$ に固定し、 $\alpha$ の変化に着目して整理した応力テンソル増分 $\Delta\sigma_{ij}$ の各成分の分布を図 3.33 に示す。まず、 $\alpha=1.0$ のケースは、等方弾性体であるため、 $\Delta\sigma_{z\theta}$ 以外はゼロとなる。 $\alpha \neq 1.0$ のケースでは、いずれの $\Delta\sigma_{ij}$ 成分も非一様に分布する。 $\xi$ の変化に着目した整理から得た知見と異なる点は、 $\alpha < 1.0$ の波形と $1.0 < \alpha$ の波形で正負が逆転することである。なお、 $\alpha=0.7$ の分布は図 3.32 と同様である。

次に、中空円筒のねじりせん断においても、主応力と主応力方向を評価するために、図 3.34 の主応力の方向(1, 2, 3)を図のように定め、最大主応力軸（1方向）とZ軸の為す角度を $\Delta\varphi_1$ 、中間主応力軸（2方向）とX軸の為す角度を $\Delta\varphi_2$ とする。

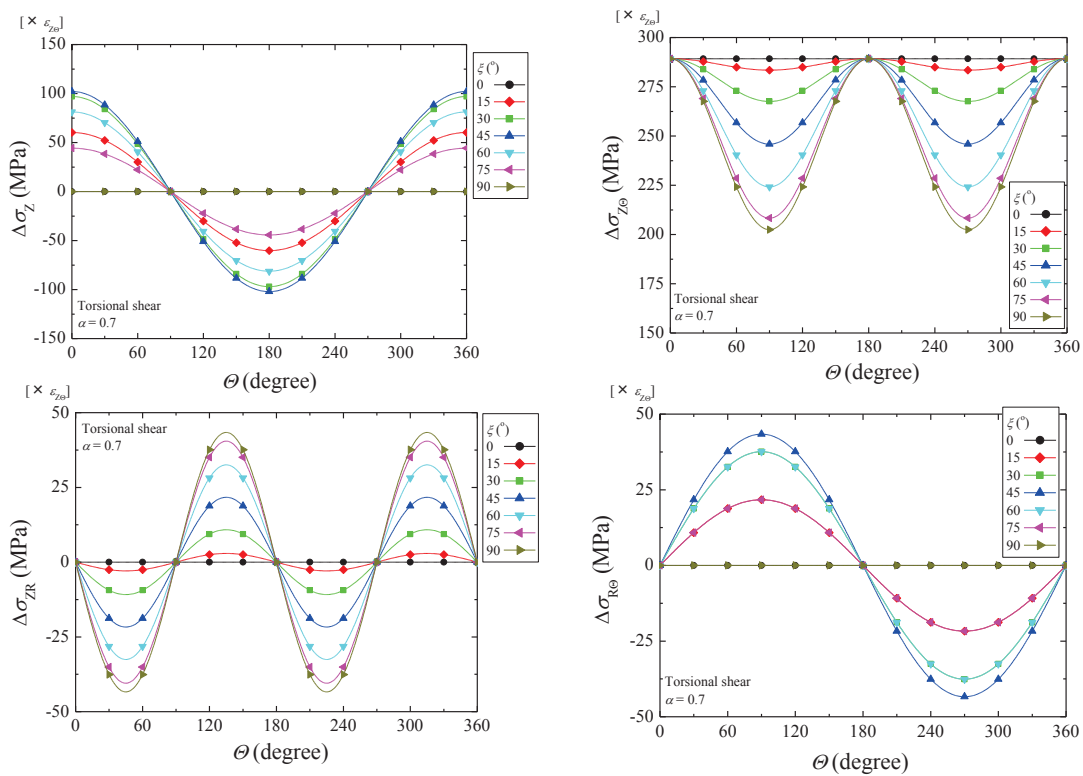


図 3.32  $\Delta\sigma_{ij}$ の分布 ( $\alpha=0.7$ )

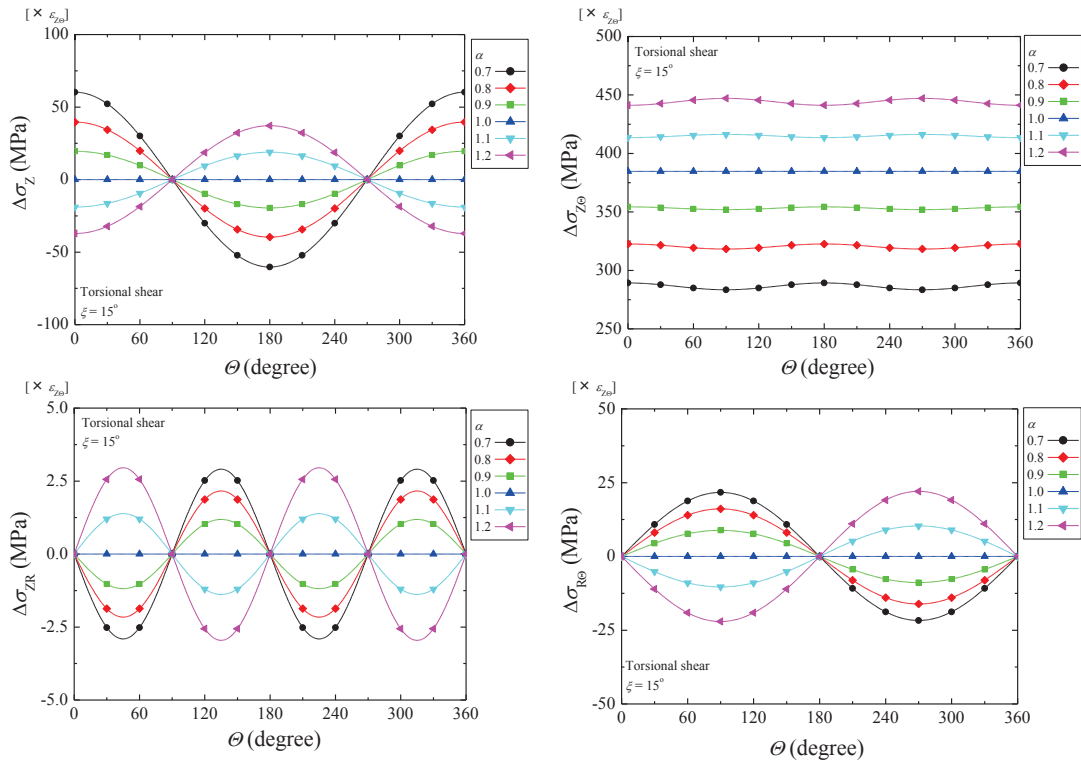


図 3.33  $\Delta\sigma_{ij}$  の分布 ( $\xi = 15^\circ$ )

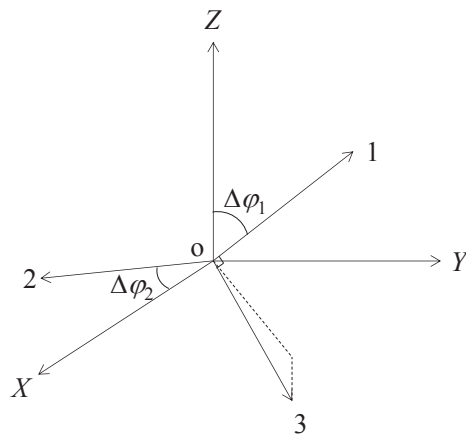


図 3.34 中空円筒のねじりせん断における主ひずみ方向

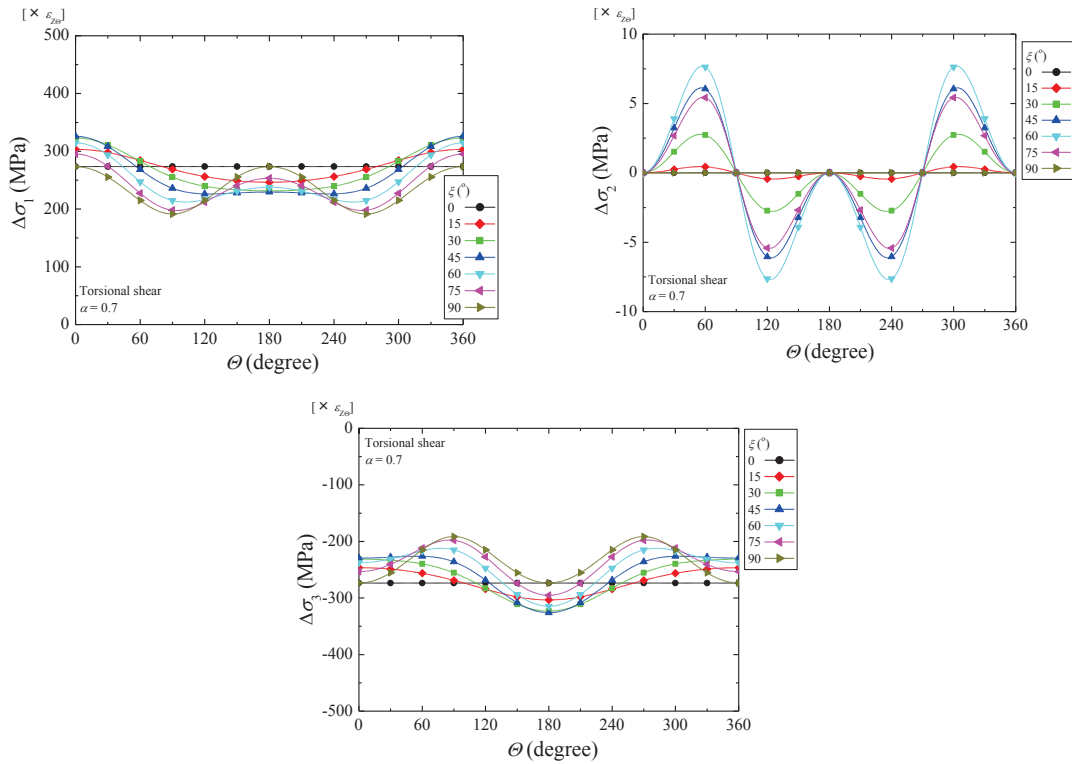


図 3.35  $\Delta\sigma_i$  の分布 ( $\alpha=0.7$ )

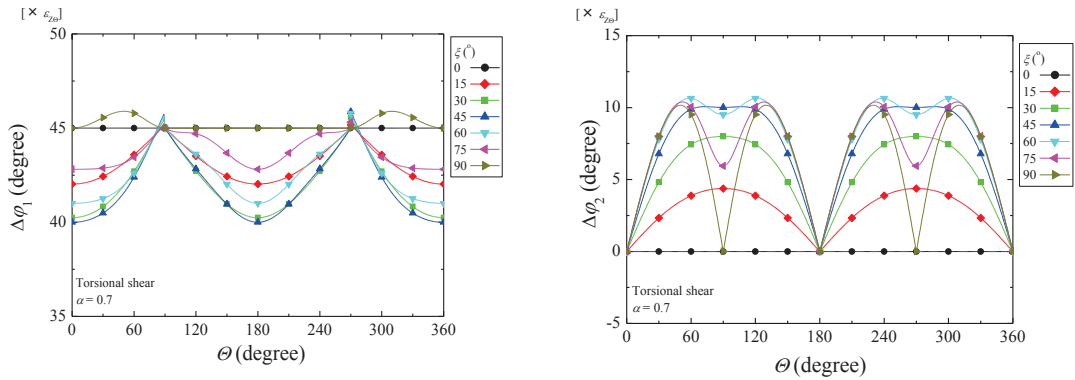


図 3.36  $\Delta\phi_i$  の分布 ( $\alpha=0.7$ )

主応力 $\Delta\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ )の各成分の円周方向の分布を $\xi$ に着目して整理したものを図 3.35 に示す。 $\Delta\sigma_j$ の考察と同様で、軸対称条件が成立する $\xi=0^\circ$ のケースでは、中空円筒が要素として挙動するため、 $\Delta\sigma_1$ は円周方向に一定値で、中間主応力 $\Delta\sigma_2$ は発生しない。 $\xi \neq 0^\circ$ のケースでは、 $\Delta\sigma_i$ の成分が、 $\xi$ の変化によって非一様に変化している。各主応力軸が直交座標系となす角度 $\Delta\phi_i$  ( $i=1, 2, 3$ )の分布を $\xi$ に着目して整理したものを図 3.36 に示す。 $\xi=0^\circ$ のケースでは、最大・最小主応力の方向 $\Delta\phi_1$ は、 $Z$ 軸と $45^\circ$ の傾斜を為し、 $\Delta\phi_2$ の方向は $X$ 軸と共軸で、等方圧密後のねじりせん断と同様になる<sup>17)</sup>。 $\xi \neq 0^\circ$ のケースでは、 $\Delta\phi_1$ は $\xi=0^\circ$ の

ケースとの差異が最大で約  $1^\circ$ 、 $\Delta\varphi_2$  が最大で約  $10^\circ$  を示し、円周方向に非一様に変化する。  
 $\Delta\sigma_i$  ( $i=1, 2, 3$ )の各成分の円周方向の分布を $\alpha$ に着目して整理したものを図 3.37 に示す。  
 $\Delta\varphi_i$  ( $i=1, 2, 3$ )の分布を $\alpha$ に着目して整理したものを図 3.38 に示す。

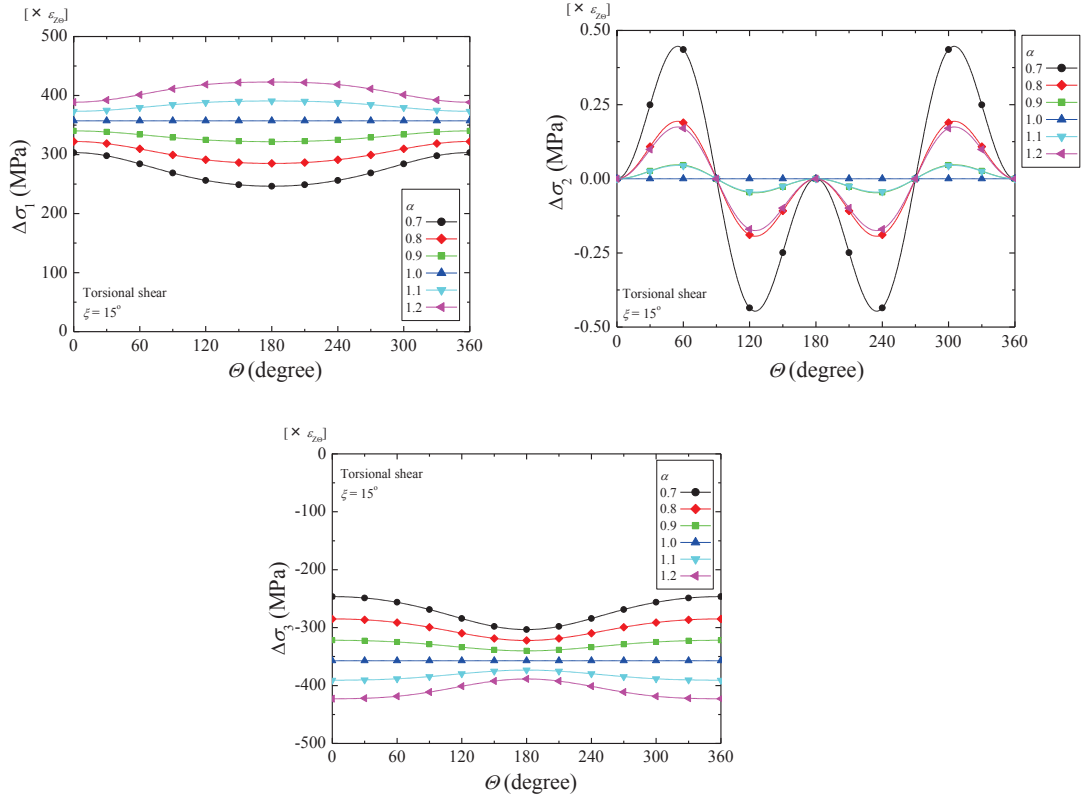


図 3.37  $\Delta\sigma_i$  の分布 ( $\xi = 15^\circ$ )

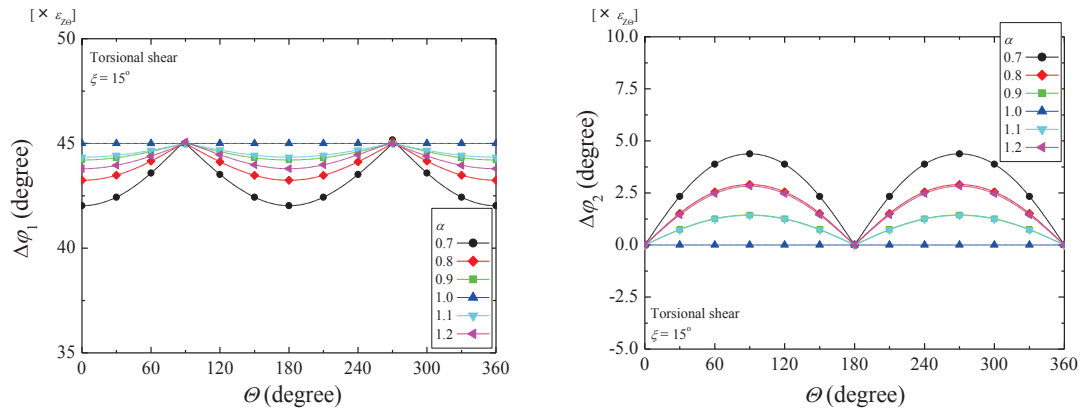


図 3.38  $\Delta\varphi_i$  の分布 ( $\xi = 15^\circ$ )

### 3-9. 中空円筒試験体の形状効果

3-7 で言及した中空円筒の面内等方弾性体の変形特性は、円周方向に異方性の主軸の局所的な傾斜 $\xi_\theta$ が正弦曲線で変化する様子を複数の単位要素に働く応力の関係から調べた。しかし、要素の解析による理論解と実際の中空円筒が同じ応答を示すかは定かでない。そこで、中空円筒の解析領域で面内等方弾性体の3次元のFEM解析を行い、求めた弾性解の形状効果について検討した。

#### (1). 弾性パラメータの設定と解析領域と境界条件および解析ケース

弾性パラメータの設定は、3-3 で軟岩を想定して設定した、異方性パラメータ $\alpha=0.7$ に相当する、 $z'$ 方向とヤング率とポアソン比とせん断剛性率を $(E_z, \nu_z, G_z) = (1000\text{MPa}, 0.3, 289\text{MPa})$ に、 $x'$ 方向 ( $y'$ 方向) に関しては、 $(E_x, \nu_x) = (490\text{MPa}, 0.21)$ と設定した。

中空円筒の解析領域を図 3.39 に示す。図の  $X$  軸を座標変換軸として剛性が等方な面に傾斜をつける。荷重はねじりせん断を行ったねじりせん断時の境界条件は、図 3.40 のように試験体上端面を試験体の軸方向 ( $Z$  方向) に変位固定境界で、下端 1 点のみ 3 方向固定で、他は円周方向と  $Z$  軸方向に固定とした。荷重は変位制御で行い、図のように試験体上端面の円周方向に分布変位を与えて制御した。

供試体の寸法は、外径  $d_o=0.4\text{m}$  で固定し、内径  $d_i=0.1\sim 0.39\text{m}$ 。試験体高さ  $h_s=0.1\sim 1.6\text{m}$  に設定し、異方性の主軸の傾斜 $\xi$ については、 $\xi=45^\circ$  で固定した。FEM 解析のメッシュは各寸法で図 3.41 に示す通りで、要素は 8 節点の直方体ソリッド要素を用いた。節点数と要素数は全ケース共通して 6840 と 5832 である。

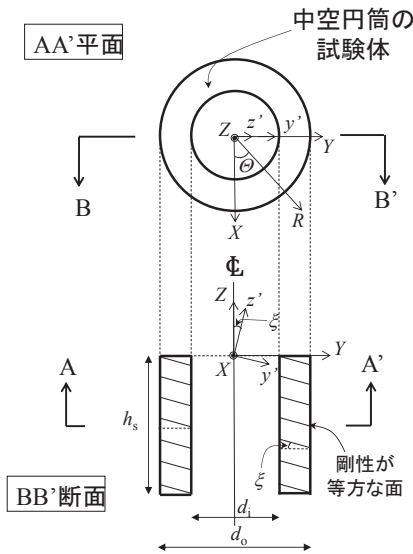


図 3.39 解析領域

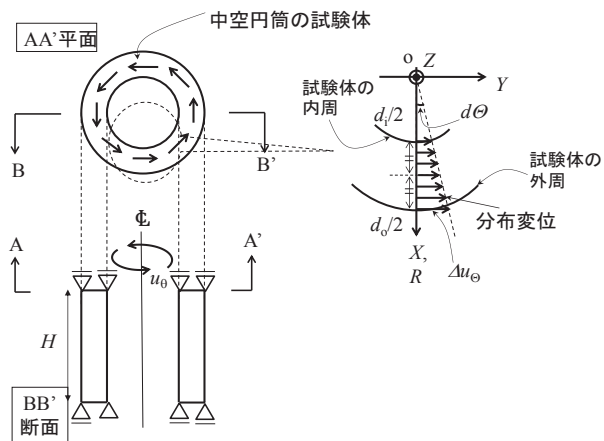
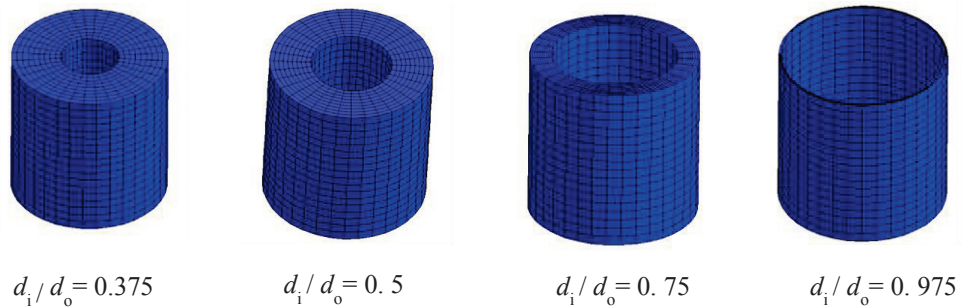
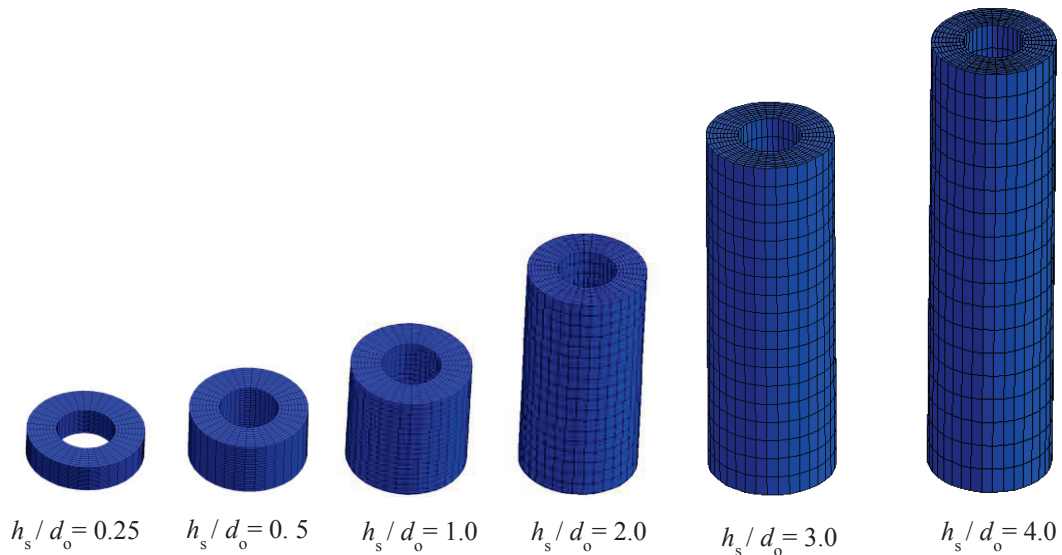


図 3.40 境界条件と外力の与え方



(A) 内径  $d_1$  を変化させたメッシュ ( $d_0 = 0.4\text{m}$ ,  $h_s = 0.4\text{m}$ )



(B) 内径  $h_s$  を変化させたメッシュ ( $d_0 = 0.4\text{m}$ ,  $d_1 = 0.2\text{m}$ )

※(A)よりも縮小して表示している

図 3.41 FEM 解析のメッシュ

## (2). 解析結果と考察

FEM 解析と 3-7 の理論解による直応力増分  $\Delta\sigma_z$  の分布を図 3.42 に比較した. 4 つの図は内径  $d_1$  毎に分かれており, プロットは試験体の高さ  $h_s$  で区別している. 同様に, FEM 解析と理論解によるせん断応力増分  $\Delta\sigma_{z\theta}$  の分布を図 3.43 に比較した.  $\Delta\sigma_z$  は, 理論解と FEM による結果が  $h_s$  にほとんど依らず比較的一致する.  $\Delta\sigma_{z\theta}$  は  $h_s$  が大きくなるほど FEM 解析の応力分布の振幅が小さくなり, 理論解と差異が大きくなる. いずれの FEM 解析結果も载荷方向依存性が見受けられる.



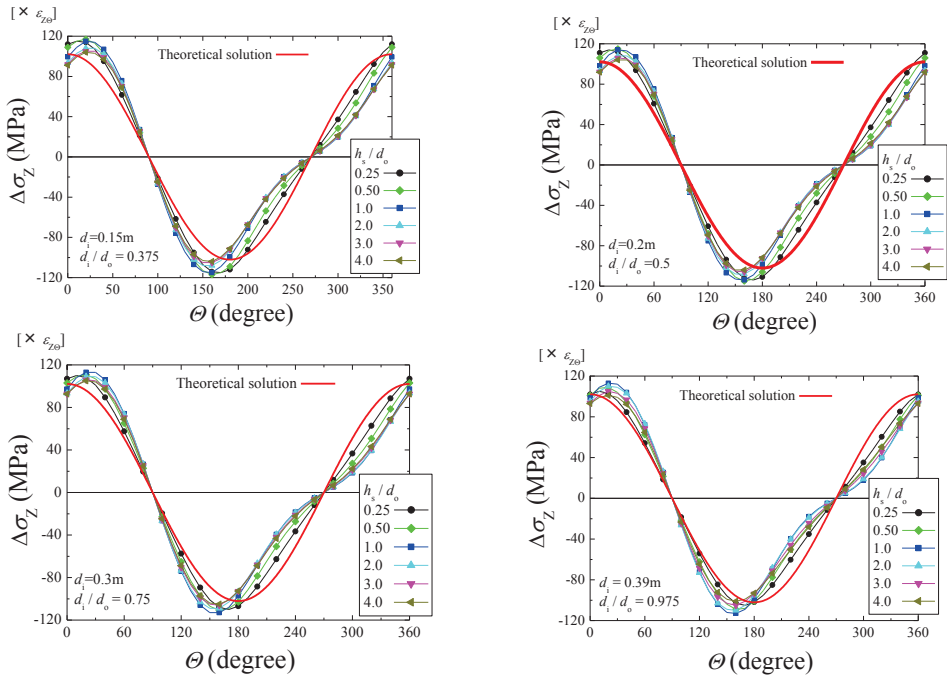


図 3.42 FEM 解析と理論解による直応力増分 $\Delta\sigma_z$ 分布の比較 ( $h_s$ に着目)

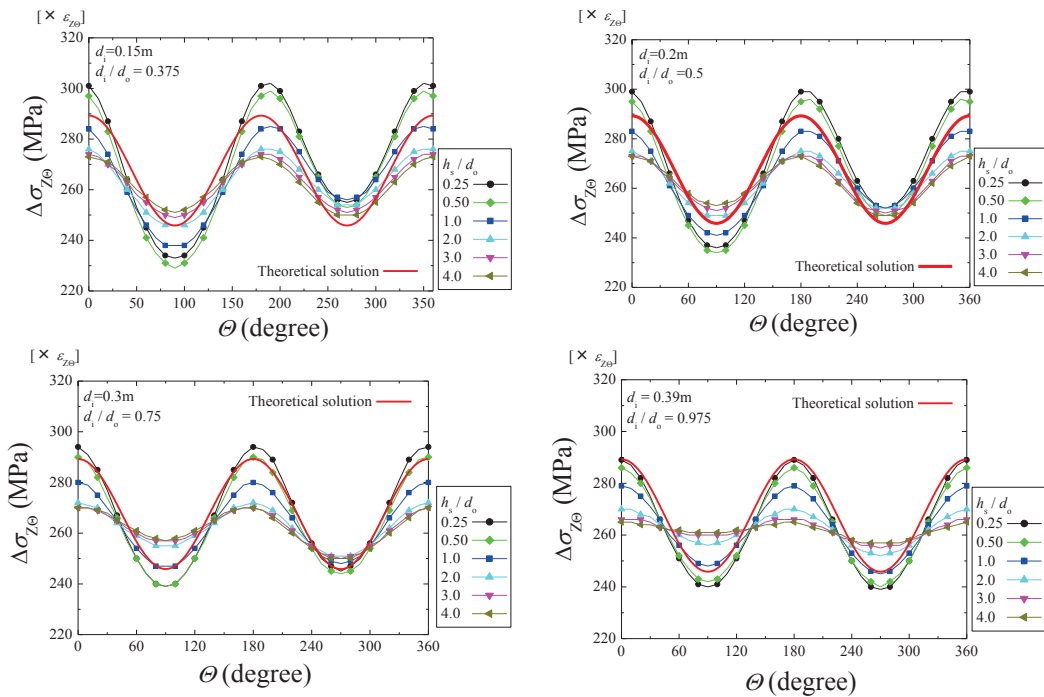


図 3.43 FEM 解析と理論解によるせん断応力増分 $\Delta\sigma_{z\theta}$ 分布の比較 ( $h_s$ に着目)

また、視点を変えて、FEM 解析と理論解による $\Delta\sigma_Z$ と $\Delta\sigma_{Z\theta}$ の分布を図 3.44 と図 3.45 に比較した。それぞれの応力に関するデータの 4 つの図は、 $h_s$ 毎に分かれており、プロットは $d_i$ で区別している。 $\Delta\sigma_Z$ は理論解と FEM による結果が $d_i$ にほとんど依らず比較的一致する。 $\Delta\sigma_{Z\theta}$ は $d_i$ の変化によって FEM 解析と理論解と差異が変化するが、 $h_s$ の影響のほうが大きい。

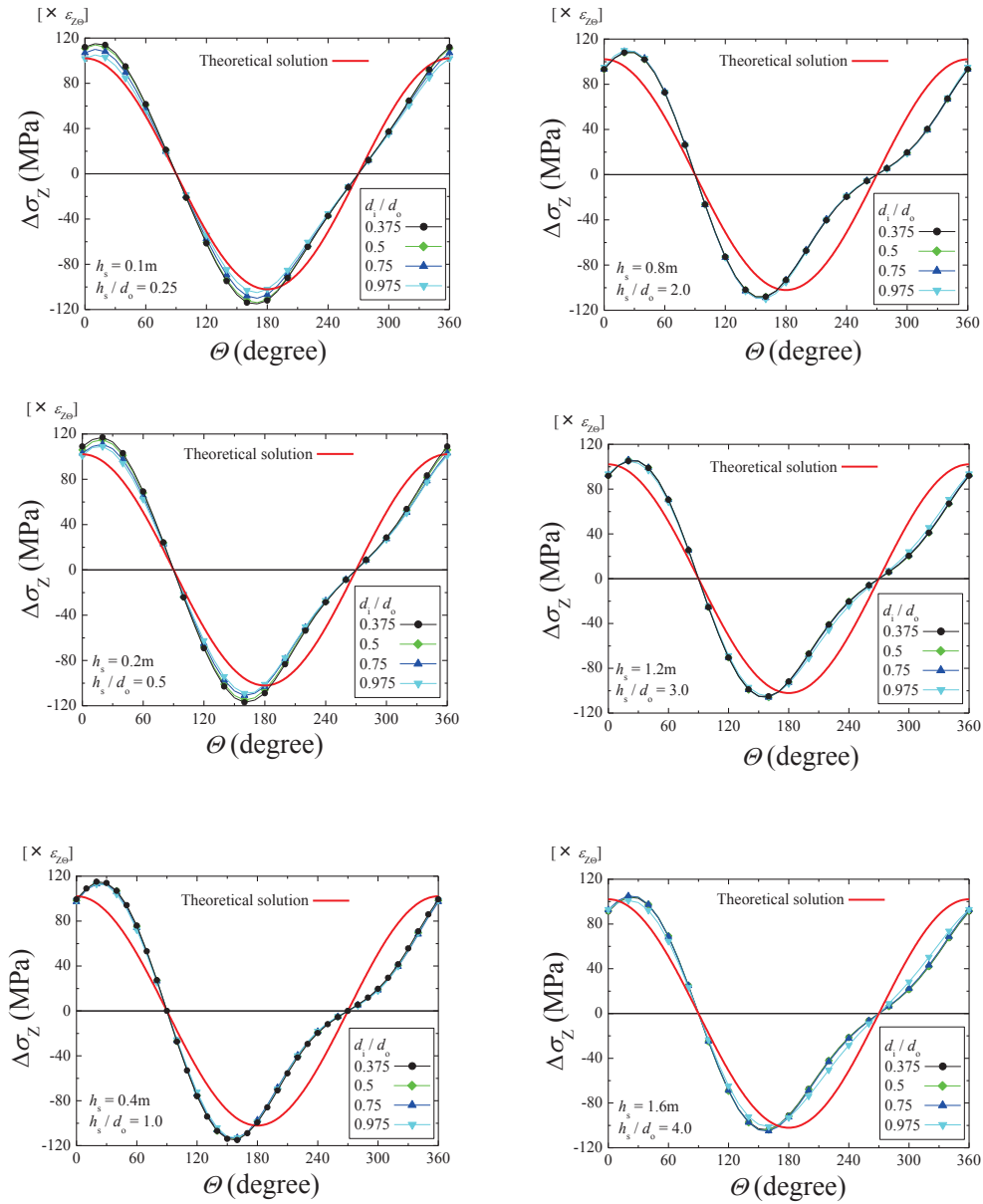


図 3.44 FEM 解析と理論解による直応力増分 $\Delta\sigma_Z$ 分布の比較 ( $d_i$ に着目)

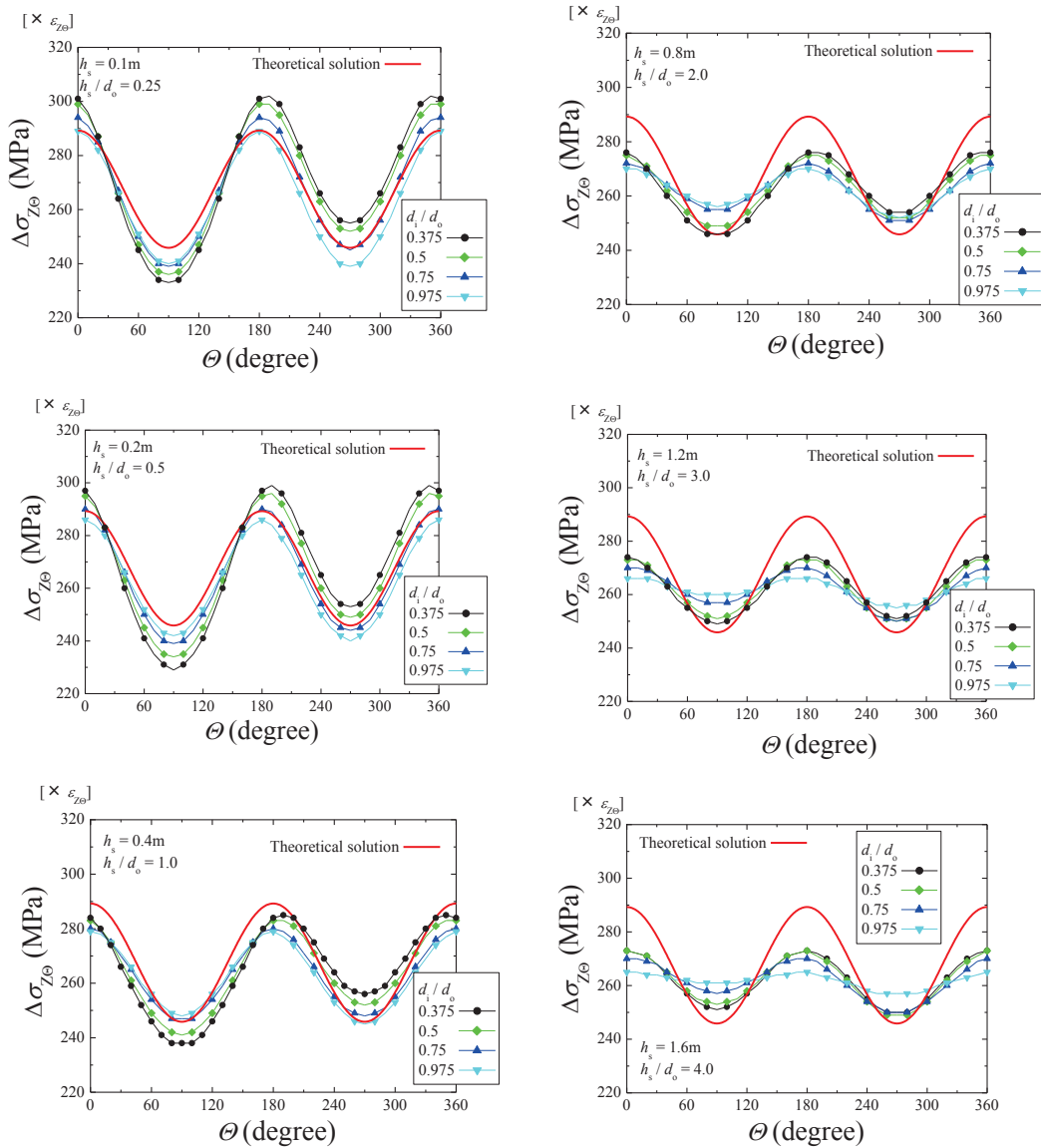


図 3.45 FEM 解析と理論解によるせん断応力増分 $\Delta\sigma_{Z\theta}$ 分布の比較( $d_i$ に着目)

さらに、 $\Delta\sigma_Z$ の分布の $\theta=0^\circ$ における値を $\Delta\sigma_{Zat0}$ 、 $\Delta\sigma_{Z\theta}$ の分布の $\theta=0^\circ$ と $90^\circ$ の位置における値を $\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ と $\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ として、 $h_s$ との関係を図 3.46 に示す。  $\Delta\sigma_Z$ は $\Delta\sigma_Z = 0$ を振幅の中心としているため、 $\Delta\sigma_{Zat0}$ の特性値ひとつで評価し、 $\Delta\sigma_{Z\theta}$ は $\Delta\sigma_{Z\theta} \neq 0$ を振幅中心とするため、 $\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ と $\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ の二つの特性値で評価した。いずれの特性値 ( $\Delta\sigma_{Zat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ ,  $\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ ) も、理論解で正規化しており、 $h_s$ は外径  $d_o$  で正規化した。  $\Delta\sigma_{Zat0}$ と $\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ は $h_s$ が小さいほど一致度が高い傾向があり、 $\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ は $h_s$ が大きくなると大きくなる傾向があるが、検討した範囲内では理論解との誤差は最大で $\pm 7\%$ である。図 3.47 に特性値 ( $\Delta\sigma_{Zat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ ,  $\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ ) と $d_i$ の関係を示す。

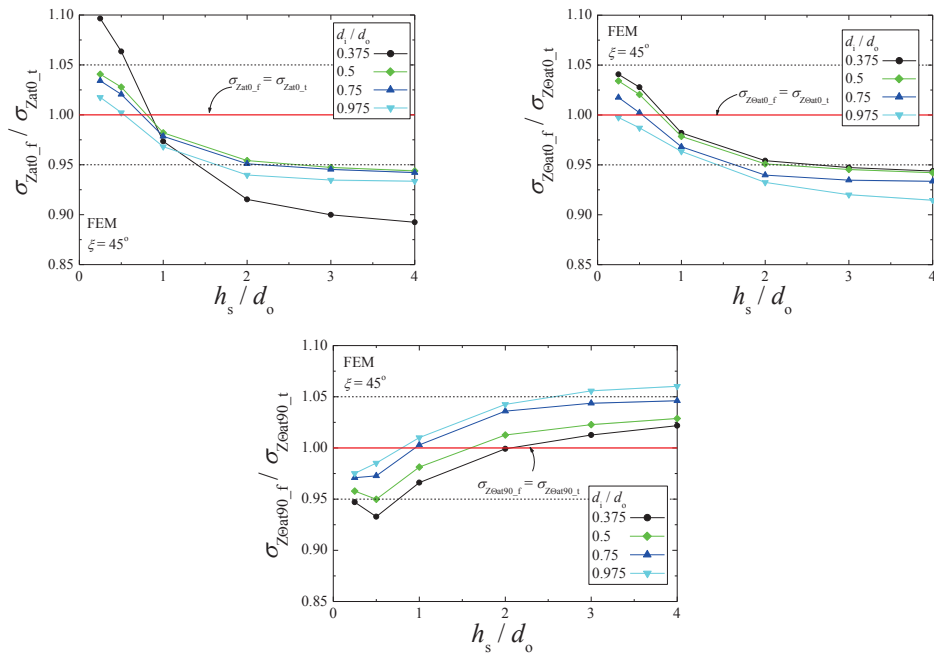


図 3.46 特性値( $\Delta\sigma_{Zat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Zeat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Zeat90}$ )による  $h_s$  で比較した形状効果

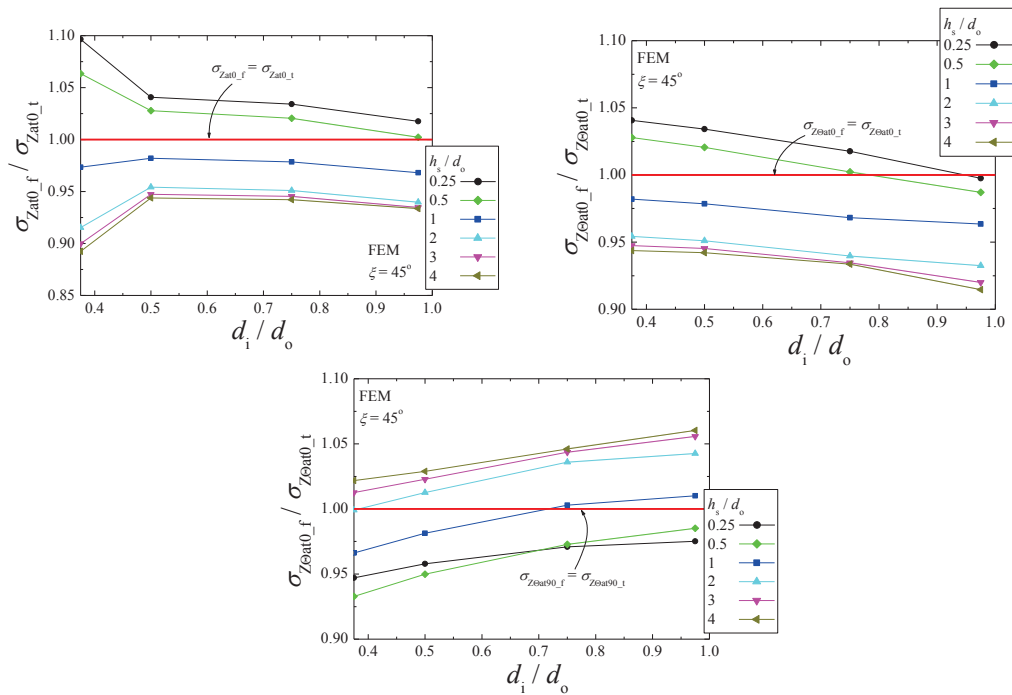


図 3.47 特性値( $\Delta\sigma_{Zat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Zeat0}$ ,  $\Delta\sigma_{Zeat90}$ )による  $d_i$  で比較した形状効果

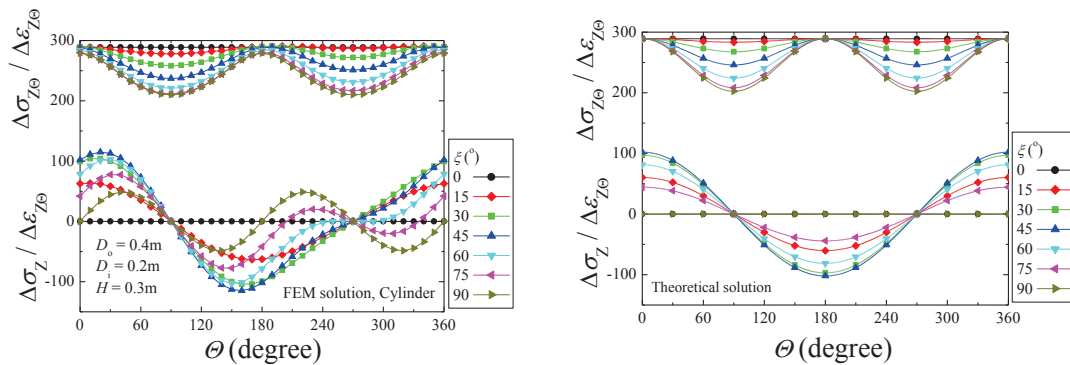


図 3.48 誤差の小さい寸法 ( $d_o=0.4m$ ,  $d_i=0.2m$ ,  $h_s=0.3m$ ) での FEM 解析結果(左)と理論解(右)の比較

こちらにも図 3.46 同様の結果が見受けられる。なお、 $d_i$  は  $d_o$  で正規化して表した。特性値は  $h_s$  と  $d_i$  の両方に依存しているが、 $h_s/d_o = 0.5 \sim 0.7$  で、 $d_i/d_o = 0.5$  程度で試験体の大きさを設定すれば、理論解との誤差が 5%程度である。例えば、図 3.48 に理論解と  $d_o=0.4m$ ,  $d_i=0.2m$ ,  $h_s=0.3m$  のケース FEM 解析結果を比較するが、かなり近い結果が得られている。

#### 参考文献

- 1) Boehler, J. P. and Sawczuk, A.: On yielding of oriented solids, *Acta Mechanica*, Vol. 27, pp.185-206, 1977.
- 2) グッドマン, R. E.: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978.
- 3) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫: 面内等方性を仮定した岩盤の三軸応力下の変形特性と異方剛性, 日本材料学会 第 62 期学術講演会, pp.77-78, 2013.
- 4) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫: 面内等方弾性体を仮定した岩が三軸試験で示す非三軸性, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.621-622, 2013.
- 5) Pickering, D. J.: Anisotropic elastic parameters for soils, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp.271-276, 1970.
- 6) Graham, J. and Houlsby, G. T.: Anisotropic elasticity of a natural clay, *Geotechnique*, Vol.33, No.2, pp.165~180, 1983.
- 7) Oka, F., Kimoto, S., Kobayashi, H. and Adachi, T.: Anisotropic behavior of soft sedimentary rock, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.59-70, 2002.
- 8) Chen, C., Pan, E. and Amadei, B.: Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using brazilian tests, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.35, pp.43-61, 1998.
- 9) Liao, J. J., Hu, T. and Chang, C.: Determination of dynamic elastic constants of transversely isotropic rocks using a single cylindrical specimen, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.34, pp.1045-1054, 1997.
- 10) Wang, C. D. and Liao, J. J.: Stress influence charts for transversely isotropic rocks, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.35, pp.771-785, 1998.

- 11) Gatelier, N. Pellet, F. and Loret, B.: Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial test, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.39, pp.335-354, 2002.
- 12) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.33, pp.293-325, 1999.
- 13) Talesnick, M. L. and Ringel, M.: Completing the hollow cylinder methodology for testing of transversely isotropic rocks: torsion testing, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.36, pp.627-639, 1999.
- 14) 地盤工学会：原位置岩盤試験データベース（2008年度版），丸善，2009.
- 15) 西澤修：岩石の地震波速度とその異方性：エネルギー論からのアプローチ，物理探査，第 62 巻第 4 号，pp.397-419, 2009.
- 16) 富田佳宏：弾塑性力学の基礎と応用，森北出版，1995.
- 17) 地盤工学会：土の中空円筒供試体によるねじりせん断試験方法（JGS0551-2009），2009.

## 4. 不連続面を含む岩盤の強度異方性

不連続面を含む岩盤の強度異方性は、卓越した不連続面の力学挙動が支配的になると仮定して、単一の傾斜した不連続面をもつ供試体を複数の三軸試験することで求める。しかし、複数の異なる供試体を用いることで供試体毎に異なる力学特性を平均化している問題や、試験のコストや時間の問題があり、強度異方性の合理的な特定手法が必要である。基質の破壊規準は、採取されたサンプリングコアから室内試験で求められるが、岩盤の卓越不連続面の破壊規準は原位置試験で求めるのが好ましい。よって、この章では、岩盤の不連続面の破壊規準を求めることを目的として、不連続面を含む岩盤による強度異方性について、3章と同様に三軸試験時の要素と中空ねじり試験の非要素となる中空円筒のそれぞれの応力経路に着目して検討した。

### 4-1. 三軸試験における不連続面を含む要素の強度異方性

不連続面を含む岩盤の三軸載荷時の直応力とせん断応力の関係は、図 4.1 のように、①不連続面の傾斜 $\xi$ が低角度なため基質（岩）で破壊するときと、② $\xi$ が高角度なため基質で破壊するときと、③不連続面で破壊するとき、の3つの場合が想定される。ここでは、2章と同様に、不連続面を含む要素と不連続面に働く直応力とせん断応力を $(\sigma, \tau)$ と $(\sigma_d, \tau_d)$ とし、基質と不連続面の粘着力とせん断抵抗角を $(c_r, \phi_r)$ と $(c_d, \phi_d)$ とした<sup>1)</sup>。

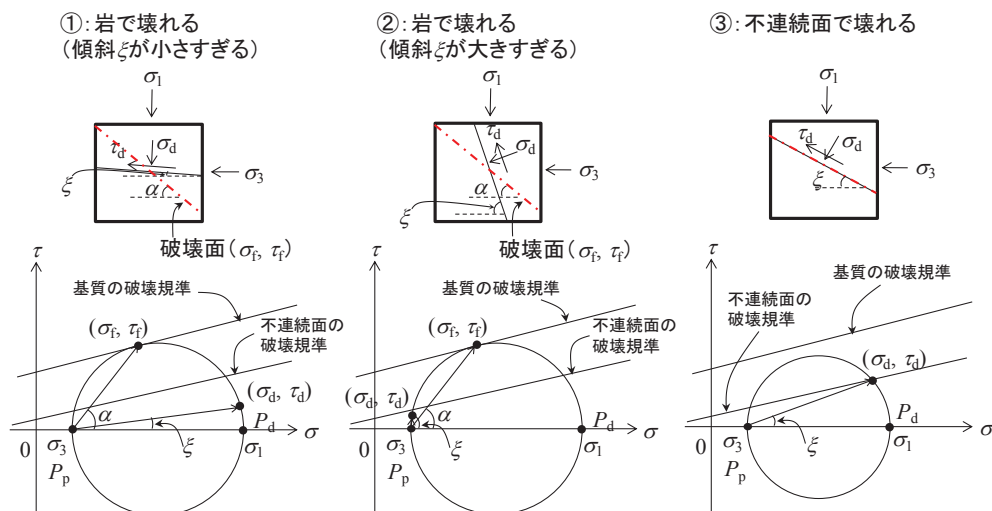


図 4.1 三軸載荷時の不連続面を含む岩盤の直応力とせん断応力の関係

この①と③の場合および②と③の場合を区別するために、図 4.2 のように、モール円が基質の破壊規準にちょうど接するときの限界傾斜角を $\xi_1$ と $\xi_2$ として導入すると、 $\xi < \xi_1$  (①の場合) と $\xi_2 < \xi$  (②の場合) のときは、不連続面に働く応力が不連続面の破壊規準を満たさず、基質の応力が破壊規準を満たすことで供試体が破壊に至る。それに対し、 $\xi_1 < \xi < \xi_2$  の場合には、不連続面の応力が不連続面の破壊規準を満たすことによって供試体が破壊に至る<sup>2)</sup>。これは、 $\xi$ が小さいときと非常に大きいときでは不連続面を含む岩盤の強度特性について調査することができない。例えば、軟岩を想定して基質の強度定数 $(c_r, \phi_r) = (2.0\text{MPa}, 30^\circ)$ と不連続面の強度定数 $(c_d, \phi_d) = (0\text{MPa}, 30^\circ)$ と等方圧密応力 $\sigma_c = 1.0\text{MPa}$ と設定した時には、図 4.3 のように、限界傾斜角が $\xi_1 = 32.2^\circ$ と $\xi_2 = 87.8^\circ$ と計算される。このとき、 $\xi < 32.2^\circ$ と $87.8^\circ < \xi$ の不連続面を持つ供試体を用いた場合には、不連続面の破壊規準が算出できない。

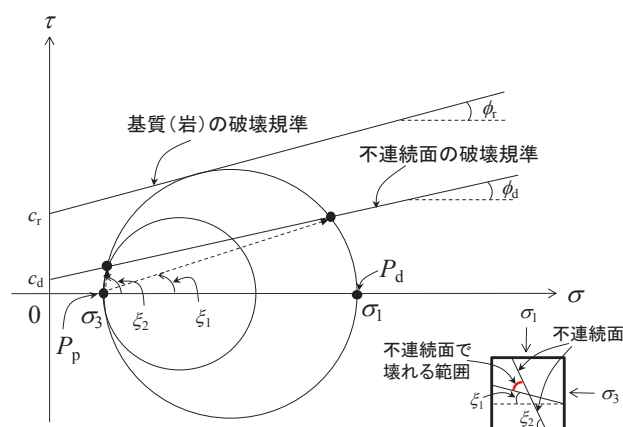


図 4.2 不連続面で破壊する場合の限界の傾斜 ( $\xi_1, \xi_2$ )

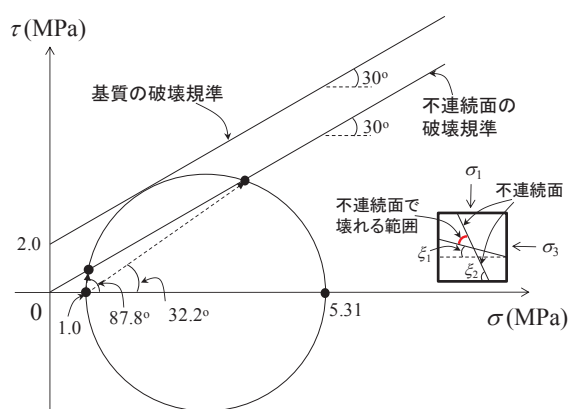


図 4.3 軟岩を想定して計算したせん断応力直応力関係における ( $\xi_1, \xi_2$ )



#### 4-2. ねじり試験における不連続面を含む中空円筒試験体の強度異方性の評価

供試体が要素としての挙動する三軸試験に対して，中空円筒の試験体を用いたねじりせん断試験においては，不連続面を含む中空円筒の試験体は非要素となるため，**図 4.4** のように考える<sup>3)</sup>。これは3章で行った中空円筒の面内等方弾性体のねじりの弾性問題と同様で，**図 4.4** の展開に示すように，円周方向に向かって局所的な不連続面の傾斜 $\xi_\theta$ が式(4-1)に示す正弦曲線で変化する状況を想定している。

$$\xi_\theta = \tan^{-1}(-\tan\xi \cos\theta) \quad (4-1)$$

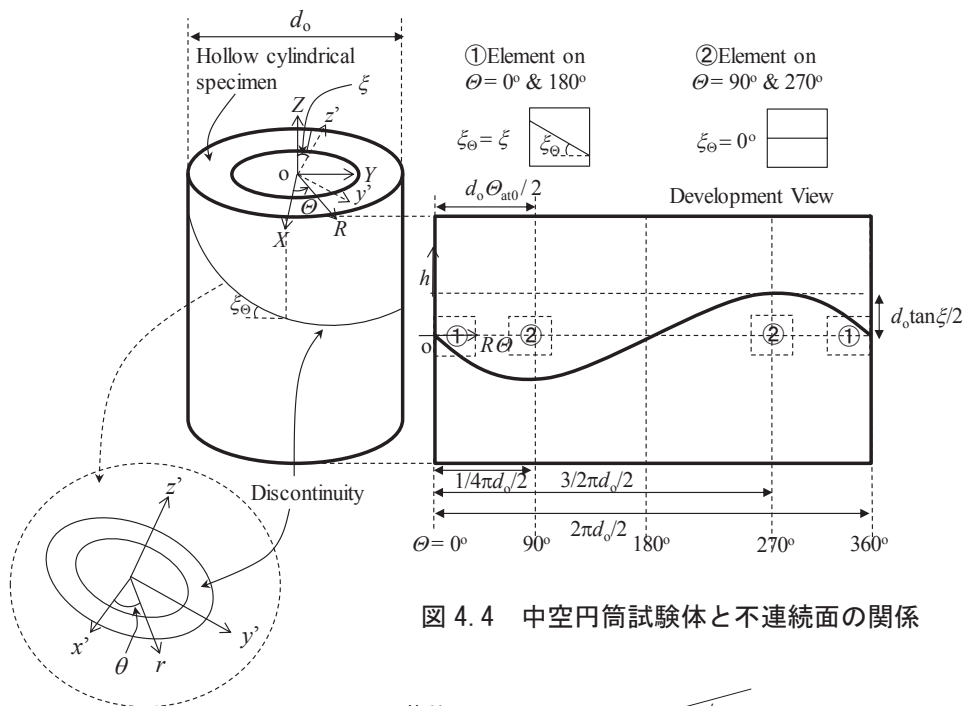


図 4.4 中空円筒試験体と不連続面の関係

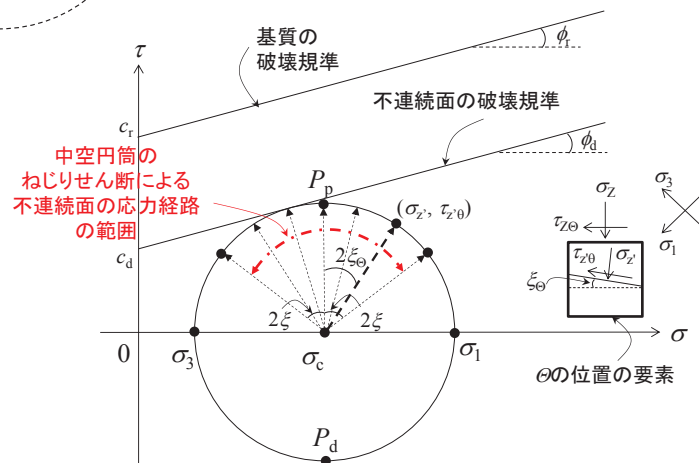


図 4.5 不連続面を含む岩盤のねじりせん断試験の応力経路

このとき、ねじりせん断時の不連続面を含む中空円筒における直応力とせん断応力の関係を図 4.5 に示す。主応力制御の三軸試験と異なり、等方圧密後のねじりせん断時には主応力方向がせん断方向に対し  $45^\circ$  傾斜し、等方圧密応力  $\sigma_c$  を中心としたモール円が想定される。このとき、円周方向に  $\theta$  の位置にある要素の不連続面では、図の太い破線で示した応力経路をとり、また試験体内で式(4-1)のサインカーブで  $\xi_0$  が変化する不連続面の応力経路を全て並べると、 $-\xi \leq \xi_0 \leq \xi$  の応力経路が、図のように扇形に広がった形状になると考えられる。三軸試験の不連続面の応力経路は単一であったが、ねじり試験では試験体内応力が非要素の挙動を示し、一度のせん断で試験体内応力が複数の経路をとる。ねじりせん断時の応力分布を計測できれば、三軸試験よりも合理的に強度異方性を特定できる可能性がある。なお、 $\xi=90^\circ$  のケースにおいては、不連続面の応力の応力経路が  $\sigma$  軸上を動くため、 $\sigma_c$  によっては不連続面で破壊が起きない。さらに、 $\xi$  が高角度の場合は、図 4.6 に示すように、供試体高さによっては、不連続面が試験体の端部に到達するように配置される。このとき、図 4.7 に示すモール円のように、不連続面の応力経路は、供試体の内部に不連続面が全て収まっている場合よりも、不連続面で破壊すると想定される部分が小さくなる。

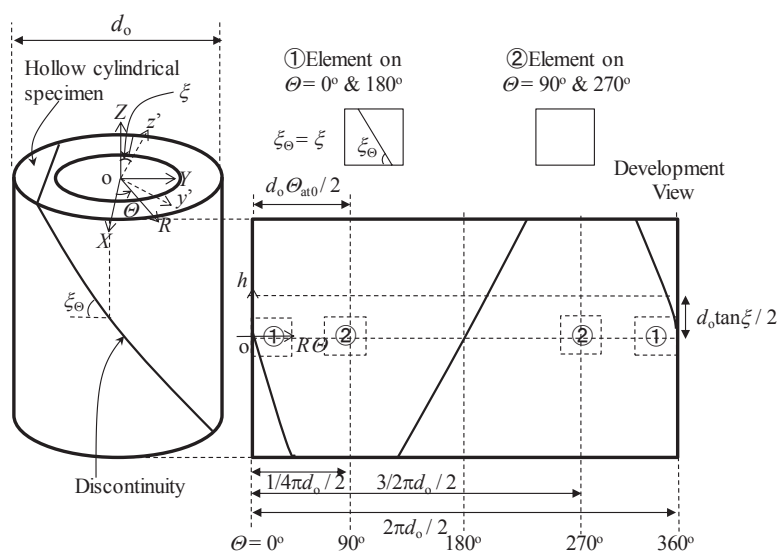


図 4.6 中空円筒試験体と高角度の不連続面の関係

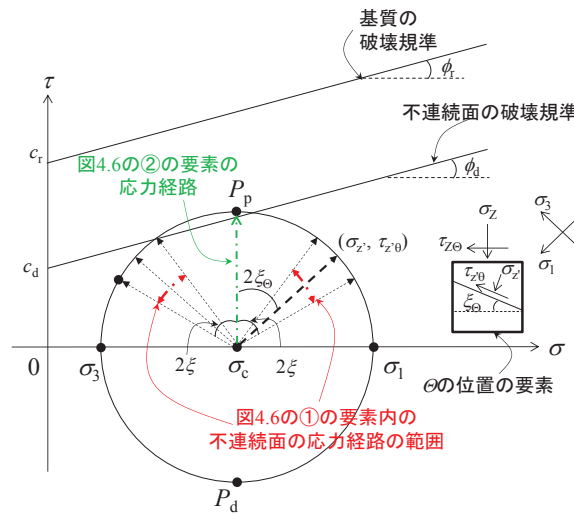


図 4.7 高角度の不連続面を含む岩盤のねじり試験時の応力経路

この場合にも、ねじり試験では異方圧密を行って主応力軸の方向を制御すれば応力経路をコントロールできるため、高角度の場合も確実に不連続面で破壊させることができると考えられる。

なお、不連続面を含む要素に働く応力と不連続面に働く応力の関係は式(4-2)で表され、

$$\begin{aligned}\sigma_{z'} &= \sigma_c - \tau_{z\theta} \cos(90^\circ - 2\xi_\theta) \\ \tau_{z'\theta} &= \tau_{z\theta} \sin(90^\circ - 2\xi_\theta) \\ \tau_{z\theta} &= \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\end{aligned}\quad (4-2)$$

式(4-2)と式(4-1)を合わせると、ねじりせん断時の不連続面に働く応力分布の推定式は式(4-3)で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{z'} &= \sigma_c - \tau_{z\theta} \cos(90^\circ - 2 \tan^{-1}(\xi \cos \theta)) \\ \tau_{z'\theta} &= \tau_{z\theta} \sin(90^\circ - 2 \tan^{-1}(\xi \cos \theta))\end{aligned}\quad (4-3)$$

#### 4-3. 不連続面を含む中空円筒試験体の弾塑性解析

4-2 で議論したねじりせん断時の不連続面を含む中空円筒試験体の応力状態及び、塑性変形に伴う変形の様子を検証するために、不連続面をインターフェース要素で模擬した 3 次元の弾塑性 FEM 解析を行った。

##### (1). 解析領域と境界条件

中空円筒試験体の解析領域を図 4.8 に示す。解析領域は 8 節点の直方体ソリッド要素と、不連続面を模擬したインターフェース要素（4 節点の四角形）によって構成する。

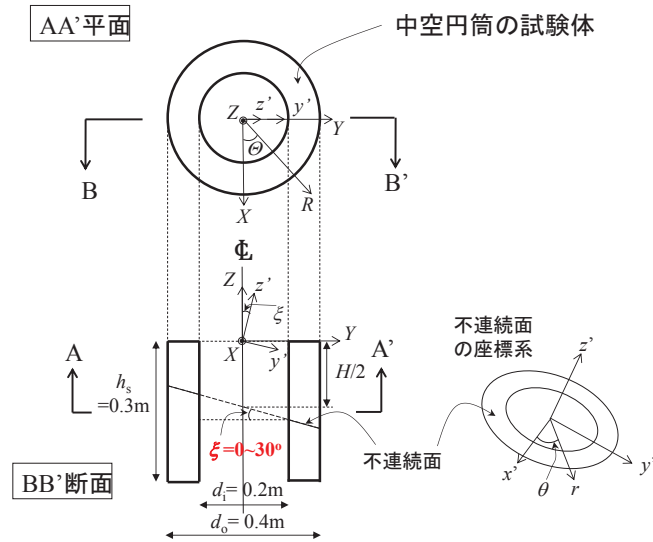


図 4.8 解析領域

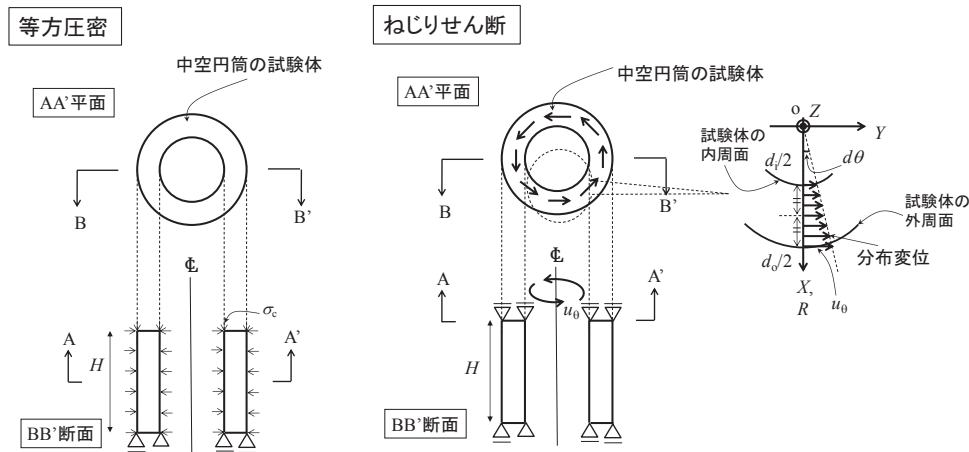


図 4.9 境界条件

インターフェース要素は試験体の高さ方向の中央に配置し、図の  $X$  軸を座標変換軸として不連続面に傾斜をつける。荷重は等方圧荷重を  $\sigma_c = 1.0\text{MPa}$  で行った後に、応力と変形を引き継いだうえで、ねじりせん断を行った。境界条件は図 4.9 に示すように、等方圧密時には、試験体上端面を変位自由境界で、下端全面を  $\theta$ ,  $Z$  方向変位固定境界で 1 節点のみ 3 方向 ( $R, \theta, Z$ ) に変位を固定している。荷重は圧力で、上端と外周・内周面に与えた。このように、半径方向及び  $Z$  方向への変形が一樣になるように条件を設定した。ねじりせん断時の境界条件は、試験体上端面を試験体の軸方向 ( $Z$  方向) に変位固定境界で、下端は等方圧密時と同様の境界条件である。荷重は変位制御で行い、図 4.9 のように試験体上端面に

分布変位を与えて制御した。供試体の寸法については、3章で検討し、異方性の応答に対して、形状効果が少ないと想定される  $d_1=0.3\text{m}$ ,  $d_0=0.4\text{m}$ ,  $h_s=0.3\text{m}$  を採用した。なお、有限要素メッシュの節点数と要素数は7200と6156である。

## (2). 弾性パラメータと破壊規準の設定および解析ケース

基質と不連続面の弾性パラメータ及び強度定数を表4.1に示す。(a)の基本パラメータは、基質は等方な性質をもつと仮定し、弾性パラメータとせん断抵抗角と粘着力を軟岩を想定して設定した<sup>1),4)</sup>。不連続面の垂直地盤反力係数  $k_n$  は、Goodman(1976)を参考に、基質のヤング率との関係  $k_n = E/h_s$  から計算し<sup>5)</sup>、せん断地盤反力係数  $k_s$  は、既往の砂岩などの不連続面のせん断試験の結果から、 $k_s = (1/3)k_n$  とした<sup>6)</sup>。この基本のパラメータを元に3つの解析ケースを行った。Case a では不連続面の傾斜  $\xi$  の影響を検討するため、 $c_d = 0\text{MPa}$  とし、関連流れ則を仮定して不連続面のせん断抵抗角  $\phi_d = \text{ダイラタンシー角 } \psi_d$  とし、 $\xi = 0^\circ \sim 30^\circ$  で  $5^\circ$  置きに7ケース解析を行った。Case b では、不連続面の粘着力  $c_d \neq 0\text{MPa}$  として、不連続面の凹凸の影響を検討した。Case c では、非関連流れ則を仮定し、 $\phi_d \neq \psi_d$  として解析を行った。なお、全ての解析は弾完全塑性を仮定した。

表 4.1 基質と不連続面の弾性パラメータ及び強度定数

(a) 基本のパラメータ		
	地盤パラメータ	値
基質(岩)	ヤング率 $E_r$ (MPa)	1000
	ポアソン比 $\nu_r$	0.3
	粘着力 $c_r$ (MPa)	2
	せん断抵抗角 $\phi_r$ ( $^\circ$ )	30
	ダイラタンシー角 $\psi_r$ ( $^\circ$ )	30
	引張強さ $\sigma_{t,r}$ (MPa)	2
不連続面	垂直地盤反力係数 $k_n$ (MPa/m)	3333
	せん断地盤反力係数 $k_s$ (MPa/m)	1111
	不連続面の引張強さ $\sigma_{t,d}$ (MPa)	-

(b) Case a		
地盤パラメータ	値	
不連続面の傾斜 $\xi$ ( $^\circ$ )	0~30	
不連続面の粘着力 $c_d$ (MPa)	0.001	
不連続面のせん断抵抗角 $\phi_d$ ( $^\circ$ )	30	
不連続面のダイラタンシー角 $\psi_d$ ( $^\circ$ )	30	

(c) Case b		
地盤パラメータ	値	
$\xi$ ( $^\circ$ )	15	
$c_d$ (MPa)	0.5	
$\phi_d$ ( $^\circ$ )	30	
$\psi_d$ ( $^\circ$ )	30	

(d) Case c		
地盤パラメータ	値	
$\xi$ ( $^\circ$ )	15	
$c_d$ (MPa)	0.001	
$\phi_d$ ( $^\circ$ )	30	
$\psi_d$ ( $^\circ$ )	0	

### (3). Case a の解析結果

図 4.4 の展開のように局所的な傾斜 $\xi_\theta$ が円周方向に変化する不連続面によって、不連続面の塑性変形に伴って、中空円筒の試験体の応力は非一様になる。そこで、以後の解析結果は、円周方向に一定間隔の位置の、応力および応力分布について考察する。それぞれの円周上の位置の応力は、半径方向の 10 節点の平均値を示し、直応力とせん断応力に関して議論する。まず、 $\xi = 0^\circ$ における試験体上端面における応力ひずみ関係を図 4.10 に示す。

このとき、図 4.5 の $\xi = 0^\circ$ における応力経路の通りに、試験体上端と不連続面の応力ひずみ関係はほとんど一致する。また、図 4.11 のように、 $\xi = 0^\circ$ のケースでは、軸対称条件が満足されるため、応力は分布しない。

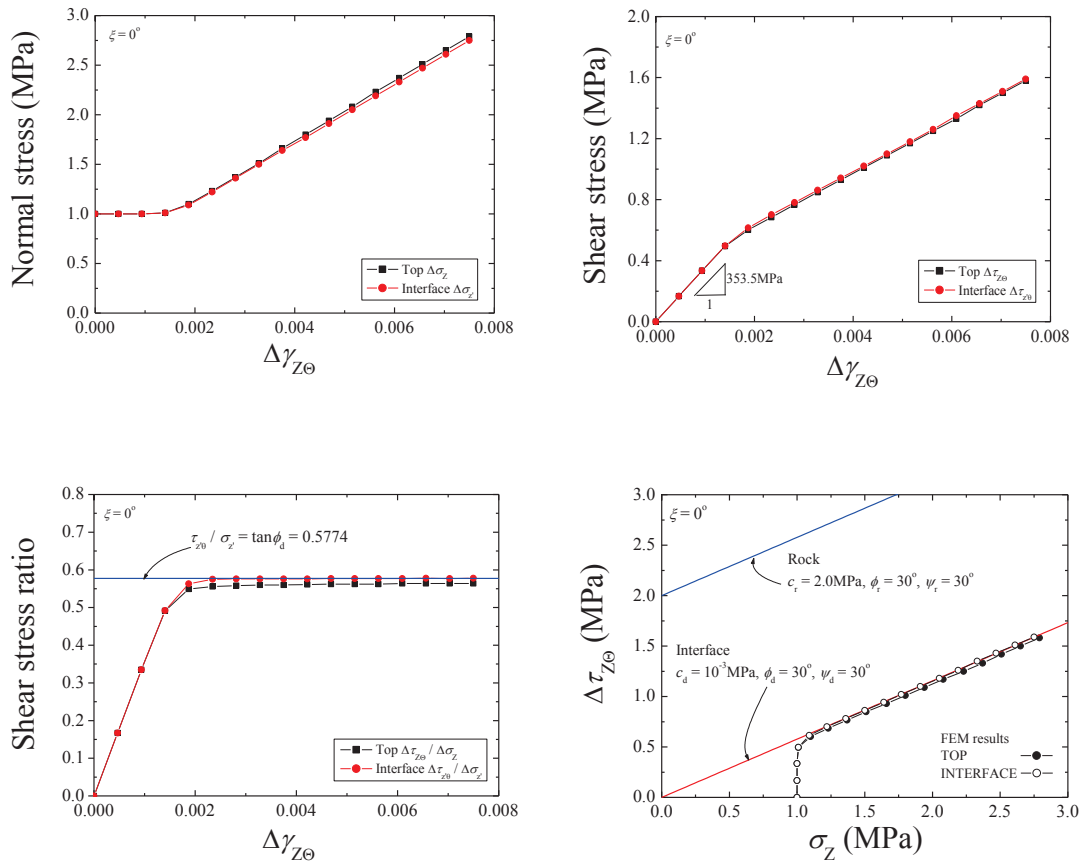


図 4.10  $\xi = 0^\circ$  の試験体上端の応力ひずみ関係 (Case a)

(右上：直応力増分，左上：せん断応力増分，右下：せん断応力比，左下： $\tau$ - $\sigma$ 関係)

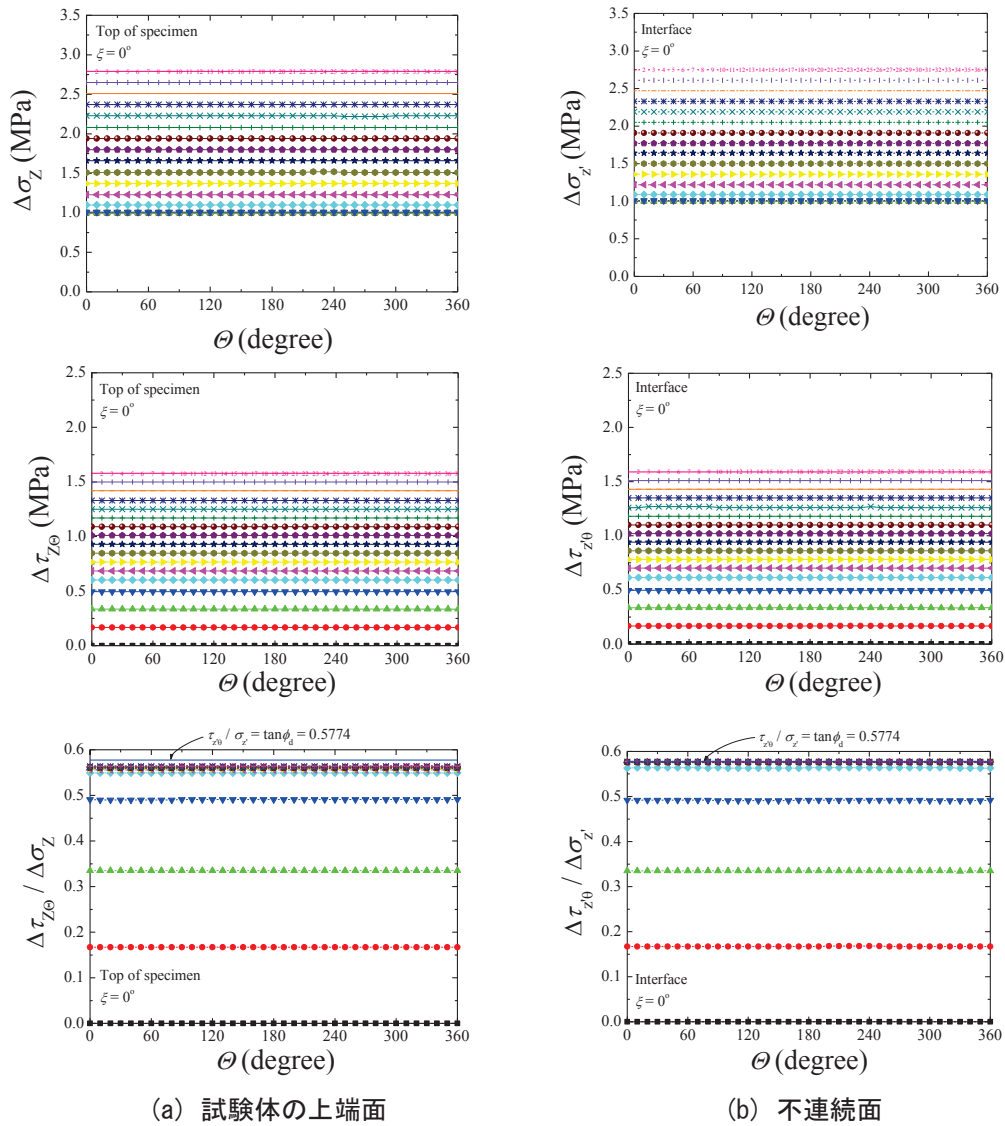


図 4.11  $\xi = 0^\circ$  の試験体上端の応力分布 (Case a)

(上 : 直応力増分, 上 : せん断応力増分, 下 : せん断応力比)

次に,  $\xi = 15^\circ$  に代表される試験体上端面の応力ひずみ関係を図 4.12 に示す. 図のプロットは  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  と  $\theta = 180 \sim 360^\circ$  それぞれで, 円周方向に  $30^\circ$  毎の位置の結果を示した. 直応力増分  $\Delta\sigma_z$  は, 不連続面が塑性変形に伴うダイラタンシーに起因して, せん断ひずみ増分  $\Delta\gamma_{z\theta} = 0.002$  近傍で大きくなり始める. せん断応力増分  $\Delta\tau_{z\theta}$  に関しては,  $\theta = 0^\circ$  のときは  $\Delta\tau_{z\theta}$  の増加に伴って, ほとんど線形に大きくなっていくが,  $\theta$  が  $0^\circ$  よりも大きくなるほど,  $\Delta\tau_{z\theta} = 0.002$  近傍で非線形になる. これは, 図 4.5 のモール円に説明されるように,  $\theta$  が  $0^\circ$  よりも大きいほど,  $\xi_\theta$  が小さくなり,  $\theta = 180^\circ$  では  $\xi_\theta = -15^\circ$  となり,  $\theta = 0^\circ$  の  $\xi_\theta = 15^\circ$  よりも不連続面の破壊規準に近く, 不連続面で破壊が起きているためである.

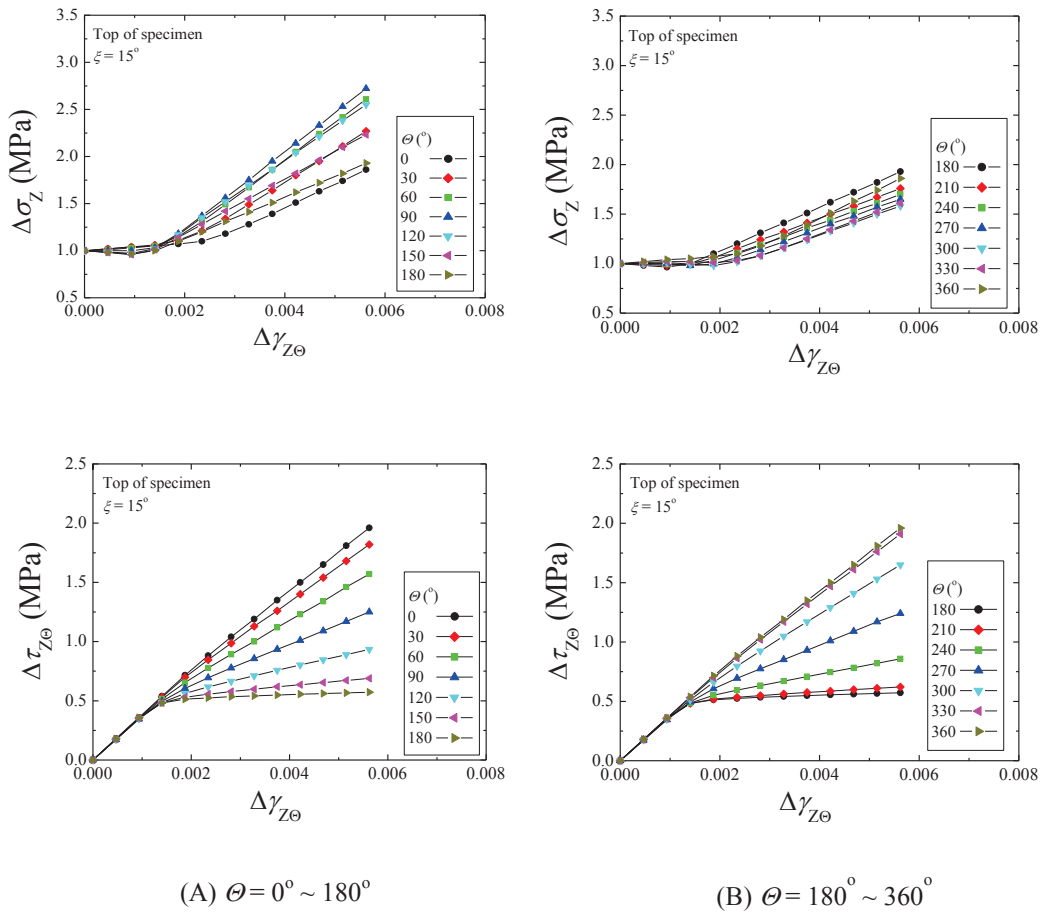


図 4.12  $\xi = 15^\circ$  の試験体の上端面の応力ひずみ関係 (Case a)  
(上: 直応力増分, 下: せん断応力増分)

不連続面の塑性変形に伴う各載荷ステップでの供試体の変形及びせん断応力分布と、試験体上端のせん断応力比とせん断ひずみの関係を図 4.13 に示す。このように、弾性変形している STEP3 では、円周方向に一樣な応力状態であるが、不連続面の塑性変形に伴って、STEP7 以降では試験体内の応力が非一樣に分布する。せん断応力比  $\Delta\tau_{z\theta} / \Delta\sigma_z$  に関しては、 $\xi = 60^\circ$  の結果が、設定した不連続面のせん断抵抗角  $\phi_d$  から計算される摩擦係数  $\tan\phi_d$  に近い値を示す。

さらに、試験体上端の応力分布について図 4.14 に議論する。図はせん断レベルを徐々に上げたときに変化していく応力分布の様子を示しており、このデータも  $\xi = 15^\circ$  のものである。 $\Delta\sigma_z$  は、はじめ  $\Delta\sigma_z = \sigma_c$  となるが、不連続面の塑性変形に伴って非一樣になる。



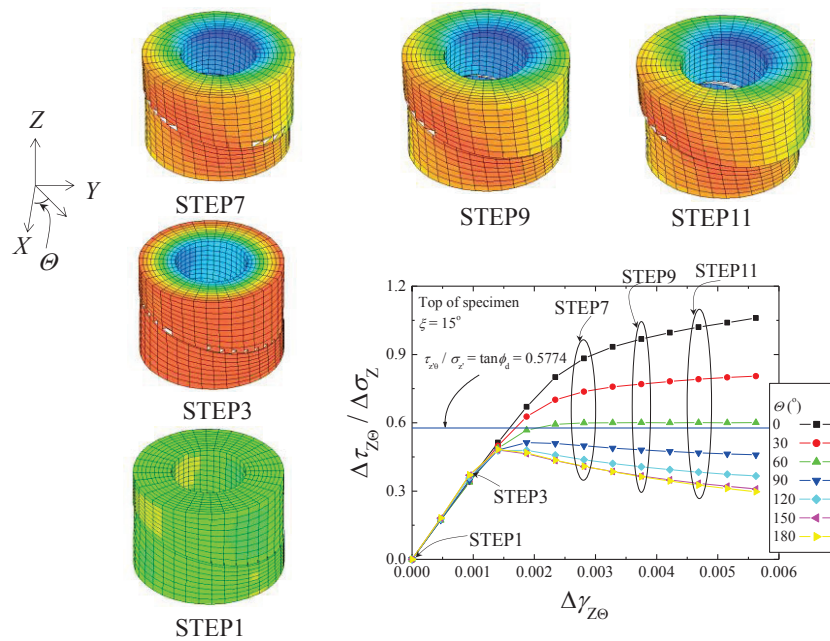


図 4.13  $\xi = 15^\circ$  の試験体上端のせん断応力比とせん断ひずみ増分の関係  
および各ステップでの中空円筒試験体の変形 (Case a)

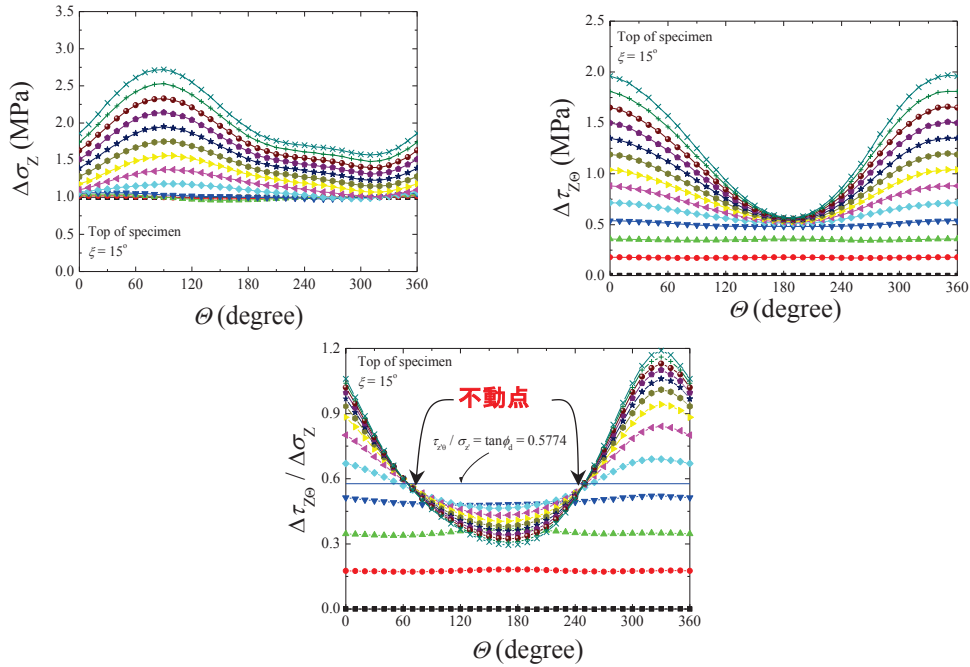


図 4.14  $\xi = 15^\circ$  の試験体の上端面の応力分布 (Case a)  
(上：直応力増分，中：せん断応力増分，下：せん断応力比)

$\Delta\tau_{z\theta}$  も、はじめは一定値だが、同様に不連続面が塑性変形することで非一様になる。 $\Delta\tau_{z\theta} / \Delta\sigma_z$  は、不連続面が塑性変形した後は、 $\Delta\tau_{z\theta} / \Delta\sigma_z = \tan\phi_d$  となる円周上の位置を不動点として非一様に変化する。この傾向を利用すれば、傾斜した不連続面を持つ試験体の中空ねじり試験で、応力分布を計測することで不連続面の破壊規準を特定できる可能性がある。なお、他のケース ( $\xi = 5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ ) においても、**図 4.15** に同じ傾向を確認している。

次に、不連続面の応力ひずみ関係に関して言及する。 $\xi = 15^\circ$  に代表される不連続面の応力ひずみ関係を**図 4.16** に示す。ここで示す応力は、**図 4.4** の不連続面に示す局所座標系で表される。

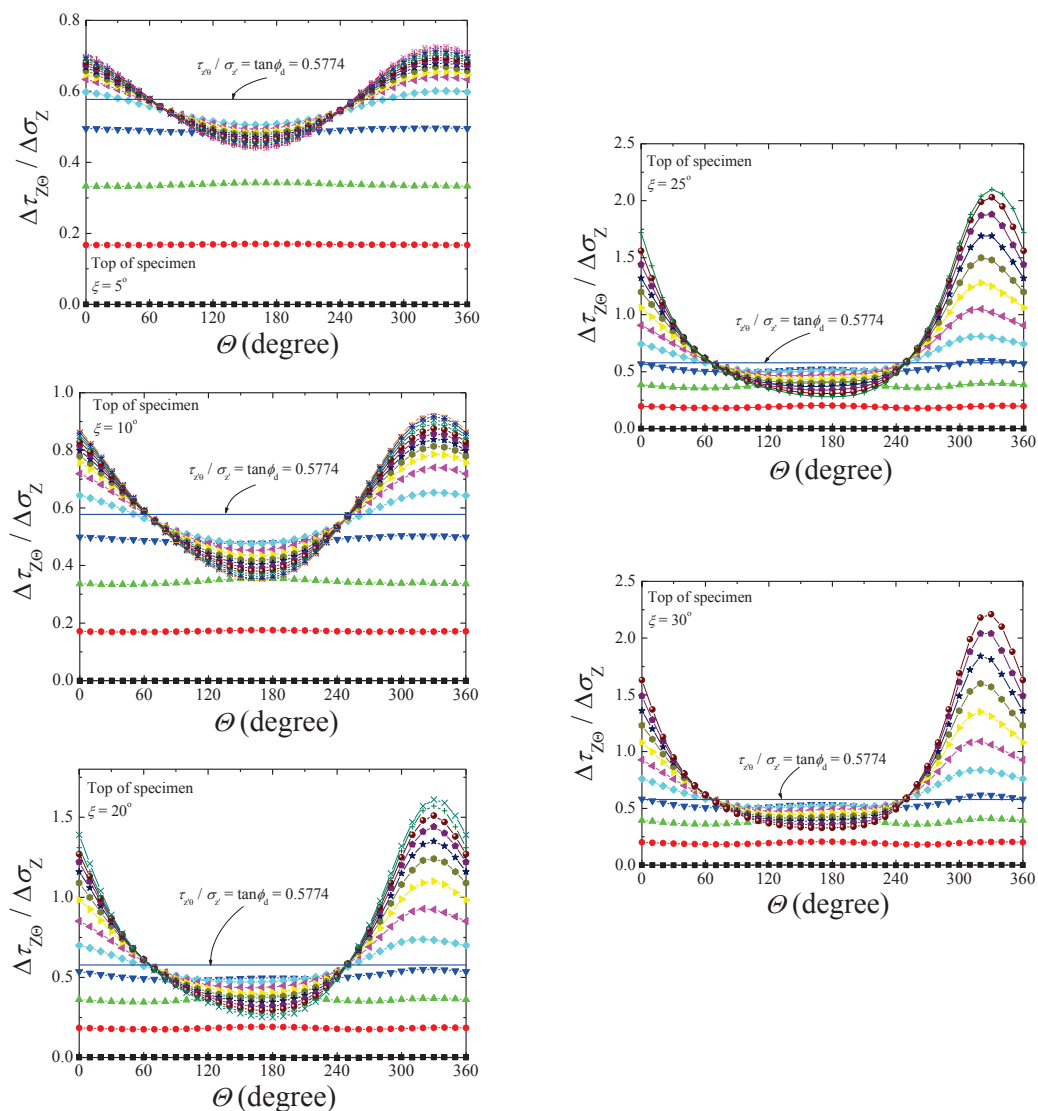


図 4.15  $\xi = 15^\circ$  以外の試験体上端のせん断応力比分布 (Case a)

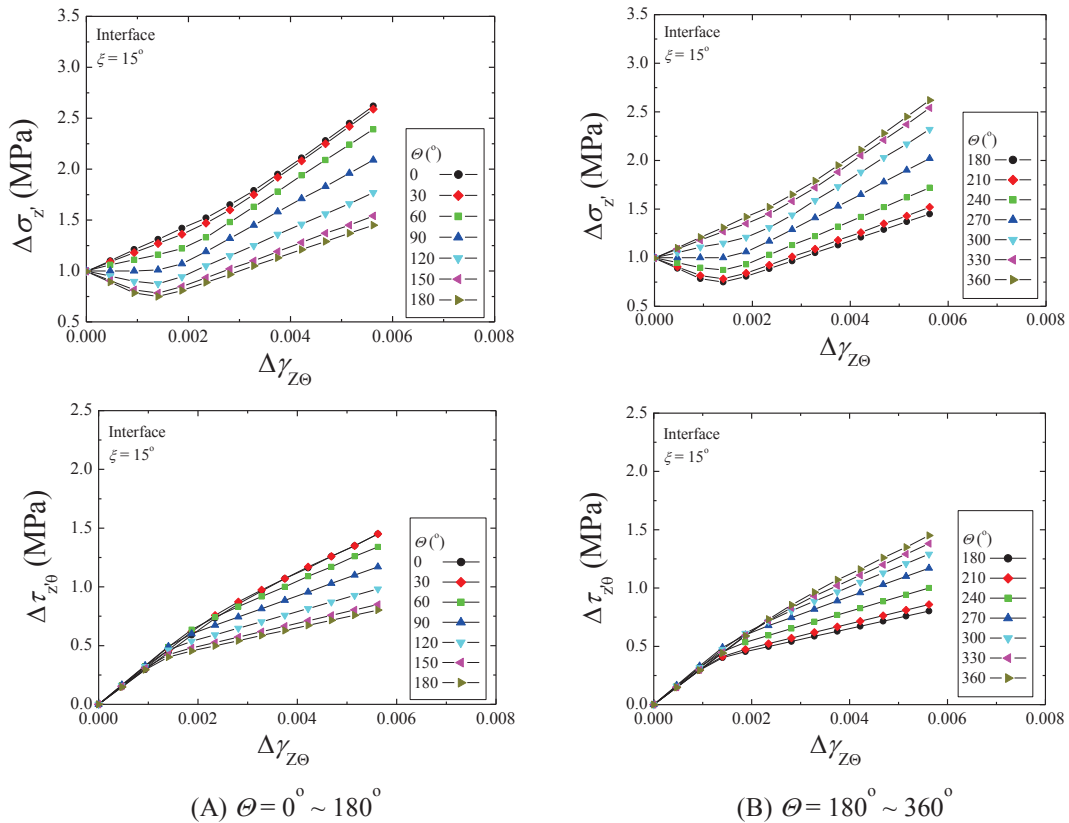


図 4.16  $\xi = 15^\circ$  の不連続面の応力ひずみ関係 (Case a)

(上：直応力増分，下：せん断応力増分)

ここでも，図のプロットは $\theta = 0 \sim 180^\circ$ と $\theta = 180 \sim 360^\circ$ それぞれで，円周方向に $30^\circ$ 毎の位置の結果を示す．不連続面で塑性変形が始まる直前まで ( $\Delta\gamma_{z\theta}$ が $0.002$ 以下) は，直応力増分 $\Delta\sigma_z$ は， $0^\circ < \theta < 90^\circ$ でせん断レベルの増加に伴って大きくなる傾向にあり，逆に $0^\circ < \theta < 90^\circ$ では，減少する傾向にある．これは，図 4.5 の不連続面の局所的な傾斜 $\xi_\theta$ によって変化する応力経路によって説明できる． $\Delta\gamma_{z\theta}$ が $0.002$ の近傍から，不連続面のダイラタンシーにより $\Delta\sigma_z$ は増加する． $\Delta\tau_{z\theta}$ は， $\theta = 0^\circ$ に近いプロットほど大きい値を示しており，これは， $\theta = 0^\circ$ のときは $\xi_\theta$ が最大の $\xi$ となるためである．塑性変形に伴う各载荷ステップでのインターフェース要素（不連続面）の変形及びせん断応力分布と，不連続面のせん断応力比とせん断ひずみの関係を図 4.17 に示す．このように，弾性変形している STEP3 では，円周方向に一樣な応力状態であるが，不連続面の塑性変形に伴って，STEP5 以降では，試験体内の応力が非一樣に分布する．せん断応力比 $\Delta\tau_{z\theta} / \Delta\sigma_z$ に関しては，全ての円周上の位置における結果が最終的には， $\tan\phi_d$ に近い値を示す．不連続面の応力分布について図 4.18 に議論する．このデータも $\xi = 15^\circ$ のものである． $\Delta\sigma_z$ は，はじめ $\xi = 90^\circ$ と $\xi = 270^\circ$ の位置で $\Delta\sigma_z = 0\text{MPa}$ となり，不連続面の塑性変形に伴って，増加していく． $\Delta\tau_{z\theta}$ は初め，一樣であるが，せん断レベルの増加に伴い，塑性変形を起こし，非一樣に変化する．

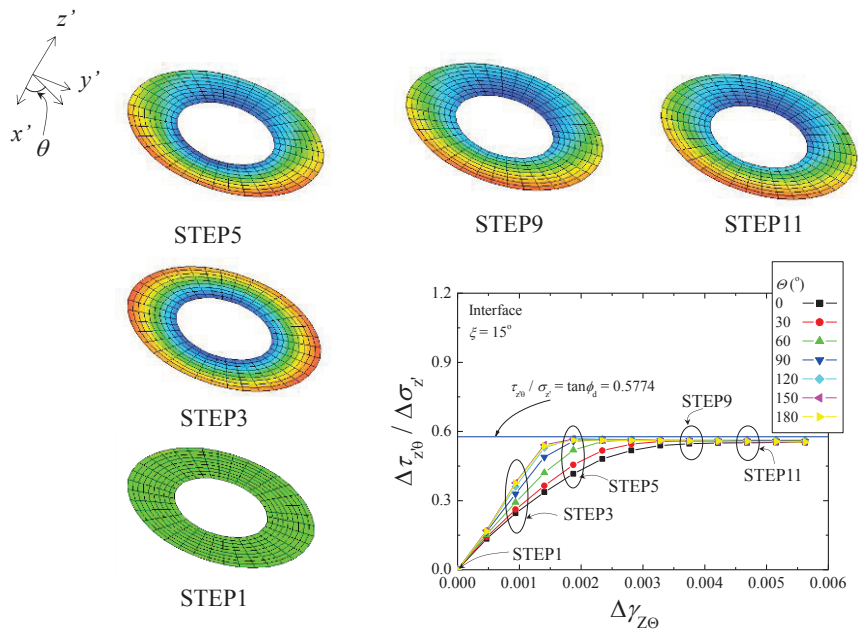


図 4.17  $\xi = 15^\circ$  の不連続面のせん断応力比とせん断ひずみ増分の関係  
および各ステップでの中空円筒試験体の変形 (Case a)

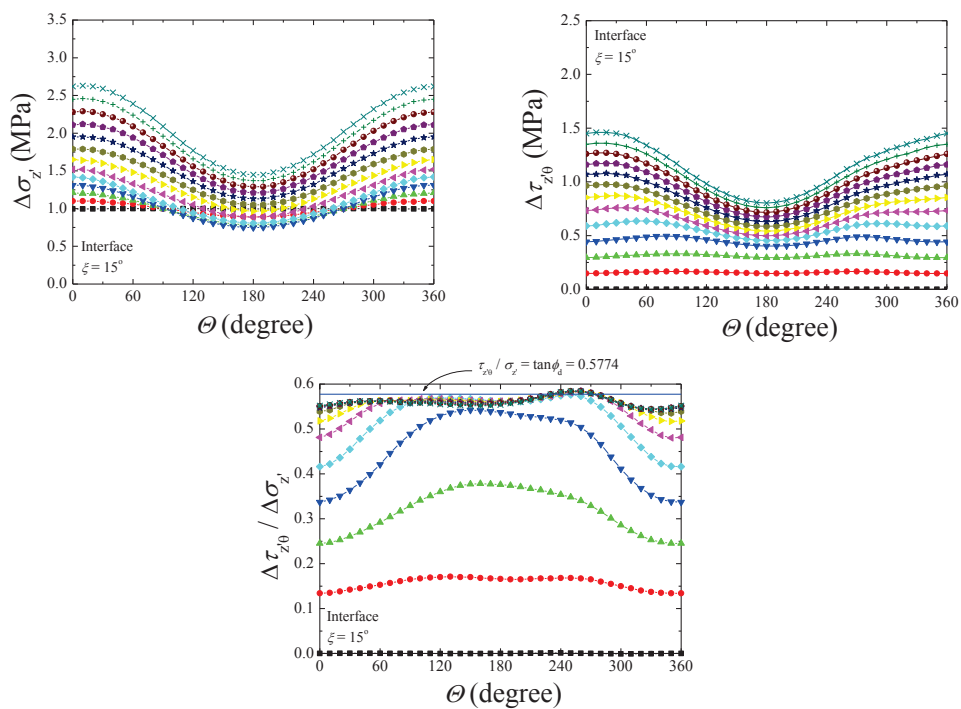
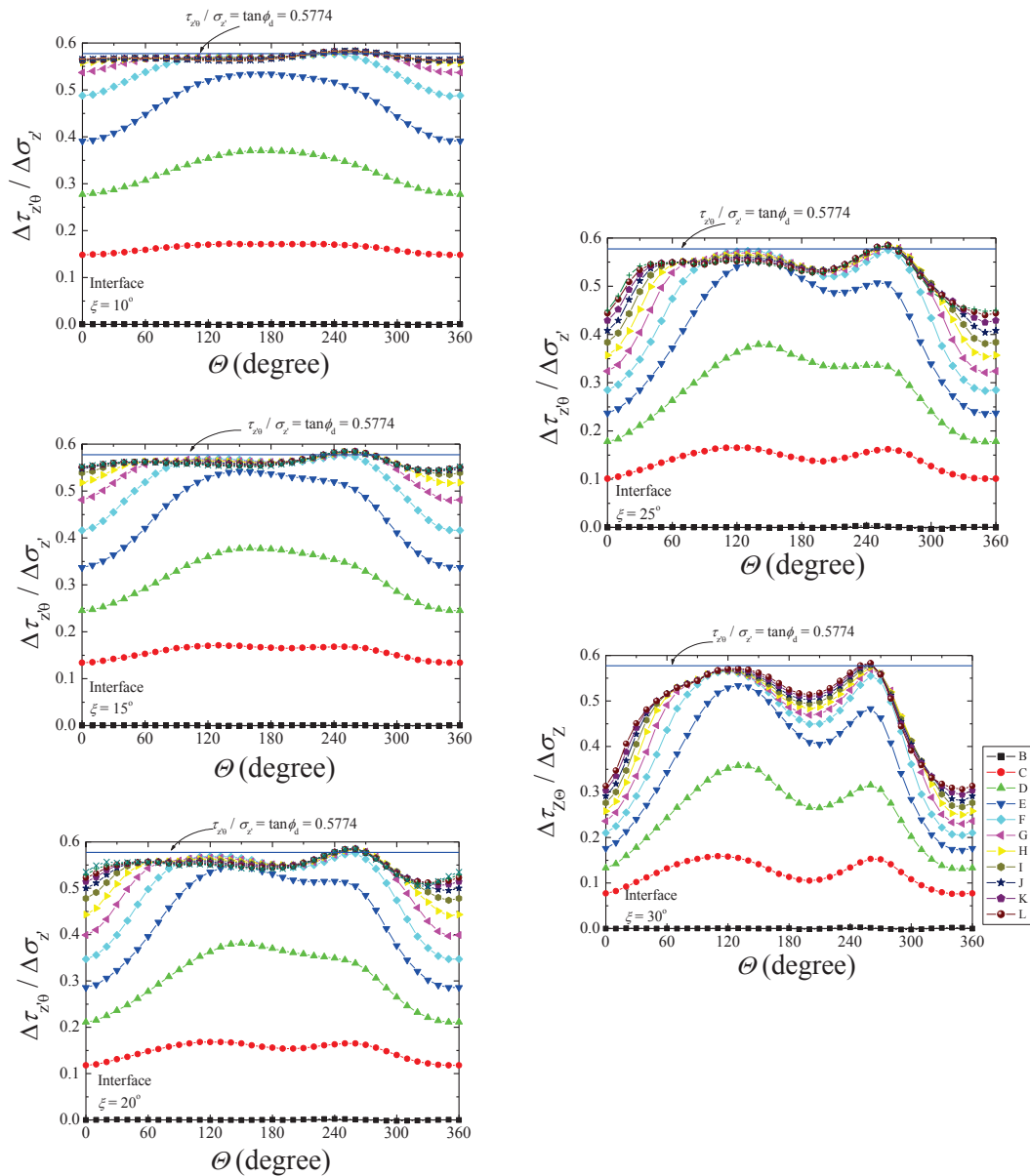


図 4.18  $\xi = 15^\circ$  の不連続面の応力分布 (Case a)  
(上: 直応力増分, 中: せん断応力増分, 下: せん断応力比)

$\Delta\tau_{z\theta} / \Delta\sigma_z$  は、塑性変形後は、ほぼ同じ分布を示し、 $\tan\phi_d$  よりも小さい値を示すことを確認した。なお、他のケース ( $\xi=5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ ) においても、**図 4.19** に確認している。

次に、試験体上端と不連続面のせん断応力と直応力の関係を**図 4.20** に比較する。この図も  $\xi=15^\circ$  における代表的な結果を示している。試験体上端の応力に関しては、 $\theta < 60^\circ$  の結果では、不連続面の塑性変形後に、基質の破壊規準のほうに応力経路をとる傾向がある。



**図 4.19**  $\xi = 15^\circ$  以外の不連続面のせん断応力比分布 (Case a)

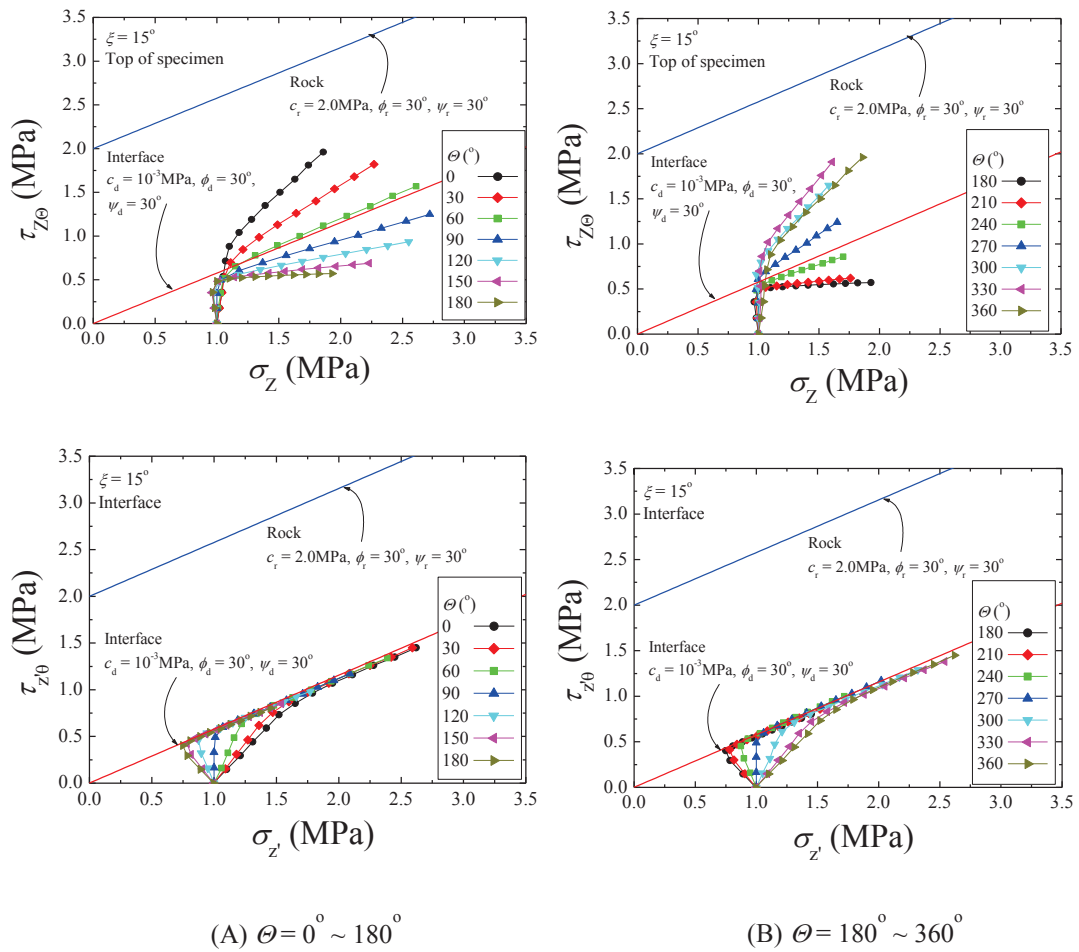


図 4.20  $\xi = 15^\circ$  の試験体上端と不連続面の  $\tau$ -関係の比較 (Case a)  
(上：試験体上端，下：不連続面)

$60^\circ < \theta$  では、応力経路が不連続面の破壊規準よりも応力状態が低い部分を推移する．不連続面の応力に関しては、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$  では、 $\sigma_z$  が増加した後に、不連続面の破壊規準上を推移し、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$  では、 $\sigma_z$  が減少した後に、破壊規準上を推移する．4.2 で議論した想定通りのことが言える．さらに、図 4.5 の非要素となる中空円筒の不連続面の応力経路と解析結果を図 4.21 と図 4.22 に比較すると、ほとんど想定通りの不連続面の応力経路が得られていることがわかる．なお、不連続面を含む岩盤に相当する試験体上端の応力経路は、図 4.23 と図 4.24 に示すように、不連続面の破壊規準に到達するまでは、せん断応力の増加に伴ってほとんど一様に増加する．

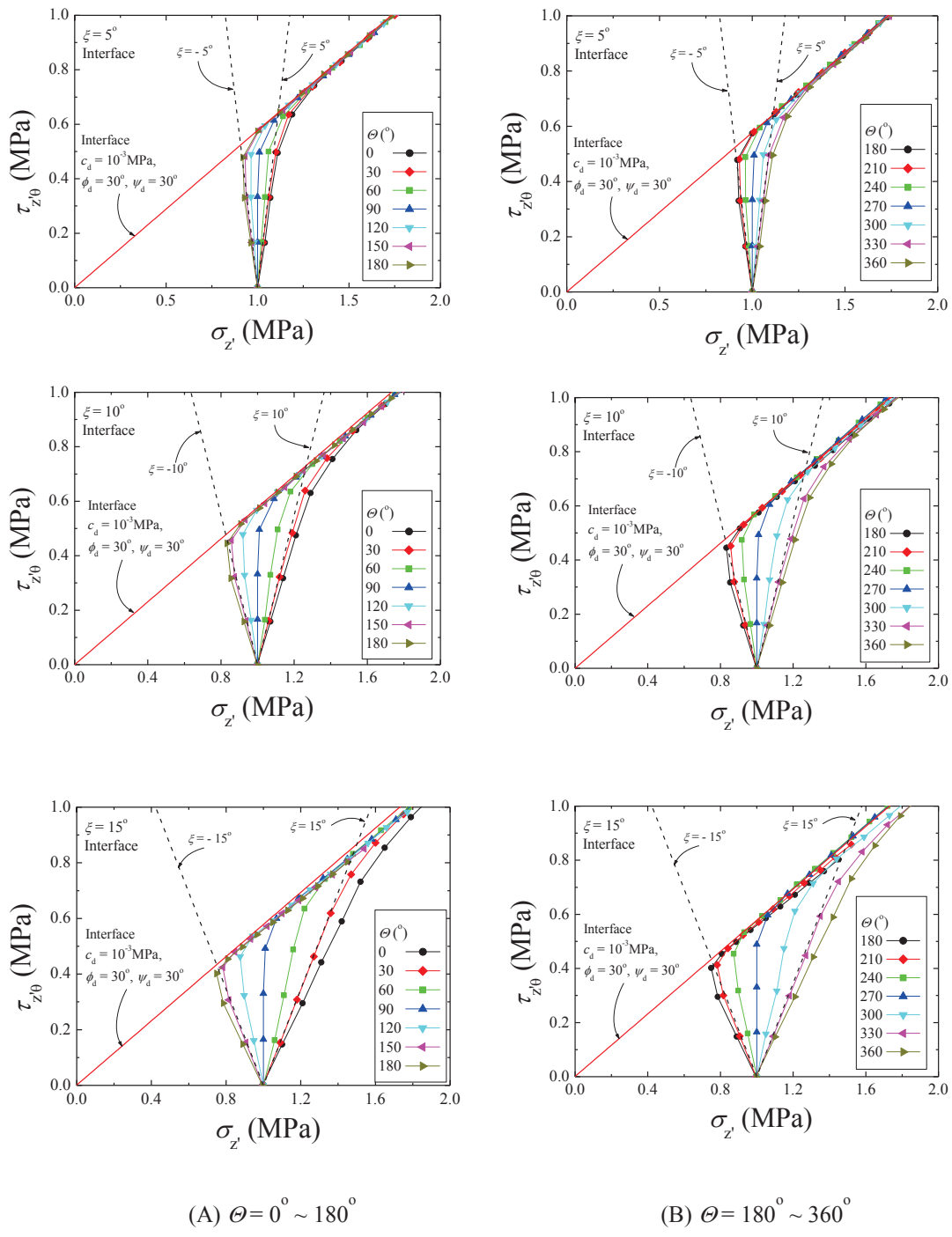


図 4.21 不連続面の応力経路と理論上の応力経路の比較 (Case a,  $\xi = 5^\circ \sim 15^\circ$ )

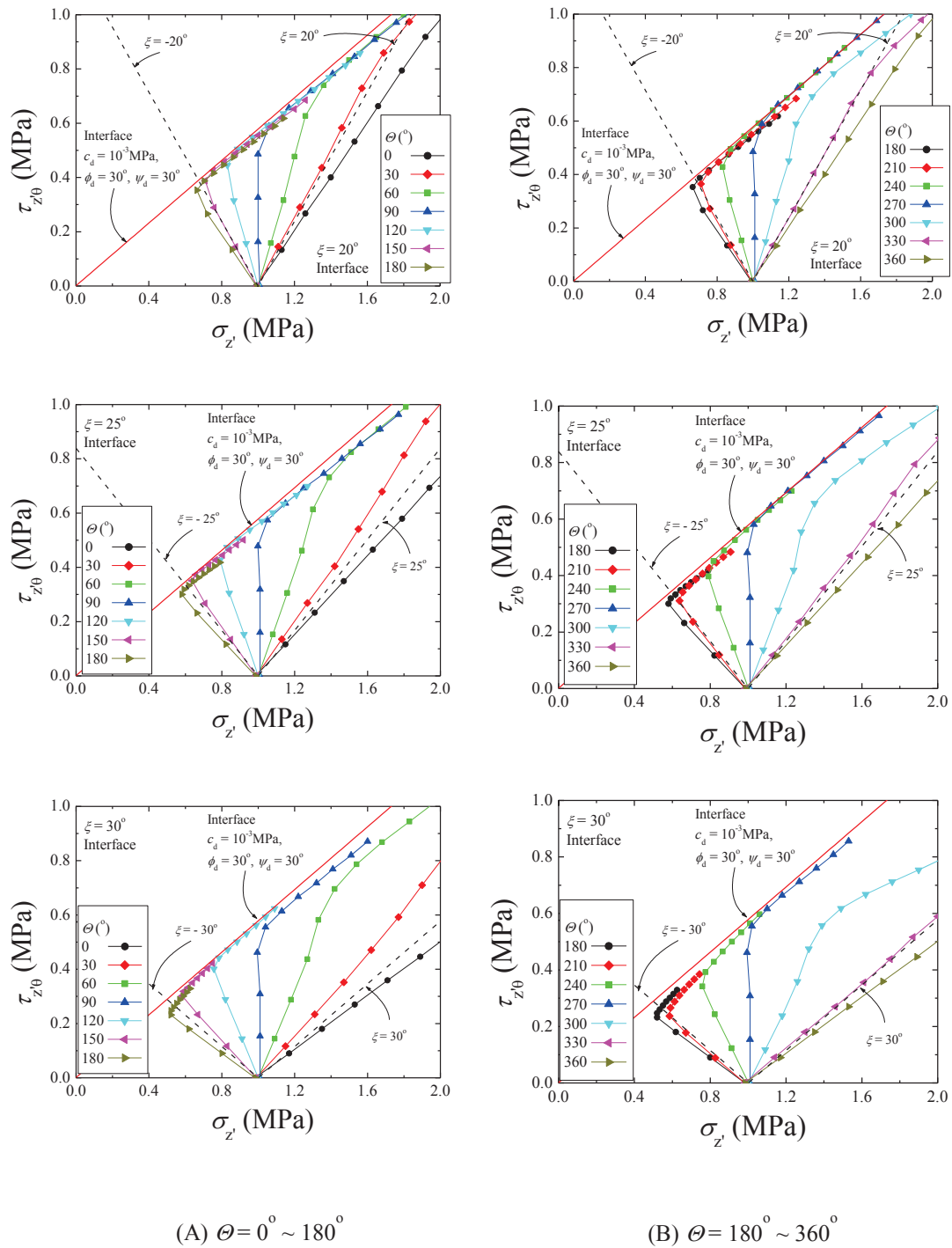
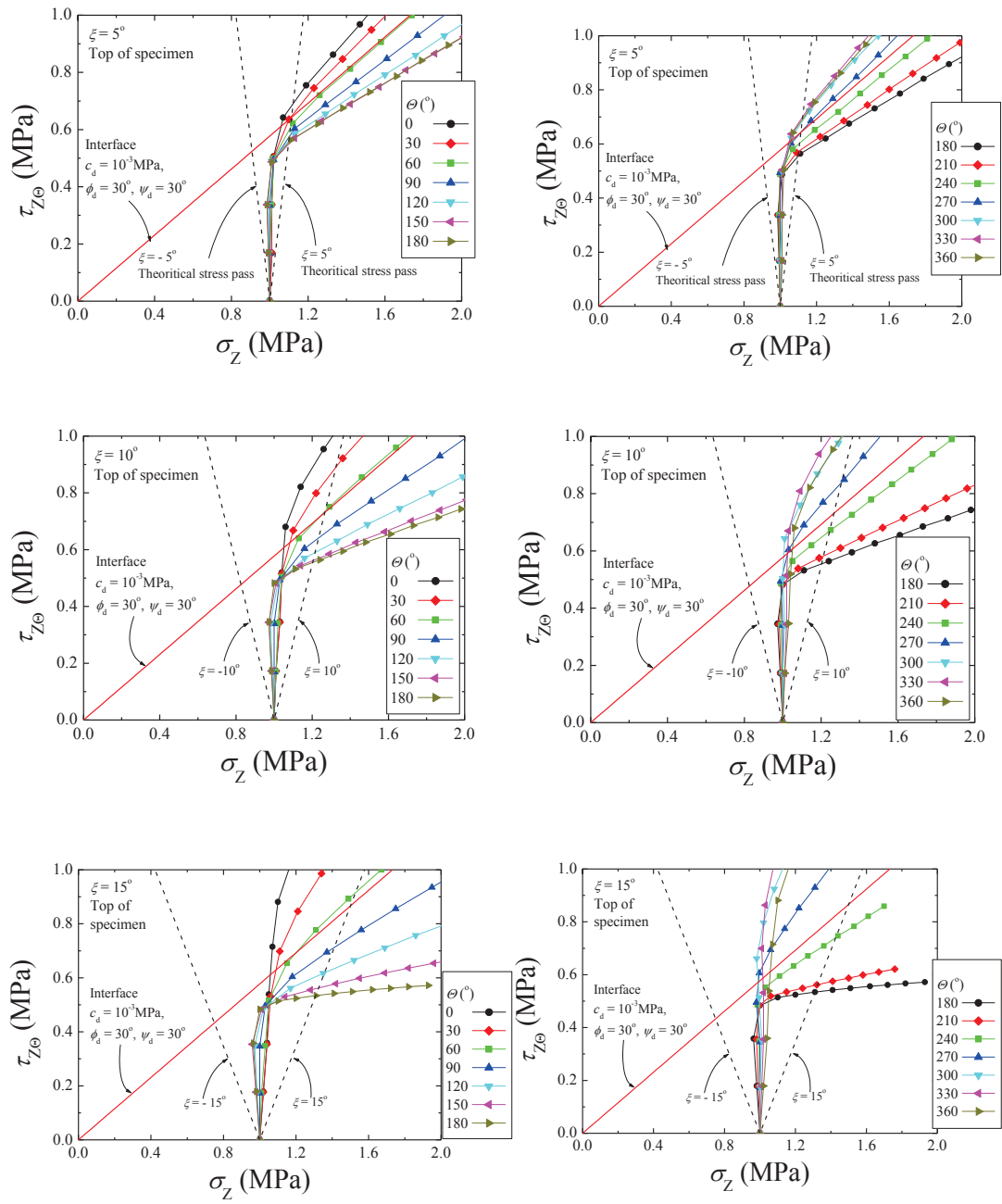


図 4.22 不連続面の応力経路と理論上の応力経路の比較 (Case a,  $\xi = 20^\circ \sim 30^\circ$ )





(A)  $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$

(B)  $\theta = 180^\circ \sim 360^\circ$

図 4.23 試験体上端の応力経路と理論上の不連続面の応力経路の比較 (Case a,  $\xi = 5^\circ \sim 15^\circ$ )

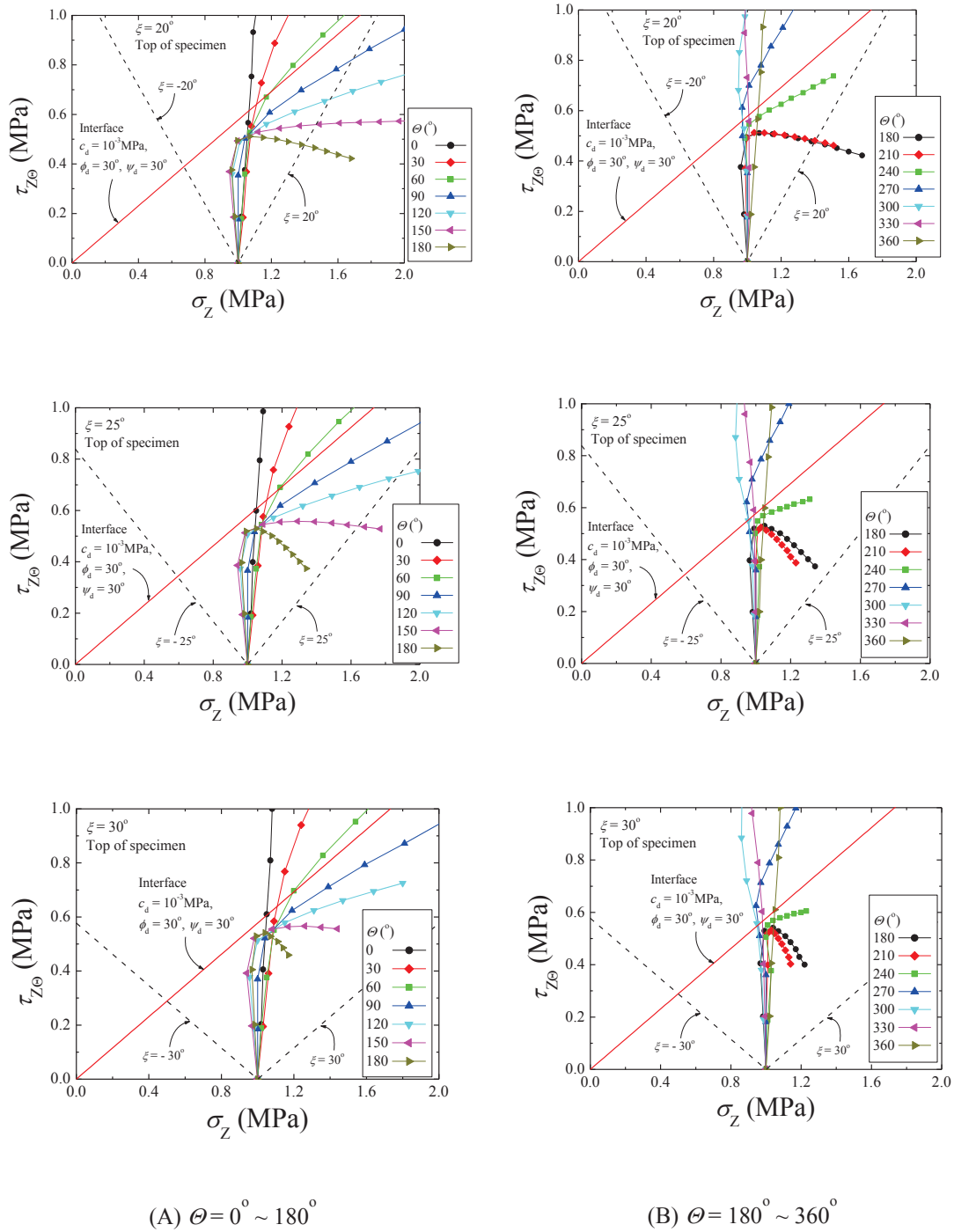


図 4.24 試験体上端の応力経路と理論上の不連続面の応力経路の比較 (Case a,  $\xi = 20^\circ \sim 30^\circ$ )

#### (4). Case a における不連続面の応力分布の推定式の妥当性

(3)で得られた解析結果から、式(4-3)の破壊時の不連続面の応力分布の推定式の妥当性をここで図 4.25 に議論する。図の黒四角 (■) のプロットが式(4-3)の推定式で、破壊規準に到達した時の分布を示している。ちょうど破壊規準に達したせん断レベルの解析結果がないため、近いせん断レベルの FEM の結果を複数示した。ξが変化してもかなり正確な分布が得られており、不連続面の破壊時の応力が推定できる。例えば、試験後に試験体の観察から、卓越した不連続面の傾斜を特定すれば、破壊に至った不連続面内の点を特定できる。

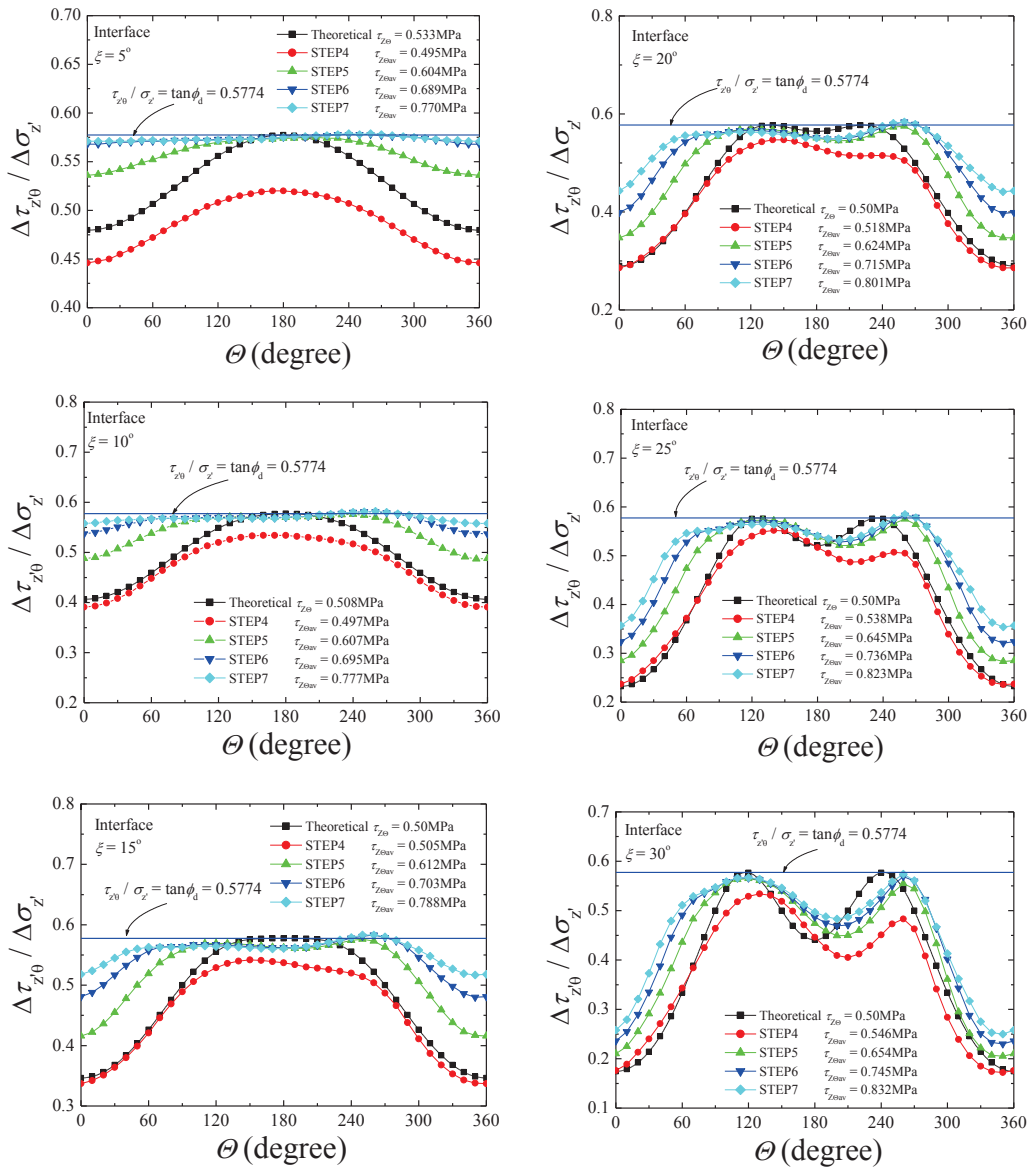


図 4.25 破壊時の不連続面の応力分布の推定 (Case a)

(5). Case b の解析結果

Case b では、不連続面の凹凸に起因する不連続面の粘着力の影響について考察する。  $\xi = 15^\circ$ 、 $c_d = 0.5\text{MPa}$  の試験体の応力ひずみ関係を図 4.26 に示す。ここでは  $\theta = 0^\circ \sim 180^\circ$  のデータを示す。直応力とせん断応力の全体的な傾向は  $c_d = 0\text{MPa}$  のケースと同様である。せん断応力比に関しては、試験体上端と不連続面の  $90^\circ < \theta$  のデータがひずみ軟化を示し、それ以外のデータはひずみ硬化を示す複雑な傾向となる。

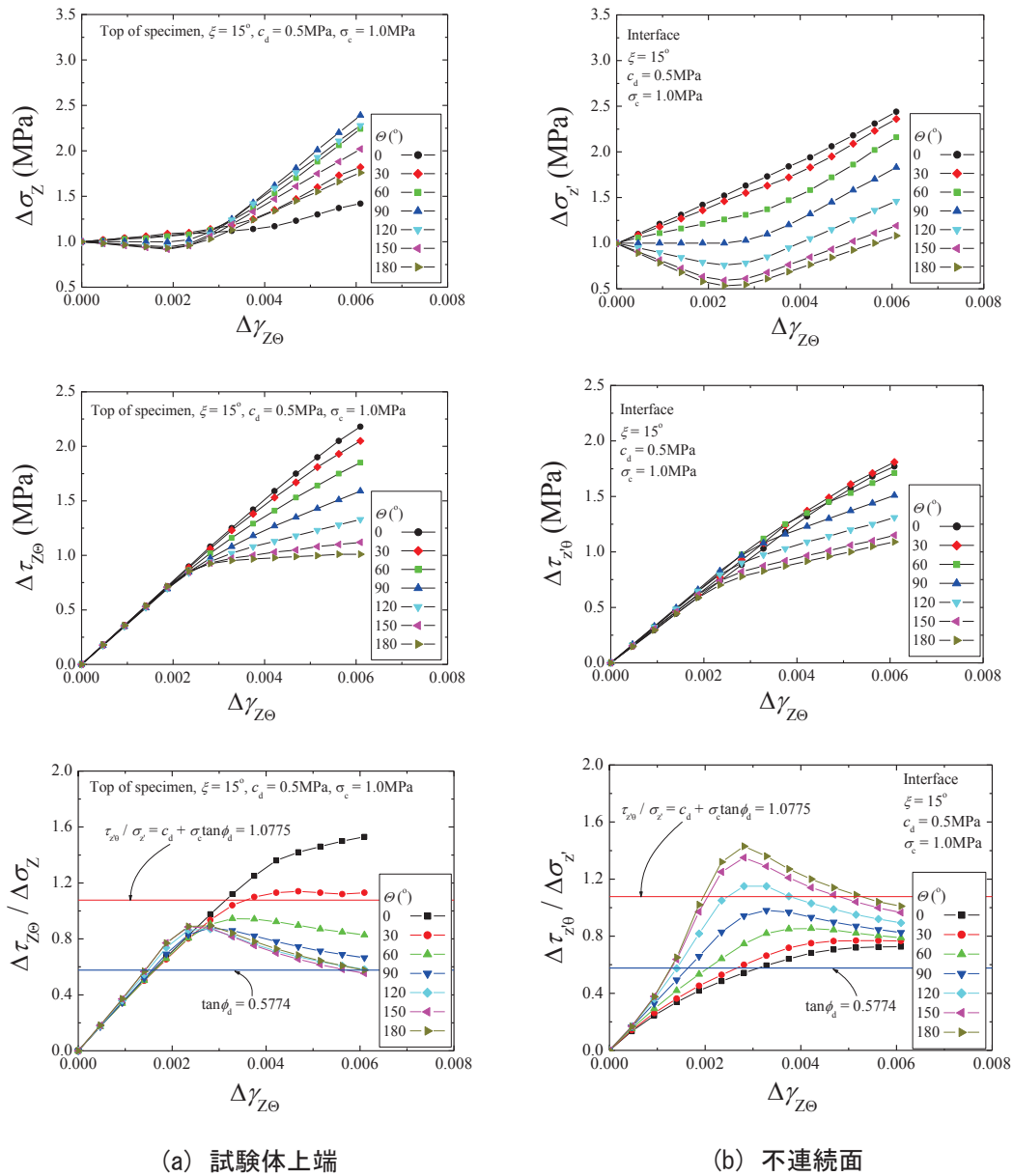
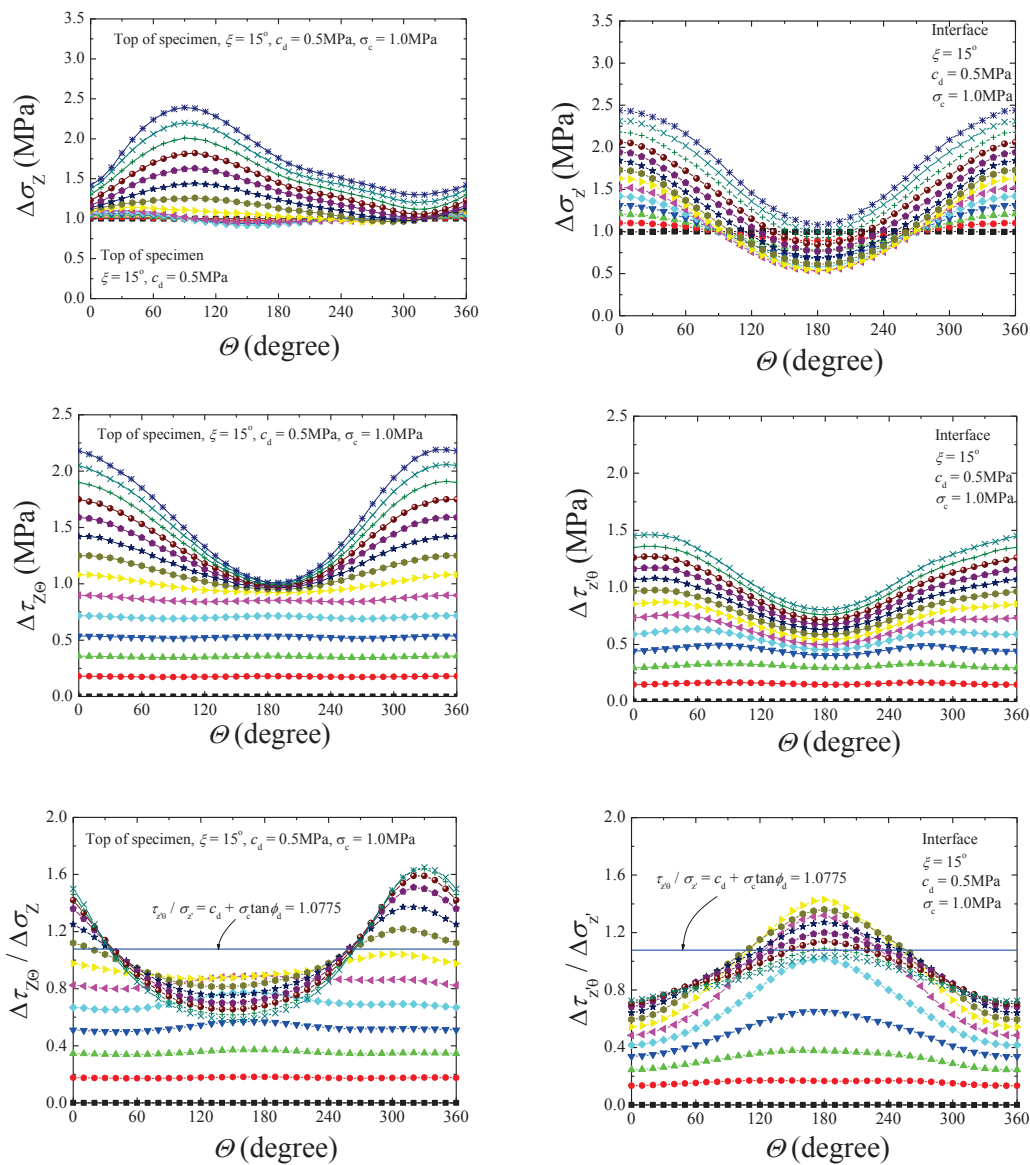


図 4.26  $\xi = 15^\circ$ 、 $c_d \neq 0\text{MPa}$  の試験体の応力ひずみ関係 (Case b,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  の例)

図 4.27 に同じケースの応力分布を示す。  $c_d \neq 0\text{MPa}$  のケースと異なり、試験体上端のせん断応力比分布の塑性変形に伴う不動点は  $\tau_{z\theta} / \sigma_z = c_d + \sigma_c \tan \phi_d = 1.0775$  の上にある。不連続面の粘着力  $c_d$  の程度は明らかになっていないことが多いが、  $c_d \neq 0\text{MPa}$  を仮定する場合でも、中空ねじり試験で試験上端の応力分布を計測すれば、破壊時の不連続面のせん断応力比が推定できる。



(a) 試験体上端

(b) 不連続面

図 4.27  $\xi = 15^\circ$ ,  $c_d \neq 0\text{MPa}$  の試験体の応力分布 (Case b)

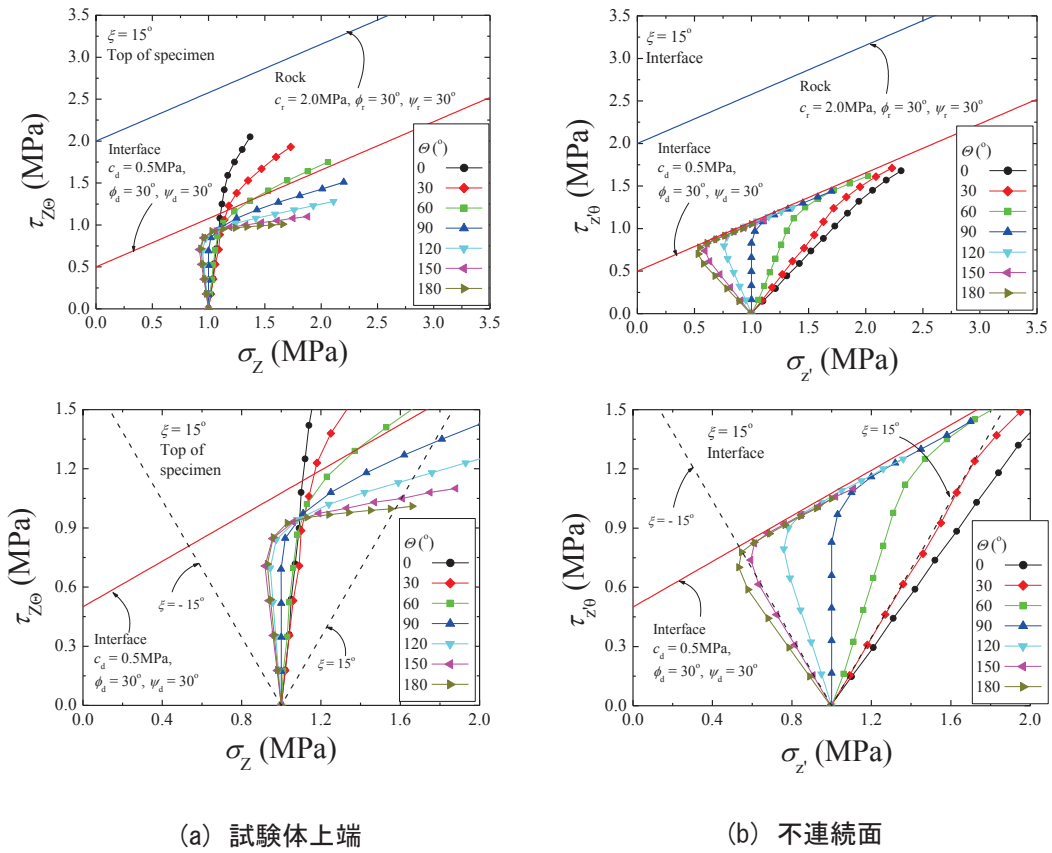


図 4.28  $\xi = 15^\circ$ ,  $c_d \neq 0\text{MPa}$  の試験体の  $\tau - \sigma$  関係  
(Case b, 上: 全体, 下: 拡大,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  の例)

また、不連続面のせん断応力比は  $\theta = 180^\circ$  付近で直応力が低下していくため、せん断応力比が  $\tau_{z\theta} / \sigma_z = 1.0775$  よりも部分的に大きくなる。図 4.28 は同じケースの  $\tau - \sigma$  関係を示す。試験体上端では  $c_d = 0\text{MPa}$  のケースと同様の傾向を示し、不連続面の拡大では、図 4.5 で議論した通りの結果が得られた。

#### (6). Case c の解析結果

Case c では、非関連流れ則を仮定し、不連続面の凹凸の乗り上げが全く起こらない、ダイラタンシー角  $\psi_d = 0^\circ$  のケースについて考察した。現実には、せん断レベルを上げていく程に不連続面の凹凸が削られ、 $\psi_d$  が大きい状態からゼロに移行していくため、Case a と Case c の現象が順を追って起こると考えられる。図 4.29 には同ケースの応力ひずみ関係を示す。このように、せん断レベルが大きくなるに従って不連続面の直応力が最終的にゼロになるため、試験体上端の直応力もゼロに近づき、双方のせん断応力も小さくなっていく。

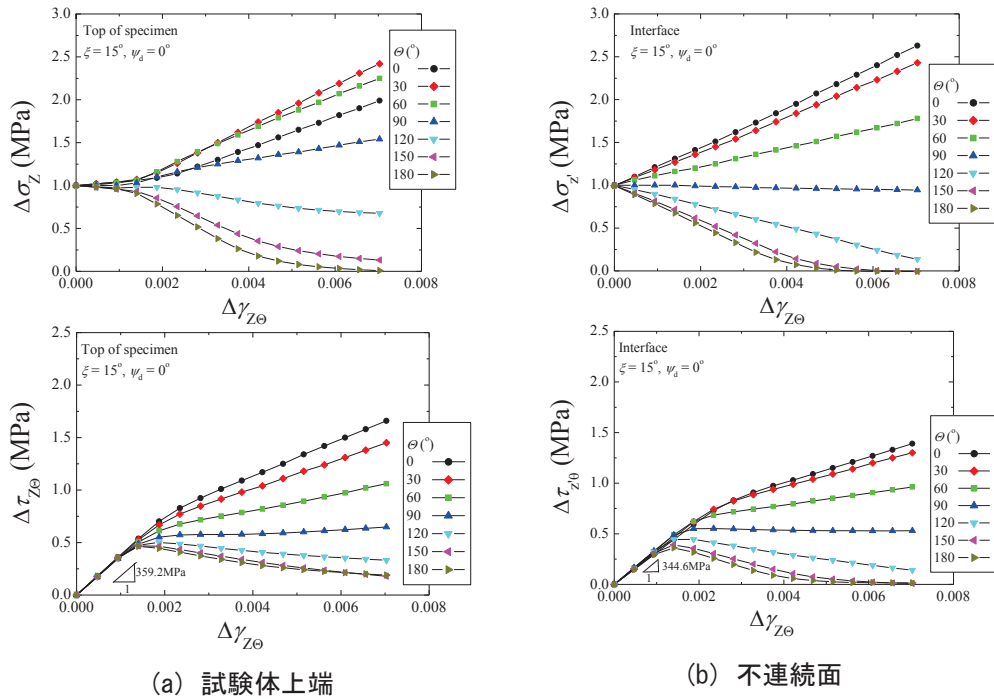


図 4.29  $\xi = 15^\circ$ ,  $\phi_d \neq \psi_d$  の試験体の応力ひずみ関係 (Case c,  $\theta=0\sim 180^\circ$  の例)

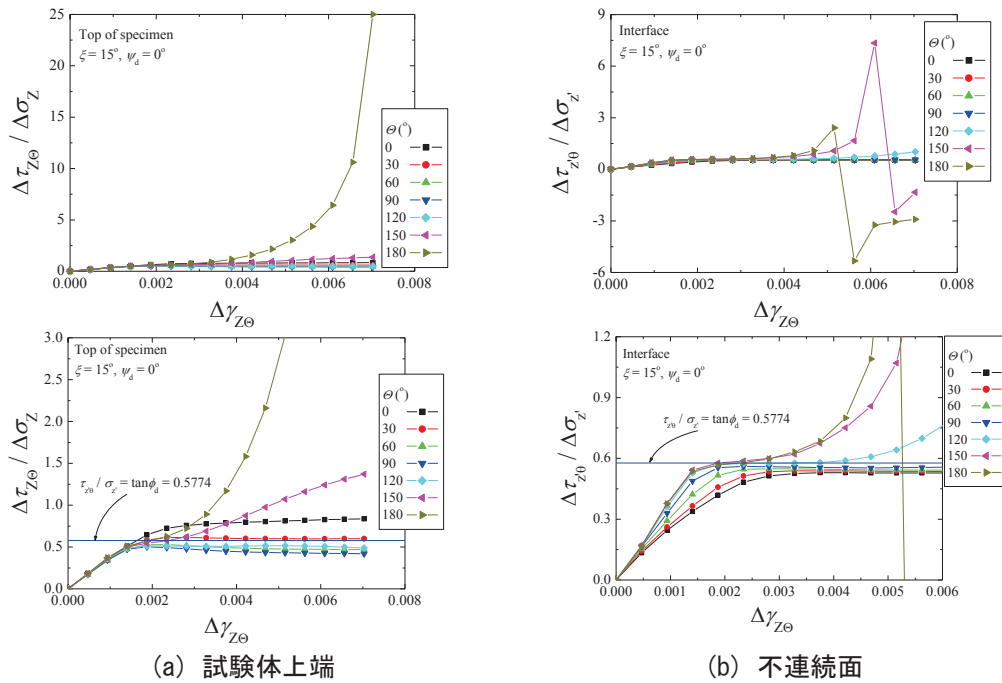


図 4.30  $\xi = 15^\circ$ ,  $\phi_d \neq \psi_d$  の試験体のせん断応力比とひずみの関係 (Case c, 上: 全体, 下: 拡大,  $\theta=0\sim 180^\circ$  の例)

図 4.30 にはせん断応力比とひずみの関係を示す。図 4.29 の不連続面と試験体上端の直応力がゼロに近づく影響で、せん断応力比が $\theta = 180^\circ$ 付近で発散する。図 4.31 には、せん断応力と直応力の分布を示す。せん断応力と直応力は、試験体上端と不連続面で共に、不連続面の塑性変形に伴って、 $\theta = 180^\circ$ 付近で減少する傾向が見られる。図 4.32 には、せん断応力比の分布を示す。図 4.30 と同様に、不連続面の塑性変形に伴ってせん断応力比は発散する。試験体上端の拡大した応力分布をみると、不連続面の塑性変形に伴う不動点は $\tau_{z\theta} / \sigma_z = \tan\phi_d = 0.5774$ 上にあり、非関連流れ則を仮定した場合でも、中空ねじり試験で試験体上端の応力分布を計測できれば、せん断抵抗角が推定できる。図 4.33 にはせん断応力と直応力の関係を示す。ダイラタンシーが全く起こらないために、 $90^\circ < \theta$ では試験体上端と不連続面で直応力とせん断応力が共に減少していく傾向が見られる。また、図 4.5 で推定した通りの結果が、非関連流れ側を仮定した場合でも得られる。

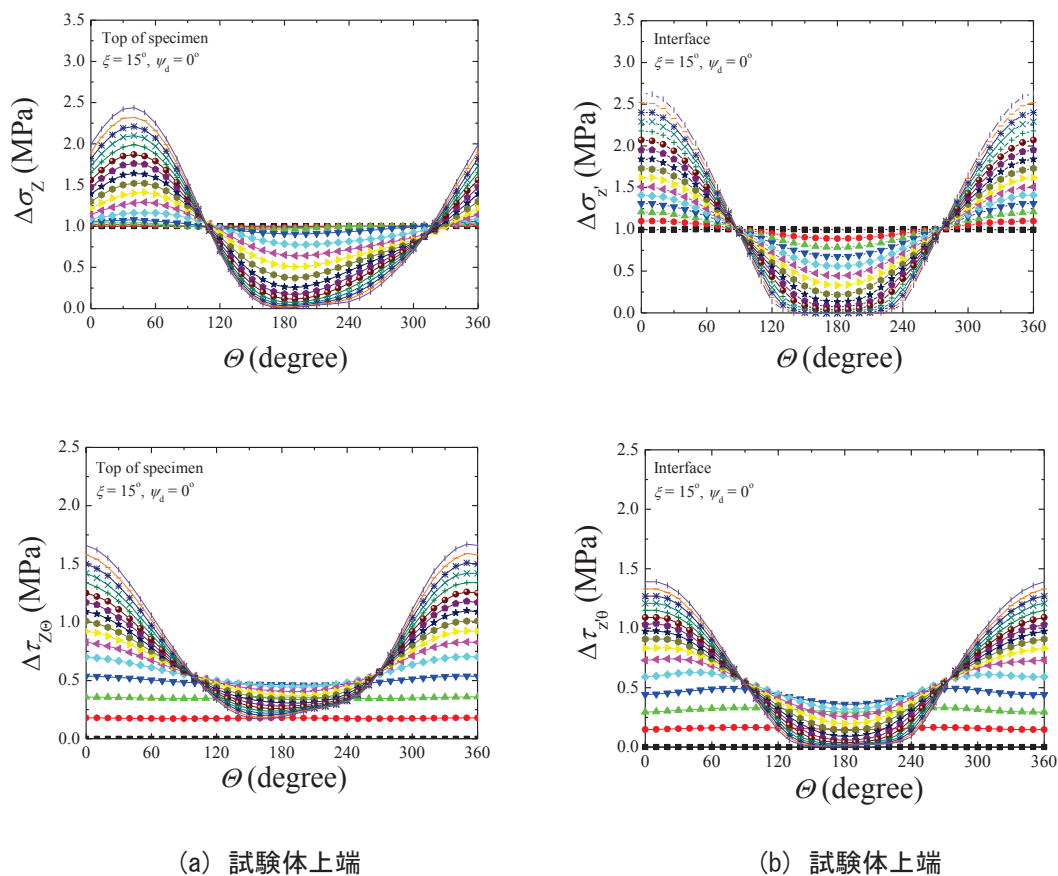


図 4.31  $\xi = 15^\circ$ ,  $\phi_d \neq \psi_d$  の試験体の応力分布 (Case c,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  の例)



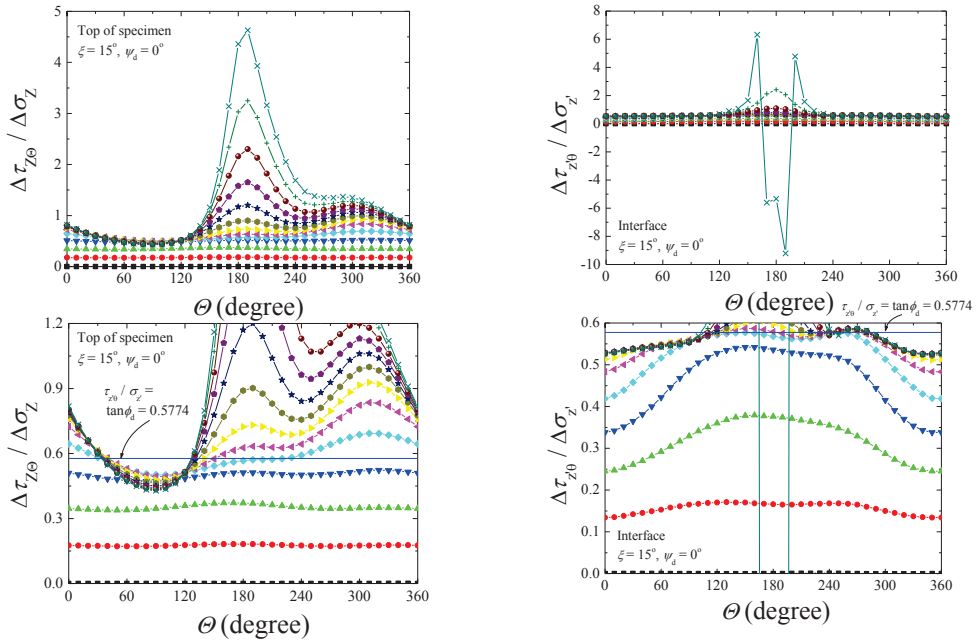


図 4.32  $\xi = 15^\circ$ ,  $\phi_d \neq \psi_d$  の試験体のせん断応力比の分布 (左: 上端, 右: 不連続面)  
(Case c, 上: 全体, 下: 拡大,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  の例)

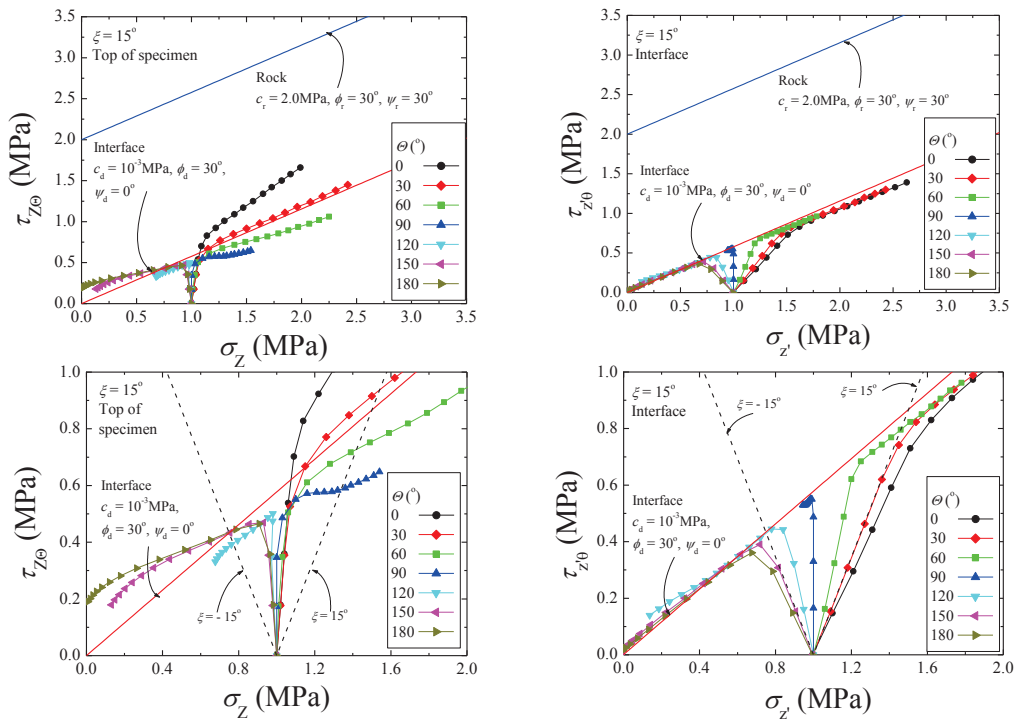


図 4.33  $\xi = 15^\circ$ ,  $\phi_d \neq \psi_d$  の試験体の  $\tau - \sigma$  関係 (右: 上端, 右: 不連続面)  
(Case c, 上: 全体, 下: 拡大,  $\theta = 0 \sim 180^\circ$  の例)

#### 参考文献

- 1) I. W. ファーマー：岩盤工学の基礎と応用，鹿島出版会，1988.
- 2) Attewell, P. B. and Farmer, I. W.: Principles of engineering geology, *Chapman and Hall*, London.
- 3) 菊本統，谷和夫，富樫陽太：原位置岩盤試験方法および装置，特願 2013-148114 号，2013.
- 4) 地盤工学会：原位置岩盤試験データベース（2008 年度版），丸善，2009.
- 5) グッドマン，R. E.: 不連続性岩盤の地質工学，森北出版，1976.
- 6) 日本材料学会：ロックメカニクス，技報堂出版，2002.

## 5. 三軸試験で岩盤の変形特性の異方性を特定する手法の提案

三軸試験をはじめとする要素試験において、2章で挙げた従来の岩盤の変形異方性の調査方法には、以下の(1)~(3)の欠点・問題点がある。

### (1) 異方性材料の変形と応力の条件が考慮されていない

異方性材料は、必ずしも軸対称条件が満たされず、主応力方向と主ひずみ方向が一致しない。そのため、変形に拘束のない条件で载荷すると、供試体の上下端が自由に変位できる条件（図 3.3 (a)）では、剛性の等方な面の傾斜方向（Y軸方向）にせん断変形が起こるし、従来の三軸試験に近い条件の、軸に直交する方向の変位が拘束されている条件（図 3.3 (b)）では、Y軸方向にせん断応力が発生する。このようなせん断変形やせん断応力は異方性に起因するもので、異方性を特定する上で重要であるが、従来の試験で計測しようとする試みはない。

### (2) 異方性の方向が特定できない

従来の変形特性の異方性の調査は、岩石コアの観察で異方性の方向を推定した上で行われる。従来の方法では、異方性の方向が、堆積面や節理の方位あるいは鉱物粒子の配向と一致すると仮定されるが、例えば複数の方向に卓越する節理を持つ岩石などの場合は異方性の方向が特定できない。

### (3) 複数回の試験が必要

最も簡易な変形異方性である面内等方性を仮定した調査でも、最低で3方向にサンプリングしたコアを用いた試験が必要になる。試験結果のばらつきを考慮するためには、さらに試験数を増やす必要があり、費用と時間がかかる。

このうち、(2)と(3)は、2章で言及したように、Gonzaga et al.(2008)が、等方圧密時の主ひずみ方向と異方性の方向が一致する特性と等方圧密・軸圧縮の2つの载荷モードによる変形を計測して弾性パラメータを求める手法を提案する手法を提案したが、著者らが3章で弾性解を求め、(1)で言及したような、異方性材料特有の変形と応力の条件を考慮した調査方法は、いまだ考案されていない。

そこで、この章では、著者らが発明した、三軸試験で変形特性の異方性を特定するキャップの機構と手法について説明する<sup>1)</sup>。

### 5-1. 変形特性の異方性を特定するキャップ機構の提案

変形特性の異方性を特定できるキャップの機構は2つあって、1つは「変位計測式キャップ」で、キャップが軸方向以外に変位することが可能で、異方性に起因する変形を計測できる、3章で説明した図 3.3(a)の試験条件を作り出せる。もう1つは「荷重計測式キャップ」で、通常の三軸試験に近い図 3.3(b)の条件（キャップが軸方向以外に動かない条件）で、異

方に起因するせん断応力を計測することができる。これらのキャップを用い、異方性に起因する供試体の変形あるいはキャップに作用する荷重を計測することで、1回の三軸試験によって変形特性の異方性を調査できる。

### (1). 変位計測式キャップ

「変位計測式キャップ」を図 5.1 に示す。このキャップを用いれば、異方性材料の変形挙動に合わせた試験条件で三軸試験を行える。

#### (a) 異方性岩盤の変形特性に合わせた载荷条件を満たす方法

変位計測式キャップは、2組のレールとキャリバーで構成され、図 5.1 のように通常の三軸試験のキャップの上部に配置するもので、キャリバーがレールに沿って、軸方向に直交する2方向(図のSE面内)をレールにかかる摩擦の影響をほとんど受けずに可動することができる。異方性材料を用いた三軸試験において、図 5.2 のように、異方性材料の変形に合わせて、せん断応力が発生しない条件で载荷することができる。キャップの材質はステンレススチールなど剛性の高いものを用いる。供試体のせん断変形にキャップが追従する必要があるため、供試体と通常のキャップは石膏あるいは接着剤等で固定し、必要があればキャップの表面に凹凸をつける。

#### (b) 岩盤の異方性に起因する変形を計測

供試体の形状は三軸試験で一般的な円柱形がよい。供試体の変形は、供試体側面に設置したひずみの計測を基本とし、加えて载荷軸方向の外部変位や、渦電流式変位計などでキャリバーの変位(図 5.1)、ビューレットなどで排水量を計測しても良い。

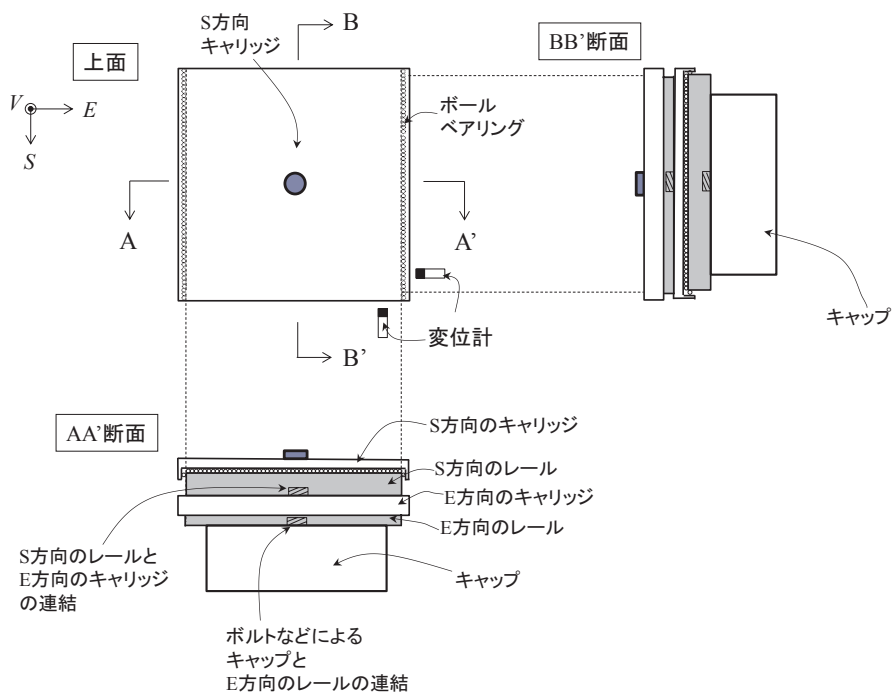


図 5.1 変位計測式キャップ

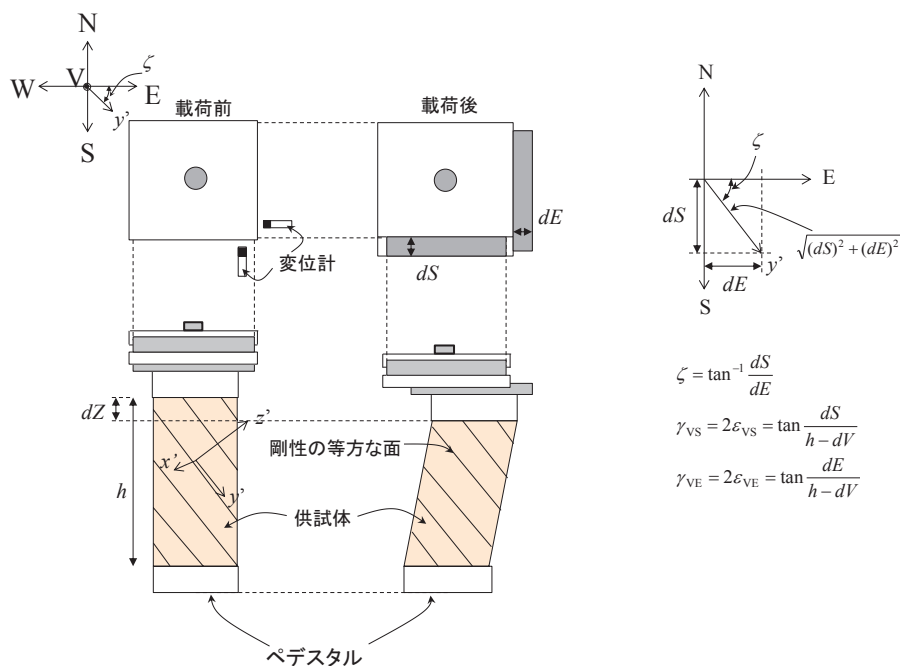


図 5.2 変位計測式キャップの動き

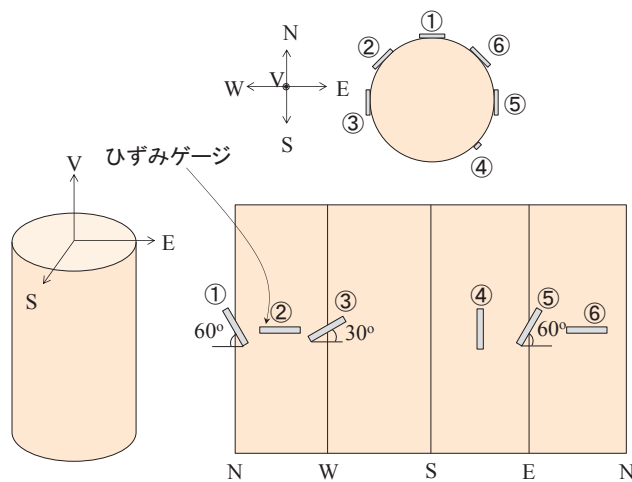


図 5.3 ひずみゲージの設置

ひずみゲージの設置個所に関しては、地理座標系 (E, W, N, S) に対して、供試体の側面に 図 5.3 のようにひずみゲージを設置する。ひずみゲージは接着剤等で供試体の中部に接着し、パラフィンあるいはシリコンゴムなどでプレート表面を止水するのが好ましい。i 番目のひずみゲージ (①) で計測されるひずみを  $x_i$  とすると、地理座標系のひずみテンソル成分は式(5-1)で計算できる。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_S \\ \varepsilon_E \\ \varepsilon_V \\ \gamma_{SE} \\ \gamma_{EV} \\ \gamma_{VS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2.31 & 0.58 & -0.58 & -2.31 & 0.58 & -0.58 \\ 0 & 0 & 0.58 & 1.15 & -1.73 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

なお、 $\gamma_{ij}$ は工学ひずみでテンソルひずみ $\varepsilon_{ij}$ と $\gamma_{ij}=2\varepsilon_{ij}$  ( $i \neq j$ ) ( $i, j = S, E, V$ )の関係がある。

## (2). 荷重計測式キャップ

「荷重計測式キャップ」を図 5.4 に提案する。このキャップを用いれば、通常の三軸試験の条件で、異方性に起因する荷重を計測できる。

### (a) 異方性岩盤に働く応力の特性に合わせた試験条件を満たす方法

応力計測式キャップは 2 方向ロードセルを内蔵し、供試体上端面で、供試体の軸に直交する 2 方向の荷重を計測できる。図のように通常の三軸試験のキャップの上部に配置する。荷重の条件は一般的な三軸試験と同様だが、せん断変形が発生しない条件で、図 5.5 のように異方性に起因するせん断応力を計測できる。せん断変形を抑制するために、供試体とキャップは剛結する必要がある、その境界には、接着剤やキャップ表面に凹凸をつけるなどの処理をする。

### (b) 岩盤の異方性に起因する荷重を計測

供試体の形状は三軸試験で一般的な円柱形を用いる。

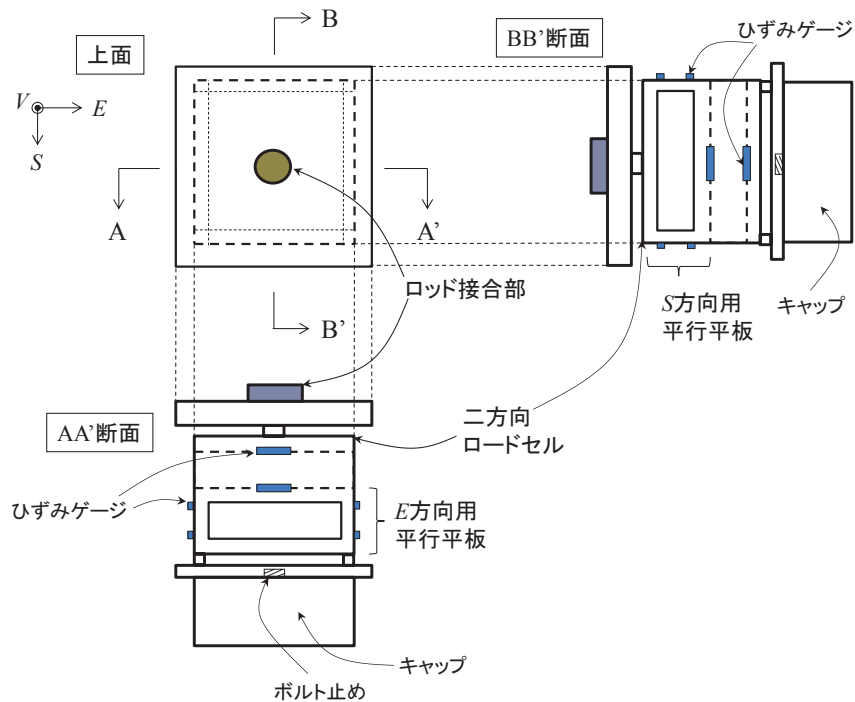


図 5.4 荷重計測式キャップ

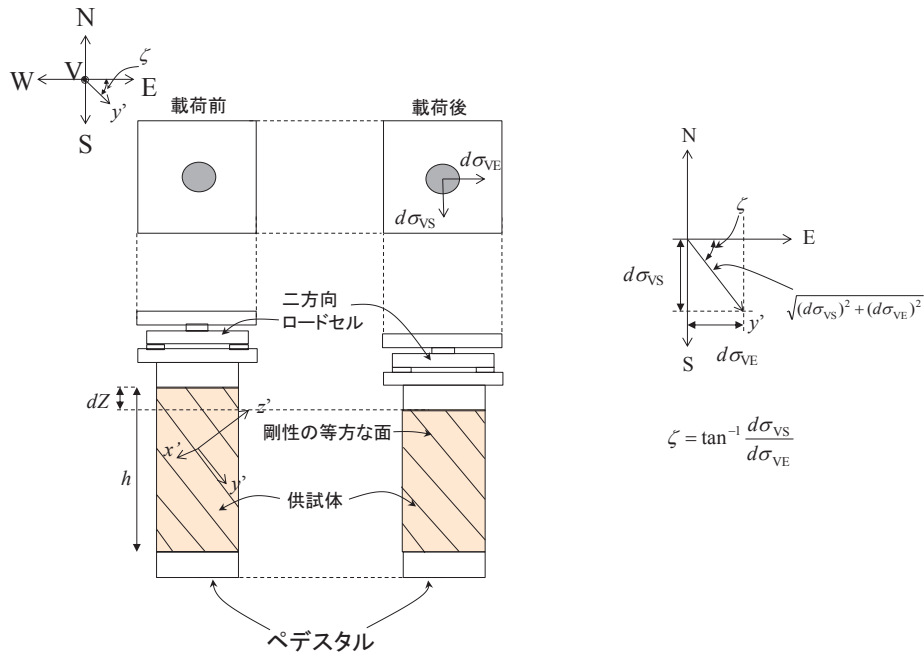


図 5.5 荷重計測式キャップで計測する応力

供試体に働く荷重面内の荷重（供試体の断面積で割れば平均応力）の計測に関しては、キャップ内の 2 方向ロードセルを用い、平行平板型のものなどでよい。荷重軸方向の荷重に関してはキャップの直上で計測する。この時、セルの内部または外部のロードセルのどちらで計測しても良いが、外部ロードセルは、ロッドが荷重枠上盤で摩擦力を受ける場合があるので、事前にキャリブレーションして計測値を補正する必要がある。ひずみの計測に関しては、荷重軸方向のひずみを供試体の側面に設置したひずみゲージにより計測する。加えて外部変位計によって軸変位を計測しても良いが、ベディングエラーの影響が含まれることに留意する必要がある。

## 5-2. 三軸試験で変形特性の異方性を特定する方法

以下に、変位計測式キャップを用いた場合と荷重計測式キャップを用いた場合の面内等方性を仮定した変形特性の異方性の特定方法を記す。

### (1). 変位計測式キャップを用いた方法

図 5.6 に面内等方弾性体要素と地理座標系(E, W, N, S), 異方性の方向を表す局所座標系( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ ) の関係を示す<sup>2)</sup>。  $x'$  軸方向は剛性が等方な面の走向,  $y'$  軸方向は剛性が等方な面の傾斜方位,  $z'$  軸方向は剛性の等方な面の法線方向で, E 軸と傾斜方位  $y'$  軸の為す角度を  $\zeta$  とする。ここでは, 3 章と同様に,  $x'$  方向と  $y'$  方向の弾性パラメータ (ヤング率, ポアソン比, せん断剛性率) を ( $E_{x'}$ ,  $\nu_{x'}$ ,  $G_{x'}$  ( $=E_{x'}/2(1+\nu_{x'})$ )) とし,  $z'$  方向の弾性パラメータを ( $E_{z'}$ ,  $\nu_{z'}$ ,  $G_{z'}$ ) とした。

変位計測式キャップを用い、面内等方性を仮定した岩盤の変形特性の異方性を求めるフローを図 5.7 に示す。まず、試験の準備として、供試体の目視観察を行い剛性が等方と推定される面（乃ち不連続面）の $\zeta$ と傾斜 $\xi$ を推定する (①)。このとき、サンプリング時の東西南北（地理座標系）の方位と供試体の位置関係を確認した後に、ひずみゲージなどの計測機器を設置する (②)。ひずみゲージを設置に関しては、地理座標系に対して前述した図 5.3 のように行う。

次に、等方圧密 (③)、軸圧縮 (④) を行い、応力とひずみの計測を行う。各载荷はひずみレベルを  $10^{-5}$  から  $10^{-4}$  以下の弾性域<sup>3)</sup>で行うのが好ましい。

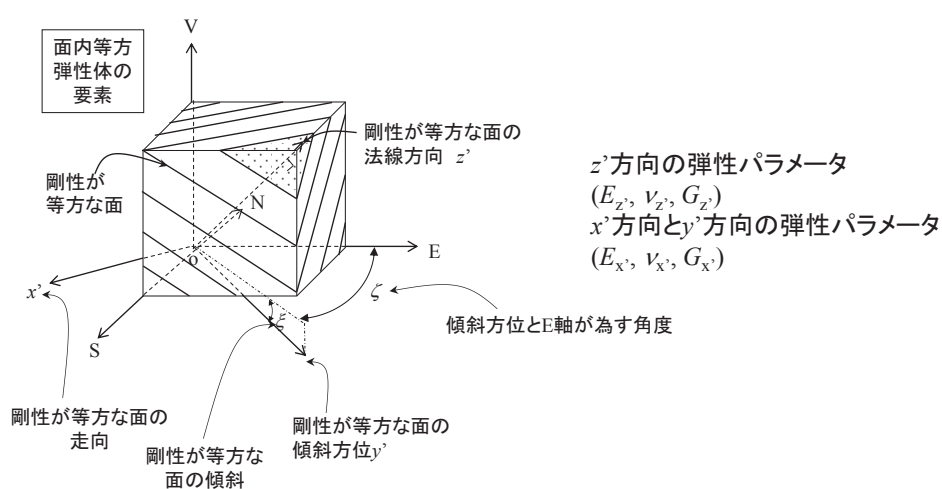


図 5.6 面内等方弾性体要素と座標系の関係

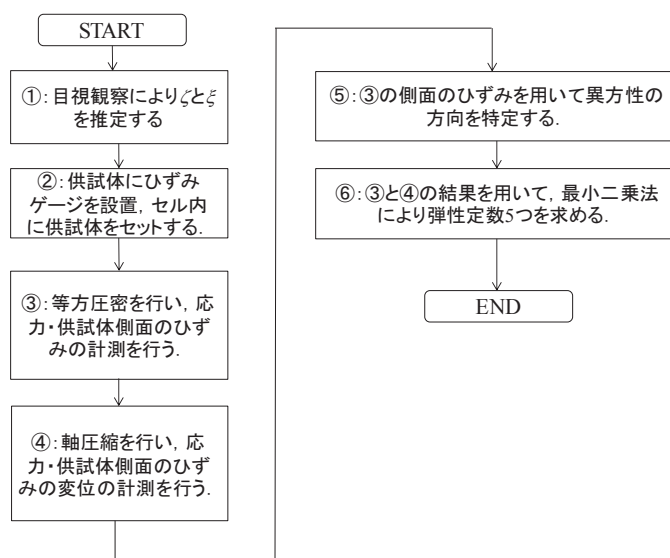


図 5.7 変位計測式キャップを用いて異方性を特定するフロー



もちろん各载荷で段階的に载荷する応力を上げ下げして塑性変形の判定を行ったり，塑性変形に伴う剛性の変化を計測することもできる。

次に，等方圧密時のひずみの計測値を用いて，**図 5.6** に示した剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ と $\zeta$ を特定し，座標軸を設定する (⑤)．前述したひずみの計測方法により，地理座標系での等方圧载荷時のひずみ増分テンソル $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ は式(5-2)で表される． $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ から，式(5-3)によって主ひずみを求める．

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}' = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_S & \Delta\varepsilon_{SE} & \Delta\varepsilon_{SV} \\ & \Delta\varepsilon_E & \Delta\varepsilon_{EV} \\ sym. & & \Delta\varepsilon_V \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

$$\mathbf{e}^T \Delta\boldsymbol{\varepsilon}' \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (5-3)$$

式(5-3)のひずみテンソルの対角化は jacobi 法<sup>4)</sup>などを用い，式(5-4)で表される主ひずみの単位方向ベクトル $\mathbf{e}$ を求める．等方圧密時には，Gonzaga et al.(2008)が指摘したように，異方性の方向 $(x', y', z')$ と主ひずみ方向 $(1, 2, 3)$ が一致する<sup>5)</sup>ため， $(\xi, \zeta)$ によって $\mathbf{e}$ は構成され，例えば式(5-5)によって $\xi$ と $\zeta$ は特定されるが， $e_{12}$ で $\zeta$ を， $e_{23}$ で $\xi$ を求めてもよいし，ばらつきを評価するために，複数の求めた $\xi, \zeta$ を平均値化しても良い．

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta & 0 \\ -\cos\xi\sin\zeta & \cos\xi\cos\zeta & \sin\xi \\ \sin\xi\cos\zeta & -\sin\xi\sin\zeta & \cos\xi \end{pmatrix} \quad (5-4)$$

$$\begin{aligned} \xi &= \cos^{-1}(e_{33}) \\ \zeta &= \cos^{-1}(e_{11}) \end{aligned} \quad (5-5)$$

ここで， $\zeta$ を用いて**図 5.8**のように，E軸から時計周りの角度 $\zeta$ の位置にY軸が来るように，直交座標系 $(X, Y, Z)$ を設定する．この操作でX軸と $x'$ 軸は一致する．

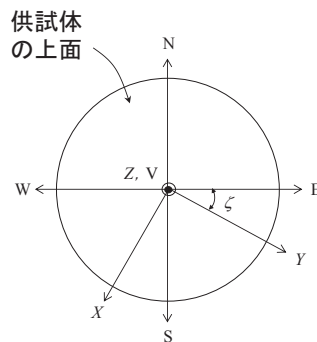


図 5.8 座標軸の設定

また,  $(X, Y, Z)$ 座標系に合わせて円筒座標系 $(R, \theta, Z)$ を設定して,  $\xi$ の計測結果を併せると, 図 5.9 のような試験体と座標軸の関係を得る. ①の目視観察で得た不連続面の $\zeta$ ・傾斜 $\xi$ と, 異方性の方向の整合をこの時点で確認することができる. さらに, 後述する試験結果の整理のため, 式(5-2)の EWNS 方位系のひずみ増分テンソルを, 式(5-6)で直交座標系 $(X, Y, Z)$ に座標変換する.

$$\begin{pmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta & 0 \\ -\sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_S & \Delta\varepsilon_{SE} & \Delta\varepsilon_{SV} \\ \text{sym.} & \Delta\varepsilon_E & \Delta\varepsilon_{EV} \\ \text{sym.} & \text{sym.} & \Delta\varepsilon_V \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta & 0 \\ \sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_X & \Delta\varepsilon_{XY} & \Delta\varepsilon_{ZX} \\ \Delta\varepsilon_Y & \Delta\varepsilon_{ZY} & \Delta\varepsilon_Z \\ \text{sym.} & \text{sym.} & \text{sym.} \end{pmatrix} \quad (5-6)$$

上記のように, 理論的には,  $x'y'$ 面の剛性 $<z'$ 面の剛性の場合には最大主ひずみ方向と中間主ひずみ方向で形成される面(1-2面) $=x'y'$ 面, 最小主ひずみ方向(3方向) $=z'$ 方向,  $\varepsilon_1=\varepsilon_2$ となり,  $z'$ 面の剛性 $<x'y'$ 面の剛性の場合には中間主ひずみ方向と最小主ひずみ方向で形成される面(2-3面) $=x'y'$ 面, 最大主ひずみ方向(1方向) $=z'$ 方向,  $\varepsilon_2=\varepsilon_3$ となることが予測されるが, 仮に,  $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$ となる場合には, 図 5.10 のように異方性の方向を設定する.

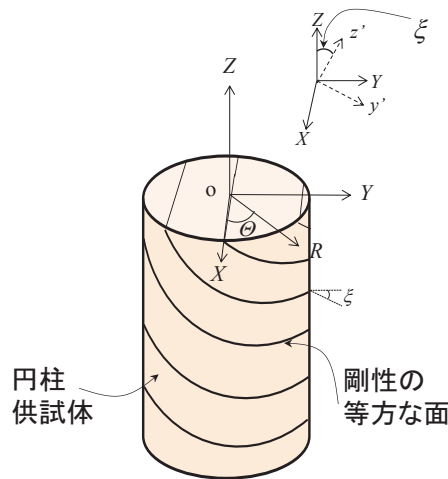


図 5.9 座標軸と供試体の関係

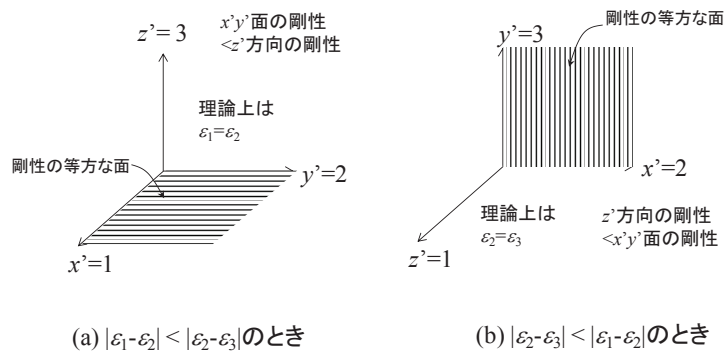


図 5.10 異方性の方向設定

次に、③と④で計測した応力とひずみを用いて、弾性パラメータを定める (⑥)。弾性論により求めた、等方圧密時のひずみテンソル成分の理論解は式(5-7)で表される。ひずみテンソルの成分は式(5-6)で得たものを用い、 $\Delta\sigma_c$ は载荷軸方向のロードセルあるいはセル圧計で計測した値を用いる。なお  $C_{ijkl}$ , ( $i, j, k, l = X, Y, Z$ ) はコンプライアンステンソルで、面内等方弾性体のコンプライアンステンソルの成分は ( $C_{XXXX}$ ,  $C_{XXYY}$ ,  $C_{XXZZ}$ ,  $C_{ZZZZ}$ ,  $C_{ZYZY}$ ) の5つで表現される<sup>2)</sup>。コンプライアンステンソル成分は3章と同様である。

$$\frac{1}{\Delta\sigma_c} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_X \\ \Delta\varepsilon_Y \\ \Delta\varepsilon_Z \\ \Delta\varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{3+\cos 2\xi} & \frac{2}{1+\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{2}{-\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & 0 \\ \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \\ C_{ZYZY} \end{pmatrix} \quad (5-7)$$

また同様に、軸圧縮時のひずみテンソル成分の理論解は式(5-8)で表される。軸圧縮時のひずみを計測し、式(5-1)で地理座標系に座標変換した後に、式(5-6)で直交座標系に変換したのを用い、 $\Delta\sigma_a$ は载荷軸方向のロードセルで計測した値を用いる。

$$\frac{1}{\Delta\sigma_a} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_X \\ \Delta\varepsilon_Y \\ \Delta\varepsilon_Z \\ \Delta\varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_5 \\ k_6 \\ k_7 \\ k_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{3+\cos 4\xi}{4} & \frac{1-\cos 4\xi}{8} & \frac{\cos 4\xi - 1}{2} \\ \frac{3-4\cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{4} & \frac{3+4\cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & \frac{1-\cos 4\xi}{2} \\ \frac{8}{\sin 2\xi} & 0 & \frac{4}{-\sin 2\xi} & \frac{8}{\sin 2\xi} & \frac{2}{-\sin 2\xi} \\ \frac{\cos 2\xi - 1}{2} & 0 & \frac{\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \\ C_{ZYZY} \end{pmatrix} \quad (5-8)$$

次に、計測した応力のデータから、式(5-9)で表す最小二乗法<sup>6)</sup>を用いて弾性定数を特定する。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{k} \quad (5-9)$$

なお、 $\mathbf{k}$ と $\mathbf{A}$ は式(5-7), (5-8)から算出される計測値行列と $\xi$ で表現される係数行列で、 $\mathbf{C}$ はコンプライアンステンソルの成分によって構成されたコンプライアンスマトリックスで、下記で表される。

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \\ k_7 \\ k_8 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \\ C_{ZYZY} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{3+\cos 2\xi} & \frac{2}{1+\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & 0 \\ 0 & \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{1+\cos 2\xi} & 0 & 0 \\ \frac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{3+\cos 4\xi}{4} & \frac{1-\cos 4\xi}{8} & \frac{\cos 4\xi-1}{2} \\ \frac{3-4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1-\cos 4\xi}{4} & \frac{3+4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & \frac{1-\cos 4\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi-1}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} \frac{1+\cos 2\xi}{2} & -\sin 2\xi \cos 2\xi \end{pmatrix}$$

式(5-9)で求めた  $\mathbf{C}$  を用いて、式(5-10)から、コンプライアンステンソルの成分を用いて面内等方弾性体を仮定した岩盤の弾性パラメータを決定する<sup>7)</sup>。

$$\begin{aligned} E_{x'} &= \frac{1}{C_{xxxx}}, & E_{z'} &= \frac{1}{C_{zzzz}}, & \nu_{z'} &= -\frac{C_{xxzz}}{C_{zzzz}} \\ \nu_{x'} &= \frac{-C_{xxyy}}{C_{xxxx}} \\ G_{z'} &= \frac{1}{C_{zyzy}} \end{aligned} \quad (5-10)$$

なお、**図 5.7** のフローの⑤で、 $\xi=0^\circ$  または  $90^\circ$  と特定された場合には、**図 5.11** のように①等方圧密と②軸圧縮時の供試体の変形を考え、式(5-9)の最小二乗法において  $\mathbf{A}$  と  $\mathbf{C}$  を書き換え、式(5-10)で求めることができる。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} \\ \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{3+\cos 2\xi} & \frac{2}{1+\cos 2\xi} \\ \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} \\ 0 & \frac{2}{1-\cos 2\xi} & \frac{2}{1+\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{3+\cos 4\xi}{4} & \frac{1-\cos 4\xi}{8} \\ \frac{3-4\cos 2\xi}{8} & 0 & \frac{1-\cos 4\xi}{4} & \frac{3+4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi-1}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} \frac{1+\cos 2\xi}{2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{xxxx} \\ C_{xxyy} \\ C_{xxzz} \\ C_{zzzz} \end{pmatrix}$$

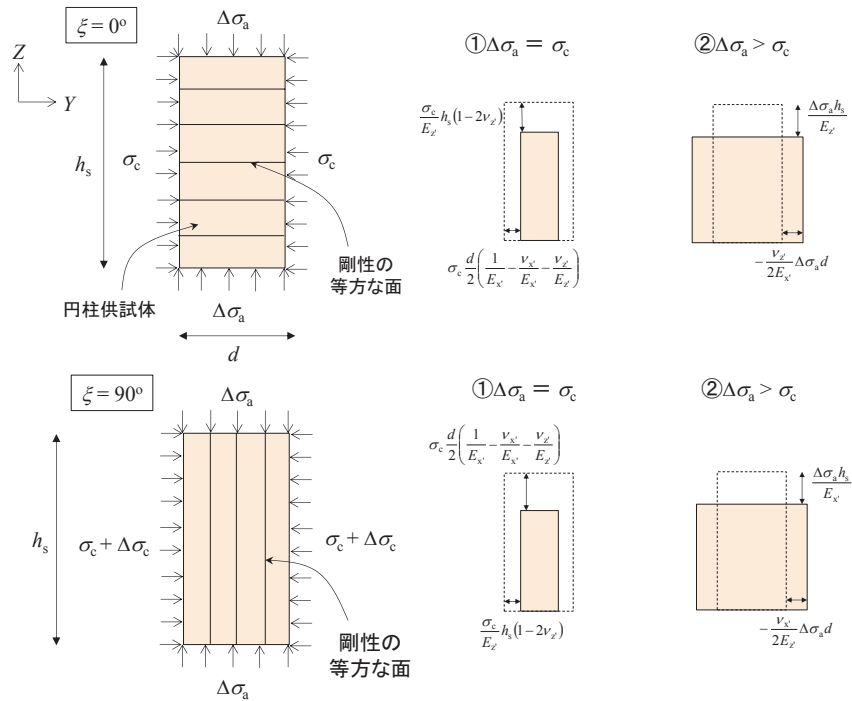


図 5.11  $\xi = 0^\circ$  (上) と  $90^\circ$  (下) の場合の弾性パラメータの算定 (変位計測式キャップの場合)

$C_{ZYZY}$  に関しては, 式(2-8)によって次式で求めることができる.

$$C_{ZYZY} = \frac{1}{E_{x'}} + \frac{1+2\nu_{x'}}{E_{x'}}$$

## (2). 荷重計測式キャップを用いた方法

荷重計測式キャップを用い, 面内等方性を仮定した岩盤の変形異方性を求めるフローを 図 5.12 に示す. ①, ②は可動式キャップのときと同様で, ひずみゲージを設置に関しては, 載荷軸方向のひずみを計測すればよい.

次に, 等方圧密 (③), 軸圧縮 (④) を行い, 応力とひずみの計測を行う. このステップでも注意事項は可動式キャップのときと同様である.

次に, 等方圧載荷時の応力の計測値を用いて, 図 5.6 の地理座標系からの異方性の方向の傾斜 ( $\xi, \zeta$ ) を特定し, 座標軸を設定する (⑤). 地理座標系での等方圧密時の応力増分テンソル  $\Delta\sigma$  は式(5-11)で表される.  $\Delta\sigma$  から, 式(5-12)によって主応力を求める. 直応力の増分 ( $\Delta\sigma_S, \Delta\sigma_E, \Delta\sigma_V$ ) は軸圧  $\Delta\sigma_a$  あるいはセル圧  $\Delta\sigma_c$  を入力し, ( $\Delta\sigma_{SV}, \Delta\sigma_{EV}$ ) はキャップ内の 2 方向ロードセルで 図 5.5 のように求める. なお,  $\Delta\sigma_{SE} = 0 \text{MPa}$  である.

$$\Delta\sigma' = \begin{pmatrix} \Delta\sigma_S & \Delta\sigma_{SE} & \Delta\sigma_{SV} \\ & \Delta\sigma_E & \Delta\sigma_{EV} \\ \text{sym.} & & \Delta\sigma_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\sigma_c & 0 & \Delta\sigma_{SV} \\ & \Delta\sigma_c & \Delta\sigma_{EV} \\ \text{sym.} & & \Delta\sigma_c \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

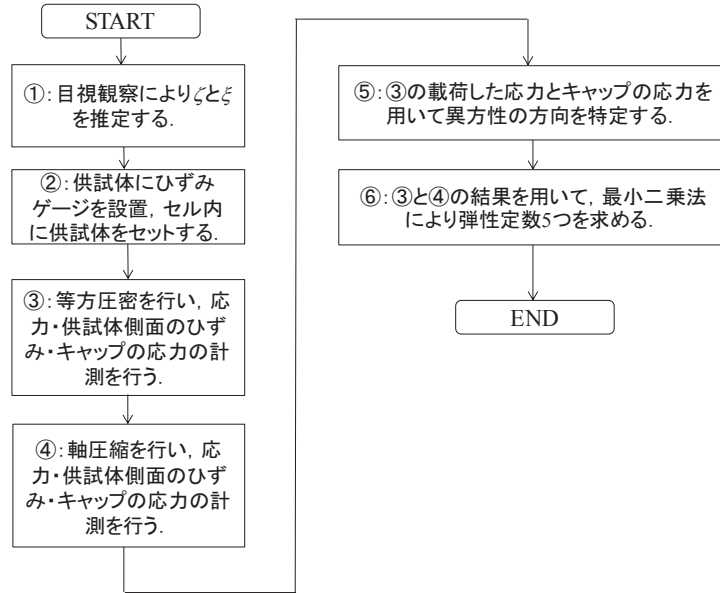


図 5.12 荷重計測式キャップを用いて異方性を特定するフロー

$$\mathbf{e}^T \Delta \boldsymbol{\sigma}' \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (5-12)$$

3章で得た主ひずみ方向と異方性の方向が一致する結果と同様に, 主応力の単位方向ベクトル  $\mathbf{e}$  を式(5-4)から,  $(\zeta, \xi)$  を式(5-5)で求める. 座標軸の設定のプロセスも上述と同様なので省略する. 後述する試験結果の整理のため, 式(5-11)の地理座標系の応力増分テンソルを, 式(5-6)で直交座標系  $(X, Y, Z)$  に座標変換する.

$$\begin{pmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta & 0 \\ -\sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_S & \Delta \sigma_{SE} & \Delta \sigma_{SV} \\ \Delta \sigma_E & \Delta \sigma_{EV} & \Delta \sigma_V \\ \text{sym.} & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta & 0 \\ \sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \sigma_X & \Delta \sigma_{XY} & \Delta \sigma_{ZX} \\ \Delta \sigma_Y & \Delta \sigma_{ZY} & \Delta \sigma_Z \\ \text{sym.} & & \end{pmatrix} \quad (5-13)$$

式(5-11), (5-12), (5-13)の評価に関しても, 可動式キャップのときと同様である.

次に, ③と④で計測した応力とひずみを用いて, 弾性パラメータを定める (⑥). 弾性論により求めた, 等方圧密時の直応力とせん断応力の理論解は式(5-14)で表される. 応力テンソルの成分は式(5-11)で得たものを用い,  $\Delta \varepsilon_i$  は载荷軸方向のひずみゲージあるいは外部変位計で計測した値を用いる. なお,  $D_{ijkl}$ ,  $(i, j, k, l = X, Y, Z)$  は剛性テンソルで, 面内等方弾性体の剛性テンソルの成分は  $(D_{XXXX}, D_{XXYY}, D_{XXZZ}, D_{ZZZZ}, D_{ZYZY})$  の5つで表現される<sup>2)</sup>. 剛性テンソル成分と弾性パラメータの関係は後述される.

$$\frac{1}{\Delta \varepsilon_c} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_X \\ \Delta \sigma_Y \\ \Delta \sigma_Z \\ \Delta \sigma_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \\ k'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & -2 & 0 \\ 1 + \cos 2\xi & \frac{3 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 & 0 \\ 1 - \cos 2\xi & \frac{3 + \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 & 0 \\ -\sin 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \sin 2\xi & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{XXXX} \\ D_{XXZZ} \\ D_{ZZZZ} \\ D_{XYYX} \\ D_{ZYZY} \end{pmatrix} \quad (5-14)$$

また同様に、軸圧縮時の理論解は式(5-15)で表される。軸圧縮時の応力を計測し、式(5-13)で直交座標系に変換し、式(5-15)に代入する。 $\Delta \varepsilon_a$  は载荷軸方向のひずみゲージで計測した値を用いる。

$$\frac{1}{\Delta \varepsilon_a} \begin{pmatrix} \Delta \sigma_X \\ \Delta \sigma_Y \\ \Delta \sigma_Z \\ \Delta \sigma_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k'_5 \\ k'_6 \\ k'_7 \\ k'_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & 0 & 1 - \cos 2\xi & 0 \\ \frac{1 - \cos 4\xi}{8} & \frac{3 + \cos 4\xi}{4} & \frac{1 - \cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{\cos 4\xi - 1}{2} \\ \frac{3 - 4 \cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & \frac{1 - \cos 4\xi}{4} & \frac{3 + 4 \cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1 - \cos 4\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi - 1}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi (1 + \cos 2\xi)}{2} & 0 & -\sin 2\xi \cos 2\xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{XXXX} \\ D_{XXZZ} \\ D_{ZZZZ} \\ D_{XYYX} \\ D_{ZYZY} \end{pmatrix} \quad (5-15)$$

なお、式(5-13)で座標変換を行う地理座標系での軸圧縮時の応力テンソルは次式を用いる。等方圧载荷時と同様に $(\Delta \sigma_{SV}, \Delta \sigma_{EV})$  はキャップ内の2方向ロードセルで求める。

$$\Delta \sigma' = \begin{pmatrix} \Delta \sigma_S & \Delta \sigma_{SE} & \Delta \sigma_{SV} \\ & \Delta \sigma_E & \Delta \sigma_{EV} \\ sym. & & \Delta \sigma_V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta \sigma_c & 0 & \Delta \sigma_{SV} \\ & \Delta \sigma_c & \Delta \sigma_{EV} \\ sym. & & \Delta \sigma_a \end{pmatrix}$$

次に、計測した応力のデータから、式(5-16)で表す最小二乗法<sup>6)</sup>を用いて弾性定数を特定する。

$$\mathbf{D} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A}')^{-1} \mathbf{A}'^T \mathbf{k}' \quad (5-16)$$

なお、 $\mathbf{k}'$  と  $\mathbf{A}'$  は式(5-14)、(5-15)から算出される計測値行列と $\xi$ で構成される係数行列で、 $\mathbf{D}$  は剛性テンソルの成分で構成される剛性マトリックスで、下記で表される。

$$\mathbf{k}' = \begin{pmatrix} k'_1 \\ k'_2 \\ k'_3 \\ k'_4 \\ k'_5 \\ k'_6 \\ k'_7 \\ k'_8 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{XXXX} \\ D_{XXZZ} \\ D_{ZZZZ} \\ D_{XYYX} \\ D_{ZYZY} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & -2 & 0 \\ 1 + \cos 2\xi & \frac{3 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 & 0 \\ 1 - \cos 2\xi & \frac{3 + \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 & 0 \\ -\sin 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \sin 2\xi & 0 \\ \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & 0 & 1 - \cos 2\xi & 0 \\ \frac{1 - \cos 4\xi}{8} & \frac{3 + \cos 4\xi}{4} & \frac{1 - \cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{\cos 4\xi - 1}{2} \\ \frac{3 - 4 \cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & \frac{1 - \cos 4\xi}{4} & \frac{3 + 4 \cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1 - \cos 4\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi - 1}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi (1 + \cos 2\xi)}{2} & 0 & -\sin 2\xi \cos 2\xi \end{pmatrix}$$

式 (5-16) で求めた  $\mathbf{D}$  を用いて、式(5-17)から、剛性テンソルの成分を用いて面内等方弾性体を仮定した岩盤の弾性パラメータを決定する<sup>8)</sup>。

$$E_{x'} = \frac{2D_{XYXY}(D_{XXXX}D_{ZZZ} + (D_{XXXX} - 2D_{XYXY})D_{ZZZ} - 2D_{XXZZ}^2)}{D_{XXXX}D_{ZZZ} - D_{XXZZ}^2}$$

$$E_{z'} = \frac{D_{XXXX}D_{ZZZ} + (D_{XXXX} - 2D_{XYXY})D_{ZZZ} - 2D_{XXZZ}^2}{2(D_{XXXX} - D_{XYXY})} \quad (5-17)$$

$$\nu_{x'} = \frac{(D_{XXXX} - 2D_{XYXY})D_{ZZZ} - D_{XXZZ}^2}{D_{XXXX}D_{ZZZ} - D_{XXZZ}^2}, \quad \nu_{z'} = \frac{D_{XXZZ}}{2(D_{XXXX} - D_{XYXY})}$$

$$G_{x'} = \frac{E_{x'}}{2(1 + \nu_{x'})} = D_{XYXY}$$

$$G_{z'} = D_{ZYZY}$$

なお、図 5.12 のフローの⑤で、 $\xi = 0^\circ$  または  $90^\circ$  と特定された場合には、図 5.13 のように①等方圧密と②軸圧縮時の供試体の変形を考え、式(5-16)の最小二乗法において  $\mathbf{A}'$  と  $\mathbf{D}$  を書き換え、式(5-17)で求めることができる。

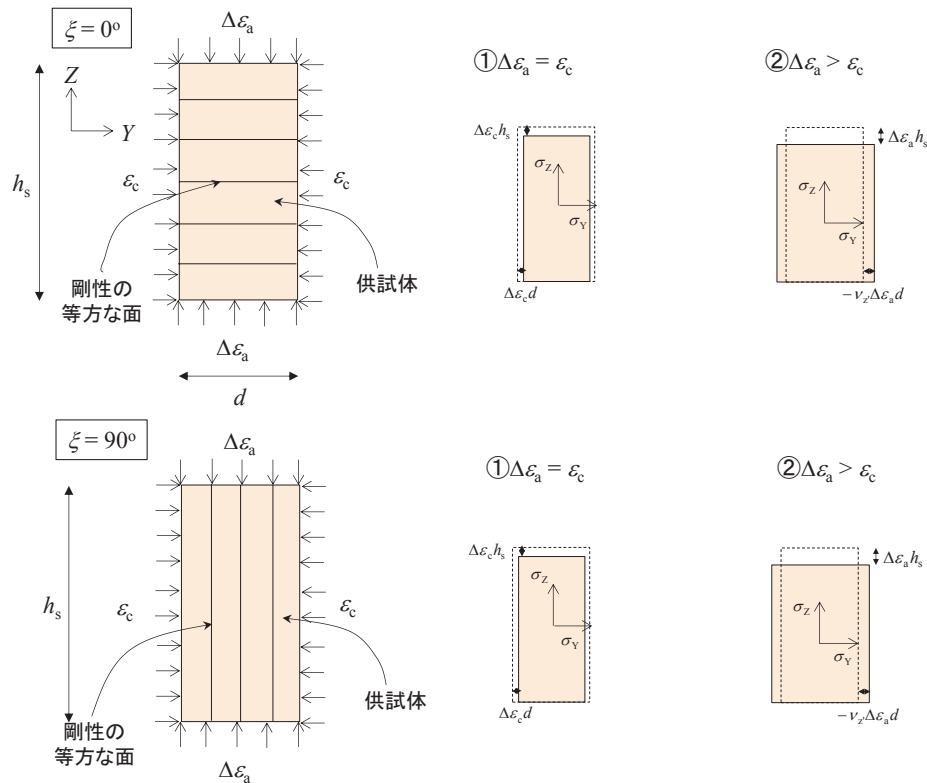


図 5.13  $\xi = 0^\circ$  (上) と  $90^\circ$  (下) の場合の弾性パラメータの算定 (荷重計測式キャップの場合)



$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 & -2 \\ 1 + \cos 2\xi & \frac{3 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 \\ 1 - \cos 2\xi & \frac{3 + \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & \cos 2\xi - 1 \\ -\sin 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \sin 2\xi \\ \frac{1 - \cos 2\xi}{2} & \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & 0 & 1 - \cos 2\xi \\ \frac{1 - \cos 4\xi}{8} & \frac{3 + \cos 4\xi}{4} & \frac{1 - \cos 4\xi}{4} & 0 \\ \frac{3 - 4\cos 2\xi + \cos 4\xi}{8} & \frac{1 - \cos 4\xi}{4} & \frac{3 + 4\cos 2\xi + \cos 4\xi}{4} & 0 \\ \frac{\sin 2\xi}{2} \frac{\cos 2\xi - 1}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & -\frac{\sin 2\xi}{2} \frac{1 + \cos 2\xi}{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{XXXX} \\ D_{XXZZ} \\ D_{ZZZZ} \\ D_{XYXY} \end{pmatrix}$$

$D_{ZYZY}$  に関しては、式(2-8)によって次式で求めることができる。

$$D_{ZYZY} = \frac{E_x E_z'}{E_x + E_z'(1 + 2\nu_x')}$$

### 5-3. 実施の形態と実岩盤への適用の考察

室内で行われる三軸試験<sup>9), 10)</sup>において、「変位計測式キャップ」は図 5.14 のように、「荷重計測式キャップ」は図 5.15 のように実施が考えられる。

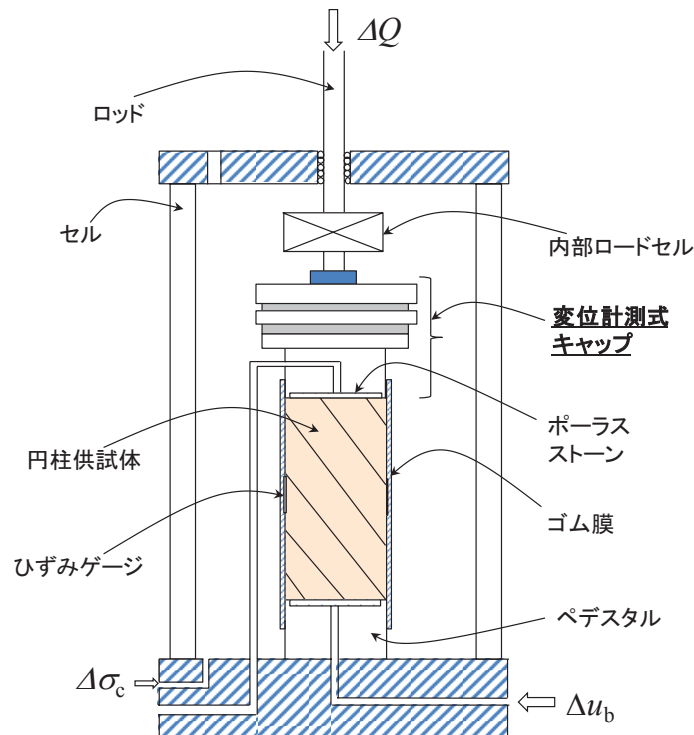


図 5.14 変位計測式キャップを用いた三軸セル

実岩盤への適用性を検討するために、表 5.1 に示す面内等方性があると言われる戸室石の弾性パラメータを用いて、3章で示した三軸試験を想定した要素の解析を行った。荷重の条件は等方圧密と軸圧縮で、弾性変形を期待できる荷重レベルの、等方圧密応力 $\sigma_c = 0.5\text{MPa}$ と軸圧縮応力 $\Delta\sigma_a = 0.5\text{MPa}$ を設定し、剛性の等方な面の傾斜 $\xi = 45^\circ$ とした。変位計測式キャップを用いた三軸試験を想定した解析結果を表 5.2 に示す。

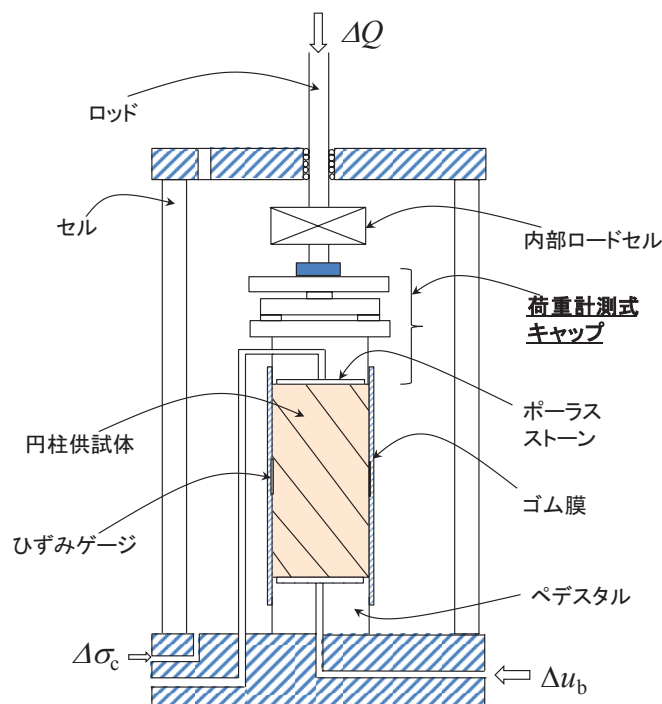


図 5.15 荷重計測式キャップを用いた三軸セル

表 5.1 Oka et al. (2002) の戸室石の弾性パラメータ

弾性パラメータ	値
$E_{x'}$ (MPa)	1020
$\nu_{x'}$	0.267
$E_{z'}$ (MPa)	900
$\nu_{z'}$	0.0613
$G_{z'}$ (MPa)	190

表 5.2 戸室石の弾性パラメータを用いた試験の状況の解析結果  
(変位計測式キャップを想定した解析,  $\xi = 45^\circ$ )

荷重モード	$\sigma_c$ (MPa)	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	$\varepsilon_{x'}$	$\varepsilon_{y'}$	$\varepsilon_{z'}$	$\varepsilon_{ZY}$	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$
等方圧密	0.5	-	0.00033	0.00041	0.00041	0.00008	0.00049	0.00033	0.00033
軸圧縮	-	0.5	-0.00008	-0.00041	0.00090	0.00002	0.00090	-0.00008	-0.00041

このように、一番小さいせん断ひずみ $\varepsilon_{ZY}$ でも $2 \times 10^{-5}$ のひずみが算出されており、ひずみゲージなどで十分に計測可能であるし、変位計測式キャップの載荷面内の動きを Gap センサーで計測することも可能である。さらに、計測したひずみテンソル成分から主ひずみの程度も確認しているが、絶対値が一番小さいもので $8 \times 10^{-5}$ である。変位計測式キャップを用いた三軸試験を想定した解析結果を表 5.3 に示す。せん断応力 $\sigma_{ZY}$ が最小で $-0.03\text{MPa}$ 作用しており、平行平板ロードセルで十分に計測できる値である。この結果は弾性論によるものであるが、戸室石の一軸圧縮強さ $q_u \approx 10\text{MPa}$ であることを考えると、破壊時のせん断応力 $\sigma_{ZY, f} = 0.6\text{MPa}$ を想定できる。このような軟岩に適用する場合はロードセルの容量 $\approx 2 \times \sigma_{ZY, f}$ 程度で設計するのが好ましい。

さらに、提案した解析手法の安定性を評価するために、変位計測式キャップを用いた解析手法について、図 5.16 に示すフローで感度分析を行った。

表 5.3 戸室石の弾性パラメータを用いた試験の状況の解析結果  
(荷重計測式キャップを想定した解析,  $\xi = 45^\circ$ )

載荷モード	$\sigma_c$ (MPa)	$\Delta\sigma_a$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)	$\sigma_{ZY}$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)
等方圧密	0.5	-	0.50	0.50	0.50	-0.15	0.6456	0.5000	0.3544
軸圧縮	-	0.5	0.50	0.50	1.00	-0.03	0.5017	0.0000	-0.0017

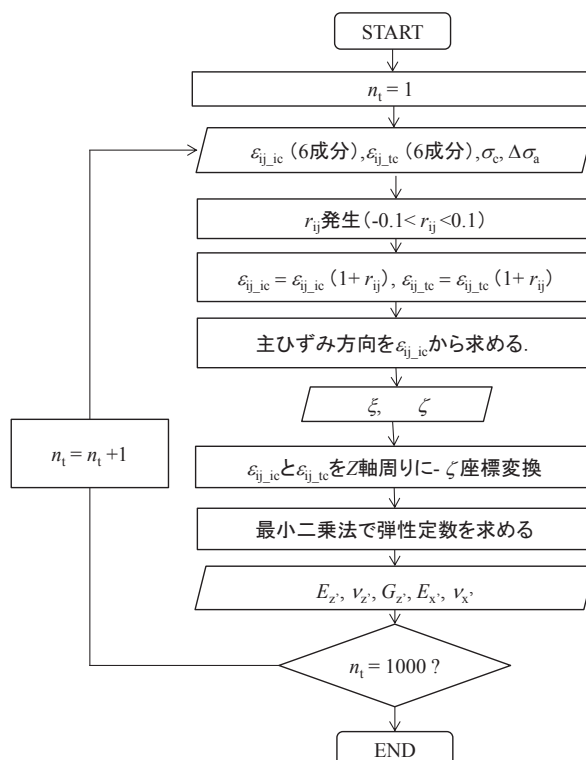
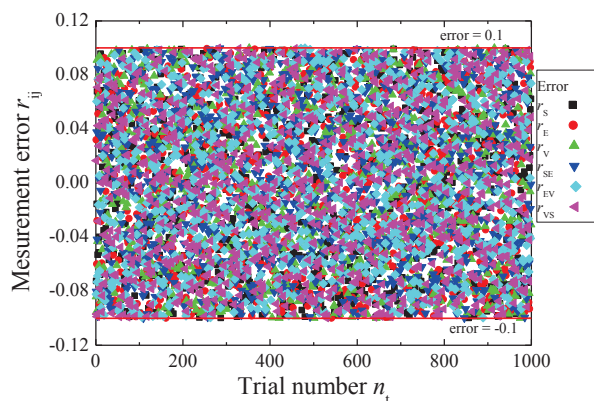


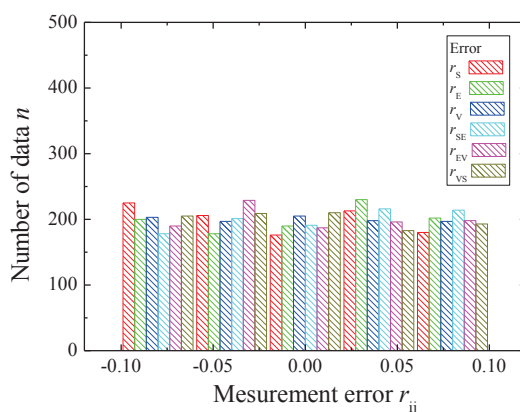
図 5.16 感度分析のフロー

入力は等方圧密時と軸圧縮時のひずみテンソル各成分の理論値 $\varepsilon_{ij\_ic}$ と $\varepsilon_{ij\_tc}$ 、および等方圧密応力と軸圧縮応力の $\sigma_c$ と $\Delta\sigma_a$ である。この感度分析では新(2002)<sup>11)</sup>にならない、各ひずみテンソルに含まれる計測誤差 $r_{ij}$ が最大最小で $\pm 10\%$ 含まれると仮定して<sup>12)</sup>、 $r_{ij}$ を一様乱数を用いて図 5.17 のように発生させてひずみテンソルの各成分に加え合わせ、図 5.7 のフローに従って剛性の等方な面の傾斜 $\xi$ 及び $\zeta$ と弾性パラメータを求めた。

$\varepsilon_{ij\_ic}$ と $\varepsilon_{ij\_tc}$ のひずみレベルは最大で $10^{-4}$ になるように設定し、試行回数は $n_t=1000$ で分析を行った。なお、荷重計測式キャップを用いた手法についても全く同様の感度分析が想定できるため省略する。この解析で検討した中で最も異方性の大きいケース ( $\xi=30^\circ$ ,  $\zeta=15^\circ$ , 3章の $\alpha=0.7$ ,  $E_z=1000\text{MPa}$ ,  $\nu_z=0.3$ ,  $G_z=289\text{MPa}$ ,  $E_x=490\text{MPa}$ ,  $\nu_x=0.21$ ) の $n_t$ と $\xi$ ,  $\zeta$ および弾性パラメータの関係を図 5.18 に示す。このように異方性のパラメータの真値の周辺にデータが一様に分布していることがわかる。図 5.19 には図 5.18 の頻度分布を示す。



(a) 誤差として発生させた乱数



(b) 誤差の頻度分布

図 5.17 誤差として発生させた乱数 ( $\alpha = 0.7$  のケース)

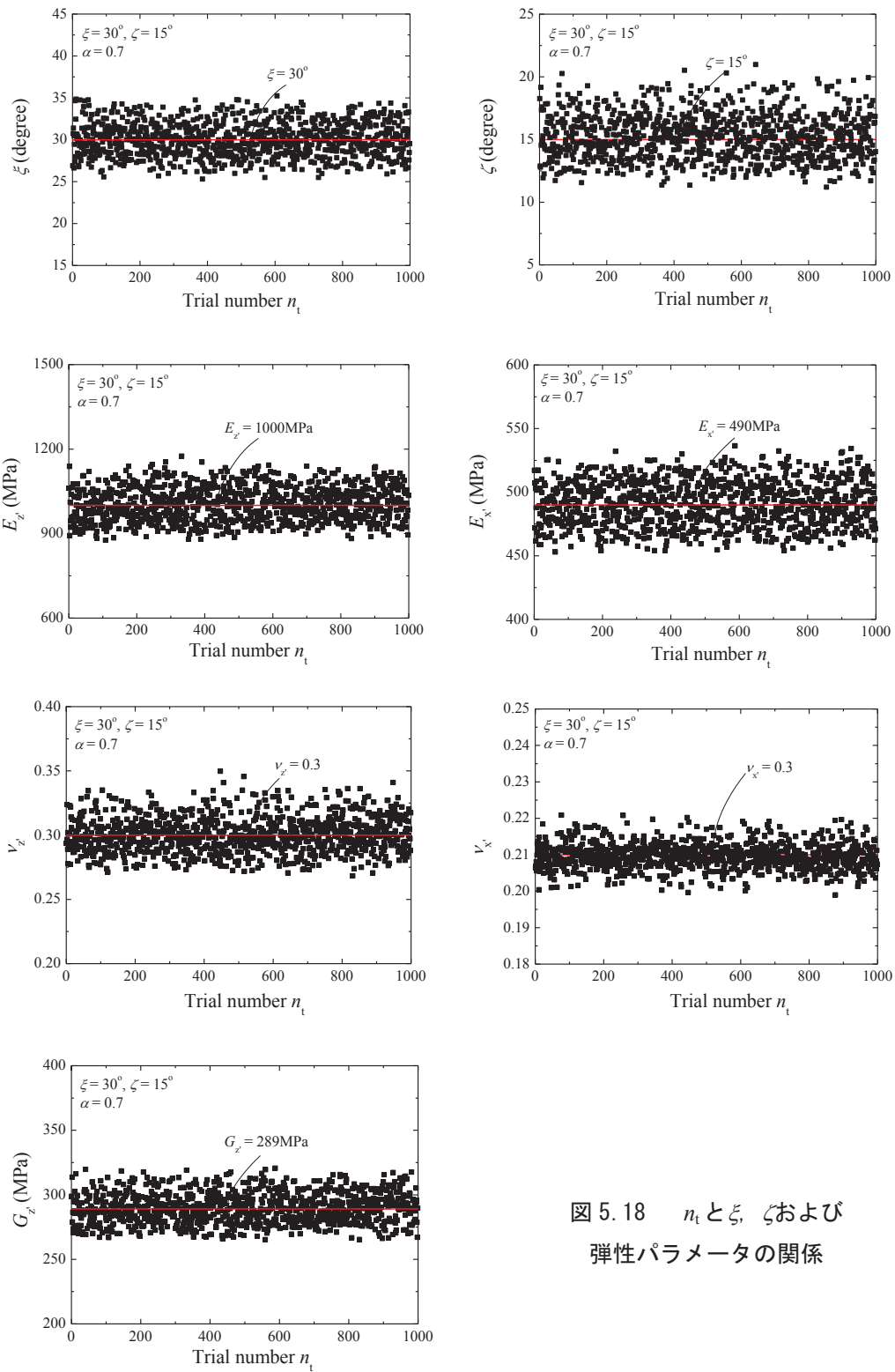


図 5.18  $n_t$  と  $\xi$ ,  $\zeta$  および  
弾性パラメータの関係

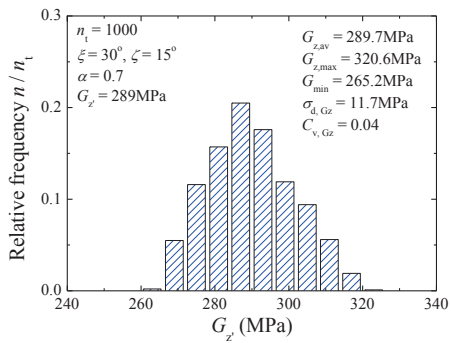
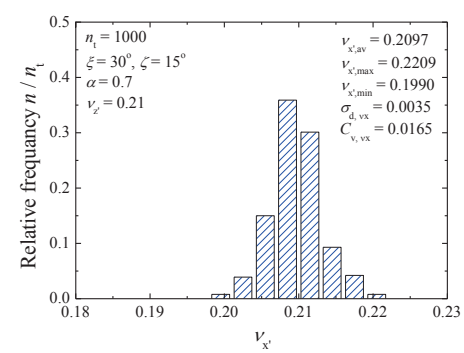
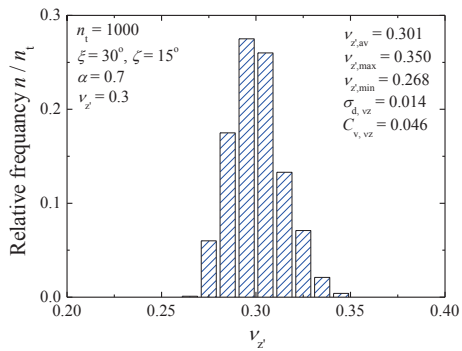
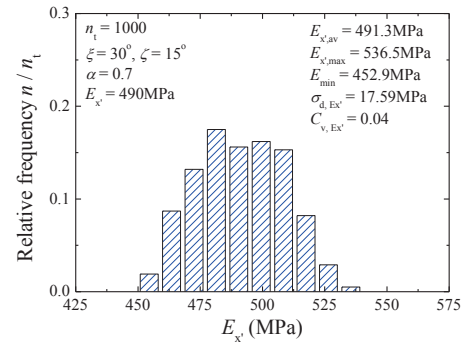
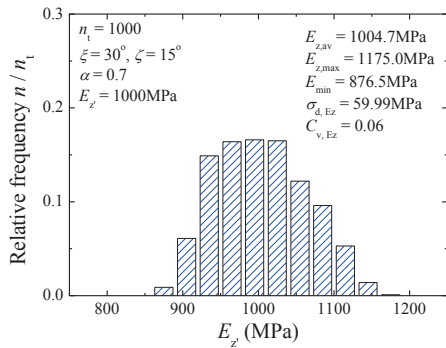
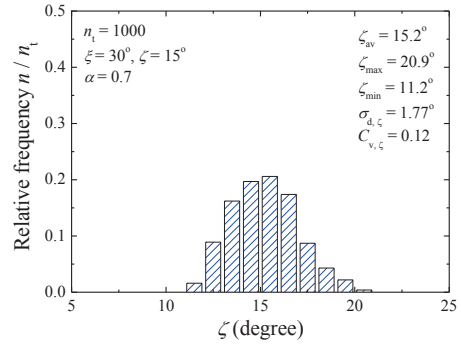
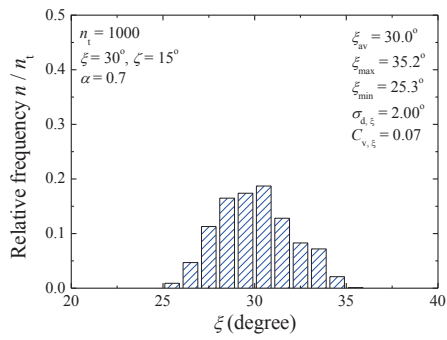


図 5.19  $\xi, \zeta$  および弾性パラメータの頻度分布 ( $\alpha = 0.7$ )

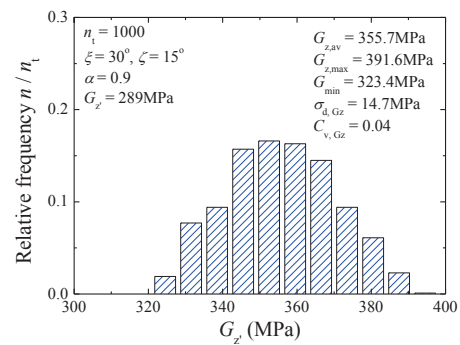
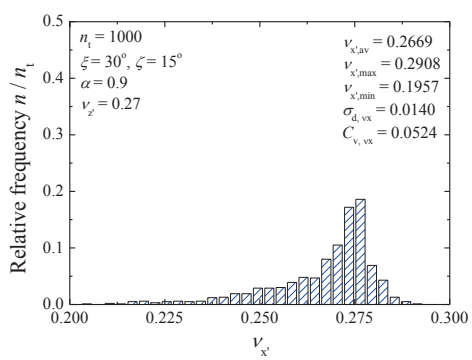
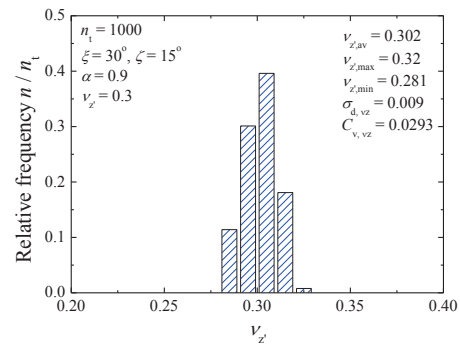
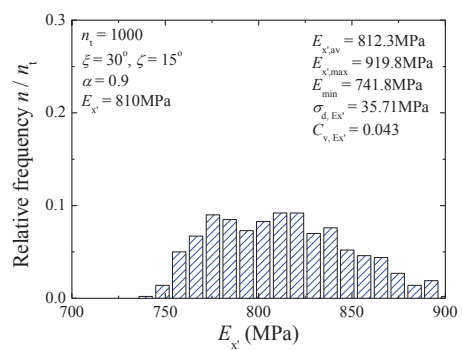
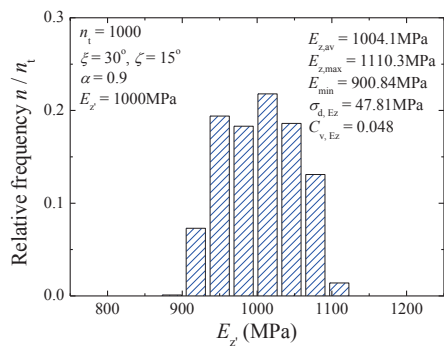
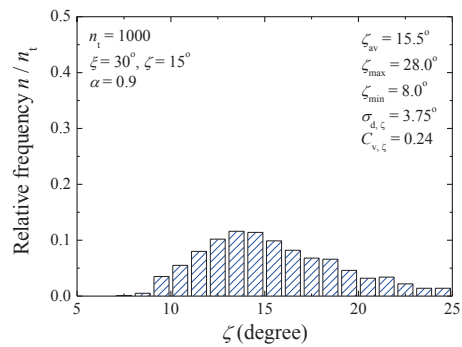
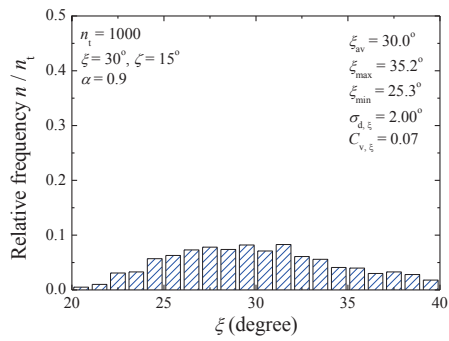


図 5.20  $\xi, \zeta$  および弾性パラメータの  
頻度分布 ( $\alpha = 0.9$ )

いずれのケースにおいても変動係数  $C_v$  が非常に小さく、異方性が大きい場合には±10%程度の誤差を想定しても安定して解を求められる。

それに対し、異方性が小さい場合（3章の $\alpha=1.0$ ）には、この解析手法で得られる異方性のパラメータが安定しない可能性がある。この場合は岩盤の性質が等方的になるため、特に異方性の方向を表す( $\xi, \zeta$ )が不定となることが想定される。この解析で検討した中では異方性が小さいケース（ $\xi=30^\circ, \zeta=15^\circ$ , 3章の $\alpha = 0.9, E_z=1000\text{MPa}, \nu_z=0.3, G_z=354\text{MPa}, E_x=810\text{MPa}, \nu_x=0.27$ ）の頻度分布を図 5.20 に示す。この図は図 5.19 の頻度分布と同じビン幅を用いているが、( $\xi, \zeta$ )のばらつきが $\alpha=0.7$ の場合よりも大きいことが図 5.21 の比較によってもわかる。また各異方性を記述するパラメータに関して、変動係数と $\alpha$ の関係を図 5.22 に調査する。 $\alpha$ が1に近づいて岩盤の性質が等方になるに従って算出されるパラメータのばらつきが非常に大きくなる。

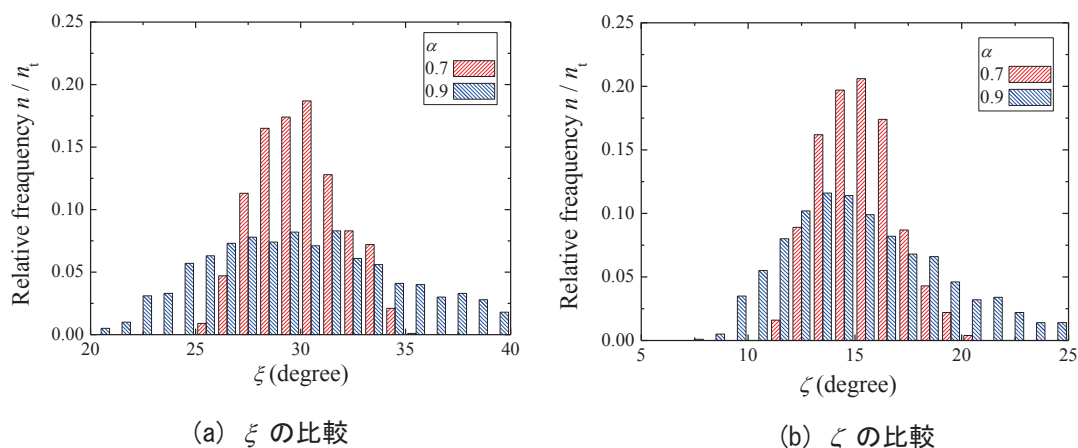


図 5.21  $\alpha = 0.7$  と  $0.9$  で求まる ( $\xi, \zeta$ ) のばらつきの比較

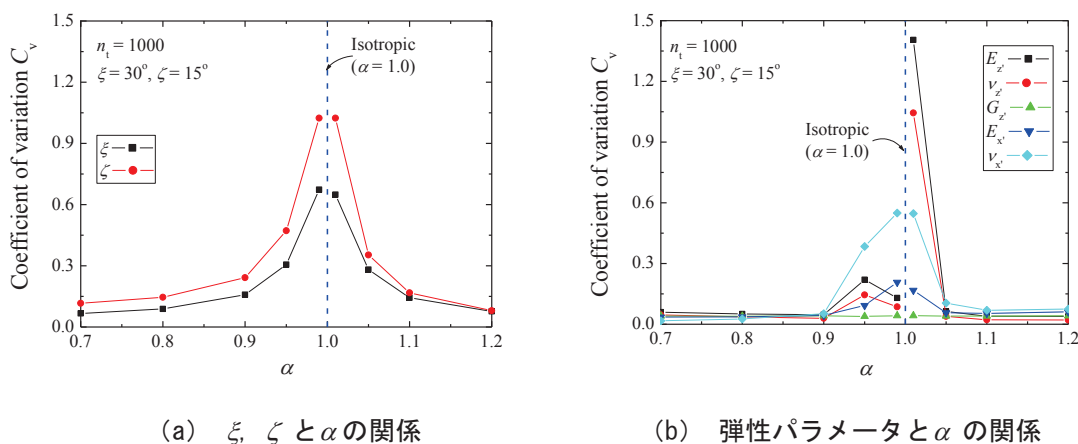


図 5.22  $\xi, \zeta$  および弾性パラメータ毎の変動係数  $C_v$  と  $\alpha$  の関係



## 参考文献

- 1) 菊本統, 谷和夫, 富樫陽太: 三軸試験装置および三軸試験方法, 特願 2013-244449, 2013.
- 2) 山口柏樹: 弾・塑性力学, 森北出版, 1974.
- 3) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1976.
- 4) 牛島省: 数値計算のための Fortran90/95 プログラミング入門, 森北出版, 2007.
- 5) Gonzaga, G. G., Leite, M. H. and Corthesy, R.: Determination of anisotropic deformability parameters from a single standard rock specimen, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.45, pp.1420-1438, 2008.
- 6) 川崎晴久: C & FORTRAN による数値解析の基礎, 共立出版株式会社, 1993.
- 7) Liao, J. J., Hu, T., Chang, C.: Determination of dynamic elastic constants of transversely isotropic rocks using a single cylindrical specimen, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 34, pp.1045-1054, 1997.
- 8) Wang, C. D., Tzeng, C. S., Pan, E., and Liao, J. J.: Displacements and stresses due to a vertical point load in an inhomogeneous transversely isotropic half-space, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol. 40, pp.667-685, 2003.
- 9) 地盤工学会: 土の非圧密非排水三軸圧縮試験方法, JGS0521-2009, 2009.
- 10) 地盤工学会: 土の圧密非排水三軸圧縮試験方法, JGS0522-2009, 2009.
- 11) 新孝一: 地盤の異方弾性係数の実用的な測定解析法, 土木学会論文集 No.722/III-61, pp.231-243, 2002.
- 12) Nunes, A. L. L. S.: A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.39, pp.257-273, 2002.

## 6. 原位置岩盤ねじりせん断試験の提案

従来の原位置岩盤試験の方法には、岩盤の力学特性の異方性を調査する上で、異方性を調査するための合理的な手法がない。

従来の原位置岩盤試験では、(1つの試験体に対する)1回の試験によって、その試験の方法(試験体の形状・方向と载荷の方法)によって定まる主応力方向(ないし主ひずみ方向)に対する力学特性しか評価できない。異方性の主な原因の1つである不連続面の傾斜・走向と载荷軸方向の関係によって力学特性が異方的になるために、岩盤の力学特性に関する異方性を調べるには、同じ試験方法を、方向を変えて複数回実施する必要がある。例えば、岩盤せん断試験(ロックせん断試験とブロックせん断試験)<sup>1)</sup>、平板载荷試験<sup>2)</sup>、原位置岩盤三軸試験<sup>3)</sup>、原位置引張り試験<sup>4)</sup>、岩盤ねじりせん断試験<sup>5)</sup>では、方向が異なる試験体を複数個作製して試験を実施する必要がある。また、孔底三軸試験<sup>6)</sup>やプレッシャーメータ試験<sup>7)</sup>では、異なる方向に掘削した複数のボーリング孔において試験を実施する必要があるし、中空円筒の試験体を用いた静水圧試験<sup>8)</sup>ではひずみテンソルの6成分を算出するのに十分な測点数のひずみを計測すれば剛性の異方性は特定できるが、等方応力下の試験であるため強度異方性は特定できない。

さらに、岩盤せん断試験(ロックせん断試験とブロックせん断試験)、原位置岩盤三軸試験、原位置引張り試験、岩盤ねじりせん断試験では、自重の影響によって試験体に過度の曲げやせん断が作用してしまうために、中心軸が鉛直方向から大きく乖離する(20度以上傾く)試験体の作製は困難であり、複数の方向を変えた試験の実施は難しい。すなわち、岩盤の力学特性に関する異方性を調べるためには複数回の試験を行う必要があり、時間がかかると共にコストも大きく、また試験方法によっては施工(実施)が困難である。その中で、ねじりせん断試験に関して、3章で言及した中空円筒の非要素の変形特性と、4章で言及した単一の不連続面を含む中空円筒の非要素の強度特性を、適切に評価できれば、合理的に岩盤の力学特性の異方性を、強度と変形の両方から調査できる。

そこで、この章では、3章と4章での検討を元に、著者らが開発した「原位置岩盤ねじりせん断試験」<sup>9)</sup>の概要と異方性を特定するための解析手法、及び手法の検証に関して説明する。「原位置岩盤ねじりせん断試験」は、岩盤に作製した中空円筒試験体の上端に2方向ロードセルを複数設置し、载荷時の応力分布を計測して分析することで力学的な異方性が把握できる。

### 6-1. 原位置岩盤ねじりせん断試験の提案

「原位置岩盤ねじりせん断試験」を図6.1に提案する。単に、室内力学試験の中空ねじりせん断試験を原位置試験として行うだけでなく、試験体の上面に作用する応力やひずみの分布(図6.2)を求めて、その結果から岩盤の異方的な力学特性を評価しようとする点に新規性がある。

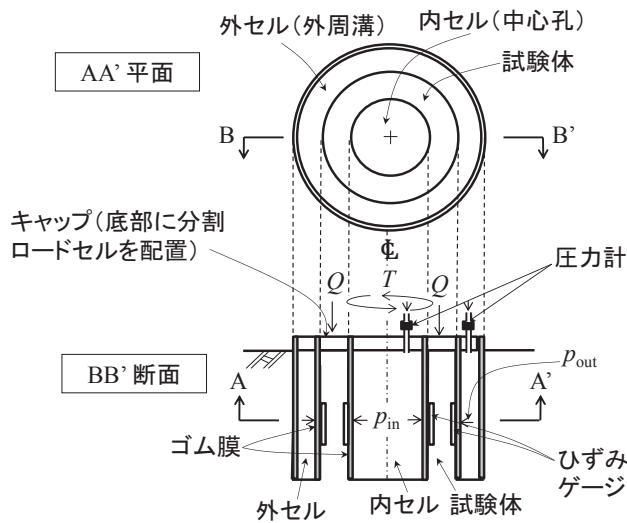


図 6.1 原位置岩盤ねじりせん断試験（露頭で行う場合）

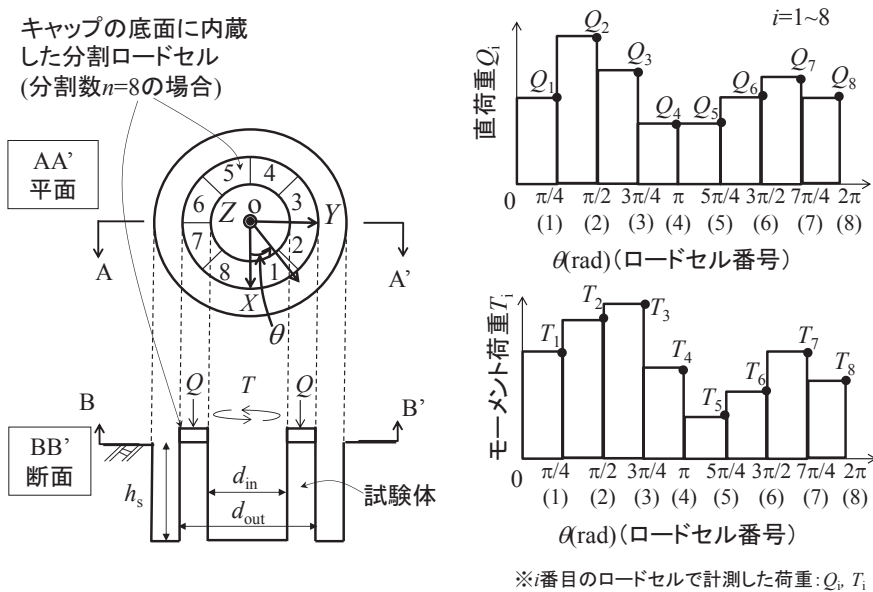


図 6.2 試験体の寸法と分割ロードセルおよび試験体の上端面の荷重分布

(1). 原位置岩盤ねじりせん断試験のアイデア

(a) 単純せん断モードにおける岩盤の力学特性を調べる方法

岩盤の露頭面ないしボーリングの孔底に中空円筒の形状に成形された試験体に対して、内セルと外セルにより内側面と外側面にゴム膜を介して液圧による直応力を作用させた状態で、試験体の上面に剛なドーナツ状のキャップを介して軸変位（ないし軸荷重）と円周方向のねじり変位（ないし中心軸回りのモーメント荷重（トルク））を作用させて、

試験体を中心軸回りにねじる。試験体の上面における荷重は、変位（ないしひずみ）制御でも荷重（ないし応力）制御でも良いし、単調荷重だけでなく繰返し荷重を行うことができる。

試験体の変形モードが単純せん断モードであると仮定するために、試験体の内径・外径比 ( $d_i/d_o$ ) が 1.0 に近く（一般に、 $1.0 > d_i/d_o \geq 0.6$ ）、試験体の内側面に作用する直応力  $p_{in}$  と外側面に作用する直応力  $p_o$  が等しい場合 ( $p_i=p_o$ ) を原則とする。この場合、試験体の上面に作用するねじり方向のせん断応力およびせん断ひずみの半径方向の分布は一律と仮定して、試験結果を解析することが多い。さらに、試験体の下部は、底部が周辺岩盤に連続していることによる影響を受け易い。そのため、ほぼ一律な単純せん断モードの変形をしていると見なせる試験体の上部から中部の区間において変形の計測が行なえるように、試験体の高さ・外径比 ( $h_s/d_o$ ) は 0.5 以上が好適である。また、試験体の寸法が岩盤の不均質性や不連続性を代表できる大きさであることと、試験体が要素と見なせるように（応力とひずみの一様性を高めるために）円筒断面の曲率を小さくするために、試験体は大きいほど良い。しかし、経済合理性も考慮すると、従来の原位置岩盤試験における試験体の大きさを参考にすると、外径  $d_o$  は少なくとも 100mm とし、200~600mm が好適である。

(b) 1つの試験によって岩盤の異方性を調べる方法

岩盤の力学特性の異方性を評価するために、キャップの底面（試験体の上面と接する面）を円周方向に複数の面に分割して、各分割面において直荷重  $Q_i$  とねじり方向のせん断荷重  $S_i$ （ないし中心軸回りのモーメント荷重（トルク） $T_i$ ）を図 6.2 のように計測して、試験体の上面に作用する直応力  $\sigma_z$  とねじり方向のせん断応力  $\sigma_{z\theta}$  の円周方向分布を求める。分割数  $n$  は、応力分布の形状を精度良く特定するために、少なくとも 6 分割とし、8 分割以上が好適である。求められた試験体の上面に作用する応力の円周方向分布より、異方性を適切に考慮した構成モデルを仮定し、この構成モデルを記述する地盤パラメータを逆解析により求める。構成モデルの例としては、面内等方性（transversely isotropy）があるが、これに限定されることはない。

提案する原位置岩盤ねじりせん断試験には、従来の原位置岩盤試験と比較して以下の効果が期待できる。

(A) 単純せん断モードにおける岩盤の力学特性を調べることができる

室内力学試験における中空ねじりせん断試験（地盤工学会基準 JGS 0543-2009, 0551-2009）と同様の単純せん断モードの試験が、原位置において実施が可能になる。その結果、岩盤の単純せん断モードにおける力学特性を評価することが可能になる。特に、繰返し荷重時の変形特性（せん断剛性率  $G$  や減衰定数  $h$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係等）や強度特性（せん断強さや引張り強さ）は地震時における地盤の安定性の評価にとって重要である。

(B) 岩盤の力学特性の異方性を 1つの試験体に対する試験により調べることができる

試験体の上面に作用する直応力 $\sigma_z$ とねじり方向のせん断応力 $\sigma_{z\theta}$ の円周方向分布を求め、1つの試験体に対する試験により、力学的な異方性を有する岩盤の変形特性および強度特性を評価できる。なお、ねじりせん断時に軸圧、セル圧を調整することにより主応力方向を自由に回転できるため、主応力制御の載荷試験（例えば三軸試験）に比べ、格段合理的に力学的異方性を把握できる。その結果、短い時間と低いコストで、岩盤の力学特性の異方性を調べる事が可能になる。

## (2). 試験方法の概要

岩盤の露頭面ないしボーリングの孔底に中空円筒の形状に成形された試験体に対して、ねじりせん断試験（torsional shear test）を行う。内セルと外セルにより内側面と外側面にゴム膜を介して直応力を作用させた状態で、剛なドーナツ状のキャップを介して試験体の上面に軸荷重と中心軸回りのモーメント荷重（トルク）を作用させて、試験体に軸変位と円周方向のねじり変位を与えて（中心軸回りにねじって）破壊させる。試験体の上面における載荷は、変位（ないしひずみ）制御でも荷重（ないし応力）制御でも良いし、単調載荷だけでなく繰返し載荷等も行うことができる。

試験体の上面に軸方向に圧縮変位（ないし圧縮力）を作用させた場合には、試験体はせん断破壊するのでせん断破壊特性が評価できる。一方、引張り変位（引張り力）を作用させた場合には、引張り破壊する場合があります、この場合には引張り破壊特性が評価できる。

## (3). 試験の手順

試験の手順を図 6.3 に示す。岩盤の露頭面ないしボーリングの孔底に、中空円筒の形状の試験体を成形する。まず、試験体の上面にあたる地表面ないし孔底面を、ディスク型ビット等を用いて平滑に整形する。コアバレル等を用いて、整形された上面に対して直交する方向に中心孔と外周溝を掘削し、円筒形状の試験体を成形する。中心孔と外周溝は共軸で、試験体の上面と内側面と外側面は滑らかに仕上げる。

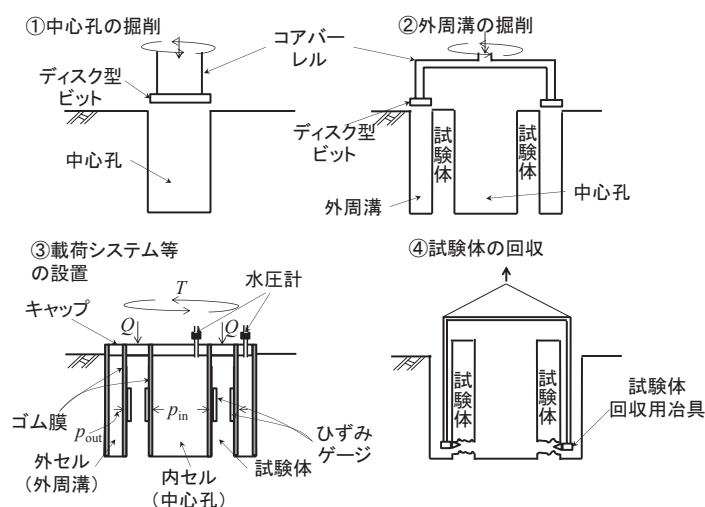


図 6.3 試験の手順

次に、内セルを中心孔に、外セルを外周溝に設置し、側圧の載荷装置に接続する。さらに、試験体の上面に、キャップ、載荷装置等を設置し、荷重の供給装置に接続する。載荷試験は、等方圧密ないし異方圧密した後に、ねじりせん断を行う。単調載荷の他に繰返し載荷、クリープ載荷等を組み合わせることもできる。試験体の内側面に作用する側圧  $p_{in}$  と外側面に作用する側圧  $p_{out}$  は等しい条件 ( $p_{in}=p_{out}$ ) を基本とするが、中間主応力の影響を検討する場合には、両者を独立に制御すること ( $p_{in}\neq p_{out}$ ) も可能である。載荷は、原則として、試験体がせん断破壊ないし引張り破壊するまで行う。

載荷試験の終了後に、試験装置を分解・撤去し、試験体を回収して変形の形態や破壊の性状等を観察する。

#### (4). 試験体の形状および寸法

試験体の形状は、底部が地盤と連続した中空円筒とする。中心軸は鉛直方向を原則とする。ただし、自重の影響によって試験体に過度の曲げやせん断が作用しない範囲（中心軸の傾きが 20 度未満）であれば、傾斜させることもできる。

試験体の変形モードが単純せん断モードであると仮定するためには曲率を小さくする必要があり、一般に内径・外径比 ( $d_i/d_o$ ) は 0.5 以上 ( $1.0 > d_i/d_o \geq 0.5$ ) が好適である。なお、この仮定をしない解析方法を用いるならば内径・外径比 ( $d_i/d_o$ ) は 0.5 以下でも良い。極端な条件として内径がゼロ ( $d_i/d_o=0$ ) の場合には、試験体の形状は円柱になり、中心孔及び内セルは不要になるので、試験装置や試験の手順（施工性）は簡略になる。しかし、試験体の上面に作用するせん断応力およびねじり方向のせん断ひずみの中心軸における値はゼロになり、それらの半径方向の分布は非一様になるため、この影響を適切に考慮した解析方法とする必要がある。

外径  $d_o$  は、岩盤の力学特性の寸法効果を考慮すると 100mm 以上で、試験の費用を考慮すると 200~600mm が一般的である。費用は高くなるが、 $d_o > 600$ mm も可能である。

高さ  $h_s$  は、寸法効果に関する半径方向とのバランスを考慮すると、ほぼ一樣な単純せん断モードの変形をしていると見なせる試験体の上部から中部の区間の高さが外径  $d_o$  の 0.4 倍以上を基本とするが、試験体の底部が周辺岩盤に連続していることの影響があるため、試験体の高さ・外径比 ( $h_s/d_o$ ) は 0.5 以上 ( $h_s/d_o \geq 0.5$ ) が好適である。

#### (5). 試験装置

試験装置は、図 6.1 に示したように、中心孔に設置する内セル、外周溝に設置する外セル、試験体の上面に設置するキャップ、載荷装置等、さらに計測機器類や側圧と荷重の供給装置等からなる。

内セルは、円柱の形状をしており、中心孔に挿入され、試験体の内側面に直応力  $p_{in}$  を作用させる。剛な円筒の側面をゴム膜が覆う構造をしている。ゴム膜の両端を固定する部分は、試験体の軸方向変位（圧縮・伸張）とねじり変位を拘束しない（変位に追従できる）構造とする。ゴム膜を介して試験体の内側面に作用させる圧力と、試験体の内側面のひずみ（および変位）を計測するセンサーを内蔵する。

外セルは、円筒の形状をしており、外周溝に挿入され、試験体の外側面に直応力  $p_{out}$  を作用させる。剛な円筒の内側面をゴム膜が覆う構造をしている。ゴム膜の両端を固定する部分は、試験体の軸変位（圧縮・伸張）とねじり変位を拘束しない（試験体の変形に追従できる）構造とする。円筒の外側面もゴム膜が覆う構造にすれば、周辺の岩盤に反力を取ることができる。円筒の剛性と強さを低くすることが可能になり、薄く軽い構造とすることができる。ゴム膜を介して試験体の外側面に作用させる圧力と、試験体の外側面の変位やひずみを計測するセンサーを内蔵する。

キャップは、その底面が試験体の上端面と同一寸法のドーナツ状の形状をしており、試験体の上面に設置され、試験体の上面に軸方向とねじり方向の変位や荷重を伝達する。全体の構造は剛な円盤ないし円筒で、軸荷重とせん断荷重を計測する機能を有する。軸荷重（ないし直応力）及びねじり方向のせん断荷重（ないしせん断応力）がキャップの底面から試験体の上面に確実に伝わり、試験体とキャップの境界面や試験体の上面の近傍で破壊が生じないように、キャップの底面に凹凸を付けたり（粗度を高めたり）、キャップと試験体の境界面を接着したり、試験体の上面近傍を補強したり、試験体の上面にアンカーボルト等を埋め込む等の工夫をする。特に軸荷重（ないし直応力）が引張りである場合には、キャップの底面と試験体の上面が分離しないように留意する必要がある。キャップの底面（試験体の上端面に接する面）は、円周方向に複数に等分割されており、各底面に作用する直荷重とねじり方向のせん断荷重を計測できるものとする。試験体の上面全体に作用する軸荷重と中心軸回りのモーメント荷重（トルク）を計測するための荷重計を、キャップの上部に設置する。これらの計測結果は、分割したキャップの底面において計測した分布荷重の合力として、計測結果の確認に利用できる。

載荷装置は、キャップを介して試験体の上面に軸方向（圧縮・伸張方向）の荷重を、さらに中心軸回りにねじりモーメント荷重（トルク）を作用させる装置である。一定の荷重（ないし応力）速度及び変位（ないしひずみ）速度で制御が可能で、単調載荷のみならず、繰返し載荷等も可能とすることが好適である。動力源は、油圧等の液圧、空圧、電動モーターのいずれでも良く、所定のねじりモーメント荷重（トルク）が確保されるならば手動形式の載荷機構でも問題ない。

計測機器類は、荷重計、圧力計、変位計、回転角計、ひずみゲージ等の各種のセンサーである。試験体の側面に設置する計測機器は、内セルあるいは外セルに内蔵する。試験体の上面に設置する計測機器は、キャップに内蔵するか、キャップの直上、あるいは載荷装置に設置する。なお、側圧と軸荷重およびせん断荷重の供給装置においても、制御のために適切なセンサーを設置することが好適である。

試験体に作用する側圧は、内セルと外セルのセル圧を供給する装置で付与する。単純せん断モードの試験の場合は、内セルの圧力  $p_{in}$  と外セルの圧力  $p_{out}$  は同一である ( $p_{in}=p_{out}$ ) ので1つの供給装置とすることができる。しかし、中間主応力の影響を検討する場合には、両者を独立に制御できるようにすること ( $p_{in} \neq p_{out}$ ) が好適である。圧力の供給媒体は、油

圧等の液圧でも空圧でも良いが、制御性能や安全性を考慮すると液圧が好適である。動力源は、油圧等の液圧、空圧、電動モーターのいずれでも良い。露頭で行う浅い試験の場合には、地表面に設置することが一般的であるが、孔底で行う深い試験の場合には、孔内のキャップや載荷装置の上に設置することもある。最大供給圧力は、試験条件によって決められるが、試験体である岩盤の一般的な強度に勘案すると、数～20MPaで十分といえる。荷重の供給装置は、キャップに軸荷重と中心軸回りのモーメント荷重（トルク）を供給する装置で、軸荷重は圧縮・伸張（引張り）の両方向、中心軸回りのモーメント荷重（トルク）は時計回り・反時計回りの両方向に制御できることが好適である。露頭で行う浅い試験の場合には、地表面に設置することが一般的で、アンカー等により周辺地盤に反力を取る。また、孔底で行う深い試験の場合には、孔内のキャップの上部に設置して、孔壁の摩擦抵抗により反力を取ることもある。最大供給荷重は、試験の目的や試験体の寸法、力学特性によって決められるが、一般に、試験体を破壊させるのに十分な能力を有することが必要である。

#### (6). 計測システム

荷重ないし応力・圧力の計測は、試験体の内側面に作用する直応力（内セルの圧力） $p_{in}$ と外側面に作用する直応力（外セルの圧力） $p_{out}$ と、試験体の上面全体に作用する直荷重 $Q$ と中心軸回りのモーメント荷重（トルク） $T$ （ないしねじり方向のせん断荷重 $S$ ）について行う。試験体の内部では間隙水圧を計測することもできる。さらに、キャップの底面（試験体の上端面との接触面）は円周方向に複数の面に等分割され、各分割面（ $i=1\sim n$ ）に作用する直荷重 $Q_i$ とねじり方向のせん断荷重 $S_i$ （または中心軸回りのモーメント荷重（トルク） $T_i$ ）を計測して供試体の上面に作用する応力分布を求める。荷重計ないし圧力計は、試験体の側面では内セルと外セルに与える圧力を、試験体の上面ではキャップ及びキャップの直上の荷重を計測する。

変位ないしひずみの計測については、試験体の軸方向の変位（圧縮量・伸張量）、中心軸回りのねじり変位（ないし回転角度）、半径方向の変位（ないし内径と外径の変化量または内周長と外周長の変化量）、さらに側面の任意の位置と方向におけるひずみについて行う。

試験体内外側面でのひずみの計測は、ひずみゲージでの計測を基本とし、加えて、一定の計測範囲の圧縮量・伸張量を計測して計測範囲内の平均ひずみを求めても良い。外側面のひずみゲージの設置個所に関しては、地理座標系（E, W, N, S）に対して、試験体の側面に図 6.4 のようにひずみゲージを設置する。ひずみゲージは接着剤等で試験体側面の任意の位置に接着し、パラフィンあるいはシリコンなどでプレート表面を止水するのが好ましい。 $i$ 番目のひずみゲージ（①）で計測されるひずみを $x_i$ とすると、地理座標系のひずみテンソル成分は式(6-1)で計算できる。



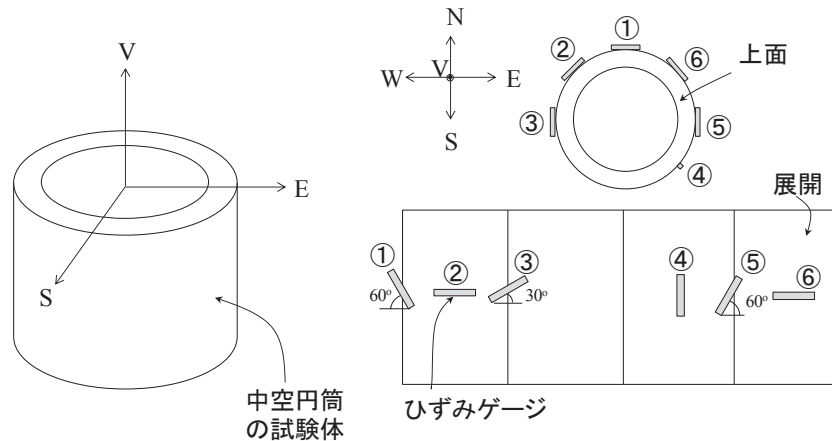


図 6.4 外側面へのひずみゲージの設置  
(左：試験体と座標系の関係，右：試験体の上面と展開)

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_S \\ \varepsilon_E \\ \varepsilon_V \\ \gamma_{SE} \\ \gamma_{EV} \\ \gamma_{VS} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2.31 & 0.58 & -0.58 & -2.31 & 0.58 & -0.58 \\ 0 & 0 & 0.58 & 1.15 & -1.73 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (6-1)$$

なお， $\gamma_{ij}$  は計測値に相当する工学ひずみで， $\gamma_{ij}=2\varepsilon_{ij}$  ( $i \neq j$ ) ( $i, j = S, E, V$ ) の関係がある．ねじり変位（回転角度）は，中心軸回りの回転量を計測しても良いし，中心軸から一定の距離における回転方向の変位を計測して求めても良い．

### (7) 荷重の方法

基本的には，圧密過程とそれに続くせん断過程から成る．圧密過程では，試験体の内側面に直応力  $p_{in}$ ，外側面に直応力  $p_{out}$ ，上面に軸荷重  $Q$  を荷重して，変形が収束するまで放置する．最も一般的な応力状態は等方圧密状態 ( $p_{in}=p_{out}=\sigma_z$ ) であるが，異方圧密状態 ( $K_0$  圧密状態) ( $p_{in}=p_{out} \neq \sigma_z$ ，静止土圧係数  $K_0=p_{in}/\sigma_z=p_{out}/\sigma_z$ ) で行うこともできる．また，内側面と外側面に作用する直応力が等しい場合 ( $p_{in}=p_{out}$ ) を原則とするが，異なる値の条件 ( $p_{in} \neq p_{out}$ ) とすることができる．この場合には，中間主応力の影響（中間主応力係数  $b$  の影響）を検討できる．さらに，上面に中心軸回りのモーメント荷重（トルク） $T$ （ないしねじり方向のせん断荷重  $S$ ）を荷重して，初期せん断を受けた状態とすることも可能である．

せん断過程では，試験体の上面に中心軸回りのモーメント荷重（トルク） $T$ （ないしねじり方向のせん断荷重  $S$ ）を適切なパターンで荷重する．最も一般的なパターンは一定の荷重速度で行う単調荷重であるが，試験結果がねじり方向に依存する場合には，逆振りの荷重を行って結果を平均値化し，ねじり方向依存性を相殺することも有効である．

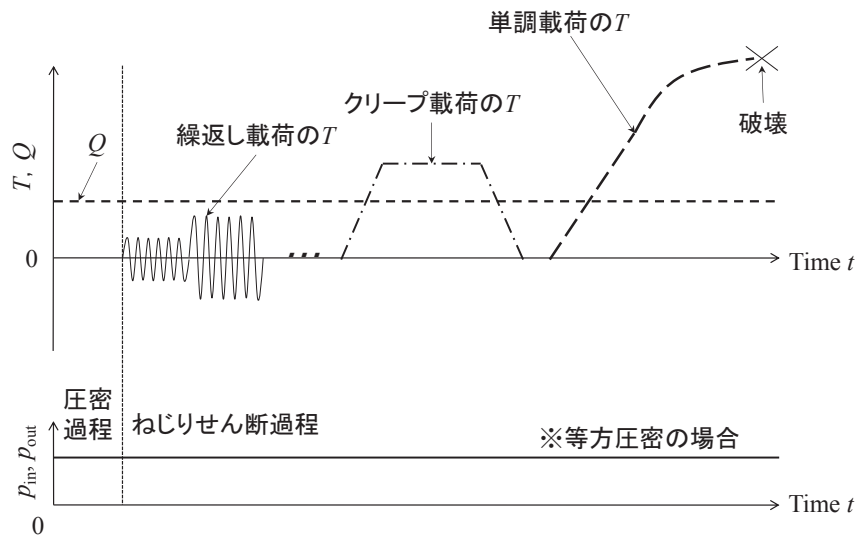


図 6.5 载荷の応力経路の例  
(上：直荷重とモーメント荷重，下：側圧)

また、試験の目的に応じて、繰返し载荷、微小な除荷・再载荷、クリープ载荷、応力緩和等を、図 6.5 のように組み合わせたり、単調载荷の途中で载荷速度を変化させるパターンもできる。また、試験の目的に応じて、試験体の側面に作用する直応力を変化させることもできる。さらに、圧密過程とせん断過程を繰返す多段階载荷式の試験を行うこともできる。

## 6-2. 原位置岩盤ねじりせん断試験で変形特性の異方性を特定する方法

面内等方性を仮定した岩盤の変形異方性を求めるフローを図 6.6 に示す。まず、試験の準備として、上述したように、岩盤に中空円筒の試験体を掘削・作製し (①)、試験体の目視観察を行い不連続面の走向と傾斜を推定する (②)。このとき、地理座標系 (E, W, S, N) と試験体の位置関係を確認した後に、外セル・内セル・载荷装置・ひずみゲージなどの計測機器を設置する (③)。ひずみゲージを設置に関しては、地理座標系に対して前述した図 6.4 のように行う。

次に、等方圧密 (④)、ねじりせん断 (⑤) を行い、応力とひずみの計測を行う。せん断に伴う塑性変形を考慮して、载荷の順序は、はじめに等方圧载荷をはじめに行い、その後、ねじりせん断を  $10^{-4}$  以下の弾性域で行うのが好ましい。もちろん各载荷で段階的に载荷する応力を上げ下げして塑性変形の判定を行っても良い。

次に、等方圧密時のひずみの計測値を用いて、図 6.7 示す剛性の等方な面の傾斜  $\xi$  と Y 軸と傾斜方位の為す角度  $\zeta$  を特定し、座標軸を設定する (⑥)。

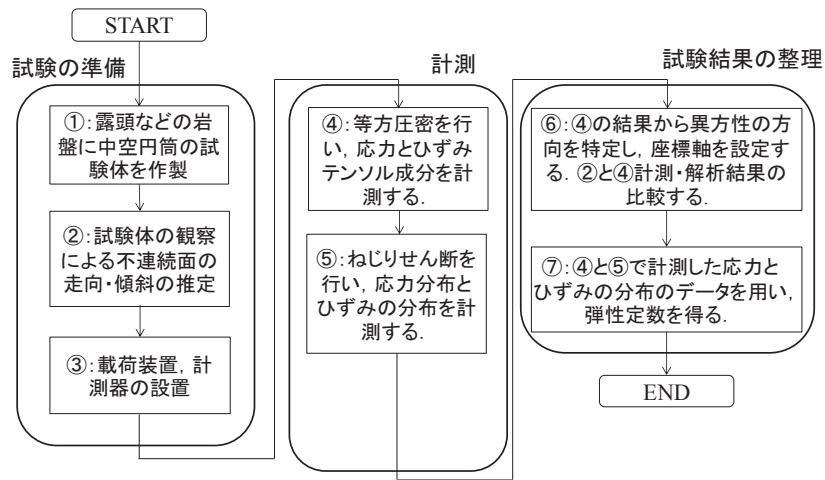


図 6.6 面内等方性を仮定した岩盤の変形異方性を求めるフロー

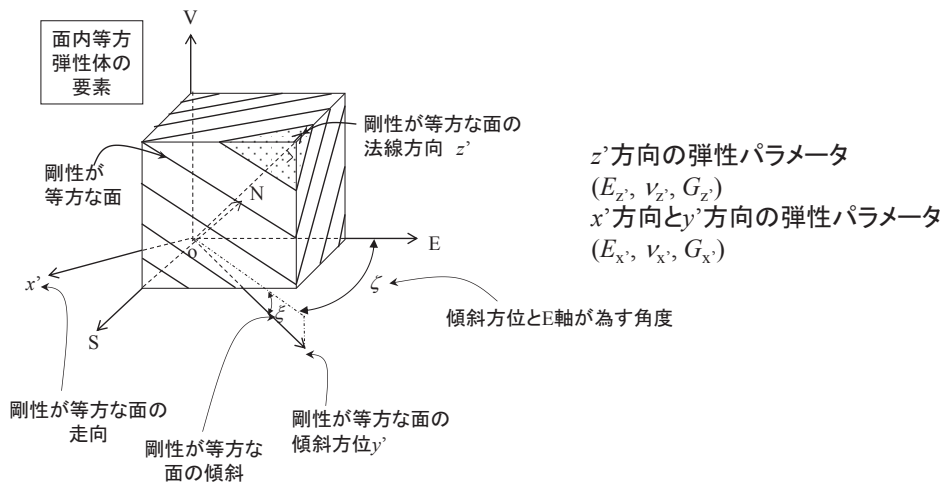


図 6.7 地理座標系からの剛性の等方な面の傾斜 ( $\xi$ ,  $\zeta$ )

前述したひずみの計測方法により，地理座標系での等方圧密時のひずみ増分テンソル $\Delta\epsilon'$ は式(6-2)で表される．式(6-1)で得た $\Delta\epsilon'$ から，式(6-3)によって主ひずみを求める．

$$\Delta\epsilon' = \begin{pmatrix} \Delta\epsilon_S & \Delta\epsilon_{SE} & \Delta\epsilon_{SV} \\ & \Delta\epsilon_E & \Delta\epsilon_{EV} \\ sym. & & \Delta\epsilon_V \end{pmatrix} \quad (6-2)$$

$$\mathbf{e}^T \Delta\epsilon' \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad (6-3)$$

式(6-3)のひずみテンソルの対角化は jacobi 法などを用い，式(6-4)で表される主ひずみの基底

ベクトルで構成される行列  $\mathbf{e}$  を求める. 等方圧密時においては, 異方性の方向を表す局所座標系  $(x', y', z')$  の各方向と主ひずみ方向  $(1, 2, 3)$  が共軸となるため,  $(\xi, \zeta)$  によって  $\mathbf{e}$  は式(5-4)と同様に構成され, 例えば式(5-5)と同様であるが, 式(6-5)によって  $\xi$  と  $\zeta$  は特定される.

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta & 0 \\ -\cos\xi\sin\zeta & \cos\xi\cos\zeta & \sin\xi \\ \sin\xi\cos\zeta & -\sin\xi\cos\zeta & \cos\xi \end{pmatrix} \quad (6-4)$$

$$\begin{aligned} \xi &= \cos^{-1}(e_{33}) \\ \zeta &= \cos^{-1}(e_{11}) \end{aligned} \quad (6-5)$$

ここで,  $\zeta$  を用いて図 6.8 のように, E 軸から反時計周りの角度  $\zeta$  の位置に Y 軸が来るように, 直交座標系  $(X, Y, Z)$  を設定する. この操作で X 軸と  $x'$  軸は一致する. また,  $(X, Y, Z)$  座標系に合わせて円筒座標系  $(R, \theta, Z)$  を設定すると, 図 6.9 のような試験体と座標軸の関係を得る. ②の目視観察で得た不連続面の走向・傾斜と, 異方性の方向の整合を確認できる.

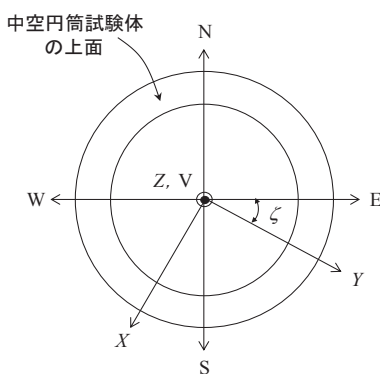


図 6.8 直交座標系  $(X, Y, Z)$  の設定

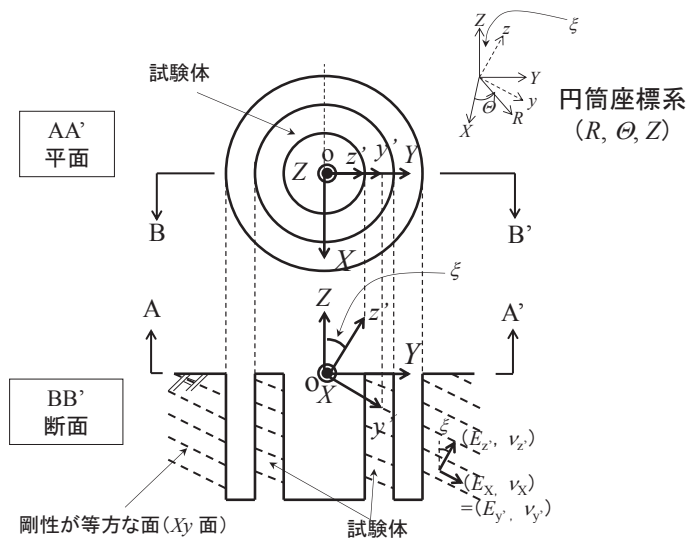


図 6.9 面内等方弾性体の中空円筒の試験体と直交座標系  $(X, Y, Z)$  および局所座標系  $(X, y', z')$

さらに、後述する試験結果の整理のため、式(6-2)の地理座標系のひずみテンソルを、式(6-7)で直交座標系(X, Y, Z)に座標変換する。

$$\begin{pmatrix} \cos\zeta & \sin\zeta & 0 \\ -\sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_s & \Delta\varepsilon_{SE} & \Delta\varepsilon_{SV} \\ & \Delta\varepsilon_E & \Delta\varepsilon_{EV} \\ \text{sym.} & & \Delta\varepsilon_V \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta & 0 \\ \sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_x & \Delta\varepsilon_{XY} & \Delta\varepsilon_{ZX} \\ & \Delta\varepsilon_Y & \Delta\varepsilon_{ZY} \\ \text{sym.} & & \Delta\varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (6-6)$$

上記のように、理論的には、 $x'y'$ 面の剛性 $<z'$ 面の剛性の場合は最大主ひずみ 1 方向と中間主ひずみ 2 方向で形成される面= $x'y'$ 面，最小主ひずみ 3 方向= $z'$ 方向，最大主ひずみ $\varepsilon_1$ =中間主ひずみ $\varepsilon_2$  となり， $z'$ 面の剛性 $<x'y'$ 面の剛性の場合は 2 方向-3 方向で形成される面= $x'y'$ 面，1 方向= $z'$ 方向， $\varepsilon_2$ =最小主ひずみ $\varepsilon_3$  となることが予測されるが，仮に， $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$  となる場合には，図 6.10 のように異方性の方向を設定する。

次に，④，⑤で計測した応力とひずみを用いて，弾性定数を定める (⑦)。弾性論により求めた，ねじりせん断時の直応力 $\sigma_z$ およびせん断応力 $\sigma_{z\theta}$ の理論解は式(6-7)で表される。

$$\sigma_z = - \frac{2 \left( -\sin^3 \xi \cos \xi + (\sin^3 \xi \cos \xi - \sin \xi \cos^3 \xi) C_{xxxx} + \sin \xi \cos^3 \xi C_{zzzz} + \frac{1}{2} (\sin^3 \xi \cos \xi - \sin \xi \cos^3 \xi) C_{zyzy} \right) \varepsilon_{z\theta} \cos \theta}{\sin^4 \xi C_{xxxx} + 2 \sin^2 \xi \cos^2 \xi C_{zzzz} + \cos^4 \xi C_{zzzz} + \sin^2 \xi \cos^2 \xi C_{zyzy}} \frac{\varepsilon_{z\theta} \cos \theta}{C_{zyzy}}$$

$$\sigma_{z\theta} = \sin^2 \theta \left( \frac{1}{C_{xyxy}} \sin^2 \xi + \frac{1}{C_{zyzy}} \cos^2 \xi \right) \varepsilon_{z\theta} + \cos^2 \theta \frac{\varepsilon_{z\theta}}{C_{zyzy}} \quad (6-7)$$

せん断ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{z\theta}$ は，変位制御のねじりせん断試験により，円周方向の変位増分 $\Delta u_\theta$ と試験体の高さ $h_s$ で $\Delta\varepsilon_{z\theta} = \Delta u_\theta / h_s$ と表される。式(6-7)より，ねじりせん断時の $\theta=0, 90^\circ$ の位置における応力分布の理論解は，式(6-8)で表される。 $\theta=0^\circ$ における直応力増分を $\Delta\sigma_{zat0}$ とし， $\theta=0^\circ$ と $\theta=90^\circ$ におけるせん断応力増分を $\Delta\sigma_{z\theta at0}$ と $\Delta\sigma_{z\theta at90}$ とした。

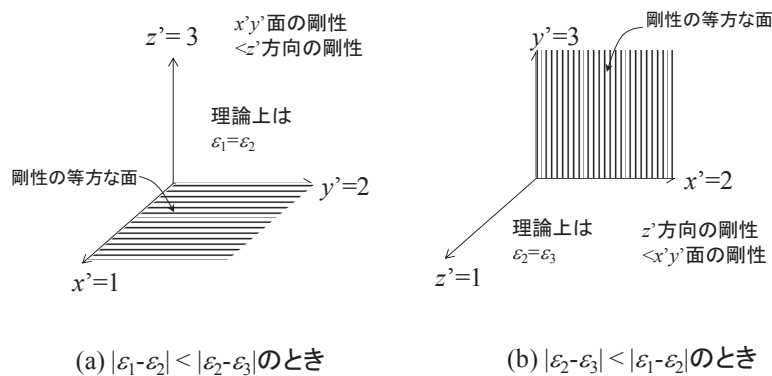


図 6.10 面内等方性を仮定した異方性の方向の設定

$$\begin{pmatrix} \frac{\sin 2\xi}{2} \left( \frac{\sin 2\xi}{2} \Delta\sigma_{Za0} C_{2323} + \Delta\varepsilon_{Z\theta} \cos 2\xi \right) \\ \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{\Delta\sigma_{Z\theta at 90}} - \frac{1 + \cos 2\xi}{2} C_{ZYZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_5 \\ k_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{3 \sin \xi - \sin 3\xi}{4} \left( -\Delta\sigma_{Za0} \sin \xi - \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{C_{ZYZY}} \cos \xi \right) & 0 & \frac{\sin 2\xi}{2} \left( 2 \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{C_{ZYZY}} \cos 2\xi - \Delta\sigma_{Za0} \sin \xi \right) & -\frac{(3 \cos \xi + \cos 3\xi)}{4} (\Delta\sigma_{Za0} \cos \xi + 2 \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{C_{ZYZY}} \sin \xi) \\ \frac{4}{1 - \cos 2\xi} & \frac{4}{\cos 2\xi - 1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \end{pmatrix} \quad (6-8)$$

$$C_{ZYZY} = \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{\Delta\sigma_{Z\theta at 0}}$$

式(6-8)に示すように、 $\theta = 0^\circ$ の位置のせん断応力増分とせん断ひずみ増分の関係から  $C_{2323}$  が特定できる。なお、式(6-8)の左辺の1行目を  $k_5$ , 2行目を  $k_6$  と記号を置く。

同様に、弾性論の理論解から、等方圧密時の理論解は式(6-9)で表される。式(6-9)は式(5-7)と同じ式であるが、求めるコンプライアンステンソル成分に合わせて書き換えた。等方圧密時は分割ロードセルで計測される応力が一定値になる。等方圧密時の応力増分  $\Delta\sigma_c$  は任意の方向の直応力に等しいので、分割ロードセルで計測した直応力の任意の1つか、あるいは複数の応力の平均値を用いればよい。なお、 $\Delta\varepsilon_X / \Delta\sigma_c$  ( $=k_1$ ),  $\Delta\varepsilon_Y / \Delta\sigma_c$  ( $=k_2$ ),  $\Delta\varepsilon_Z / \Delta\sigma_c$  ( $=k_3$ ),  $\Delta\varepsilon_{ZY} / \Delta\sigma_c$  ( $=k_4$ ) と記号を設定する。

$$\frac{1}{\sigma_c} \begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \\ \varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + \cos 2\xi} & \frac{1}{1 + \cos 2\xi} & \frac{1}{3 - \cos 2\xi} & \frac{0}{1 - \cos 2\xi} \\ \frac{2}{1 - \cos 2\xi} & \frac{2}{1 - \cos 2\xi} & \frac{2}{3 + \cos 2\xi} & \frac{2}{1 + \cos 2\xi} \\ \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} \\ -\frac{\sin 2\xi}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \end{pmatrix} \quad (6-9)$$

次に、計測した応力のデータから、式(6-10)で表す最小二乗法を用いて弾性定数を特定する。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A}^{-1}) \mathbf{A}^T \mathbf{k} \quad (6-10)$$

なお、 $\mathbf{k}$  と  $\mathbf{A}$  は式(6-8), (6-9)から算出される係数行列で、 $\mathbf{C}$  はコンプライアンステンソルの成分で、下記で表される。

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{XXXX} \\ C_{XXYY} \\ C_{XXZZ} \\ C_{ZZZZ} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + \cos 2\xi} & \frac{1}{1 + \cos 2\xi} & \frac{1}{3 - \cos 2\xi} & \frac{0}{1 - \cos 2\xi} \\ \frac{2}{1 - \cos 2\xi} & \frac{2}{1 - \cos 2\xi} & \frac{2}{3 + \cos 2\xi} & \frac{2}{1 + \cos 2\xi} \\ \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} & \frac{2}{2} \\ -\frac{\sin 2\xi}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} \\ \frac{3 \sin \xi - \sin 3\xi}{4} \left( -\Delta\sigma_{Za0} \sin \xi + \frac{2 \Delta\varepsilon_{Z\theta} \cos \xi}{C_{2323}} \right) & 0 & \frac{\sin 2\xi}{2} \left( 2 \frac{\Delta\varepsilon_{Z\theta}}{C_{2323}} \cos 2\xi - \Delta\sigma_{Za0} \cos 2\xi \right) & \frac{3 \cos \xi + \cos 3\xi}{4} \left( \Delta\sigma_{Za0} \cos \xi + \frac{2 \Delta\varepsilon_{Z\theta} \sin \xi}{C_{2323}} \right) \\ \frac{4}{1 - \cos 2\xi} & \frac{4}{\cos 2\xi - 1} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

式 (6-10) で求めた  $\mathbf{C}$  を用いて, 式(6-12)から弾性定数を決定する.

$$\begin{aligned}
 E_{x'} &= \frac{1}{C_{xxxx}}, & E_z &= \frac{1}{C_{zzzz}}, & \nu_z &= -\frac{C_{xxzz}}{C_{zzzz}} \\
 \nu_{x'} &= \frac{-C_{xxxy}}{C_{xxxx}} \\
 G_{z'} &= \frac{1}{C_{zyzy}}
 \end{aligned}
 \tag{6-11}$$

なお, 図 6.6 のフローの⑥で  $\xi = 0^\circ$  が特定された場合は図 6.11 のように 1:軸圧縮と 2:外圧荷と 3:ねじりせん断を行ったときの中空円筒試験体の変形を考え, 次式によって弾性パラメータを特定する.

$$\begin{aligned}
 E_z &= \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a}, \nu_z = -\frac{2\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_z}, G_z = \frac{\Delta\sigma_{z\theta}}{\Delta\varepsilon_{z\theta}} \\
 E_{x'} &= \frac{p_o}{2\Delta\varepsilon_R}, \nu_{x'} = -\frac{\Delta\varepsilon_\theta}{\Delta\varepsilon_R}
 \end{aligned}$$

なお,  $p_o$  は外圧である. また, 図 6.6 のフローの⑥で  $\xi = 90^\circ$  が特定された場合は図 6.12 のように 1:軸圧縮と 2:外圧荷と 3:ねじりせん断を行ったときの中空円筒試験体の変形を考える. この  $\xi = 90^\circ$  の場合は, 次式によって弾性パラメータを特定する.

$$\begin{aligned}
 E_{x'} &= \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\varepsilon_a}, \nu_{x'} = -\frac{2\Delta\varepsilon_x}{\Delta\varepsilon_z} \\
 E_z &= \frac{p_o}{2\Delta\varepsilon_R}, \nu_z = -\frac{\Delta\varepsilon_\theta}{\Delta\varepsilon_R}, G_z = \frac{\Delta\sigma_{z\theta}}{\Delta\varepsilon_{z\theta}}
 \end{aligned}$$

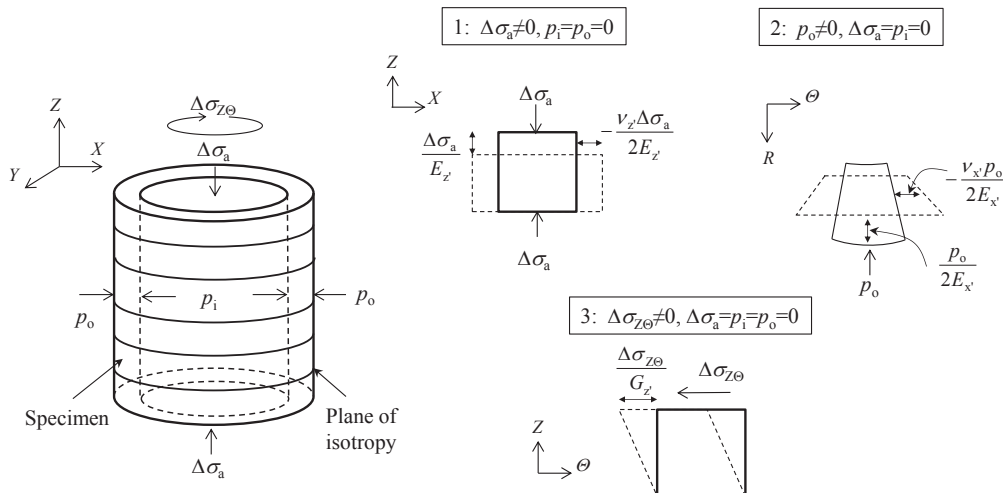


図 6.11  $\xi = 0^\circ$  の場合の試験体の変形

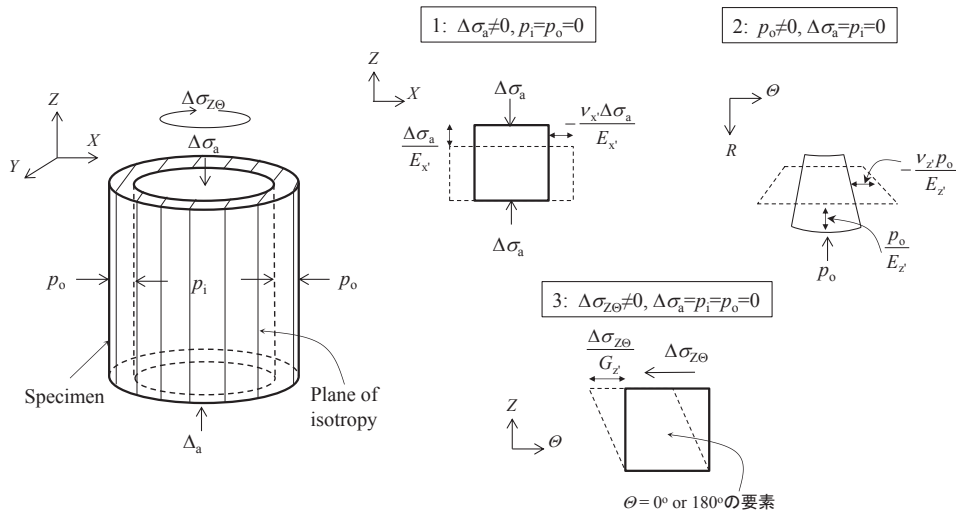


図 6.12  $\xi = 90^\circ$  の場合の試験体の変形

### 6-3. 異方性の特定方法の検証および地山の拘束効果の検討

ここでは、6-2 で提案した面内等方性を仮定した岩盤の異方性の特定方法を、形状効果の検討をするために 3-8 で行った FEM 解析の結果を用いて検証する。さらに、試験の条件を表現した FEM 解析を行って、試験体の下端が地山と一体化している影響に関して考察する。

#### (1). 異方性の特定方法の検証

3-8 では、理論解と FEM 解析によるひずみと応力の関係の一致度に関して言及した。ここでは、3-8 で試験体の寸法を変えて行った FEM 解析の結果を用いて、式(6-12)によって弾性パラメータを算出し比較する。

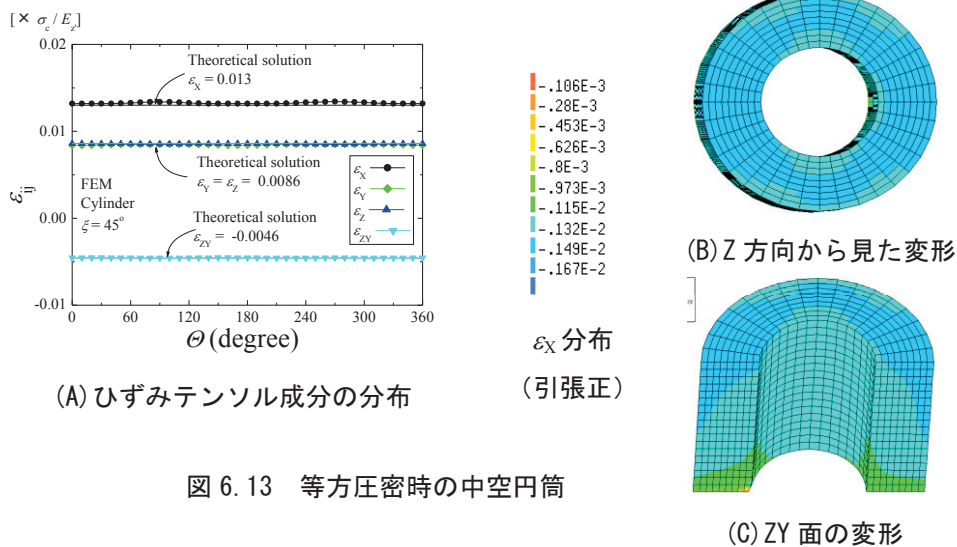


図 6.13 等方圧密時の中空円筒



試験体の外径  $d_0=0.4\text{m}$  で一定とし、高さを  $h_s = 0.1\sim 1.6\text{m}$ 、内径を  $d_i = 0.15\sim 0.39\text{m}$  で FEM 解析した結果を用いる。なお、図 6.13 の FEM 解析の結果のように、等方圧載荷時は中空円筒が要素として挙動し、理論解と完全に一致する。そのため、異方性の主軸の傾斜及び剛性の等方な面の走向を求めるステップは省略し、式(6-12)の等方圧載荷時の項 ( $k_5$  と  $k_6$ ) には要素の解析結果を代入する。

剛性等方な面に直交する方向 ( $z'$  方向) の弾性パラメータ ( $E_{z'}$ ,  $\nu_{z'}$ ,  $G_{z'}$ ) と試験体高さ  $h_s$  および内径  $d_i$  の関係を図 6.14 に示す。  $h_s$  と  $d_i$  は外径  $d_0$  で正規化している。いずれのパラメータも肉厚 ( $d_0-d_i$ ) と試験体高さ  $h_s$  の影響を受ける。乱さない試験体の掘削が可能と考えられる肉厚( $d_0-d_i$ )が 10cm 程度とであるため、  $h_s/d_0 = 0.75\sim 1.25$  付近で理論解との誤差が少ない試験体の寸法を決定できる。

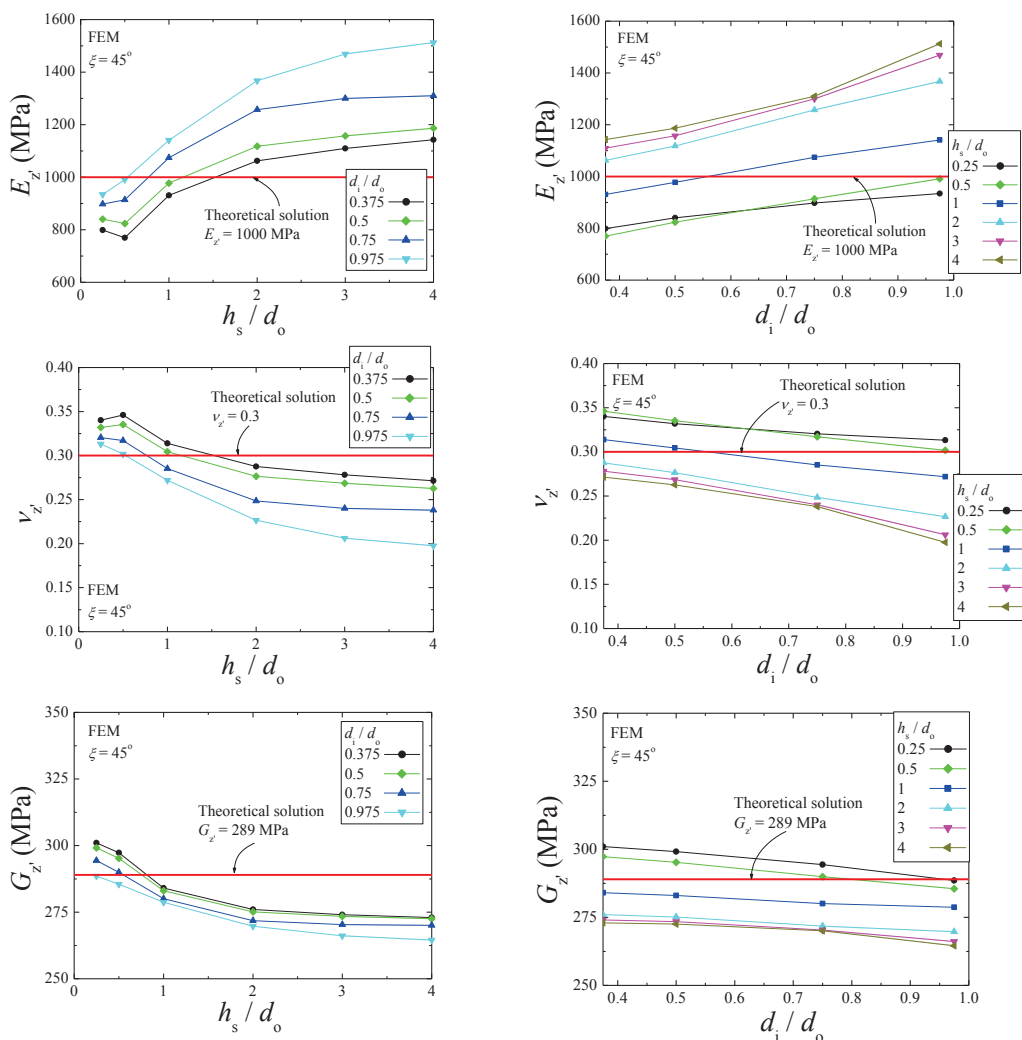


図 6.14  $z'$  方向の弾性パラメータ ( $E_{z'}$ ,  $\nu_{z'}$ ,  $G_{z'}$ ) と試験体高さ  $h_s$  (左) および内径  $d_i$  (右) 関係

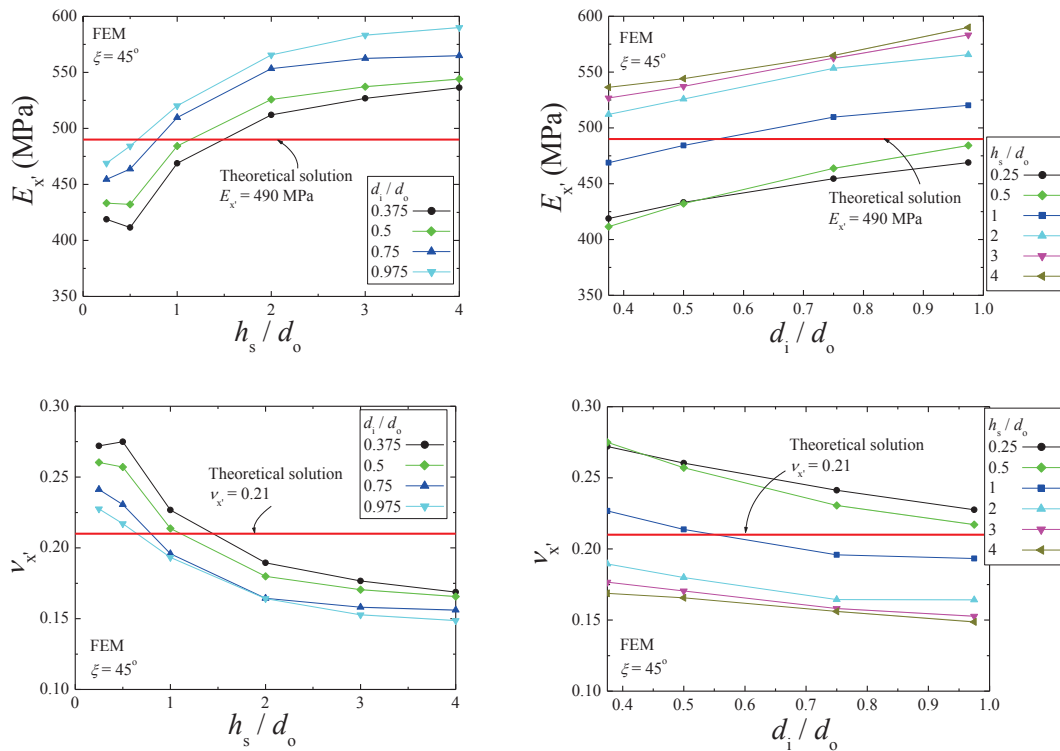


図 6.15  $x'$ 方向の弾性パラメータ ( $E_{x'}$ ,  $\nu_{x'}$ ) と試験体高さ  $h_s$  (左) および内径  $d_i$  (右) 関係

剛性の等方な面 ( $x'y'$ 方向) の弾性パラメータ ( $E_{x'}$ ,  $\nu_{x'}$ ) と試験体高さ  $h_s$  および内径  $d_i$  の関係を図 6.15 に示す. このパラメータも  $z'$ 方向と同様のことが言える.

## (2). 原位置岩盤ねじりせん断試験の FEM 解析

次に, 原位置岩盤ねじりせん断試験における試験体の下端が地山と一体化することによる影響を検討する. 解析領域と境界条件を図 6.16 に示す. 試験体の寸法は 3-8 と (1) の検討により, 理論解との誤差が 5%以下の,  $h_s = 0.3\text{m}$ ,  $d_0 = 0.4\text{m}$ ,  $d_i = 0.2\text{m}$  とし, 載荷時の領域内の応力状態が, 境界条件の影響を受けないように, 解析領域の寸法は 2.0m 径, 高さ 2.0m の円柱形とした<sup>10)</sup>. (1) の議論と同様に, 図 6.17 に示す通り原位置試験の解析においても試験体が要素に近い挙動をするため, 載荷は, ねじりせん断だけを行い, 図 6.16 ように円周方向の変位を分布させて試験体の上端に与える. なお, メッシュの節点と要素の数は, 14680 と 13041 である. 原位置岩盤せん断試験によっても, 非一様になったせん断応力分布を図 6.18 に示す.

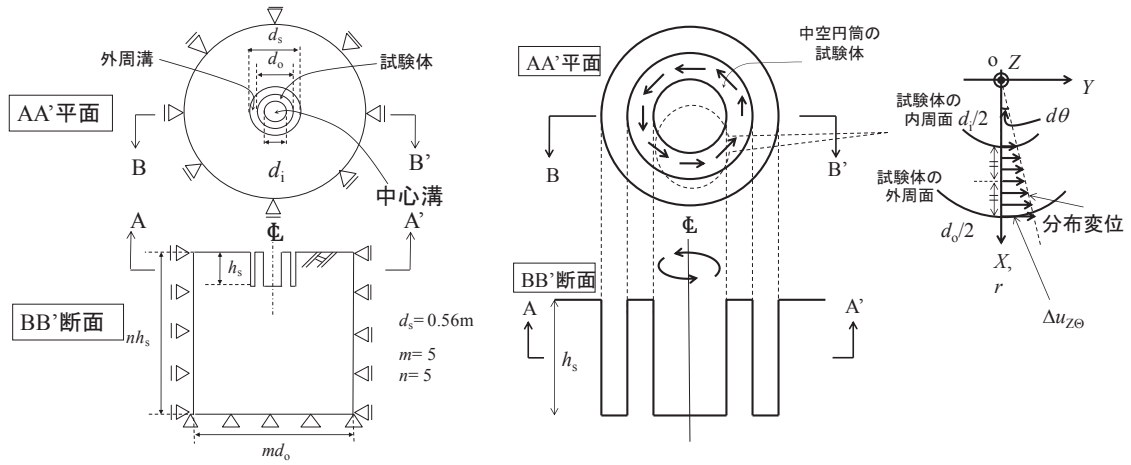
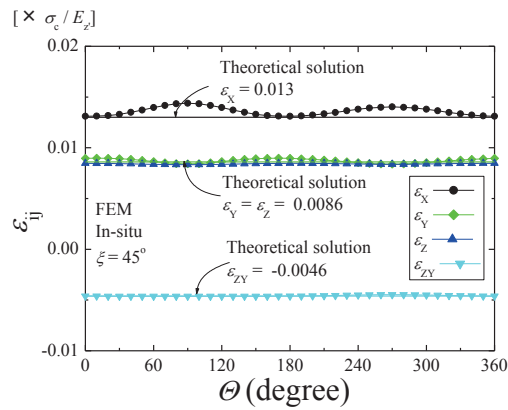
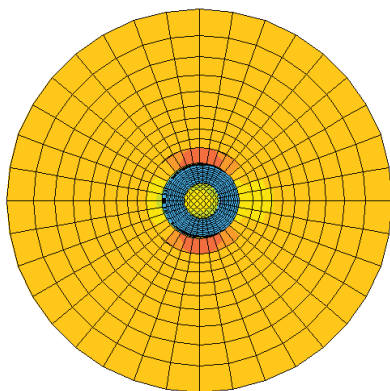


図 6.16 解析領域と境界条件  
(左：全体，右：試験体周り)

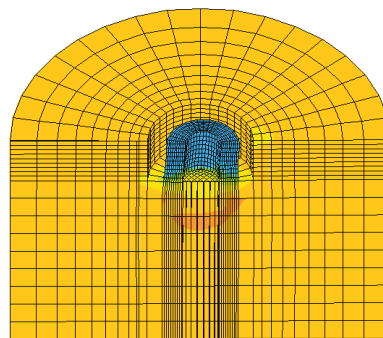
(A) ひずみテンソル  
成分の分布



$\epsilon_x$  分布  
(引張正)



(B) Z 方向から見た変形



(C) ZY 面の変形

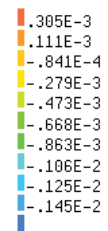


図 6.17 等方圧密時の原位置岩盤ねじりせん断試験の試験体

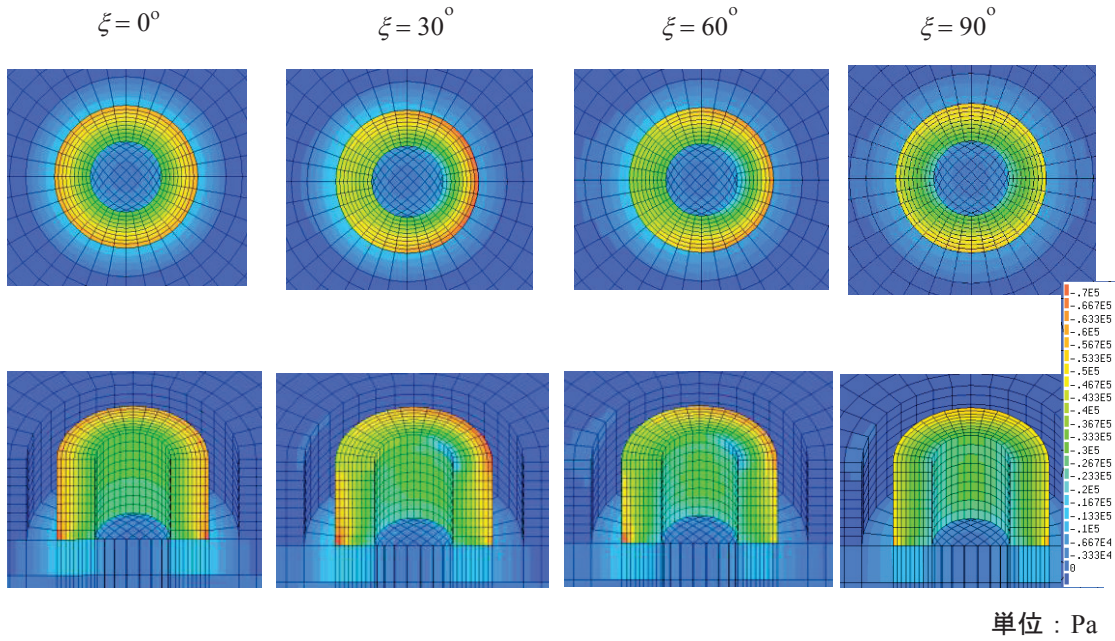


図 6.18 ねじりせん断時の非一様なせん断応力分布

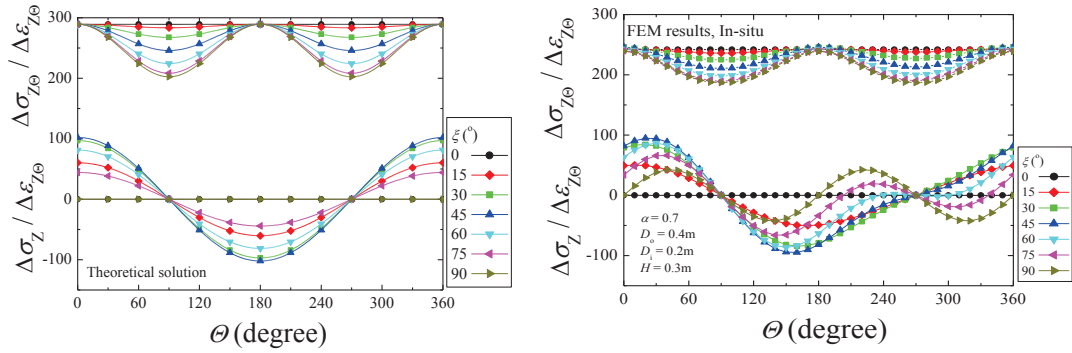


図 6.19 理論解（左）と FEM 解析（右）による応力分布の比較

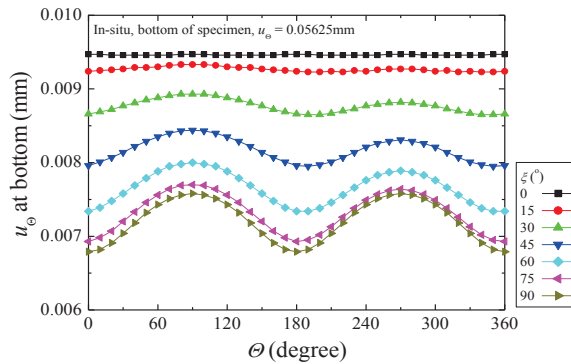


図 6.20 FEM 解析による試験体下端の円周方向変位分布

理論解と原位置岩盤ねじりせん断試験の FEM 解析の応力分布を図 6.19 に比較する. 原位置岩盤ねじりせん断試験の解析結果でも, 理論解に近い応力分布が得られている. さらに,  $\xi = 45^\circ$  のときの原位置岩盤ねじりせん断試験の FEM 解析の結果を用いて, 式(6-12)によって弾性パラメータを算出すると,  $(E_z, \nu_z, G_z, E_x, \nu_x) = (875\text{MPa}, 0.32, 246\text{MPa}, 441\text{MPa}, 0.26)$  が得られており, 理論解  $(E_z, \nu_z, G_z, E_x, \nu_x) = (1000\text{MPa}, 0.3, 289\text{MPa}, 490\text{MPa}, 0.21)$  と比べてもかなり近い値が原位置岩盤ねじりせん断試験によっても得られる. 図 6.20 には FEM 解析による原位置岩盤ねじりせん断試験の試験体下端の円周方向変位の分布を示す. この解析において入力の変位  $u_\theta = 0.056\text{mm}$  であるが, 試験体下端での変位は最大で入力の  $u_\theta$  の 17%にあたる.  $\theta=90^\circ$  における図 6.19 の応力分布では, 原位置の試験体では理論解の 16%にあたる応力分布が得られており, 下端での変形と同じだけ応力が低減されている. そのため, 例えば試験体下端近傍でせん断ひずみが計測できれば補正可能である.

#### 6-4. 強度異方性の特定方法

4-3 では, 不連続面を含む中空円筒のねじりせん断時のメカニズムを, 3次元の弾塑性 FEM 解析によって明らかにした. ここでは, 4-3 で議論した内容に基づいて, 原位置岩盤ねじりせん断試験によって, 強度異方性を特定する方法を提案する.

強度異方性を特定するフローを図 6.21 に示す.

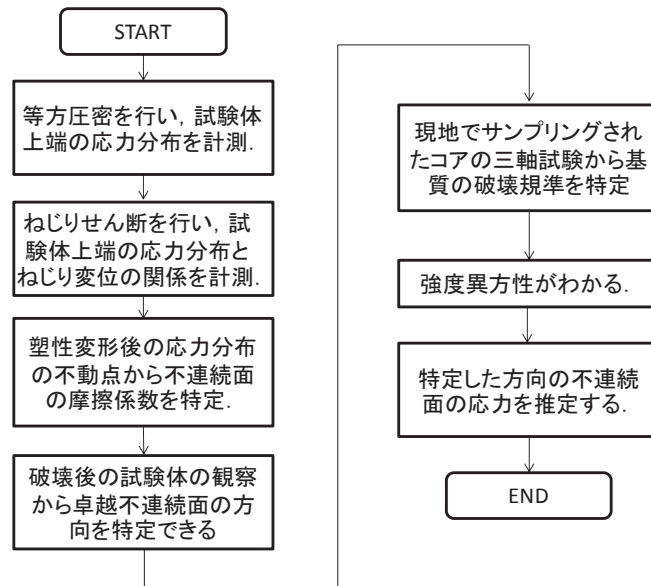


図 6.21 強度異方性を特定するフロー

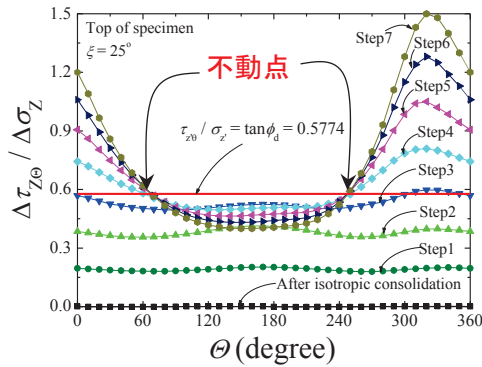


図 6.22 塑性変形に伴う応力分布  
( $\xi = 25^\circ$  の例)

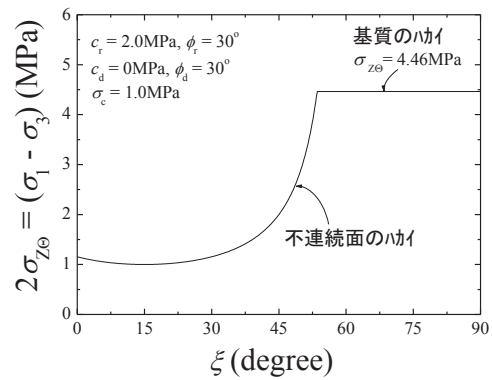


図 6.23 定式化された強度異方性

このように、等方圧载荷およびねじりせん断を行い、試験体上端の応力分布を計測する。その後、図 6.22 に示すように、塑性変形に伴う応力分布の不動点を把握すれば、不連続面のせん断抵抗角  $\phi_d$  を把握できる。载荷後の試験体の観察から、卓越した不連続面の傾斜  $\xi$  を特定する。その後、原位置試験と併せて採取されるボーリングコアで室内の三軸試験を行い、基質の破壊規準を特定する。基質の破壊規準と  $\xi$  と不連続面のせん断抵抗角を用いれば、図 6.23 のように、強度異方性が定式化される。さらに、 $\xi$  と等方圧密応力  $\sigma_c$  と試験体上端で計測したせん断応力  $\sigma_{z\theta}$  を用いて、式(4-3)から、破壊時の不連続面に働く応力を特定できる。

### 6-5. 実施の形態と実岩盤への適用する際の考察

露頭で行う場合と孔底で行う場合が図 6.24 のように考えられる。露頭で行う場合には、原子力発電所の岩盤基礎や、山岳トンネルの周辺岩盤、長大橋の橋脚基礎などの力学特性を把握する際に用いることができるし、孔底で行う場合は、構造物を建設する際の深部岩盤の力学挙動の評価や、石油などの資源探査における掘削時の周辺岩盤の力学特性を把握する際に用いることができる。

#### (1). 露頭で行う場合：原位置岩盤ねじりせん断試験

試験体を露頭ないし調査坑の底面の浅部に作製して試験を行うので、深度は一般に 2m 以浅に限定されるが、中規模の試験 ( $200\text{mm} \leq d_0 < 400\text{mm}$ ) や大規模な試験 ( $400\text{mm} \leq d_0$ ) も可能となる。試験の手順(試験体の作製、装置のセット等)、試験装置の設計、計測等、孔底で行う場合に比較して容易である。また、中～大規模な試験も可能となるので、寸法効果の観点から試験結果の岩盤の代表性が高い。载荷重の反力は、地表面や、調査坑の天端や側面に取ることが可能となる。

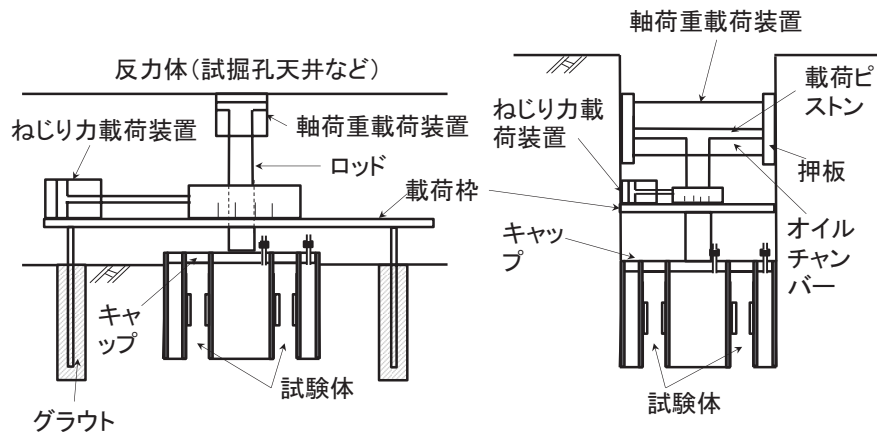


図 6.24 実施場所に応じた载荷装置等の設置状況  
(左：露頭, 右：ボーリング孔底)

表 6.1 戸室石の弾性パラメータを用いた試験の状況の解析結果  
(原位置岩盤ねじりせん断試験を想定した解析,  $\xi = 45^\circ$ )

試験条件	载荷モード	$\Delta\varepsilon_{Z\theta}$	$\Delta\sigma_{Zat0}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{Z\theta at0}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{Z\theta at90}$ (MPa)
原位置岩盤 ねじり	ねじりせん断	$10^{-4}$	-0.02	0.06	0.15

### (2). 孔底で行う場合：孔底ねじりせん断試験

試験体をボーリング孔の底面（孔底）に作製して試験で行うので，深度は一般に 2m 以深も可能となるが，一般に小規模な試験（ $100\text{mm} \leq d_0 < 200\text{mm}$ ）となる．試験の手順（試験体の作製，装置のセット等），試験装置の設計，計測等，露頭で行う場合に比較して困難である．また，小規模な試験に限定されるので，寸法効果の観点から試験結果の岩盤の代表性は低くなる．载荷重の反力は，地上に設置する昇降装置（ボーリング機械を使うことが一般的）の自重を通じて地表面に取るか，孔壁に取ること一般的である．

### (3). 実岩盤への適用

5 章と同様に，表 5.1 の戸室石の弾性パラメータを用いて，原位置岩盤ねじりせん断試験の実岩盤への適用を考察した．せん断ひずみ  $\varepsilon_{Z\theta}$  のレベルが弾性域の  $10^{-4}$  のときを想定して 3 章の中空ねじり試験の解析を表 6.1 のように行った．

特に，弾性パラメータを求める解析に必要な  $\theta = 0^\circ$  における直応力  $\sigma_{Zat0}$  とせん断応力  $\sigma_{Z\theta at0}$  と  $\theta = 90^\circ$  における  $\sigma_{Z\theta at90}$  に着目するが，最小で 0.02MPa が得られており，十分に計測できる範囲である．なお  $\sigma_{Zat0}$  引張方向に発生しているが，等方圧密後のねじりせん断を行うために計測することが可能である．二方向ロードセルの設計については 5 章と同様の議論が

できる。

さらに、原位置岩盤ねじりせん断試験の解析手法の安定性を評価するために、**図 6.25** のフローで感度分析を行った。入力は等方圧密時のひずみテンソル各成分の理論値 $\varepsilon_{ij\_ic}$ と分割ロードセルで**図 6.26**のように計測した直応力とせん断応力 ( $\sigma_{Zat0}$ ,  $\sigma_{Z\Theta at0}$ ,  $\sigma_{Z\Theta at90}$ )、および等方圧密応力 $\sigma_c$ と $\zeta$ である。5章で行った感度分析で、同様の手法で算出する $\xi$ と $\zeta$ の安定性は確認しており、ここでは $\zeta=0^\circ$ を設定し、その他の異方性のパラメータ算出の安定性を議論する。5章と同様に、この感度分析でも新(2002)<sup>8)</sup>にならない、各ひずみテンソルに含まれる計測誤差 $r_{ij}$ が最大最小で $\pm 10\%$ 含まれる<sup>11)</sup>と仮定した。さらに、通常はロードセルの計測誤差は既往の文献ではほとんど見積もらない<sup>11)</sup>が、分割ロードセルにおいては、隣接するロードセルで干渉し合う可能性があるため、通常のロードセルよりも計測誤差を多く含む可能性がある。また試験結果の整理としては、**図 6.26**のように最小二乗法によりフィッティングを行って応力分布を推定する必要がある。そこで、直応力とせん断応力に含まれる計測誤差 ( $r_{\sigma Zat0}$ ,  $r_{\sigma Z\Theta at0}$ ,  $r_{\sigma Z\Theta at90}$ ) を最大最小で $\pm 5\%$ 見積もった $r_{ij}$ と ( $r_{\sigma Zat0}$ ,  $r_{\sigma Z\Theta at0}$ ,  $r_{\sigma Z\Theta at90}$ ) を、一様乱数を用いて**図 6.27**のように発生させてひずみテンソルの各成分に加え合わせ、弾性パラメータを求めた。一様乱数で発生させた誤差が偏らないように、 $\varepsilon_{ij\_ic}$ と $\varepsilon_{Z\Theta}$ のひずみレベルは最大で $10^{-4}$ になるように設定し、試行回数は $n_t=1000$ で分析を行った。なお、 $n_t=10000$ でも同じ検討を行っているが、得られた分析結果のばらつきは $n_t=1000$ の場合とほぼ同様の値を示すため、この感度分析は $n_t=1000$ で十分である。

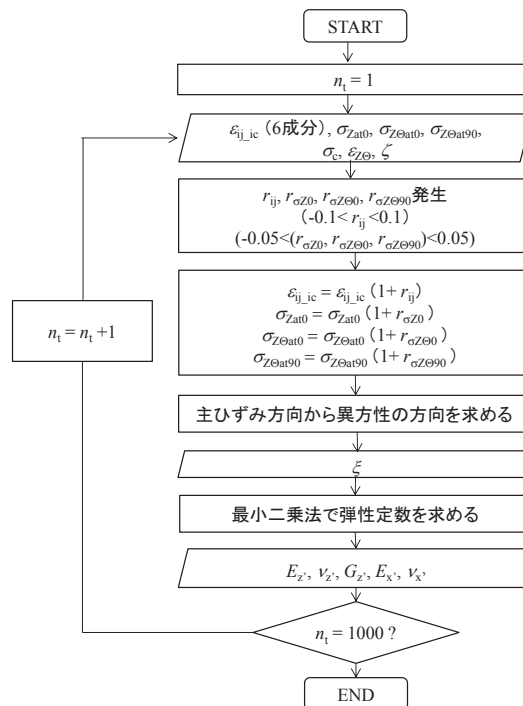


図 6.25 感度分析のフロー



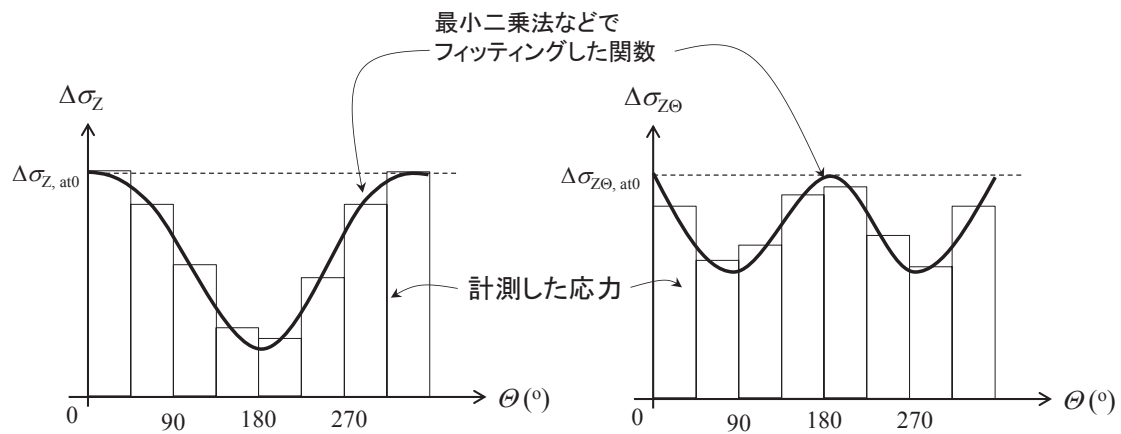
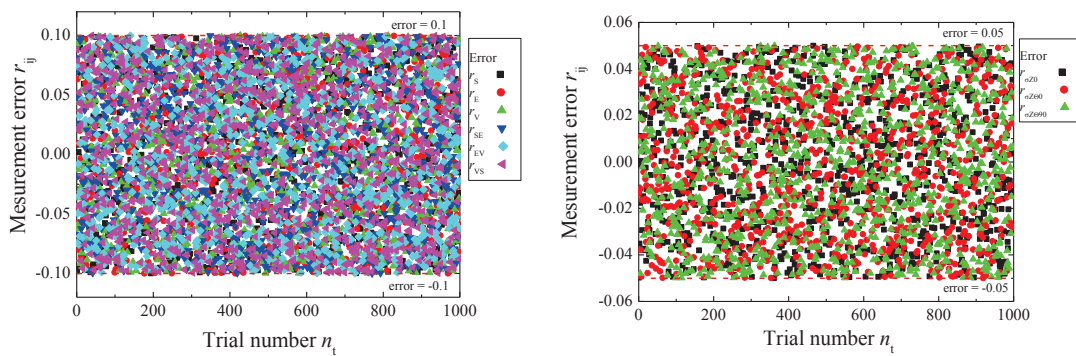
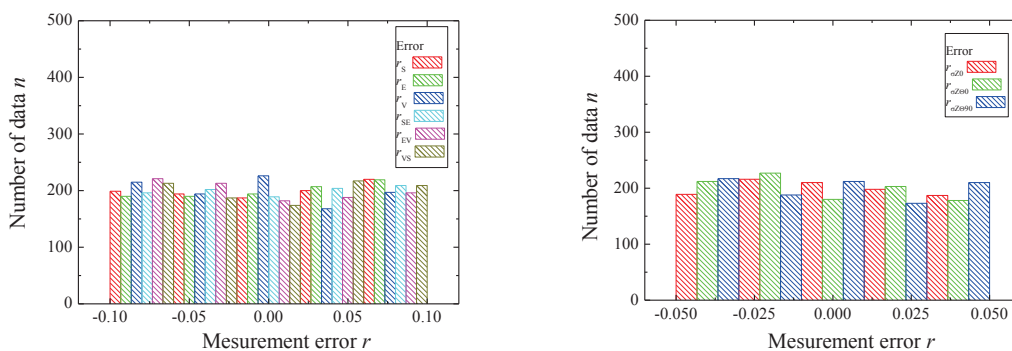


図 6.26 分割ロードセルで計測した応力とフィッティング



(a)  $n_i$  と誤差の関係

(左：ひずみテンソル，右：応力)



(b) 誤差の頻度分布

(左：ひずみテンソル，右：応力)

図 6.27 一様乱数を用いて発生させた誤差

この解析で検討した中で最も異方性の大きいケース（3章の $\alpha = 0.7$ ,  $E_z = 1000\text{MPa}$ ,  $\nu_z = 0.3$ ,  $G_z = 289\text{MPa}$ ,  $E_x = 490\text{MPa}$ ,  $\nu_x = 0.21$ ）の弾性パラメータの頻度分布を図 6.28 に示す。

$z'$ 方向の弾性パラメータ ( $E_z$ ,  $\nu_z$ ,  $G_z$ ) は明確なピークが見られ、変動係数  $C_v$  も最大で 0.07 と小さい値を取るため安定して求められる。  $x'$ 方向の弾性パラメータ ( $E_x$ ,  $\nu_x$ ) は、真値付近にピークがあるものの  $C_v$  も最大で 0.4 と相対的に大きいため注意が必要である。本手法と Nunes(2002)の同様の感度分析結果（変動係数）を表 6.2 に比較すると、本手法が同程度以上の安定性を示している。なお、異方性のパラメータ ( $\xi$ ,  $E_z$ ,  $\nu_z$ ,  $G_z$ ,  $E_x$ ,  $\nu_x$ ) の変動係数を ( $C_{v,\xi}$ ,  $C_{v,Ez}$ ,  $C_{v,\nu z}$ ,  $C_{v,Gz}$ ,  $C_{v,Ex}$ ,  $C_{v,\nu x}$ ) とした。

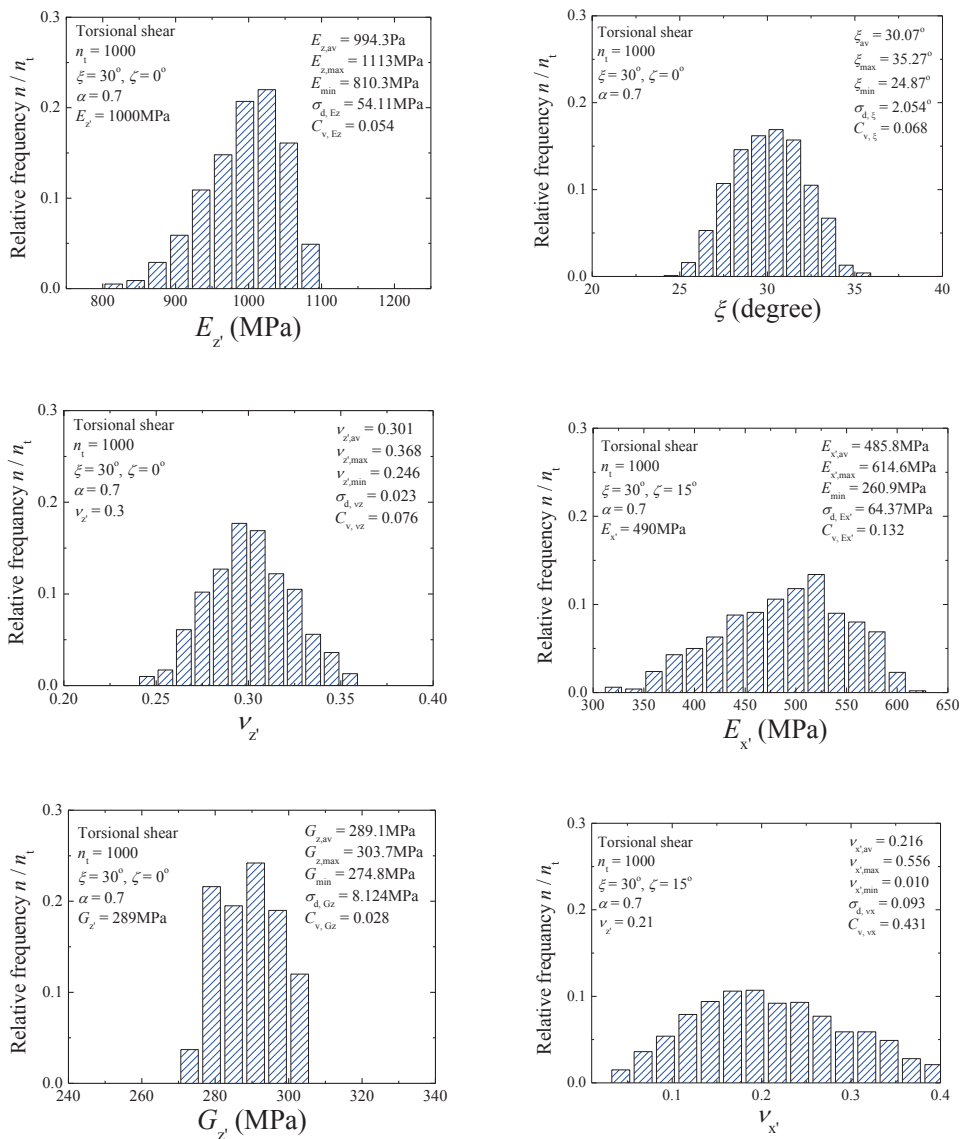


図 6.28 異方性のパラメータの頻度分布

表 6.2 感度分析結果の比較

手法	$C_{v_{\xi}}$	$C_{v_{Ez}}$	$C_{v_{vz}}$	$C_{v_{Gz}}$	$C_{v_{Ex}}$	$C_{v_{vx}}$	備考
This study	0.068	0.054	0.076	0.028	0.132	0.431	ひずみに誤差±10% ロードセルに誤差±5%
Nunes(2002) <sup>11)</sup>	0.248	0.060	0.120	-	0.100	0.470	ひずみに誤差±10% ロードセルに誤差0%

参考文献

- 1) 地盤工学会：岩盤のせん断試験方法（JGS3511-2004），2004.
- 2) 地盤工学会：地盤の平板載荷試験方法（JGS1521-2009），2009.
- 3) 谷和夫：三軸セル，三軸試験装置および三軸試験方法，特願平 10-252640，1998.
- 4) 岡田哲実，納谷朋広，谷和夫：中空円筒形状の試験体を用いた岩盤の引張試験方法の考案，第 48 回地盤工学研究発表会，pp.301-302，2013.
- 5) ISRM：Torsional shear test, *Suggested method of the committee of field test*, 1972.
- 6) 谷和夫：原位置孔底三軸圧縮試験法，特願平 9-318696，1997.
- 7) 地盤工学会：新規制定の地盤工学会基準案「岩盤のプレッシャーメータ試験方法」について，土と基礎，Vol.51, pp.98-105, 2003.
- 8) 新孝一：地盤の異方弾性係数の実用的な測定解析法，土木学会論文集 No.722/III-61, pp.231-243, 2002.
- 9) 菊本統，谷和夫，富樫陽太：原位置岩盤試験方法および装置，特願 2013-148114 号，2013.
- 10) 仙名里江，谷和夫：FEM 解析に基づく孔底三軸試験の試験体の適切な高さ直径比の提案，第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.264-269, 2011.
- 11) Nunes, A. L. L. S.: A new method for determination of transverse isotropic orientation and the associated elastic parameters for intact rock, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol.39, pp.257-273, 2002.

## 7. まとめ

### 7-1. 結論

この研究では、不連続面を含み異方的な力学挙動を示す岩盤の力学特性の異方性を合理的に調査することを目的に、まず、要素試験である三軸試験と、異方性材料で非要素試験になる中空ねじり試験を想定した理論解析と離散化解析を実施して、異方性岩盤の変形特性や不連続面の塑性変形に伴う力学挙動を考察した。その結果を利用して、異方性を調査するための新しい室内試験方法と原位置試験方法を提案した。得られた結果を次にまとめる。

2章で行った文献調査で、不連続面の密度が大きくなるほど岩盤の力学特性が低下する傾向が著しいことを確認し、変形特性の異方性では、剛性の等方な面と直交する方向の剛性が異なる面内等方弾性体が、剛性の等方な面を不連続面と見立てることで、堆積岩や節理群を持つ岩盤などのモデル化に用いられており、幅広い種類の岩盤の力学挙動をモデル化できる。強度特性の異方性では、岩盤の破壊が一つの弱面の方向性に依存すると仮定すれば、単一の不連続面を含む岩盤によってモデル化出来る。

3章では、面内等方弾性体が、力学特性に異方性をもつ岩盤を対象とした三軸試験では、応力とひずみの主方向が一致せず、軸対称性を満たさない“非三軸状態”になることと、同様の岩盤を対象としたねじりせん断試験では、中空円筒が非要素となり、载荷時の応答が分布することに言及した。その後、非三軸状態における異方性要素の変形特性および、ねじりせん断時の非要素となる中空円筒の変形特性を把握することを目的として、軟岩を想定した弾性パラメータの設定を行った上で、面内等方弾性体を仮定し、要素を対象とした解析さらに要素を対象とした解析を応用した非要素特性の検討を行った。その結果、以下3つのことがわかった。

#### (a) : 三軸試験の主応力軸と载荷軸が一致したケース

主応力軸と载荷軸が一致した、供試体の上下端が自由に変位できる条件の軟岩の解析結果では、等方圧密時に、異方性の主軸の傾斜 $\xi = 45^\circ$ のときにせん断ひずみが最大値を取り、主ひずみ軸は異方性の方向と一致する。

軸圧縮時には、等方圧密時と同様に $\xi = 45^\circ$ のときに、せん断ひずみが最大値を取り、この解析で考慮した変形の異方性が最も大きいケース（剛性の等方な面のヤング率とポアソン比が490MPaと0.3で、剛性の等方な面の法線方向のヤング率とポアソン比とせん断剛性率が1000MPaと0.21と289MPaの場合）主ひずみ方向は载荷軸から最大で $8.4^\circ$ 傾斜する。

(b) : 三軸試験の主ひずみ軸と載荷軸方向が一致したケース

主ひずみ軸と載荷軸が一致した供試体の上下端の側方変位を固定した条件は、通常の三軸試験に近い条件で、このとき、等方圧載荷時に、 $\xi = 45^\circ$  のときに最大値を取り、主応力方向は載荷軸と  $45^\circ$  の傾斜をなす。

三軸圧縮載荷時にはせん断応力が、 $\xi = 45^\circ$  のときに最大値を取り、(a)と同様の、変形の異方性が最も大きいケースで、主応力方向が載荷軸から最大で  $14.9^\circ$  傾斜する。このように、弾性変形が卓越する、等方圧載荷時や初期せん断時においても、異方性岩盤では変形が軸対称性を満たない非三軸性を示し、その値は等方圧密応力や軸応力、あるいは軸ひずみと比較しても、非常に大きい値を示す。この非三軸性に起因する応力とひずみが試験の制御上与える影響も大きいと考えられる。さらに、異方性を調査する上では、こういった異方性特有の応力とひずみの応答を適切に計測することができれば、異方性が従来の手法よりも簡易に特定できる可能性がある。

(c) : 非要素の中空円筒の試験体を用いたねじり試験

非要素となる中空円筒ねじり問題に関しては、要素を対象とした解析を応用して、載荷時に、円周方向に正弦と余弦、あるいはそれらの合成関数で表現されるひずみ分布の理論解を求め FEM 解析の結果と比較した。算出した理論解と FEM 解析解は誤差  $\pm 5\%$  以内で一致する。

4章では、強度異方性を合理的に調査する方法を考案することを目的として、一つの不連続面が全体の力学挙動に及ぼす影響が卓越すると仮定して、単一の不連続面を含む岩盤の破壊時の挙動について三軸試験と中空ねじり試験を対象として応力経路の考察を行った。理論解析とインターフェース要素で不連続面を模擬した弾塑性解析を行った結果、強度異方性の定式化のためには、主応力制御の要素試験である三軸試験では、必ず複数の試験が必要となる。しかし、中空ねじりせん断試験においては、単一の不連続面が円周方向に正弦曲線で変化する非要素試験となる。そのため、円周方向の応答の応力が非一様に分布して幅広い応力経路をとるので、この応力経路をコントロールして載荷し、せん断応力比の分布を適切に評価すれば、1回の試験で不連続面の破壊規準を求められ、破壊時の不連続面の応力が推定できる。

5章では、変形特性の異方性を合理的に調査することを目的として、著者らが発明した「変位計測式キャップ」と「荷重計測式キャップ」を用いた三軸試験を発明し、面内等方弾性体を仮定した岩盤の、異方性の方向と弾性パラメータ 5 つを 1 回の試験で調査する方法を提案した。これは、3章で説明した、異方性材料が載荷時に非三軸状態となる性質を利用したものである。さらに、提案した解析手法の安定性を感度分析を行って、計測したひずみテンソル成分に  $\pm 10\%$  の誤差が含まれたとしても安定して異方性の方向と弾性パラメータが求められることがわかった。

6章では、3章と4章で得た知見をもとに、「原位置岩盤ねじりせん断試験」を発明した。

この手法では、岩盤に作製した中空円筒試験体の上端に 2 方向ロードセルを複数設置し、載荷時の応力分布を計測して分析することで力学的な異方性が把握できる。具体的には、面内等方弾性体を仮定した岩盤の異方性の方向および弾性パラメータを求めることができ、不連続面の破壊規準を求めることができる。なお、変形特性に関しては、原位置岩盤ねじりせん断試験を想定した FEM 解析と感度分析を実施して、ひずみテンソル成分に計測誤差が±10%と応力分布に分布計測の際の誤差が±5%含まれる状況でも安定して弾性パラメータが求められることを確認した。

## 7-2. 今後の課題

最後に、5章で提案した三軸試験と6章で提案した原位置岩盤ねじりせん断試験について、実用化に向けた今後の課題としては、以下の2つが考えられる。

### (a) 室内の実証実験

この研究では、研究のアイデアの実証を試験の境界条件を再現した数値解析で行った。しかし、5章で提案した三軸試験では、セル水のなかに設置した変位計によって岩盤の変形特性の異方性に起因するキャップの動きをどのぐらいの精度で計測できるかなど、実岩盤のコアの側方変位や反力計測を実験的に検証する必要がある。また、6章で提案した原位置岩盤ねじりせん断試験では、高額な原位置試験を行う前に、室内で模型実験を実施して、トルクを伝えるための処理を検討する必要があるし、トルク力の反力はどこで支持についても実験的に検証する必要がある。さらに、ゴム膜の張力を低減するために原位置岩盤三軸試験で導入されている摺動リングのキャリブレーションなどを行う必要があるし、室内試験の段階で、試験体の掘削機や載荷装置のキャリブレーションなどを経て試験の計画を綿密に立てる必要がある。

### (b) 原位置の実証実験

室内の実証実験で行った原位置試験の実験計画を、実際に原位置で実証実験を行う必要がある。この時に重要となるのは試験時間とコストで、実用化に向けて綿密に立てた施工計画通りに実験できるかを原位置で実験的に検証する必要がある。特に岩盤の性状によっては試験体の作製・成型の時間がコントロールできない可能性もあるので注意する。

## 謝辞

この論文は、著者が横浜国立大学大学院博士後期課程に在学中に行った研究の成果をまとめたものです。論文をまとめるにあたって、先生方、研究機関の方々、大学の先輩、同級生、後輩からご指導とご支援を賜りました。ここに感謝の意を表すとともに御礼申し上げます。

谷和夫先生（元横浜国立大学教授，現 防災科学技術研究所）には修士課程も合わせると 5 年の長い間ご指導頂きました。生活態度の改善や自己研鑽のやり方などの研究を円滑に行う環境づくりから、具体的な研究の指導まで、先生からたくさんのことを学びました。本学を退職され防災科学技術研究所に移られると聞いたときは、はじめは非常に悲しかったのですが、いま思うと、常に研究の最前線にいたいと思う研究者のあるべき姿を見せて頂いたのでかなと思います。絶えず勉強を続けて、新しい研究テーマに果敢に挑んでおられる先生の姿にはいつも元気づけられました。

指導教員の菊本統先生には 1 年半という短い期間でしたが、連続体の力学や三軸試験に関すること、論文や助成金申請書の執筆の仕方など、いろいろと的確なアドバイスを頂きました。先生のご指導がなければ、この論文がまとまることはなかったと思います。先生は、年齢が比較的近いこともあって、研究室の運営や趣味のアウトドアウェア収集の話など研究以外でもたくさんの議論をさせて頂きました。

当研究室の早野公敏先生は卒業研究の指導教員で、この論文も審査して頂きました。私が神奈川県を退職して本学で学び直したいと相談した時も快く受け入れて頂きました。また、普段から研究の議論などをして頂き、長い間大変お世話になりました。

小長井一男先生（横浜国立大学教授）、勝地弘先生（横浜国立大学教授）、西尾真由子先生（横浜国立大学准教授）にはこの論文の審査をして頂き、私が研究を進めるだけでは思いつかない視点の貴重なアドバイスを頂きました。

電力中央研究所の岡田哲実さま、佐藤浩章さま、澤田昌孝さま、西本壮志さまには、学会活動のなかで研究のアドバイスや丁寧なコメントを頂き、いつも暖かい言葉をかけて頂きました。特に、岡田さまと佐藤さまは修士研究の指導をして頂いたこともあり、博士研究でも的を射たコメントとアドバイスを頂きました。いつも最先端の研究を積極的に進めているお二人のような研究者を目指して、私も頑張っていきたいと思います。また、たくさん連れて行って頂いた飲み会の席でも大変お世話になりました。

本学秘書の小林恵津子さま，坪田佳子さまには，旅費の申請や学会費の払込みなどで多大なご迷惑をおかけしました．特に小林さまには 5 年近くの長い間お世話になり，数えきれない御恩があります．有難うございます．

港湾空港技術研究所の高橋英紀さま，北海道大学の西村聡先生，ジオデザインの丸山憲治さまには，私の卒論の指導をして頂きました．その後も皆さまには，いつも学会でお会いする度に暖かい言葉をかけて頂きました．高橋さまは，国際地盤工学会のフランスの会議では，ENPC やグルノーブル大学の地盤研究室に訪問する機会も与えて頂きました．西村先生には，東日本大震災のときに私の実家が被災したと勘違いされて，メールで心配して頂いた時にはとても有り難く思いました．丸山さまは，ソイルストラクチャーコンテストなどの学会行事でお会いする度に声をかけてくださいました．丸山さまのフランクな人柄にはいつも癒されました．

研究室の大先輩である村本勝己さま（鉄道総合技術研究所）には，今は無き横浜国大地盤研の BBQ でいつも声を掛けて頂いていて，最近では研究の議論や博士研究の進捗について叱咤激励頂きました．

三井住友建設の高橋直樹さまには，昨年のフランスの会議で約 2 週間同行させて頂き，飲み会などで岩石力学に関する議論など，楽しい時間を過ごさせてさせて頂きました．

東亜建設工業の田中洋輔さまには，富山の地盤工学研究発表会ではじめてお会いしましたが，海外の建設現場のことや現場ならではの研究課題，また本学地盤研にまつわる話題でたくさん議論して頂きました．

日本原子力研究開発機構の片山敦さまには，博士論文の特に図面作成について重要なアドバイスを頂きました．

ギタリストの荻原亮さんには，主に趣味のことで大変お世話になりましたが，私の研究活動をいつも応援してくださいました．また，博士研究の合間に都内のジャズバーなどに連れて行って頂きました．

神奈川県藤沢土木事務所の先輩，下川大輔さん（神奈川県）には，私が神奈川県を退職した後も大変良くして頂きました．下川さんは，地質学や土木工学にも精通しておられ，博士研究のことからキースジャレットのことまで様々なことを議論させて頂きました．

研究室の先輩である池野谷尚史さん（東急建設）には，学会などでお会いする度に叱咤激



励頂きました。研究室の近い先輩であるナセル・アミルヘサリさん（現、日揮）には、研究の議論をいつも熱心にして頂きました。また、氏と一緒にいったインドの国際会議では、あなたの交渉術のうまさには感嘆致しました。本学モダンジャズ研究会の先輩である磯田幸実さん（東日本旅客鉄道）には、研究などの相談だけでなく研究室の後輩の就職相談にも乗って頂きました。大変お世話になりました。

大学の同級生である、田村洋君（現、東北大学）、小松怜史君（現、日本学術振興会特別研究員）、石崎崇大君（現、愛知県）、田中悠一君（現、東急建設）、田村央貴君（現、川崎市立日本民家園学芸員）、徳武皓也君（現、エムケー精工）は、研究や趣味のを通して一緒に楽しい大学生活を過ごさせて頂きました。特に、田村洋君、小松君、田村央貴君は博士課程後期に進んだ数少ない同期で、博士の学生ならではの話題で議論したり、事あるごとに相談に乗って頂きました。また、徳武君は横浜国大と共同研究で度々大学に訪れては声を掛けてくださいました。君たちがいてくれたおかげで、寂しい思いをすることなく博士課程の学生生活を送れました。

研究室の後輩である、大草陽太郎君（現、鹿島建設）、渡辺悠太君（現、千代田化工建設）、田中啓君（現、東京大学大学院博士過程 3 年）、石井香織さん（現、東急建設）、小川慧君（現、JFE エンジニアリング）、青野泰久君（現、清水建設）には、研究室で一緒に楽しく研究活動をさせて頂きました。大草君と渡辺君は、私が本学の修士課程に入学した時の同期でもあります。君たちが就職してからは、大学の研究では見失いがちな工事現場の話をゼネコンマンの立場から聞かせて頂きました。青野君は、かなり近い研究テーマをやられていたこともあり、研究の議論をしたり一緒に学会に行ったり楽しく研究生生活をさせて頂きました。

最後に、長年にわたって私の学生生活を支え、研究活動を支援してくれた父と母に心より感謝致します。