

異方性岩盤の変形特性を特定する 三軸試験の提案

富樫 陽太^{1*}・菊本 統²・谷 和夫³

¹横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府，現 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

²横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター (〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋1501-21)

*E-mail: togashi.yota.93@rtri.or.jp

岩盤の力学特性の異方性は従来、サンプリング方向を変えた複数の岩石供試体の三軸試験で調査されてきた。しかし、従来の手法では異方性の方向を予測できないため、必ずしも異方性が卓越する方向の試験ができないことに加えて、複数の試験を行う必要があり、時間やコストの面で非効率であった。そこで、この報告では、堆積岩などのモデル化に用いられる面内等方弾性体に関し、1回の試験で変形異方性を特定できる三軸試験手法を提案する。この手法は、供試体の側面で計測した複数の方向の直ひずみと載荷する直応力の関係から、等方圧密時の主ひずみ方向から異方性の方向が特定でき、等方圧密時と軸圧縮時の応力とひずみの関係から岩盤を面内等方弾性体と仮定した場合の5つの弾性パラメータを特定できる。

Key Words : rock mass, triaxial test, anisotropy, transverse isotropy, deformation characteristics

1. はじめに

原子力発電所の岩盤基礎を掘削する際や岩盤の中に山岳トンネルを建造する際には岩盤の力学特性を把握する必要がある。しかし、堆積構造に伴う層理や変成作用による片理などにより岩盤の力学特性は異方性を持つことがあり、岩盤構造物の設計の上で無視できないほど異方性が顕著な場合も多い¹⁾。例えば、Oka et al. は異方性を持つ堆積軟岩に対し、図-1 に示すような複数の方向に採取した岩石供試体の三軸試験を行って、採取方向によってはヤング率が約 2 倍異なること²⁾を示し、赤井らは結晶片岩の超音波速度計測から、計測方向によってヤング率が最大で約 3 倍異なること³⁾を示した。このように岩盤の変形異方性は著しく大きく、岩盤の力学特性を正確に把握するには異方性の調査が必要である。異方性は図-1 で示したように載荷方向を変えた複数回の試験で調べることが一般的であるが、この方法は試験時間やコストの面で非効率なことに加え、サンプリング方向は有限で、必ずしも異方性が卓越する方向の試験ができるとは限らなかった。そのため、少ない試験回数で異方性の方向を含めた構成パラメータを特定できる手法が必要とされている。

本研究では、堆積岩などのモデル化に用いられる簡易

な構成則の一つである面内等方弾性体に関して三軸応力下の理論解を計算し、計算結果に基づいて1回の試験で構成パラメータを特定する三軸試験手法と試験結果の解釈方法を提案する。この提案手法に拠れば、供試体の側面で計測した複数の方向の直ひずみと載荷する直応力の関係を用いて、等方圧密時の主ひずみ方向から異方性の方向が特定でき、等方圧密時と軸圧縮時の応力とひずみの関係から岩盤を面内等方弾性体と仮定した場合の5つの弾性パラメータを特定できる。

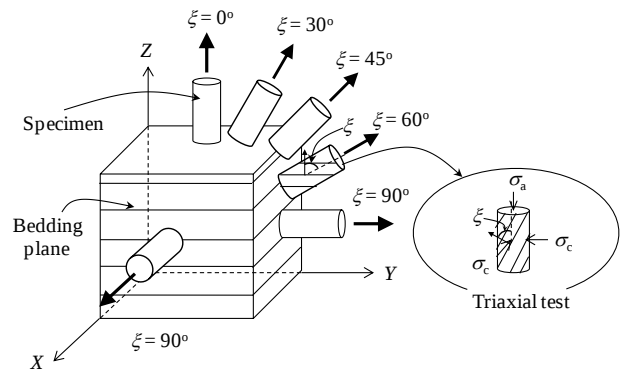


図-1 複数の三軸試験による異方性の調査²⁾

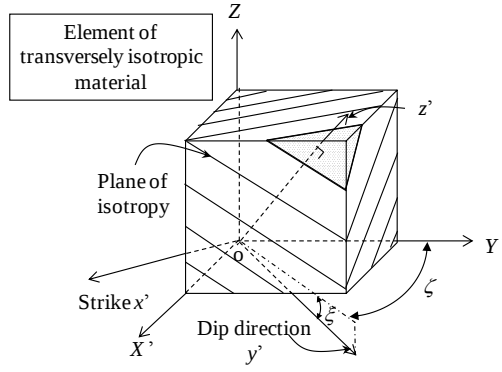


図-2 面内等方弾性体の要素

2. 面内等方弾性を示す岩盤の三軸応力下の理論解

層理を含む堆積岩やセットの節理を持つ火成岩や変成岩の変形特性は面内等方弾性体によってしばしばモデル化されている。例えばGoodmanはセットの節理を持つ岩盤の弾性挙動¹⁾、Amadeiは堆積岩や変成岩の応答⁴⁾のモデル化に面内等方弾性体モデルを用いた。そこで、本研究では、このような面内等方弾性体を対象として、1回の三軸試験で、その構成パラメータを特定する手法を提案する。特定手法の開発にあたって、まず、三軸応力下の面内等方弾性体の理論解を示す。

(1) 面内等方弾性体による岩盤のモデル化

面内等方弾性体とは、図-2 に示すように、ある面 ($x'y'$ 面) 内では等方な剛性を持ち、その面と直交する方向 (z' 方向) の剛性が異なる異方弾性体である⁵⁾。面内等方弾性体の性質は、等方的な剛性を持つ面の法線方向と5つの弾性パラメータで規定される。本報告では、直交座標系を図-2の (X', Y', Z) 軸のように設定し、等方的な剛性を持つ面内に x' 軸および y' 軸を取り、その法線方向に z' 軸をとる。等方的な剛性を持つ面は、単位法線ベクトルや法線ベクトルと (X', Y', Z) 座標系がなす3つの角でも規定できるが、ここでは提案手法の実地盤での応用を想定して、剛性の等方な $x'y'$ 面の傾斜 ξ および y' の方位と Y 軸の為す角度 ζ で表す⁶⁾。また、弾性パラメータは応力とひずみの対称性から z' 方向のヤング率 E_z 、ポアソン比 ν_z 、せん断剛性率 G_z と x', y' 方向のヤング率 E_x 、ポアソン比 ν_x の5つになる。なお、本報告では、 Z 軸を三軸試験の载荷軸、すなわちサンプリング軸として考える。

(2) 三軸応力下の面内等方弾性体

三軸応力下の面内等方弾性体の理論解を求めることを目的として、面内等方弾性体の要素シミュレーションを行った。図-2の (X', Y', Z) 座標系で解を求めると、 ξ と ζ の両方の三角関数を含む複雑な解になるため、 ζ を含

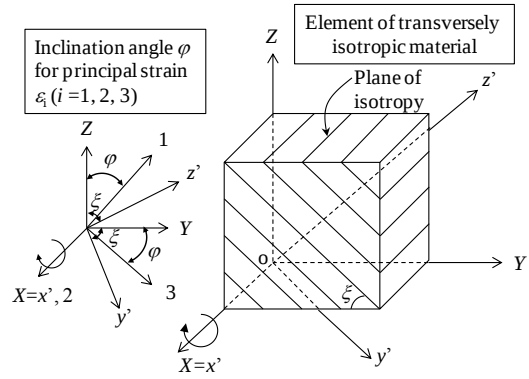


図-3 理論解を計算する際の (X, Y, Z) 軸設定と主ひずみ軸 (1, 2, 3)

まない簡易な解で表すため、図-3 のように $\zeta = 0^\circ$ とし X' 軸と x' 軸を一致させ、新たに (X, Y, Z) 座標を設定する。载荷軸 (Z 軸) に対称な円柱供試体を用いることを前提とすれば、試験結果から異方性の方向が $\zeta \neq 0^\circ$ と特定されても、計測値を Z 軸周りに $-\zeta$ だけ座標変換して解に合う座標設定を行えば良い。まず、異方性の卓越方向に軸をとった (x', y', z') 座標系でコンプライアンステンソル $\hat{C}_{ijkl}$ を考える。その後、载荷軸方向に軸を設定した (X, Y, Z) 座標系に変換する。面内等方弾性体の構成関係を式(1)に示す。

$$\varepsilon_{ij} = \hat{C}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (1)$$

ε_{ij} はひずみテンソル、 σ_{kl} は応力テンソルである。式(1)では i, j が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 x', y', z' に対して総和をとる。 σ_{kl} と ε_{ij} はともに圧縮を正とする。また、ここで考える面内等方弾性体では、これらの2階テンソルは対称テンソルとなり、独立な成分はそれぞれ6つである。

また4階テンソルの $\hat{C}_{ijkl}$ は式(2)で表される。

$$\begin{aligned} \hat{C}_{xxxx} &= \hat{C}_{yyyy} = \frac{1}{E_x}, \hat{C}_{zzzz} = \frac{1}{E_z} \\ \hat{C}_{xxyy} &= -\frac{\nu_x}{E_x}, \hat{C}_{xxzz} = \hat{C}_{yyzz} = -\frac{\nu_z}{E_z} \\ \hat{C}_{yzyz} &= \frac{1}{G_z}, \hat{C}_{xyxy} = 2(\hat{C}_{xxxx} - \hat{C}_{xxyy}) \end{aligned} \quad (2)$$

こうして得られた $\hat{C}_{ijkl}$ を式(3)により (X, Y, Z) 座標系に座標変換する⁷⁾。

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

m, n, p, q には X, Y, Z のいずれかを代入する。なお、 ε_{ij} と σ_{kl} が対称テンソルなので、 $\hat{C}_{ijkl}$ も式(4)の対称性をもつ⁸⁾。

$$C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{klij} \quad (4)$$

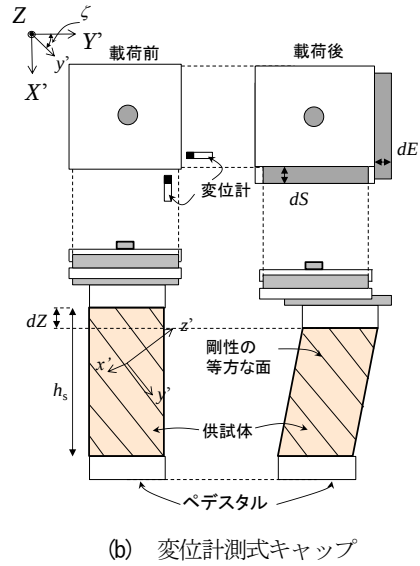
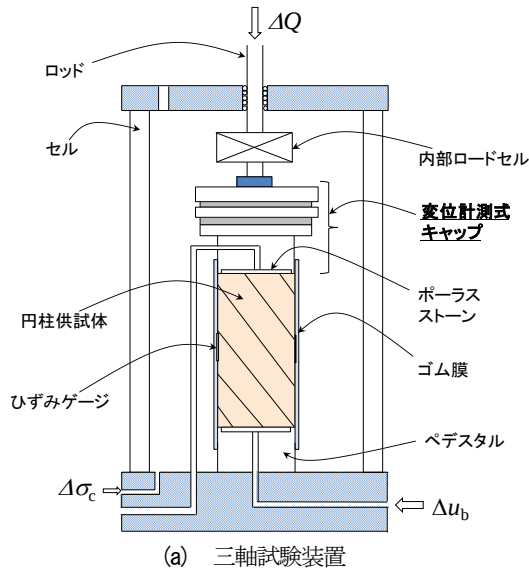
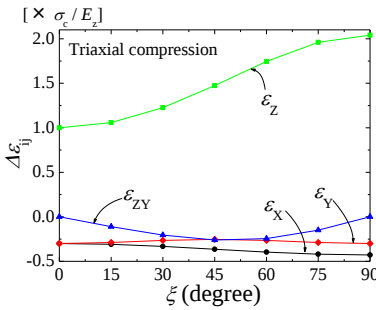
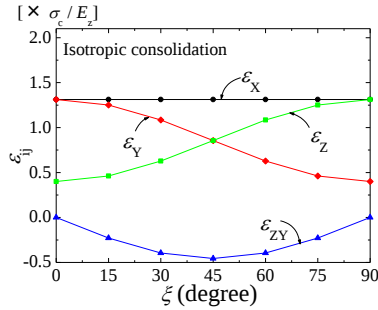


図-4 変形異方性を特定する三軸試験



(a) 等方圧密時

(b) 軸圧縮時

図-5 三軸応力下の面内等方弾性体の理論解

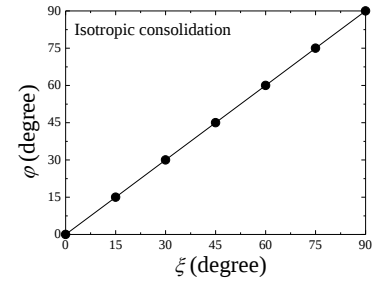


図-6 等方圧密時の

主ひずみ軸の傾斜φとξの関係

I_j は X 軸周りの回転を表す 2 階のテンソルで、成分を行列 $\mathbf{I}$ で表すと式(5)になる⁷⁾。

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_{XX} & I_{XY} & I_{XZ} \\ I_{YX} & I_{YY} & I_{YZ} \\ I_{ZX} & I_{ZY} & I_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{pmatrix} \quad (5)$$

なお、载荷軸 (Z 軸) 方向と z' 軸が一致するとき ($\xi = 0^\circ$)，行列 $\mathbf{I}$ は単位行列となり， C_{ijkl} の成分は (x', y', z') 座標系と同じになる。

以上より、剛性が等方な面の傾斜が ξ のときの面内等方弾性体の構成関係は式(6)になる。

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (6)$$

ε_{ij} と σ_{kl} は変換した (X, Y, Z) 座標系のひずみと応力テンソルであり， i, j, k, l のインデックスには X, Y, Z を用いる。

(3) 三軸試験の境界条件と与える解析条件

本研究で提案する図-4(a)の三軸試験は、図-4(b)の変位計測式キャップのように载荷軸と垂直な方向の相対変位を許すスライダ式のキャップを用いて行い、供試体の上下端面に摩擦が発生しない試験条件⁹⁾を想定する。同図では実地盤での堆積方向を把握することを想定し、

(X', Y', Z) 座標系で考えるが、この試験の境界条件は 2 章(2)の議論と同様に、 Z 軸周りに ξ 座標変換した (X, Y, Z) 座標系で付与する。なお、著者らは別報¹⁰⁾で、この条件下では供試体内で応力とひずみが一様に分布することを確認している。このとき、直交座標系のせん断応力 $(\sigma_{XY}, \sigma_{ZY}, \sigma_{ZX})$ の変化が式(7)のようにゼロになる。

$$\sigma_{XY} = \sigma_{ZY} = \sigma_{ZX} = 0 \text{ MPa} \quad (7)$$

このような条件下で異方性を特定するため、式(8)の等方圧密と式(9)の側圧一定条件下の軸圧縮の 2 種類の応力経路を考える。

$$\sigma_X = \sigma_Y = \sigma_Z = \sigma_c \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_Z &= \Delta \sigma_a \\ \Delta \sigma_X &= \Delta \sigma_Y = 0 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (9)$$

σ_c は等方圧密応力で、 $\Delta \sigma_a$ は軸応力増分である。線形弾性体を仮定する場合には供試体内の応力状態は初期応力の設定に依らないため、ここでは式(8)と(9)のように等方圧密と軸圧縮の応力変化のみを考える。

次に、面内等方弾性体に関し、上の条件の三軸試験を実施したとき、どのような応力ひずみ関係の理論解が得られるかを図-5に示す。これは、面内等方性の弾性パ

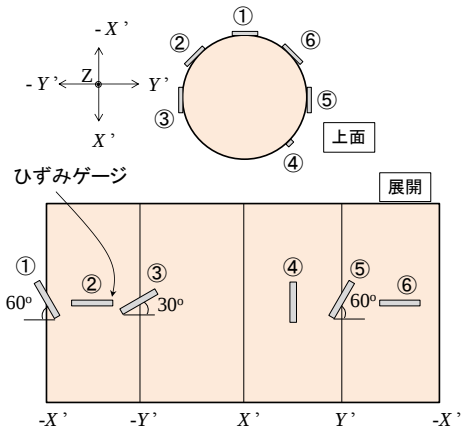


図-7 ひずみゲージの貼り方

ラメータが $(E_z, \nu_z, G_z, E_x, \nu_x) = (1000\text{MPa}, 0.3, 289\text{MPa}, 490\text{MPa}, 0.21)$ の例で、 ξ との関係を示す。等方圧密時と軸圧縮時の両方で ξ の変化に伴い応力とひずみの関係が変化し、せん断ひずみ ε_{ZY} が発生して供試体は非軸対称に一樣なせん断変形をする¹⁰⁾。なお、 $\xi=0^\circ$ と 90° の場合は軸対称に変形するため、せん断ひずみ ε_{ZY} は発生しない。また、図-6 に等方圧密時の主ひずみ軸の傾斜 ϕ と ξ の関係を示す。この条件では、等方圧密時に主ひずみ軸と異方性の方向が一致するため、ひずみテンソル 6 成分の計測を行えば異方性の方向 (ξ, ζ) が得られる。次章では、ここで計算した理論解より、三軸試験の計測項目を用いて、異方性を特定する手法を提案する。

3. 異方性岩盤の変形特性を特定する三軸試験手法の提案

2章で計算した三軸応力下の面内等方弾性体の理論解より、三軸試験の計測項目のみを用いて、等方圧密時の主ひずみ方向から異方性の軸方向を特定し、等方圧密時と軸圧縮時の応力とひずみ関係から5つの弾性パラメータを特定する手法を試験手順とともに説明する。

(1) 異方性岩盤の変形特性に合わせた三軸試験

例えば地盤工学会基準⁹⁾では、供試体にせん断帯が形成した後の応力とひずみの関係を正確に計測するため、図-4(b)のキャップを用いるが、面内等方弾性体を仮定する場合は、弾性変形が卓越するひずみレベルでも同様の端面の処理が必要なことを図-5で示した。なお、本稿では2章で説明したようにサンプリング軸を载荷軸 Z として考えるが、提案手法では任意の方向に载荷 Z 軸を設定して異方性を特定できる。

図-4(b)の変位計測式キャップは、载荷軸と直交する X' と Y' 方向にリニアガイドなどの摩擦を除去し可動する機構を備え、要素の条件 (応力とひずみが一樣) を満

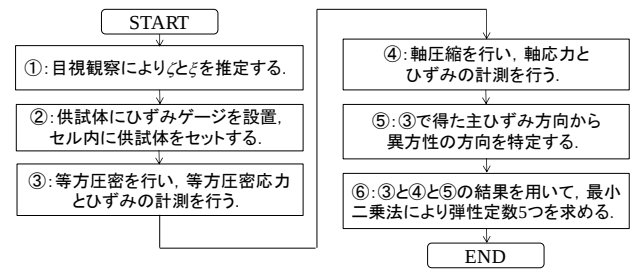


図-8 三軸試験で面内等方性を仮定した岩盤の変形異方性を特定する手法

たしながら供試体が非軸対称に変形できる。このような非軸対称の変形を計測するため、例えば図-7のように供試体にひずみゲージを設置すれば、ひずみテンソル 6 成分を取得できる。①番目のひずみゲージで計測したひずみを x_i とすると、 (X', Y', Z) 座標系のひずみ ε_{ij} ($i, j = X', Y', Z$) と x_i の関係は式(10)で表される。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon'_{xx} \\ \varepsilon'_{yy} \\ \varepsilon'_{zz} \\ 2\varepsilon'_{xy} \\ 2\varepsilon'_{yz} \\ 2\varepsilon'_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 2.31 & 0.58 & -0.58 & -2.31 & 0.58 & -0.58 \\ 0 & 0 & 0.58 & 1.15 & -1.73 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ひずみテンソル 6 成分を取得する方法は図-7以外にも、例えば Nunes¹¹⁾ や新¹²⁾ が用いた複数のロゼッタゲージを用いる方法を採用しても良いが、ひずみゲージを3枚あるいは4枚で1セットのロゼッタゲージを3セット以上用いる必要があることに注意する。

(2) 面内等方弾性体の構成パラメータの特定方法

2章で計算した解をもとに、変位計測式キャップを用いた三軸試験で、面内等方性を仮定した岩盤の変形異方性を特定する手法を図-8に提案する¹³⁾。まず、供試体の目視観察から、剛性が等方な面 (すなわち不連続面) の傾斜と走向を推定する (①)。このとき、東西南北 (E, W, S, N) の方位とサンプリング方向の関係を確認し、ひずみゲージなどの計測機器を設置する (②)。なお、本手法では、図-2の (X', Y', Z) 座標系で、S方向を X' 軸方向、E方向を Y' 軸方向と一致させて考え、ひずみゲージの設置は前述した図-7の方法などに従う。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。

この手法は、異方線形弾性論に基づくため、载荷はひずみレベルを約 10^{-4} 以下の弾性域で行う。もちろん Kohata et al.¹⁴⁾ が明石砂岩で行ったように段階的に応力レベルを増減させ、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、図-2の (ξ, ζ) を特定し、座標軸を設定する (⑤)。ひずみテンソルの 6 成分の計測から、 (X', Y', Z) 座標系での等方圧密時のひずみテンソル ε' は式(11)で表す。

$$\mathbf{\varepsilon}' = \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY} & \varepsilon_{XZ} \\ & \varepsilon_Y & \varepsilon_{YZ} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{\varepsilon}'$ を式(12)で対角化し、主ひずみを求める。

$$\mathbf{e}^T \mathbf{\varepsilon}' \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

式(12)から、式(13)に示す主ひずみの単位方向行列 $\mathbf{e}$ を求める。

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

等方圧密時では、異方性の方向(x', y', z')と主ひずみの軸方向(1, 2, 3)が一致するため、(ξ, ζ)を独立変数とした三角関数から $\mathbf{e}$ は構成され、例えば式(14)によって(ξ, ζ)は特定できる。

$$\begin{aligned} \xi &= \cos^{-1}(e_{33}) \\ \zeta &= \cos^{-1}(e_{11}) \end{aligned} \quad (14)$$

単位方向行列 $\mathbf{e}$ の成分は9つあり、式(14)以外にも、例えば e_{12} で ζ を、 e_{23} で ξ を求めてもよい。ここで、Y'軸から時計周りに ζ の位置に Y 軸を設置し、(X, Y, Z)座標系を設定する。式(6)で設定した座標系の C_{ijk} が得られる。なお、①で得た走向、傾斜と(ξ, ζ)の整合をここで確認する。また、試験結果と理論解の座標系を合わせるため、式(11)のひずみテンソルを、式(15)で(X', Y', Z)座標系から(X, Y, Z)座標系に変換する。

$$\begin{pmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta & 0 \\ -\sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{\varepsilon}' = \begin{pmatrix} \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY} & \varepsilon_{ZX} \\ & \varepsilon_Y & \varepsilon_{ZY} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (15)$$

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)。2章で計算した、等方圧密時の応力ひずみ関係の理論解を式(16)に示す。

$$\frac{1}{\Delta \sigma_a} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_X \\ \Delta \varepsilon_Y \\ \Delta \varepsilon_Z \\ \Delta \varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{3+\cos 4\xi}{4} & \frac{1-\cos 4\xi}{8} & \frac{\cos 4\xi-1}{2} \\ \frac{3-4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{4} & \frac{3+4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & \frac{1-\cos 4\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi-1}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} \frac{1+\cos 2\xi}{2} & -\sin 2\xi \cos 2\xi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{C}_{xxxx'} \\ \hat{C}_{xx'yy'} \\ \hat{C}_{xx'zz'} \\ \hat{C}_{zz'zz'} \\ \hat{C}_{zy'zy'} \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \hat{C}_{xxxx'} \\ \hat{C}_{xx'yy'} \\ \hat{C}_{xx'zz'} \\ \hat{C}_{zz'zz'} \\ \hat{C}_{zy'zy'} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{3+\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} & 0 \\ -\frac{\sin 2\xi}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{3+\cos 4\xi}{4} & \frac{1-\cos 4\xi}{8} & \frac{\cos 4\xi-1}{2} \\ \frac{3-4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & 0 & \frac{1-\cos 2\xi}{4} & \frac{3+4\cos 2\xi+\cos 4\xi}{8} & \frac{1-\cos 4\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi \cos 2\xi-1}{2} & 0 & -\frac{\sin 2\xi}{2} \cos 2\xi & \frac{\sin 2\xi}{2} \frac{1+\cos 2\xi}{2} & -\sin 2\xi \cos 2\xi \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\frac{1}{\sigma_c} \begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \\ \varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} \\ \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{3+\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} \\ \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{3+\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} \\ -\frac{\sin 2\xi}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{C}_{xxxx'} \\ \hat{C}_{xx'yy'} \\ \hat{C}_{xx'zz'} \\ \hat{C}_{zz'zz'} \\ \hat{C}_{zy'zy'} \end{pmatrix} \quad (16)$$

ひずみテンソルの成分は式(15)から得たものを用い、 α は載荷軸方向のロードセルやセル圧計で計測した値を用いて式(16)の左辺に代入する。また同様に、軸圧縮時の応力ひずみ関係の理論解を式(17)で下記に別途示す。計測した軸圧縮時のひずみを式(15)で(X, Y, Z)座標系に変換し、ロードセルで計測した軸荷重から軸応力の増分 $\Delta \sigma_a$ を計算し式(17)の左辺に代入する。

最後に計測した応力とひずみのデータから、式(18)の最小二乗法で弾性定数を特定する。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{k} \quad (18)$$

$\mathbf{k}$ は式(16), (17)の計測した応力ひずみ関係から計算される8行1列のベクトルで、各成分を式(19)で表す。

$$\begin{aligned} k_1 &= \varepsilon_X / \sigma_c, k_2 = \varepsilon_Y / \sigma_c, k_3 = \varepsilon_Z / \sigma_c, k_4 = \varepsilon_{ZY} / \sigma_c \\ k_5 &= \Delta \varepsilon_X / \Delta \sigma_a, k_6 = \Delta \varepsilon_Y / \Delta \sigma_a, k_7 = \Delta \varepsilon_Z / \Delta \sigma_a, k_8 = \Delta \varepsilon_{ZY} / \Delta \sigma_a \end{aligned} \quad (19)$$

また $\mathbf{A}$ は ξ の関数の係数行列で、 $\mathbf{C}$ は $\hat{C}_{ijk}$ の成分で表されるベクトルであり、下記の式(20)に別途示す。

式(18)で求めた $\mathbf{C}$ より、式(21)から、 $\hat{C}_{ijk}$ 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が求められる。

$$\begin{aligned} E_z &= \frac{1}{\hat{C}_{zz'zz'}}, \quad \nu_z = -\frac{\hat{C}_{xx'zz'}}{\hat{C}_{zz'zz'}}, \quad G_z = \frac{1}{\hat{C}_{zy'zy'}}, \\ E_{x'} &= \frac{1}{\hat{C}_{xx'xx'}}, \quad \nu_{x'} = -\frac{\hat{C}_{xx'yy'}}{\hat{C}_{xx'xx'}} \end{aligned} \quad (21)$$

なお、図-8のフローの⑤で、 $\xi=0^\circ$ または 90° と特定されたときは、供試体が载荷軸に対し軸対称に変形し、式(20)の $\mathbf{A}$ の5列目が全て0になるため、三軸応力下の計

測値だけでは $\hat{C}_{zyzy}$ を求めることができないが、Saint Venant¹⁵⁾によれば $\hat{C}_{zyzy}$ を経験式(22)で求められる。

$$\hat{C}_{zyzy} = \frac{1}{E_x} + \frac{1+2\nu_x}{E_z} \quad (22)$$

この式(22)はAmadeiやNunesなどに面内等方性を示す岩石の弾性パラメータを計算する時にしばしば利用されている⁴⁾¹¹⁾。 $\xi=0^\circ$ または 90° と特定された場合には、 $\mathbf{A}$ の5列目

と $\mathbf{C}$ の5行目を削除した上で、式(21)の $\hat{C}_{xxxx}$ 、 $\hat{C}_{xxyy}$ 、

$\hat{C}_{xxzz}$ 、 $\hat{C}_{zzzz}$ から G_{zy} 以外の弾性パラメータを取得した上で式(22)を用いて最後に G_{zy} を求める。

4. まとめ

従来、岩盤の力学特性の異方性はサンプリング方向を変えた供試体を用い、複数回の三軸試験から求められてきたが、コストや時間が非効率であることに加え、サンプリング方向は有限であるため必ずしも異方性の卓越方向が特定できない問題があった。そこで本研究では、このような問題を解決するために、堆積岩などのモデル化に用いられる面内等方弾性体に関して1回の三軸試験で構成パラメータを取得する手法を開発した。この手法は、供試体の側面で計測した複数の方向の直ひずみと载荷する直応力の関係を用いることで、等方圧密時の主ひずみ方向から異方性の方向が特定でき、等方圧密時と軸

圧縮時の応力とひずみの関係から岩盤を面内等方弾性体と仮定した場合の5つの弾性パラメータを特定できる。

参考文献

- 1) グッドマン R. E.: わかりやすい岩盤工学, 鹿島出版会, 1984.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.33, No.3, pp.293-325, 1996.
- 5) 山口柏樹: 弾・塑性力学, 森北出版, pp.45-47, 1975.
- 6) 日本材料学会: ロックメカニクス, 技報堂出版, 2002.
- 7) 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.
- 8) 富田佳宏: 弾塑性力学の基礎と応用, 森北出版, pp.25-26, 1995.
- 9) 地盤工学会: 地盤材料試験の方法と解説, 第3章, 土の三軸試験, pp.592-593, 2009.
- 10) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫: 面内等方弾性を仮定した岩盤が三軸応力下で示す非三軸性, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, 2014.
- 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. of Rock Mech. and Min. Sci.*, Vol.39, No.2, pp.257-273, 2002.
- 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) 菊本統, 谷和夫, 富樫陽太: 三軸試験方法および装置, 特願2013-244449号, 2013.
- 14) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G. L., Hoque, E. and Kodaka, T.: Modeling of non-linear deformation properties of stiff geomaterials, *Geotechnique*, Vol.47, No.3, pp.563-580, 1997.
- 15) 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.

PROPOSAL OF A NEW TRIAXIAL TESTING METHOD FOR DEFORMATION PROPERTIES OF ANISOTROPIC ROCK MASSES

Yota TOGASHI, Mamoru KIKUMOTO and Kazuo TANI

Mechanical properties of anisotropic rock masses are typically determined by triaxial testing using several rock specimens sampled for different orientations. But this method has two problems. The one is huge costs for testing many times and the other is that the directions of anisotropy are not determined by this method. In order to solve these problems, a new triaxial testing method for transversely isotropic rock masses is proposed. This method can determine the directions of anisotropy by the directions of principal strains during isotropic consolidation and also can determine 5 elastic parameters of a transversely isotropic rock by the relationships between stresses and strains under the triaxial stress condition.