第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
公益社団法人土木学会　2014 年 1 月　講演番号 47

原位置岩盤ねじりせん断試験による面内等方弾性体を仮定した岩盤の変形特性の異方性の特定方法

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（〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5）
[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-kx@ynu.ac.jp

著者らが提案した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，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．試験の開発にあたって，砕屑性の堆積岩などのモデル化に好適な面内等方弾性体を仮定して，要素レベルの解析により等方圧載荷とねじりせん断時の中空円筒領域の弾性解を算出するとともに，得られた解から異方性の方向と弾性パラメータを逆算する手法を提案した．この手法は，等方圧載荷時の主ひずみ方向を求めることで剛性の等方な面の走向と傾斜が目視観察に依らずに特定でき，ねじりせん断時の直応力とせん断応力の分布を計測し等方圧載荷時の計測結果とあわせて解析すれば5つの弾性パラメータを特定できる．

Key Words : *rock mass, anisotropy, torsional shear test, in-situ, transversely isotropy*

1. はじめに

原位置岩盤ねじりせん断試験は著者らが提案した岩盤の原位置試験法である[1)]．これは図-1に示すように露頭や試掘孔の岩盤を掘削して中空円筒の試験体を作製し，所定の拘束圧のもとでねじり載荷する試験である．

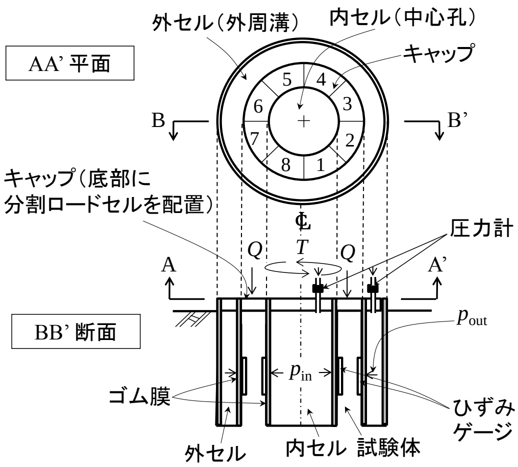


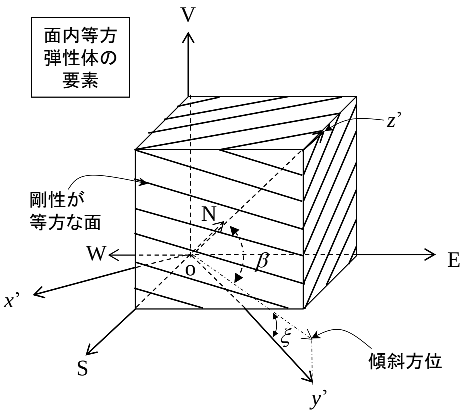
図-1　原位置岩盤ねじりせん断試験
（露頭の場合）

原位置岩盤ねじりせん断試験は単純せん断モードの試験であるため，地震時の岩盤の力学特性を把握することができることに加えて，試験体の上端に複数の2方向ロードセルを設置して載荷時の直応力分布と円周方向のせん断応力分布を計測することで岩盤の力学特性の異方性も把握できる．この報告では，堆積構造や節理群などを含む岩盤の変形特性のモデル化にしばしば用いられる面内等方弾性体に関して，原位置岩盤ねじりせん断試験を想定した要素の解析によって等方圧載荷およびねじりせん断時の弾性解を示した．さらに，算出した弾性解を用いて，面内等方弾性体の剛性が等方な面（すなわち不連続面）の走向・傾斜と弾性パラメータ5つを簡易に特定する手法を考案した．

2. 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，ある面内では弾性パラメータ（剛性とポアソン比）が等方的で，その面と垂直な弾性主軸の方向の弾性パラメータが異なる弾性体である．面

内等方弾性体は少ない数のパラメータで異方性を表現できる簡便さから，不連続面の弾性的な挙動と等価な等価連続体として用いられた例[2]や，砕屑性の堆積岩の構成関係として用いられた例[3]や，片岩のモデル化に用いられた例[4]がある．**図−2**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（x', y', z'）を示す．図には，剛性が等方な面の走向と傾斜（β, ξ）も示す．ここでは，βをN軸と傾斜方位（y'軸をSE面上に投影した線の示す方向）となす角度とし，ξをy'軸と傾斜方位のなす角度とした．また，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．



図−2　面内等方弾性体と地理座標系（E, W, N, S）
および異方性の方向（x', y', z'）の関係

3. 要素を対象とした解析による面内等方弾性体の中空円筒の弾性解

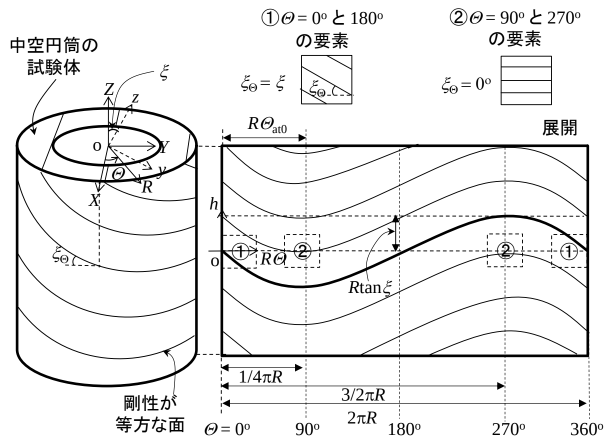
面内等方弾性体について，Amadei は要素試験の軸載荷時の弾性解を導出し[5]，Nunes は非要素試験としても扱うことができる CSIR の三軸セルを用いた外圧・内圧載荷試験に関して中空円筒領域の弾性解を導出しているが[6]，等方圧とねじりせん断時の中空円筒の弾性解は未だ導出されていない．そこで，等方圧載荷時は中空円筒試験体内の応力状態が一様で，要素として挙動すると考えられるので，Amadei と同様の手法で弾性解を導出した．なお，別途実施した FEM 解析では，等方圧載荷時に面内等方弾性体の中空円筒が要素として一様な力学挙動を示すことを確認している．ねじりせん断時の応答については，Nunes の手法を参考にして，**図−3** に示すように，局所的な傾斜ξ_Θが側面の展開図上では円周方向に正弦曲線で変化し，円周方向で異方性の方向が変化することを考慮して弾性解を導出した．

まず，直交座標系（X, Y, Z）における走向β=90°，傾斜ξ=0°の面内等方弾性体の構成関係を式(1)に示す．

$$\sigma_{\mathrm{ij}} = D_{\mathrm{ijkl}}\,\varepsilon_{\mathrm{kl}} \tag{1}$$

σ_{ij} は応力テンソル，$\varepsilon_{\mathrm{kl}}$ はひずみテンソルである．D_{ijkl} は剛性テンソルである．i, j はフリーインデックス，k, l はダミーインデックスで，X, Y, Z をそれぞれ代入する．面内等方弾性体の剛性テンソルの成分は（D_{1111}, D_{1122}, D_{1133}, D_{3333}, D_{2323}）の５つで表現され，剛性テンソル成分と弾性パラメータの関係は次式で表される．

$$D_{\mathrm{XXXX}} = D_{\mathrm{YYYY}} = \frac{(1-\nu_{x'})E_{x'}}{(1+\nu_{x'})(1-2\nu_{x'})},\ D_{\mathrm{ZZZZ}} = \frac{(1-\nu_{x'})E_{z'}}{(1+\nu_{x'})(1-2\nu_{x'})}$$
$$D_{\mathrm{XXYY}} = \frac{\nu_{x'}E_{x'}}{(1+\nu_{x'})(1-2\nu_{x'})},\ D_{\mathrm{XXZZ}} = D_{\mathrm{YYZZ}} = \frac{\nu_{z'}E_{x'}}{(1+\nu_{x'})(1-2\nu_{x'})}$$
$$D_{\mathrm{XYXY}} = \frac{E_{x'}}{1+\nu_{x'}},\ D_{\mathrm{YZYZ}} = 2G_{z'}$$



図−3　中空円筒の面内等方弾性体と直交座標系（X, Y, Z）
及び円筒座標系（R, Θ, Z）と円周方向の要素

次に，**図−3** のように傾斜ξに合わせて，D_{mnpq}を式(2)によって座標変換し，$\hat{D}_{\mathrm{ijkl}}$を得る．

$$\hat{D}_{\mathrm{ijkl}} = D_{\mathrm{mnpq}}l_{\mathrm{mi}}l_{\mathrm{nj}}l_{\mathrm{pk}}l_{\mathrm{ql}} \tag{2}$$

i, j, k, lはフリーインデックスでX, Y, Zを代入し，m, n, p, qはダミーインデックスで異方性の方向x', y', z'をそれぞれ代入する．l_{ij}は X 軸周りの回転を表す 2 階テンソルで，行列$\mathbf{l}$で表すと次式のようになる．

$$\mathbf{l} = \begin{pmatrix} l_{\mathrm{Xx'}} & l_{\mathrm{Xy'}} & l_{\mathrm{Xz'}} \\ l_{\mathrm{Y'x'}} & l_{\mathrm{Y'y'}} & l_{\mathrm{Y'z'}} \\ l_{\mathrm{Zx'}} & l_{\mathrm{Zy'}} & l_{\mathrm{Zz'}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\xi & -\sin\xi \\ 0 & \sin\xi & \cos\xi \end{pmatrix}$$

この解析は円周方向に一回転分（Θ = 0°~360°）の剛性の変化を考慮するため，走向βの設定は任意で差支えない．ここではβ= 90°とした．
なお，式(2)において剛性テンソルは，応力とひずみの対称性から下記の対称性を持つ．

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

式(1)と(2)から，$\beta=90^{\circ}$，$\xi\neq0^{\circ}$の面内等方弾性体の構成関係は式(3)で表される．

$$\sigma_{\mathrm{ij}}=\hat{D}_{\mathrm{ijkl}}\,\varepsilon_{\mathrm{kl}} \tag{3}$$

次に，各載荷条件に相当する条件を設定をする．等方圧載荷では，単位要素に等方的なひずみが作用するように，式(4)のように直ひずみを設定する．

$$\begin{aligned}&\varepsilon_{\mathrm{XX}}=\varepsilon_{\mathrm{YY}}=\varepsilon_{\mathrm{ZZ}}=\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}\\&\varepsilon_{\mathrm{XY}}=\varepsilon_{\mathrm{ZY}}=\varepsilon_{\mathrm{ZX}}=0\end{aligned} \tag{4}$$

式(4)を式(3)に代入することで，等方圧載荷時の面内等方弾性体要素の応力の弾性解が式(5)で得られる．なお k_i ($i=1,2$)は計測値行列の成分である．

$$\frac{1}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}}\begin{pmatrix}\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}\\ \Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}k_1\\ k_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}1-\cos2\xi & \dfrac{3+\cos2\xi}{2} & \dfrac{1+\cos2\xi}{2} & \cos2\xi-1 & 0\\ -\sin2\xi & \dfrac{\sin2\xi}{2} & \dfrac{\sin2\xi}{2} & \sin2\xi & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}D_{1111}\\ D_{1133}\\ D_{3333}\\ D_{1212}\\ D_{2323}\end{pmatrix} \tag{5}$$

軟岩を想定して弾性パラメータを設定し，試算した$\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$，$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$と$\xi$の関係を**図-4** に示す．$\xi$の変化に伴い，応力も変化することがわかる．

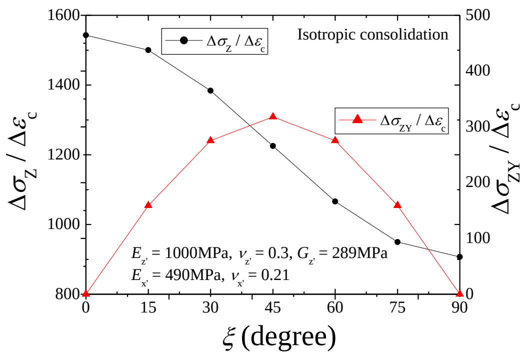


図-4　等方圧載荷時の$\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$，$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$と$\xi$の関係

ねじりせん断では，円筒座標系（R, Θ, Z）で中空円筒にΘ方向のせん断ひずみ$\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$を作用させるように，ひずみテンソルの成分を式(6)のように設定する．

$$\begin{aligned}&\varepsilon_{\mathrm{ZX}}=-\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}\sin\Theta\\&\varepsilon_{\mathrm{ZY}}=\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}\cos\Theta\\&\varepsilon_{\mathrm{XX}}=\varepsilon_{\mathrm{YY}}=\varepsilon_{\mathrm{ZZ}}=\varepsilon_{\mathrm{XY}}=0\end{aligned} \tag{6}$$

また，式(7)で直交座標系の応力テンソルを円筒座標系に座標変換する．

$$\sigma_{\mathrm{ij}}=\sigma_{\mathrm{mn}}\,m_{\mathrm{im}}m_{\mathrm{jn}} \tag{7}$$

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_{ij}はX軸周りの回転を表す 2 階テンソルで，行列 $\mathbf{m}$ で表すと次式のようになる．

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

式(6)を式(3)に代入し，式(7)で応力テンソルの成分を直交座標系から円筒座標系に変換すると，ねじりせん断時の中空円筒の面内等方弾性体の応力分布の弾性解が式(8)で得られる．

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}}&=\left(\frac{\sin2\xi}{2}\left(\begin{aligned}&\frac{\cos2\xi-1}{2}D_{1111}-\cos2\xi D_{1133}+\\&\frac{1+\cos2\xi}{2}D_{3333}-2\cos2\xi D_{2323}\end{aligned}\right)\right)\cos\Theta\\
\frac{\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}}&=\frac{1}{2}\left[\begin{aligned}&\frac{1-\cos4\xi}{8}D_{1111}-\frac{1-\cos4\xi}{4}D_{1133}+\frac{1-\cos4\xi}{8}D_{3333}+\\&\frac{1-\cos2\xi}{2}D_{1212}+\frac{2+\cos2\xi+\cos4\xi}{2}D_{2323}\end{aligned}\right]\\
&+\frac{\cos2\Theta}{2}\left[\begin{aligned}&\frac{1-\cos4\xi}{8}D_{1111}-\frac{1-\cos4\xi}{4}D_{1133}+\frac{1-\cos4\xi}{8}D_{3333}+\\&\frac{\cos2\xi+1}{2}D_{1212}+\frac{-\cos2\xi+\cos4\xi}{2}D_{2323}\end{aligned}\right]\end{aligned} \tag{8}$$

軟岩を想定したパラメータで試算したねじりせん断時における$\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$，$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$と$\Theta$の関係を$\xi$毎に**図-5** に示す．$\Theta$及び$\xi$の変化に伴い，応力も変化することがわかる．

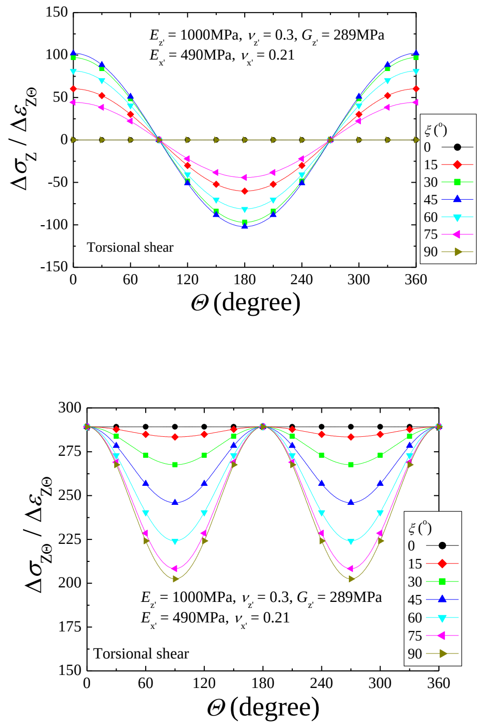


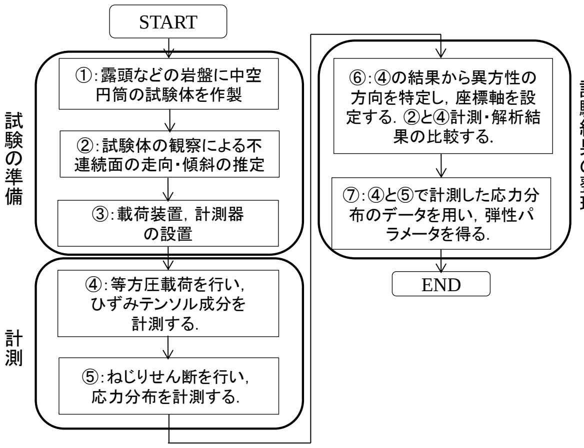
図-5　ねじりせん断時の$\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$，$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$と$\Theta$の関係

（上：直応力，下：せん断応力）

4. 面内等方弾性体の異方性の特定方法

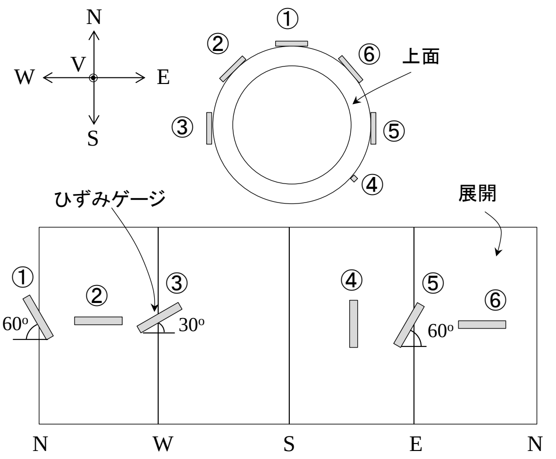
3 章で行った解析結果と求めた弾性解を利用して，面

内等方性弾性体を仮定した岩盤の異方性を**図–6** のフローのように特定する[7].



図–6　面内等方弾性体を仮定した岩盤の異方性の特定方法

まず，露頭などの岩盤を掘削して中空円筒の試験体を作製し（①），不連続面と地理座標系の関係，すなわち剛性の等方な面の走向・傾斜(β,ξ)を把握する（②）．計測器の設置（③）では，試験体の変形を計測するために**図–7** のようにひずみゲージを設置する．



図–7　中空円筒試験体側面にひずみゲージを設置する方法

このとき，ⓘ番目のひずみゲージで計測したひずみを x_i とすると，地理座標系のひずみ ε_{ij} $(i, j = \mathrm{E, S, V})$ と x_i の関係は式(9)で表される．

$$\begin{pmatrix}\varepsilon_{\mathrm{S}}\\ \varepsilon_{\mathrm{E}}\\ \varepsilon_{\mathrm{V}}\\ \gamma_{\mathrm{SE}}\\ \gamma_{\mathrm{EV}}\\ \gamma_{\mathrm{VS}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0&1&-1&1&0\\ 0&1&-1&1&-1&1\\ 0&0&0&1&0&0\\ 0&-1&0&0&0&1\\ 2.31&0.58&-0.58&-2.31&0.58&-0.58\\ 0&0&0.58&1.15&-1.73&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\ x_2\\ x_3\\ x_4\\ x_5\\ x_6\end{pmatrix} \tag{9}$$

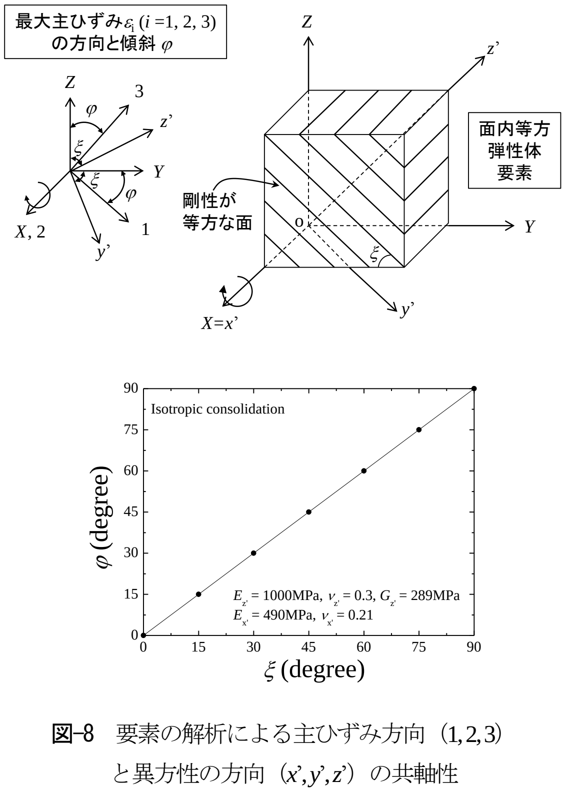
なお，式(9)は試験体が要素として挙動する等方圧載荷時のみに成立する．

次に等方圧載荷（④），ねじりせん断（⑤）を行う．等方圧載荷時のひずみの計測値を用いて，**図–2** の剛性の等方な面の走向・傾斜(β,ξ)を特定し，座標軸を設定する（⑥）．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載荷時のひずみ増分テンソル $\Delta\varepsilon'$ は式(10)で表される．$\Delta\varepsilon'$ から，式(11)によって主ひずみを求める．

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}'=\begin{pmatrix}\Delta\varepsilon_{\mathrm{S}}&\Delta\varepsilon_{\mathrm{SE}}&\Delta\varepsilon_{\mathrm{SV}}\\ &\Delta\varepsilon_{\mathrm{E}}&\Delta\varepsilon_{\mathrm{EV}}\\ sym.&&\Delta\varepsilon_{\mathrm{V}}\end{pmatrix} \tag{10}$$

$$\mathbf{e}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{\varepsilon}'\mathbf{e}=\begin{pmatrix}\varepsilon_1&0&0\\ 0&\varepsilon_2&0\\ 0&0&\varepsilon_3\end{pmatrix} \tag{11}$$

式(11)の対角化により単位方向行列 **e** を求める．等方圧載荷時においては，**図–8** のように最大主ひずみ方向の地理座標系からの傾斜 φ が剛性の等方な面の傾斜 ξ と常に同じ値をとり，異方性の方向 (x', y', z') と主ひずみ方向 (1, 2, 3) が共軸となる．この特性を利用して，式(12)の **e** から，走向と傾斜 (β,ξ) を特定できる．

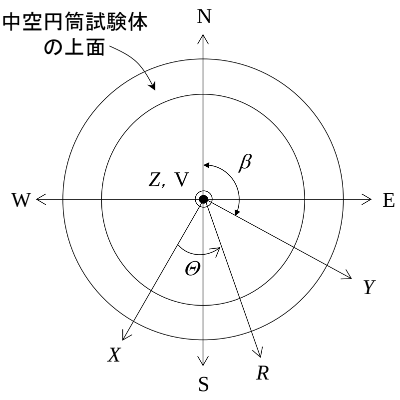


図–8　要素の解析による主ひずみ方向（1,2,3）と異方性の方向（x', y', z'）の共軸性（β=90°の試算結果）

$$\mathbf{e}=\begin{pmatrix}e_{11}&e_{12}&e_{13}\\ e_{21}&e_{22}&e_{23}\\ e_{31}&e_{32}&e_{33}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos(\beta-\frac{\pi}{2})&\sin(b-\frac{\pi}{2})&0\\ -\cos\xi\sin(\beta-\frac{\pi}{2})&\cos\xi\cos(\beta-\frac{\pi}{2})&\sin\xi\\ \sin\xi\cos(\beta-\frac{\pi}{2})&-\sin\xi\cos(\beta-\frac{\pi}{2})&\cos\xi\end{pmatrix} \tag{12}$$

ここで，β を用いて**図–9** のように，N 軸から時計周りの角度 β の位置に Y 軸が来るように，直交座標系 (X, Y, Z) と円筒座標系 (R, Θ, Z) を設定する．この操作で X 軸と x'

軸は共軸になり，**図−3** で式(5), (8)で示した$\beta = 90^{\circ}$における弾性解と調和する試験体と座標系の関係が設定される．



図−9　直交座標系（X, Y, Z）と
円筒座標系（R, Θ, Z）の設定

$\xi = 0^{\circ}$ の時に関しては，走向 β が不定となり，Talesnick and Ringel が提案している中空ねじり試験の手法を用いて，原位置岩盤ねじりせん断試験においても面内等方弾性体の弾性パラメータを求めることができる [8]．以下では$\xi \neq 0^{\circ}$の場合における解析方法を述べる．

次に，④と⑤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（⑦）．

等方圧載荷時の式(5)に関しては，中空円筒が要素として挙動するために分割ロードセルで計測される応力が一定になるので，直応力増分$\Delta\sigma_{\mathrm{Z}}$に関しては，複数個のロードセルで計測された平均値などを用いる．せん断応力に関しても同様で$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}$のみが一様に発生するが，分割ロードセルでは円周方向の$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}$が計測されるため，見かけ上は$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}$が分布する．そこで，式(13)によって$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}$を$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}}$に変換し，複数個の計測結果の平均値を用いる．

$$\Delta\sigma_{\mathrm{ZY}} = \frac{\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta}}}{\sin\Theta} \tag{13}$$

等方圧載荷時のひずみ増分$\Delta\varepsilon_{\mathrm{c}}$に関しては，**図−7** のひずみゲージで計測した直ひずみ増分$\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z}}$もしくは外部変位計による直変位増分から算出し用いる．

ねじりせん断時に関しては，式(7)より$\Theta = 0, 90^{\circ}$の位置における弾性解が式(14)で表される．解析に用いる計測値は，分割ロードセルで計測された応力分布を最小二乗法などでフィッティングした結果を用いるのが好ましい．$\Theta = 0^{\circ}$ における直応力増分とせん断ひずみ増分の比を$\Delta\sigma_{\mathrm{Zat0}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$, ($=k_3$)とし，$\Theta = 0^{\circ}$におけるせん断応力増分とせん断ひずみ増分の比を$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta at0}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$, ($=k_4$)，$\Theta = 90^{\circ}$における$\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta at90}}/\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$, ($=k_5$)とした．なお，せん断ひずみ増分$\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}$は回転角計などで任意の位置で計測した回転角$\Delta\Theta$を用いて，式(15)から計算する．$d_{\mathrm{out}}$は試験体の外径，$d_{\mathrm{in}}$は試験体の内径，$h_{\mathrm{s}}$は試験体の高さである．

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\Delta\sigma_{\mathrm{Zat0}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}} \\ \dfrac{\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta at0}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}} \\ \dfrac{\Delta\sigma_{\mathrm{Z\Theta at90}}}{\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\sin 2\xi}{2}\dfrac{\cos 2\xi - 1}{2} & -\dfrac{\sin 2\xi \cos 2\xi}{2} & \dfrac{\sin 2\xi}{2}\dfrac{1+\cos 2\xi}{2} & 0 & -\sin 2\xi \cos 2\xi \\ \dfrac{1-\cos 4\xi}{8} & \dfrac{\cos 4\xi - 1}{4} & \dfrac{1-\cos 4\xi}{8} & 0 & \dfrac{1+\cos 4\xi}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{1-\cos 2\xi}{2} & \dfrac{1+\cos 2\xi}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_{1111} \\ D_{1133} \\ D_{3333} \\ D_{1212} \\ D_{2323} \end{pmatrix} \tag{14}$$

$$\Delta\varepsilon_{\mathrm{Z\Theta}} = \frac{(d_{\mathrm{out}} + d_{\mathrm{in}})\Delta\Theta}{8h_{\mathrm{s}}} \tag{15}$$

次に，計測した応力のデータから式(16)によって弾性パラメータを求める．

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{k} \tag{16}$$

なお，**k** と **A** は式(5), (8)から算出される計測値行列とξで表現される係数行列で，**D** は剛性テンソルの成分で構成された剛性マトリックスで，下記で表される．

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{1111} \\ D_{1133} \\ D_{3333} \\ D_{1212} \\ D_{2323} \end{pmatrix}$$

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

式(16)で求めた **D** を用いて，式(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ことができる．

$$E_{\mathrm{x'}} = \frac{2D_{1212}\left(D_{1111}D_{3333} + (D_{1111} - 2D_{1212})D_{3333} - 2D_{1133}^2\right)}{D_{1111}D_{3333} - D_{1133}^2}$$

$$E_{\mathrm{z'}} = \frac{D_{1111}D_{3333} + (D_{1111} - 2D_{1212})D_{3333} - 2D_{1133}^2}{2(D_{1111} - D_{1212})}$$

$$\nu_{\mathrm{x'}} = \frac{(D_{1111} - 2D_{1212})D_{3333} - D_{1133}^2}{D_{1111}D_{3333} - D_{1133}^2}, \quad \nu_{\mathrm{z'}} = \frac{D_{1133}}{2(D_{1111} - D_{1212})} \tag{17}$$

$$G_{\mathrm{x'}} = \frac{E_{\mathrm{x'}}}{2(1+\nu_{\mathrm{x'}})} = D_{1212}$$

$$G_{\mathrm{z'}} = D_{2323}$$

5. まとめ

岩盤を砕屑性の堆積岩や節理群を持つ火成岩のモデル化にしばしば用いられる面内等方弾性体と仮定した際に，原位置岩盤ねじりせん断試験を利用して，不連続面の走向・傾斜と5つの弾性パラメータを特定する方法を提案した．この方法ではまず，等方圧載荷時の主ひずみ方向

が異方性の方向と共軸になる性質を利用して不連続面（すなわち剛性の等方な面）の走向・傾斜を特定する．さらに，等方圧載荷時の直応力・せん断応力とねじりせん断時の直応力・せん断応力分布から5つの弾性パラメータを特定する．

今後の検討課題として，今回算出した中空円筒の弾性解と試験体形状及び地山の拘束条件の関係を調査する予定である．

参考文献

1) 富樫陽太，谷和夫：力学特性の異方性を調べることのできる新しい原位置岩盤試験方法の提案，第 13 回岩の力学国内シンポジウム，pp.589-594, 2013.
2) Goodman R.E.: Introduction to Rock Mechanics. *J. Wiley, New York*, 1989.
3) Oka F., Kimoto S., Kobayashi H., Adachi T.: Anisotropic behavior of soft sedimentary rock. *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.59-70, 2002.
4) Akai K., Yamamoto K., Arioka M.: Experimental research on the structural anisotropy of crystalline schist. *J. JSCE*, Vol.170, pp.23-36, 1969.
5) Amadei, B.: Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock, *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci*., Vol.33, pp.293-325, 1996.
6) 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. & Min. Sci*., Vol.39, pp.257-273, 2002.
7) 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.
8) 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.

A METHOD FOR DETERMINATION OF ANISOTROPIC PARAMETERS OF ROCK MASSES ASSUMING TRANSVERSELY ISOTROPIC BODY BY IN-SITU TORSIONAL SHEAR TEST FOR ROCK MASSES

Yota TOGASHI, Mamoru KIKUMOTO and Kazuo TANI

In-situ torsional shear test for rock masses was proposed by the authors. In this test, anisotropic parameters of rock masses can be determined by an analysis of stress distributions measured by separate load cell placed on top of the cylindrical specimen. For the development of testing methods, elastic solutions of hollow cylinderic area assuming transversly isotropy under an isotropic consolidation and a torsional shear loading are calculated. Then, a method to determine anisotropy of transversly isotropy by these elastic solutions is proposed. This method can determine the directions for anisotropy assuming transversely isotropic body and 5 elastic parameters of transversely isotropic body.