原位置岩盤ねじりせん断試験による 異方性岩盤の変形特性の特定方法

富樫陽太¹・谷和夫²・菊本統³

¹正会員 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)

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

²正会員 東京海洋大学教授 大学改革準備室 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)

E-mail: ktani00@kaiyodai.ac.jp

³正会員 横浜国立大学准教授 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)

E-mail: kikumoto@ynu.ac.jp

岩盤は堆積構造や不連続面の影響で異方性を示すことがある。従来、異方性はサンプリング方向を変えた複数の供試体の試験で調査されてきたが、労力や時間、コストの面で効率的でない上、必ずしも異方性を特定できないという問題があった。そこで著者らは、一つの試験体で岩盤の異方性を把握できる新しい原位置試験法を開発した。同試験は異方性岩盤に作製した中空円筒の試験体を所定の拘束圧下でねじりせん断する試験であり、試験体の上端面における応力分布を計測することで、異方性を一つの試験体で調査できる。提案方法によると、最も簡易な異方性構成則の一つである面内等方弾性体に関し、等方圧密時の主ひずみ方向から異方性の卓越方向を特定でき、等方圧密時の応力ひずみ関係とねじりせん断時の応力分布を用いて5つの弾性パラメータを特定できる。

Key Words : rock mass, torsional shear, anisotropy, deformation properties, transversely isotropy

1. はじめに

岩盤の上に橋脚を建造したり、岩盤を掘削して山岳トンネルを施工する際には、予め岩盤の力学特性を正確に把握することが重要である。岩盤は層理や節理群、あるいは片理などの不連続面を含み、その力学特性は異方性を示すため、岩盤構造物の合理的な設計・施工のためには、強度や剛性をスカラー量として評価するだけでなく、異方性も含めて把握する必要がある。これまでにも、赤井ら¹は超音波速度計測から結晶片岩のヤング率が最大で約3倍異なることを、Oka et al.²は図-1に示すサンプリング方向を変えた戸室石の三軸試験の結果からヤング率が最大で約2倍異なることを指摘している。このような岩盤の異方性は、これまで供試体の採取方向を変えた複数の試験により調査する必要がある、労力や時間、コストの面で非効率であった。また、異方性の方向を目視観察で仮定しているため、必ずしも異方性の方向や程度が正しく特定されとは限らなかった。異方性の方向と程度を少ない試験回数で特定できれば、岩盤構造物の設計・施工の合理化を図ることができる。

著者らはこれまで、三軸試験時の異方性岩盤の力学的

図-1 方向を変えたサンプリングコアの三軸試験²⁾

図-2 原位置岩盤ねじりせん断試験²⁾

 図-3 原位置岩盤ねじりせん断試験の手順⁶⁾

図-4 ねじりせん断時の中空円筒試験体の応答 (平面ひずみ条件)

性質について理論的に検討するとともに³⁾、三軸試験で異方性を特定する方法⁴⁾を提案してきた。著者らが提案した三軸試験は一回の試験で異方性を特定できるものの、岩盤の異方性の程度が小さく等方性材料に近いほど測定誤差の影響が大きくなることや、主応力方向と異方性の卓越方向が一致する場合にはせん断剛性率の予測精度が低下することが課題であった。しかし、これらは主応力

载荷型の試験に起因する課題であり、せん断剛性率を直接求められる単純せん断モードの応力経路を付加できる試験により解決できる可能性が高い。このような考えに基づいて、著者らは図-2に示す原位置岩盤ねじりせん断試験を提案した⁵⁾。この試験は図-3に示すように、露頭や試掘抗の岩盤を掘削して中空円筒の試験体を作製し、所定の拘束圧の下でねじりせん断する試験である。中空

円筒試験体の掘削は、岡田らが実用化した原位置岩盤三軸試験⁶⁾に倣うが、提案試験法は、試験体の上端に設置した複数の2方向ロードセル（分割ロードセル）による応力分布の計測から、一回の試験で岩盤の力学的異方性を把握することに特徴がある。例えば、代表的な異方性の構成則である面内等方弾性体を想定した中空円筒試験体は、図-4(a)のように、円周 θ 方向の各要素で載荷方向と剛性の等方な面（すなわち不連続面）の方向が異なり、必ずしも軸対称条件を満たさない。そのため、軸変位を固定し、ひずみ制御（図-4(b)）でねじりせん断した場合の試験体内応力を図-4(c)のようにモール円で表すと、円周方向の各点の要素で異なる応力経路を取り、試験体内の応力状態は非一様になることがわかる。このように、異方性岩盤の場合は、従来の中空ねじりせん断試験で想定する要素の様な応答を示さずに、試験体が図-4(c)のモール円に合わせて描いた円周方向の応力分布のように非要素として応答する。この非一様な応力分布を円周方向の分割ロードセルで計測すれば、複数の要素試験を行うのと同様の構成パラメータの情報を取得できる。

本論文では、原位置岩盤ねじりせん断試験で計測する応力分布やひずみを用いて、堆積岩などのモデル化を想定した面内等方弾性体の構成パラメータを1回の試験で特定する方法を示す。そのために、まず、面内等方弾性体の構成則からねじりせん断時の中空円筒試験体の挙動をシミュレートし、試験体の応答を考察する。次に、ここで得た計算値をもとに、面内等方弾性体の構成パラメータを一回の試験で特定する手法を示す。最後に、所定の測定誤差を設定した条件下での提案手法による異方性パラメータの特定精度と感度の分析を行う。

2. 面内等方弾性体の中空円筒のねじりせん断時の変形特性

ここでは、面内等方弾性体の構成則を用いて図-4で指摘した中空ねじり試験時の中空円筒試験体の応答を計算する。載荷経路は等方圧密とねじりせん断の2つを想定する。等方圧密時は、試験体の内外側面と端面に主応力を一様に与えるため試験体は異方性材料であっても「要素」の応答を示す。それに対し、軸変位を固定してねじりせん断を行う際には、与える主ひずみ方向が試験体端面と45°の角度を為し、円周方向の各点で異方性と主ひずみの方向の関係が異なるため、図-4のように、円周方向の各点の要素が異なる応答を示し、試験体全体としては必ずしも一様でない「非要素」の応答をする。等方性材料を想定した中空ねじり試験は応力と変形の軸対称性を想定した試験であるが、軸対称性を満足しない異方性材料では、応力あるいはひずみの軸対称性も満足されず、

図-5 面内等方弾性体

このような挙動を呈する。本章では、中空ねじり試験における要素と非要素の応答を把握するため、面内等方弾性体の構成則（応力とひずみの関係）のシミュレーションを行う。等方圧密時には中空円筒試験体は要素の応答を、ねじりせん断時には図-4の円周方向 θ の各点では要素として応答するが、試験体全体では θ 方向に非一様に応答すると想定し計算する。

(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-5に示すように、ある面（ $x'y'$ 面）では剛性が等方で、その面と垂直な方向（ z' 方向）の剛性が異なる異方弾性体である⁷⁾。層理を含む堆積岩や、節理群を持つ火成岩や、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る。例えばGoodmanは節理群を持つ岩盤の弾性挙動⁸⁾、Amadeiは堆積岩や変成岩の応答⁹⁾のモデル化に面内等方弾性体モデルを用いている。

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できる。まず、図-5で（ X', Y', Z ）軸の取り方を説明する。また、等方的な剛性を持つ面内に x' 軸および y' 軸をとり、その法線方向に z' 軸をとる。等方的な剛性を持つ $x'y'$ 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適用を想定して、 $x'y'$ 面の傾斜 ξ および傾斜方位（ y' 軸）と Y' 軸の為す角度 ζ で表す。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、本論文では、実地盤の東西南北の方位（E, W, S, N）と中空円筒試験体の掘削軸（すなわち中空ねじり試験のトルク軸Z）に対し、東E方向を X' 軸方向、北N方向を Y' 軸方向として説明する。

(2) 面内等方弾性体の構成則のシミュレーション

ねじりせん断試験の中空円筒の面内等方弾性体の応答を求める目的で、構成則のシミュレーションを行った。

図-5の (X', Y', Z) 座標系で Z 軸を載荷軸（すなわちトルク軸）とした座標で計算すると、 ξ と ζ の両方の三角関数を含む複雑な応答になる。そのため、本検討では図-6のように $\zeta = 0^\circ$ とし X' 軸と x 軸を一致させた (X, Y, Z) 座標系を設定し、異方性の方向について傾斜 ξ のみを含むねじりせん断試験の応力ひずみ関係を示す。載荷軸（ Z 軸）に対称な中空円筒試験体を用いることを前提とすれば、現実の異方性の方向が $\zeta \neq 0^\circ$ の場合でも、応力分布やひずみなどの計測項目を Z 軸周りに $-\zeta$ だけ座標変換し、求める応力ひずみ関係に合う図-6の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、その後、載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。2階テンソルの σ_{kl} と ε_{ij} はともに圧縮を正とする。ここで、単位体積当たりのひずみエネルギー U は σ_{kl} を用いて式(2)のように与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \hat{C}_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2)$$

U から $\hat{C}_{ijkl}$ を導くと、式(3)の ij と kl の可換性が得られる¹⁰⁾。

$$\hat{C}_{ijkl} = \frac{\partial}{\partial \sigma_{kl}} \frac{\partial U}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial^2 U}{\partial \sigma_{kl} \partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial U}{\partial \sigma_{kl}} = \hat{C}_{klij} \quad (3)$$

σ_{kl} と ε_{ij} は対称テンソルであり、独立な成分はそれぞれ6つである。よって、式(3)と併せて $\hat{C}_{ijkl}$ の添字は式(4)の可換性をもつことがわかる。

$$\hat{C}_{ijkl} = \hat{C}_{jikl} = \hat{C}_{ijlk} = \hat{C}_{klij} \quad (4)$$

式(4)を考慮すると、4階テンソル $\hat{C}_{ijkl}$ の独立な成分は21個となり、非零の成分を式(5)で表す⁷⁾。

$$\begin{aligned} \hat{C}_{x'x'x'x'} &= \hat{C}_{y'y'y'y'} = \frac{1}{E_{x'}}, \hat{C}_{z'z'z'z'} = \frac{1}{E_{z'}} \\ \hat{C}_{x'x'y'y'} &= -\frac{\nu_{x'}}{E_{x'}}, \hat{C}_{x'x'z'z'} = \hat{C}_{y'y'z'z'} = -\frac{\nu_{z'}}{E_{z'}} \\ \hat{C}_{y'z'z'y'} &= \frac{1}{G_{z'}}, \hat{C}_{x'y'y'x'} = 2(\hat{C}_{x'x'x'x'} - \hat{C}_{x'x'y'y'}) \end{aligned} \quad (5)$$

得られた $\hat{C}_{ijkl}$ の成分を、式(6)により (X, Y, Z) 座標系に座標変換する¹¹⁾。

$$C_{mnpq} = \hat{C}_{ijkl} l_{im} l_{jn} l_{kp} l_{lq} \quad (6)$$

m, n, p, q はフリーインデックスで X, Y, Z のいずれかを代入

図-6 本研究での座標設定

する。 C_{mnpq} は $\hat{C}_{ijkl}$ と同様に、式(4)で示した添字の可換性を持つ。 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 $\mathbf{l}$ で表すと式(7)になる¹¹⁾。

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_{xx} & l_{xy} & l_{xz} \\ l_{yx} & l_{yy} & l_{yz} \\ l_{zx} & l_{zy} & l_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \xi & -\sin \xi \\ 0 & \sin \xi & \cos \xi \end{pmatrix} \quad (7)$$

なお、載荷軸（ Z 軸）方向と z' 軸が一致するとき（ $\xi = 0^\circ$ ），行列 $\mathbf{l}$ 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、面内等方弾性体の構成関係は式(8)になる。

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

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の成分であり、 i, j, k, l のインデックスには X, Y, Z を用いる。

(3) 中空ねじり試験と解析条件

本研究で提案する図-2の原位置岩盤ねじりせん断試験では、(2)の議論と同様に計測項目を Z 軸周りに $-\zeta$ だけ座標変換し、図-6の (X, Y, Z) 座標に座標変換した上で等方圧密とねじりせん断の2つの載荷条件を付与する。等方圧密時には試験体の上下端面と内外側面に等方な主応力を与えるため、試験体は要素として挙動する。このとき、式(9)の条件を付与する。

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_c \\ \sigma_{xy} &= \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

σ_c は等方圧密応力である。なお、式(9)の条件を満たすためには、試験体の上端には端面摩擦を除去する機構を備えておくことが望ましい。

一方、ねじりせん断時には円周方向にせん断ひずみを与える応力経路を考える。図-4(b)のように主ひずみ方向は端面から 45° 傾斜しており、試験体全体では非要素の応答を示す。このとき、等方圧密過程で式(7)で与えた応力経路に加え、通常の中空ねじり試験と同様に載荷軸

方向の変形を拘束しながらねじりせん断する。この条件を式(10)のように付与する。

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon_{ZX} &= -\Delta\epsilon_{Z\Theta} \sin \Theta \\ \Delta\epsilon_{ZY} &= \Delta\epsilon_{Z\Theta} \cos \Theta \\ \Delta\sigma_{XX} &= \Delta\sigma_{YY} = 0 \\ \Delta\epsilon_{ZZ} &= \Delta\epsilon_{XY} = 0\end{aligned}\quad (10)$$

$\Delta\epsilon_{Z\Theta}$ は円周方向のせん断ひずみ増分である。面内等方弾性体の応力ひずみ関係は線形であるため、供試体内の応力状態は初期応力の設定に依らず、式(7)と(8)のように等方圧密とねじりせん断の応力変化のみを考える。

(4) ねじりせん断試験時の中空円筒試験体の応力とひずみの特性

面内等方弾性体に関し、(2)の条件で原位置岩盤ねじりせん断試験を実施したときに得られる応力とひずみの特性を検討する。図-7に等方圧密時の応力とひずみの理論解を示す。これは、ヤング率の異方性が最大約2倍の、面内等方性の弾性パラメータを $(E_z, \nu_z, G_z, E_x, \nu_x) = (1000\text{MPa}, 0.3, 289\text{MPa}, 490\text{MPa}, 0.21)$ と設定した例で、 ξ と等方圧密時の $\epsilon_i \cdot \sigma/E_z$ の関係を示す。(2)で言及した通り、等方圧密時には、内圧、外圧および軸圧縮応力が等しい応力状態となるため試験体の変形は円周方向に依存せずに要素の挙動をするとして計算を行った。同図からは応答のひずみが ξ に依存してせん断ひずみ ϵ_{ZY} が発生することがわかる。ただし、 $\xi=0^\circ$ の場合は z 軸対称に変形するため、せん断ひずみ ϵ_{ZY} は発生せず、また $\xi=90^\circ$ の場合は対称軸が y 軸となるが同様に軸対称に変形する。同様の弾性パラメータに対し、図-8(a)は等方圧密時の主ひずみ $\epsilon_i \cdot \sigma/E_z$ ($i=1, 2, 3$) と ξ の関係を示す。なお、構成式(8)が客観性の原理を満たすことから、ねじりせん断時のように特定の方向からの载荷経路と異なり、等方圧密時には試験体に等方な応力を作用させるため、 ϵ は ξ に依らず一定値となる。図-8(b)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、等方圧密時には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, Θ) が得られることがわかった。

次に、ねじりせん断時には、式(10)の条件を構成式(8)に代入した上で、 (X, Y, Z) 座標の応力を次式(11)で円筒座標系 (R, Θ, Z) に変換して応力ひずみ関係を得る。

$$\sigma_{ij} = \sigma_{mn} m_{im} m_{jn} \quad (11)$$

i, j はフリーインデックスで R, Θ, Z を、 m, n はダミーインデックスで X, Y, Z を代入する。 m_Θ は Z 軸周りの回転を表す2階テンソルで、成分を行列 $\mathbf{m}$ で表すと式(12)になる。

図-7 等方圧密時のひずみテンソル

(a) 等方圧密時の主ひずみの応
(b) 主ひずみ軸の傾斜 ϕ と ξ の関係

図-8 等方圧密時の主ひずみの応答

図-9 ねじりせん断時の応力分布

$$\mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_{XR} & m_{X\Theta} & m_{XZ} \\ m_{YR} & m_{Y\Theta} & m_{YZ} \\ m_{ZR} & m_{Z\Theta} & m_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 0 \\ \sin \Theta & \cos \Theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

等方圧密時と同様の構成パラメータで、ねじりせん断時の応力とひずみの関係を、図-9に ξ 毎に表す。このように、ねじりせん断時には試験体が必ずしも軸対称条件を満たさないため、円周方向 Θ に直応力とせん断応力が分布する。なお、 $\xi=0^\circ$ の場合は試験体が軸対称条件を満たすため応力は一様になる。また、 $\xi=90^\circ$ の場合は直応力に対し試験体が軸対称となるため $\Delta\sigma$ は発生しないが、円周方向のせん断応力に対しては軸対称な载荷条件にならないため $\Delta\sigma_{\Theta}$ が発生する。次章では、ここで計算した応力とひずみの関係を用いて、原位置岩盤ねじりせん断試験の計測結果から異方性を特定する手法を提案する。

3. 一回の試行で異方性岩盤の変形特性を特定する方法の提案

面内等方弾性体に関し、2章で求めた中空ねじり試験の理論解をもとに、等方圧密とねじりせん断の载荷経路を想定した原位置岩盤ねじりせん断試験から、構成パラメータを取得する方法を説明する。

(1) 等方圧密時のひずみテンソルを計測する手法

2章の(4)で示したように、等方圧密時の主ひずみ方向が取得できれば、異方性の方向を特定できる。すなわち、ひずみテンソルの独立な6成分を計測すれば主ひずみとその方向を取得できるので、例えば試験体側面の図-10に示す位置と方向に6枚のひずみゲージを設置し、ひずみテンソルを計測する¹²⁾。p番目のひずみゲージで計測した直ひずみを x^p とし、ゲージを貼る方向の単位ベクトルを m^p とすると、 (X', Y', Z) 座標系のひずみ ε'_{ij} ($i, j = X', Y', Z$)と x^p は、 $x^p = m^p \varepsilon'_{ij} m^p$ で関係づけられる¹²⁾。ここから ε'_{ij} を式(13)のように導く。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon'_{X'} \\ \varepsilon'_{Y'} \\ \varepsilon'_{Z} \\ 2\varepsilon'_{X'Y'} \\ 2\varepsilon'_{Y'Z} \\ 2\varepsilon'_{ZX'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -2.31 & 0.58 & -0.58 & 2.31 & -0.58 & 0.58 \\ 0 & 0 & 0.58 & 1.15 & -1.73 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \\ x^5 \\ x^6 \end{pmatrix} \quad (13)$$

また、ひずみテンソルはNunes¹³⁾や新¹⁴⁾が用いた3成分あるいは4成分のロゼッタゲージを複数枚用いる方法でも取得できるが、独立な6成分の取得にロゼッタゲージが3枚以上も必要になるため、効率的でない。ところで、提案手法はひずみゲージでの変形計測に適した剛性を有する岩盤に対して6成分の直ひずみを計測し、計測値からひずみテンソルを算出するが、砂や粘土など剛性が低い土ではひずみゲージの使用が難しい。このような低剛性材料に対しては、例えばGasparre et al.¹⁵⁾がLondon clayに対しベンダーエレメントでせん断剛性率を計測できる中空ねじり試験を行って変形異方性を取得した結果を示している。また、Nishimura¹⁶⁾は粘土を対象としてベンダーエレメントと渦電流式変位計を複数配置した三軸試験による異方性取得法を提案している。しかし、これら既存の低剛性材料の異方性特定方法では、ひずみ成分を波動伝播速度の計測などにより補う手法がいくつか提案されているものの、ひずみテンソルを直接的に算定する方法はない。このため本提案手法は剛性が高い岩盤への適用を想定しているが、今後の検討により低剛性材料でもひずみテンソルの算出が可能になれば、本提案手法の適用範囲を拡大することは十分に可能であると考えられる。

図-10 ひずみゲージの貼り方 (矢印は計測方向)¹²⁾

図-11 面内等方弾性体の構成パラメータの取得方法¹⁷⁾

(2) 面内等方弾性体の構成パラメータの特定方法

原位置岩盤ねじりせん断試験で面内等方弾性体の構成パラメータを特定する手法を図-11に提案する¹⁷⁾。まず、岩盤を掘削して中空円筒試験体を作製し (a), 目視観察を行って、剛性が等方と推定される面 (すなわち不連続面) の方向 (走向と傾斜) を推定する (b)。このとき、目視観察で得られる走向と傾斜は図-5で定義した (ζ, ξ) と必ずしも一致しないことに注意する。次に、東西南北の方位 (すなわち図-5の (X', Y', Z) 座標系の方向) とサンプリング方向 (すなわち载荷軸 Z 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 (c)。ひずみゲージは前述した図-10の設置方法などに従う。次に、等方圧密 (d)、ねじりせん断 (e)を行い、応力とひずみの計測を行う。

この特定方法は、異方線形弾性論から導かれるため、各载荷はひずみレベルを約 10^4 以下の弾性域で行うこと

が望ましい¹⁸⁾。当然, Kohata et al.¹⁹⁾が明石砂岩コアの三軸試験で行ったように, 段階的に応力あるいはひずみ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て, 図-5の(ζ, ξ)を特定する(f)。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 $\mathbf{e}'$ は式(14)で表される。

$$\mathbf{e}' = \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY'} & \varepsilon_{XZ} \\ & \varepsilon_{Y'} & \varepsilon_{Y'Z} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{e}'$ を式(15)で対角化して主ひずみを求める。

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e}' \mathbf{e} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ & \varepsilon_2 & 0 \\ \text{sym.} & & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (15)$$

(1, 2, 3)は主ひずみの軸方向を表す座標系である。図-6では中間主ひずみ軸がX軸と一致しているが, この段階で(1, 2, 3)と(X, Y, Z)座標系の各軸が必ずしも一致する必要はない。式(15)の $\mathbf{e}$ は, (1, 2, 3)座標系の主ひずみの各軸方向の基底ベクトルを $\mathbf{e}^1, \mathbf{e}^2, \mathbf{e}^3$ とすると, $\mathbf{e} = (\mathbf{e}^1, \mathbf{e}^2, \mathbf{e}^3)$ と表すことができる。なお, $\mathbf{e}^1$ は縦ベクトルで並べ $\mathbf{e}$ を構成する。以上より, 式(16)から式(15)の主ひずみの単位方向行列 $\mathbf{e}$ を求める。

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta & 0 \\ -\cos \xi \sin \zeta & \cos \xi \cos \zeta & \sin \xi \\ \sin \xi \cos \zeta & -\sin \xi \cos \zeta & \cos \xi \end{pmatrix} \quad (16)$$

等方圧密時には, 異方性の方向(x', y', z')と主ひずみ方向(1, 2, 3)が一致するため, (ζ, ξ)を変数とする三角関数によって $\mathbf{e}$ は構成され, 例えば式(17)から(ζ, ξ)は特定できる。

$$\begin{aligned} \xi &= \cos^{-1}(e_{33}) \\ \zeta &= \cos^{-1}(e_{11}) \end{aligned} \quad (17)$$

単位方向行列 $\mathbf{e}$ の独立な成分は6つあり, 式(17)以外にも, 例えば e_{12} で ζ を, e_{23} で ξ を求めてもよい。なお, ζ は図-12のように, ねじりせん断時の直応力増分 $\Delta\sigma_z$ とせん断応力増分 $\Delta\sigma_{\theta}$ が最大となる θ の位置から求めることもできる。ここで, Y軸から時計周りに ζ の位置にY軸を設置し, 直交座標系(X, Y, Z)を設定する。この操作でX軸と x 軸は一致し, 式(6)で設定したコンプライアンステンソルに準じた座標となる。なお, (b)の目視観察で得た走向と傾斜との整合をこの時点で確認できる。また, 算出した弾性解の座標系と試験結果を合わせるため, 式(14)のひずみテンソルを, 式(18)で(X', Y', Z)から(X, Y, Z)に座標変換する。

図-12 応力分布の最大・最小値と(X, Y, Z)座標系の関係

図-13 等方性と異方性の判定

$$\begin{pmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta & 0 \\ -\sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{e}' = \begin{pmatrix} \cos \zeta & -\sin \zeta & 0 \\ \sin \zeta & \cos \zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_X & \varepsilon_{XY} & \varepsilon_{ZX} \\ & \varepsilon_{Y'} & \varepsilon_{ZY} \\ \text{sym.} & & \varepsilon_Z \end{pmatrix} \quad (18)$$

以上で得た等方圧密時の応答から, 図-13に示すように試験岩盤が等方的か異方的な変形特性を持つかが判定できる。まず, 等方性の場合には変形特性が方向性を持たないため $\xi \neq 0^\circ, 90^\circ$ が得られれば異方性を持つと判断できる。 $\xi = 0^\circ, 90^\circ$ の場合は, 異方性と等方性の両方の可能性があるが, 直ひずみの応答が等方($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$)で, せん断ひずみがゼロであれば等方性であり, それ以外は異方性を持つ岩盤と判断できる。

次に, (d)と(e)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(g)。2章で計算した等方圧密時の応力とひずみの関係を式(19)に示す。

$$\frac{1}{\sigma_c} \begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \varepsilon_Z \\ \varepsilon_{ZY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & \frac{0}{1-\cos 2\xi} \\ \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{1-\cos 2\xi}{2} & \frac{3+\cos 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} \\ \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} & \frac{2}{\sin 2\xi} \\ -\frac{\sin 2\xi}{2} & -\frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{C}_{xxxx} \\ \hat{C}_{xx'yy'} \\ \hat{C}_{xx'zz'} \\ \hat{C}_{zz'zz'} \\ \hat{C}_{zy'zy'} \end{pmatrix} \quad (19)$$

ひずみテンソルの成分は式(18)から得たものを, α は載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式(19)の左辺に代入する。

同様に, ねじりせん断時の応力とひずみの関係を式(20)で下記に示す。原位置岩盤ねじりせん断試験の試験体は, 図-2のように載荷の反力を得るため試験体下端は岩盤と連続しているが, 本検討ではNunes¹³⁾がLekhnitskii et al.²⁰⁾の解析法を参考に求めたCSIR三軸セルの2軸圧縮時の応力ひずみ関係と同様, 図-4に示す中空円筒に関してねじりせん断時の3次元の応力とひずみの関係を求めた。直方向とせん断方向の両方で, 応力とひずみの関係は円周方向 θ の関数で表される。ここでは, 式(20)のコンプライアンステンソル成分, すなわち面内等方弾性体の弾性パラメータを合理的に求めることを考え, 応答の直応力とせん断応力が最大・最少となる計測項目に着目して, $\theta = 0^\circ$ の位置の直応力増分とせん断応力増分($\Delta\sigma_{Z\theta 0}$, $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$), $\theta = 90^\circ$ の位置のせん断応力増分を $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$ と設定する。これらの計測点での応力とひずみの関係を下記の式(21)に示す。コンプライアンステンソルの成分 $\hat{C}_{zy'zy'}$ は式(21)の第3式のようにせん断ひずみ $\Delta\epsilon_{Z\theta}$ と $\Delta\sigma_{Z\theta 0}$ から直接求められることがわかる。なお, ($\Delta\sigma_{Z\theta 0}$, $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$, $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$)は計測した応力分布を最小二乗法などで適切にフィッティングした後に値を定めた上で, せん断ひずみ増分 $\Delta\epsilon_{Z\theta}$ を任意の位置で計測した回転角増分 $\Delta\theta$ を用いて式(22)のように求め式(21)に代入する。

$$\Delta\epsilon_{Z\theta} = \frac{(d_o + d_i)\Delta\theta}{8h_s} \quad (22)$$

d_o と d_i , h_s は図-4(a)に示した試験体の外径と内径, 高さである。応力分布を正確に把握するにはロードセルの分割数が多い方が好ましいが, この手法では θ 方向に 90° 離れた計測項目3つ($\Delta\sigma_{Z\theta 0}$, $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$, $\Delta\sigma_{Z\theta 90}$)を独立して計測できれば良く, すなわち図-4のXY面での試験体中心

図-14 5分割2方向ロードセルの配置

(o) から 90° 以下の角度で2方向ロードセルが隣接すればよい。従って, 図-14に示すように最低限5等分割すれば求める構成パラメータに対して十分である。

次に, 計測した応力とひずみの関係のデータから, 最小二乗法により式(23)で弾性パラメータを特定する。

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{k} \quad (23)$$

$\mathbf{k}$ は式(19), (21)の計測した応力あるいは応力分布とひずみ関係から計算される6成分のベクトルで, 各成分を式(24)で表す。

$$\begin{aligned} k_1 &= \epsilon_x / \sigma_c, k_2 = \epsilon_y / \sigma_c, k_3 = \epsilon_z / \sigma_c, k_4 = \epsilon_{zy} / \sigma_c \\ k_5 &= \frac{\sin 2\xi}{2} \left(\frac{\sin 2\xi}{2} \Delta\sigma_{Z\theta 0} \hat{C}_{zy'zy'} + \Delta\epsilon_{Z\theta} \cos 2\xi \right) \\ k_6 &= \frac{\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\Delta\sigma_{Z\theta 90}} - \frac{1 + \cos 2\xi}{2} \hat{C}_{zy'zy'} \end{aligned} \quad (24)$$

また, $\mathbf{A}$ は ξ の関数の係数行列, $\mathbf{C}$ は $\hat{C}_{ijkl}$ の成分で表されるベクトルで, 次ページの式(25)に示す。式(21)より $\hat{C}_{zy'zy'}$ は計測値から直接に求められるため, 残りの $\hat{C}_{ijkl}$ の成分 $\mathbf{C}$ を式(25)で求める。求めた $\mathbf{C}$ を用いて式(26)から面内等方弾性体を仮定した5つの弾性パラメータを決定する。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_Z &= - \frac{2 \left(-\sin^3 \xi \cos \xi + (\sin^3 \xi \cos \xi - \sin \xi \cos^3 \xi) \hat{C}_{xx'zz'} + \sin \xi \cos^3 \xi \hat{C}_{zz'zz'} + \frac{1}{2} (\sin^3 \xi \cos \xi - \sin \xi \cos^3 \xi) \hat{C}_{zy'zy'} \right) \Delta\epsilon_{Z\theta} \cos \theta}{\sin^4 \xi \hat{C}_{xx'xx'} + 2 \sin^2 \xi \cos^2 \xi \hat{C}_{xx'zz'} + \cos^4 \xi \hat{C}_{zz'zz'} + \sin^2 \xi \cos^2 \xi \hat{C}_{zy'zy'}}, \\ \Delta\sigma_{Z\theta} &= \sin^2 \theta \left(\frac{1}{\hat{C}_{xx'xx'}} \sin^2 \xi + \frac{1}{\hat{C}_{zy'zy'}} \cos^2 \xi \right) \Delta\epsilon_{Z\theta} + \cos^2 \theta \frac{\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\hat{C}_{zy'zy'}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sin 2\xi}{2} \left(\frac{\sin 2\xi}{2} \Delta\sigma_{Z\theta 0} \hat{C}_{zy'zy'} + \Delta\epsilon_{Z\theta} \cos 2\xi \right) \\ &= \frac{2 \sin \xi - \sin 3\xi}{4} \left(-\Delta\sigma_{Z\theta 0} - \frac{\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\hat{C}_{zy'zy'}} \right) \hat{C}_{xx'xx'} + \frac{\sin 2\xi}{2} \left(\frac{2\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\cos 2\xi} - \Delta\sigma_{Z\theta 0} \sin \xi \right) \hat{C}_{xx'zz'} - \frac{(3 \cos \xi + \cos 3\xi)}{4} \left(\Delta\sigma_{Z\theta 0} \cos \xi + \frac{2\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\hat{C}_{zy'zy'}} \sin \xi \right) \hat{C}_{zz'zz'} \\ & \frac{\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\Delta\sigma_{Z\theta 90}} - \frac{1 + \cos 2\xi}{2} \hat{C}_{zy'zy'} = \frac{4}{1 - \cos 2\xi} \hat{C}_{xx'xx'} + \frac{4}{\cos 2\xi - 1} \hat{C}_{xx'yy'} \quad , \quad \hat{C}_{zy'zy'} = \frac{\Delta\epsilon_{Z\theta}}{\Delta\sigma_{Z\theta 0}} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \hat{C}_{x'x'x'x'} \\ \hat{C}_{x'x'y'y'} \\ \hat{C}_{x'x'z'z'} \\ \hat{C}_{z'z'z'z'} \end{pmatrix}, \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{1+\cos 2\xi} & \frac{1}{3-\cos 2\xi} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{3+\cos 2\xi}{2} & \frac{1-\cos 2\xi}{2} \\ \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{\sin 2\xi}{2} & \frac{1+\cos 2\xi}{2} \\ \frac{3\sin \xi - \sin 3\xi}{4} \left(-\Delta\sigma_{z\theta} \sin \xi + \frac{2\Delta\epsilon_{z\theta} \cos \xi}{\hat{C}_{z'y'z'y'}} \right) & 0 & \frac{\sin 2\xi}{2} \left(\frac{2\Delta\epsilon_{z\theta} \cos 2\xi}{\hat{C}_{z'y'z'y'}} - \Delta\sigma_{z\theta} \cos 2\xi \right) & \frac{3\cos \xi + \cos 3\xi}{4} \left(\Delta\sigma_{z\theta} \cos \xi + \frac{2\Delta\epsilon_{z\theta} \sin \xi}{\hat{C}_{z'y'z'y'}} \right) \\ \frac{4}{1-\cos 2\xi} & \frac{4}{\cos 2\xi - 1} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$E_{z'} = \frac{1}{\hat{C}_{z'z'z'z'}}, \quad \nu_{z'} = -\frac{\hat{C}_{x'x'z'z'}}{\hat{C}_{z'y'z'y'}}, \quad G_{z'} = \frac{1}{\hat{C}_{z'y'z'y'}},$$

$$E_{x'} = \frac{1}{\hat{C}_{x'x'x'x'}}, \quad \nu_{x'} = -\frac{\hat{C}_{x'x'y'y'}}{\hat{C}_{x'x'x'x'}} \quad (26)$$

なお、図-11のフローの (f) で、 $\xi = 0^\circ$ と特定されたときは、式(25)の $\mathbf{A}$ の6行1列と2列が無大になる。この場合はTalesnick and Ringel²¹⁾が提案する方法で弾性パラメータを特定する。この方法は図-15のように、軸圧縮(a)、ねじりせん断(b)、内外圧増分(c)の载荷をそれぞれ行うことで、式(27)から $\xi = 0^\circ$ の場合の弾性パラメータを求める手法である。

$$\begin{aligned} \text{(a)より} : E_{z'} &= \frac{\Delta\sigma_a}{\Delta\epsilon_a}, \nu_{z'} = -\frac{2\Delta\epsilon_x}{\Delta\epsilon_z} \\ \text{(b)より} : G_{z'} &= \frac{\Delta\sigma_{z\theta}}{\Delta\epsilon_{z\theta}} \\ \text{(c)より} : E_{x'} &= \frac{\Delta p}{2\Delta\epsilon_R}, \nu_{x'} = -\frac{\Delta\epsilon_\theta}{\Delta\epsilon_R} \end{aligned} \quad (27)$$

Δp は内外圧で、 $\Delta\epsilon_\theta$ と $\Delta\epsilon_R$ は内外圧増分を与えた場合の円周方向と半径方向のひずみ増分である。なお、 $\xi = 0^\circ$ で軸対称条件を満たすため、中空円筒試験体は(a),(b),(c)の載

荷モードで要素の挙動をする。 $\Delta\epsilon_\theta$ と $\Delta\epsilon_R$ は、この载荷モードで得た (X, Y, Z) 座標のひずみを式(11)と同様に (R, θ, Z) 座標系に変換して得られる。

以上より、原位置岩盤ねじりせん断試験において、等方圧密とねじりせん断を行えば、計測する応力や変形を用いて異方性の方向と弾性パラメータが特定できることがわかった。著者らが提案した三軸試験での異方性の特定方法⁴⁾は、 $\xi = 0^\circ$ と 90° の場合にはSaint-Venantの式²²⁾を用いて経験的に $G_{z'}$ を求めているが、本論文で提案した手法によれば、同ケースにおいても全ての弾性パラメータを正確に求められる。

4. 原位置岩盤ねじりせん断試験による異方性の特定に測定誤差が及ぼす影響の分析

3章では原位置岩盤ねじりせん断試験により、計測値から異方性の卓越方向と面内等方弾性体の弾性パラメータを逆算できることを示した。しかし、実際の試験では、ひずみゲージの計測には許容誤差や設置方向の僅かなずれ、電気信号のノイズ等に起因する測定誤差が生じる。また、計測する応力分布は分割ロードセルの個数に依存してフィッティング誤差が生じる可能性もある。ここで

図-15 $\xi = 0^\circ$ の場合の弾性パラメータの取得方法²¹⁾ (左：試験体，右：各载荷時の単位要素の変形)

 図-16 誤差の設計 ($\alpha=0.7$ のケース)

 図-17 n_t と構成パラメータの関係

は、このような誤差が、計算される構成パラメータに及ぼす影響を把握するため、意図的に誤差を与えたひずみと応力を計測値と仮定して構成パラメータを算出し、真値と比較することで測定誤差に対する提案手法の感度や適用性を検討する。この感度分析では、Graham & Houlsby²³⁾と同様の異方性パラメータ α を式(28)のように導入する。

$$\alpha = \sqrt{\frac{E_{x'}}{E_{z'}}} = \frac{G_{x'}}{G_{z'}} = \frac{\nu_{x'}}{\nu_{z'}} \quad (28)$$

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と仮定することで、5つの弾性パラメータを (E_z, ν_z, α) の3つに減らすことができ、パラメトリックな分析が容易になる。この異方性パラメータ α は、各弾性パラメータの比に対する式(23)の拘束条件の下で異方性の程度を表し、 $\alpha = 1.0$ の場合は等方弾性体となる。著者ら³⁾は面内等方性を示す岩石供試体の室内試験の結果から式(27)の妥当性や α の取り得る範囲を検討しており、この分析でも $\alpha = 0.7 \sim 1.2$ の範囲で感度分析を行った。なお、異方性の卓越方向は $(\zeta, \xi) = (0^\circ, 30^\circ)$ で一定とした。

感度分析の入力値に用いたのは、等方圧密時の (X', Y', Z') 座標系のひずみテンソル ε_{ij} 、等方圧密応力 α とねじりせん断時のせん断ひずみ増分 Δz_{θ} と $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ の応力増分 $(\Delta\sigma_{Zat0}, \Delta\sigma_{Zeat0}, \Delta\sigma_{Zeat90})$ と ζ である。なお、Nunesの分析¹³⁾に倣い、ロードセルや水圧計で計測する等方圧密

応力 α は誤差を含まない真値を仮定し、 ζ も本検討では真値と仮定する。

本検討では、新¹⁴⁾と同様に真値から $\pm 10\%$ の範囲でランダムにひずみの測定誤差を、またロードセルのフィッティング誤差を $\pm 5\%$ の範囲で与えた。従って、ここでは、真値の ε_{ij} と $(\Delta\sigma_{Zat0}, \Delta\sigma_{Zeat0}, \Delta\sigma_{Zeat90})$ に次式(29)のようにひずみの測定誤差 r_{ij} およびフィッティング誤差 $(r_{Zat0}, r_{Zeat0}, r_{Zeat90})$ を加え、模擬計測値のひずみテンソルおよび応力増分を $\bar{\varepsilon}_{ij}$ と $(\bar{\Delta\sigma}_{Zat0}, \bar{\Delta\sigma}_{Zeat0}, \bar{\Delta\sigma}_{Zeat90})$ とする。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{ij} &= \varepsilon_{ij} + r_{ij} \\ \bar{\Delta\sigma}_{Zat0} &= \Delta\sigma_{Zat0} + r_{Zat0} \\ \bar{\Delta\sigma}_{Zeat0} &= \Delta\sigma_{Zeat0} + r_{Zeat0} \\ \bar{\Delta\sigma}_{Zeat90} &= \Delta\sigma_{Zeat90} + r_{Zeat90} \end{aligned} \quad (29)$$

上記の $\bar{\varepsilon}_{ij}$ 、 $(\bar{\Delta\sigma}_{Zat0}, \bar{\Delta\sigma}_{Zeat0}, \bar{\Delta\sigma}_{Zeat90})$ および $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\Delta z_{\theta}}$ を用いて、図-11に示した提案手法のフローに従って構成パラメータを求め、真値と比較分析する。図-16の頻度分布に試行回数 $n=1000$ 回について実際に与えた誤差 r_{ij} と $(r_{Zat0}, r_{Zeat0}, r_{Zeat90})$ が一様に分布することを示す。なお、 $n=10000$ 回での解析との比較から、 $n=1000$ で十分な試行回数であることを確認している。

検討した中で最も異方性が強い $\alpha = 0.7$ のケース($E_z = 1000\text{MPa}$, $\nu_z = 0.3$, $G_z = 289\text{MPa}$, $E_x = 490\text{MPa}$, $\nu_x = 0.21$)で n_t と構成パラメータの関係の一例を図-17に示す。同図は n_t と ξ 、 E_z および E_x の関係を示し、1000回の試行で得られた

 図-18 ξ および弾性パラメータの頻度分布 ($\alpha=0.7, n=1000$)

 図-19 α と構成パラメータの関係 (左: ξ , 右: 弾性パラメータ)

構成パラメータを表す。このケースでは、いずれの構成パラメータでも、真値の近傍にデータが一様に集中していることがわかる。図-18には図-17と同様のケースで計算したデータの頻度分布を示す。図-18(a)(b)が弾性パラメータ、図-18(c)が ξ の頻度分布を表しており、縦軸は各構成パラメータの頻度 n を試行回数 n_t で正規化し、相対頻度 n/n_t とした。同図には、構成パラメータ毎の平均値と標準偏差と変動係数も示し、それぞれ添え字 $_{av}$ と記号 Δ と C_v で表す。全ての構成パラメータの頻度分布で、真値をピークとした正規分布に近い結果となる。いずれのパラメータでも変動係数 C_v は小さく、 C_v の最大値は ν_x の変動係数 $C_v=0.44$ で、最小値は G_z の変動係数 $C_v=0.03$ である。このように、異方性が強い場合 ($\alpha=0.7$) にはひずみの誤差を $\pm 10\%$ 、ロードセルのフィッティング誤差を $\pm 5\%$ と大きい誤差を想定しても安定して構成パラメータを取得できることがわかった。それに対し、異方性が弱い場合 ($\alpha \neq 1.0$) には、変形特性が等方に近く、得ら

れる構成パラメータが安定に求められない可能性がある。各構成パラメータに関する C_v と α の関係を図-19に示す。求める ξ と弾性パラメータは $0.90 < \alpha < 1.10$ になるとばらつきが増大する傾向にあり、弾性パラメータの中では、 G_z 以外が特に大きくばらつく。このような岩盤が等方的な剛性になるに従って起こる異方性解析法の不安定性は、提案手法に限らず他の方法(例えば¹³⁾や¹⁴⁾でも同様に起こりうる。最後に、表-1に本検討とNunes¹³⁾によって行われた同様の分析結果と比較する。Nunesの検討では、表-2のように ξ の設定や G_z を求める手法²⁾が異なるものの、本研究と同様にヤング率の比が2倍程度の異方性を想定している。本研究ではロードセルの誤差も考慮しているが、提案手法で得られた構成パラメータのばらつきがほぼ同程度あるいはそれ以下であり、提案手法の方が高い精度で異方性を評価できると言える。

以上より、 $\alpha < 0.9$ 、または $\alpha > 1.1$ (ヤング率の差が1割以上の強い異方性を有する場合) の範囲では、提案手法

表-1 構成パラメータのばらつきに関する本検討と既往の手法¹³⁾の比較

手法	変動係数 C_v							備考
	ζ	ξ	E_z	ν_z	G_z	E_x	ν_x	
This study ($\alpha = 0.7$)	-	0.070	0.057	0.074	0.029	0.142	0.443	$r_{ij} = \pm 10\%$ $r = \pm 5\%$ (for load cells)
Nunes(2002) ¹³⁾	0.117	0.248	0.060	0.120	-	0.100	0.470	$r_{ij} = \pm 10\%$ $r = \pm 0\%$ (for load cells)

表-2 Nunesの手法¹³⁾で用いられた構成パラメータ

手法	ζ	ξ	E_z	ν_z	G_z	E_x	ν_x	備考
Nunes(2002) ¹³⁾	30°	60°	30GPa	0.25	-	60GPa	0.15	G_z はSaint-Venant ²²⁾ の 手法で求める

によって安定して構成パラメータを特定できることがわかった。また、 $0.9 < \alpha < 1.1$ の範囲の等方性に近いケース（ヤング率の差が1割以下の弱い異方性を有する場合）では、測定誤差の影響を受ける可能性があり注意が必要である。

5. まとめ

従来、岩盤の力学特性の異方性を調査する際には、方向を変えた複数のサンプリングコアの試験を行う必要があり、試験時間やコスト面で効率的でない上に異方性の方向を必ずしも特定できなかった。そのため、著者らは、少ない試験回数で異方性を調査できる原位置岩盤ねじりせん断試験を開発した。本論文では、堆積岩などのモデル化に用いられる面内等方弾性体を対象とし、原位置岩盤ねじりせん断試験の計測項目を用いて、1回の試験により弾性パラメータおよび異方性の卓越方向を特定できることを示した。提案手法では、任意の方向性を持つ異方性岩盤に対し、著者らが提案した三軸試験⁹⁾で異方性を特定するよりも異方性の方向に依らずに正確な弾性パラメータが得られることを示すと共に、提案手法に及ぼす測定誤差の影響や提案手法の適用性を検討するために測定誤差に関する感度分析も行った。弾性パラメータの異方性の程度を変化させて検討した結果、異方性が小さい場合（ヤング率の差が1割以下の場合）を除き、安定して構成パラメータを取得できることがわかった。

参考文献

- 1) 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.
- 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) 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, pp. 479-493, 2014.
- 4) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫: 三軸試験による岩盤の変形異方性の特定方法, 地盤工学ジャーナル, Vol. 10, No. 2, pp. 201-211, 2015.
- 5) Togashi, Y., Tani, K. and Kikumoto, M.: Proposal of the new in-situ torsional testing method and analysis of test results for anisotropic rock masses, *Adv. Soil Mech. and Geotech. Eng. (Proc. 5th iYGECE.)*, Vol. 2, pp. 387-390, 2013.
- 6) 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, pp. 10-11, 2003.
- 7) 山口柏樹: 弾・塑性力学, pp. 45-47, 森北出版, 1975.
- 8) Goodman, R. E.: *Introduction to Rock Mechanics*, Second Edition, John Wiley and Sons, pp. 196-197, 1989.
- 9) 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.
- 10) 富田佳宏: 弾塑性力学の基礎と応用, pp. 25-26, 森北出版, 1995.
- 11) 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.
- 12) 菊本統, 谷和夫, 岡田哲実, 高倉望, 荻原啓太: ひずみテンソル算出システム・ひずみ計貼付方向決定方法・ひずみテンソル算出方法及びひずみテンソル算出プログラム, 特願 2013-251347, 2013.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) Gasparre, A., Nishimura, S., Minh, N. A., Coop, M. R. and Jardine, R. J.: The stiffness of natural London clay, *Geotechnique*, Vol. 57, No. 1, pp. 33-47, 2007.
- 16) Nishimura, S.: Assessment of anisotropic elastic parameters of saturated clay measured in triaxial apparatus: Appraisal of techniques and derivation procedures, *Soils and Foundations*, Vol. 54, No. 3, pp. 364-376, 2014.
- 17) 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, 特開 2015-021767号, 2013.

- 18) 石原研而：土質動力学の基礎, pp. 136-137, 鹿島出版会, 1976.
- 19) Kohata, Y., Tatsuoka, F., Wang, L., Jiang, G. L., Hoque, E. and Kodaka, T.: Modeling the non-linear deformation properties of stiff geomaterials, *Geotechnique*, Vol. 47, No. 3, pp. 563-580, 1997.
- 20) Lekhnitskii, S. G., Tsai, S. W. and Cheron, T.: *Anisotropic plates*, Gordon and Breach Sci., pp. 157-212, 1968.
- 21) 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, No. 5, pp. 627-639, 1999.
- 22) 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. 257-293, 1863.
- 23) Graham, J. and Houlsby, G. T.: Anisotropic elasticity of a natural clay, *Geotechnique*, Vol. 33, No. 2, pp. 165-180, 1983.

(2015. 3. 24 受付)

DETERMINATION OF DEFORMATION PROPERTIES FOR ANISOTROPIC ROCK MASSES BY IN-SITU TORSIONAL SHEAR TESTING

Yota TOGASHI, Kazuo TANI and Mamoru KIKUMOTO

Deformation characteristics of rock masses are often significantly anisotropic due to discontinuities e.g. sedimentary planes and joints. Anisotropic properties of rock masses are commonly obtained by several triaxial tests using rock cores sampled to different orientations, but which is costly and time consuming. In this study in-situ torsional shear test for rock masses is proposed by the authors. Anisotropic deformation properties can be obtained by fewer tests than the conventional testing method. In this paper, for developing testing methods, a method of determining constitutive parameters for transversely isotropic rock masses is proposed. In this proposed method, the directions of anisotropy are determined by the strain responses under isotropic consolidation and 5 elastic parameters of transversely isotropic rocks are determined by both strain responses during isotropic consolidation and the distributed stress responses during torsional shearing.