

# 端面摩擦が堆積軟岩の 応力ひずみ特性に与える影響

富樫 陽太<sup>1\*</sup>・菊本 統<sup>2</sup>・谷 和夫<sup>3</sup>・細田 光一<sup>4</sup>・小川 浩司<sup>4</sup>

<sup>1</sup>鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
<sup>2</sup>横浜国立大学 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)  
<sup>3</sup>東京海洋大学 学術研究院 (〒108-8477 東京都港区港南4-5-7)  
<sup>4</sup>応用地質株式会社 技術本部 (〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町1-66-2)  
 \*E-mail: togashi.yota.93@trti.or.jp

本研究では、スライダ機構やテフロンシートの有無により端面摩擦の違いを考慮した条件で異方剛性をもつ凝灰岩の圧密排水三軸圧縮試験を実施し、端面の条件の影響で変化する応力ひずみ特性を検討した。検討の結果、高さ直径比 $h/d = 2.0$ では通常の三軸試験の計測項目である直ひずみおよび体積ひずみに及ぼす端面摩擦の影響は小さいことがわかった。一方で、ひずみテンソルのせん断成分やその主軸方向は端面条件によって異なることがわかった。三軸試験によって異方性材料の正しい応力ひずみ特性を把握するには端面摩擦の低減が極めて重要なことを示した。

**Key Words :** Anisotropy, end restraint, tuff, triaxial test, bedding plane

## 1. はじめに

土や岩などの地盤材料は堆積構造や鉱物粒子の配向に応じた異方的な変形特性を示し<sup>1)</sup>、例えば、結晶片岩の超音波速度計測から鉱物粒子の配列の傾斜によりヤング率が最大で3倍異なることが示されている<sup>2)</sup>。地盤の変形異方性（異方剛性と卓越方向）は、掘削による応力解放に伴うトンネルの内空変位など構造物の変形に影響を及ぼすため、正確に把握することが肝要である。

三軸試験をはじめとする要素試験で剛性などの材料パラメータを正しく把握するには、供試体端面に作用する摩擦力の影響を極力、低減することが重要である。そこでかねてより試験結果に及ぼす供試体端面の拘束条件や供試体の高さ直径比 $h/d$ との影響が調べられてきた。Bishop and Green<sup>3)</sup>は、砂の供試体が $h/d < 2.0$ ならば端面摩擦の影響を受けてせん断抵抗角 $\phi$ を過大評価することを指摘した。この知見やTatsuoka et al.<sup>4)</sup>の検討をもとに土の三軸試験の基準<sup>5)</sup>は $h/d \geq 2.0$ の供試体の使用が規定されている。一方、岩石の基準<sup>6)</sup>でも $h/d = 2.0$ を標準とし、その許容範囲を $1.8 \leq h/d \leq 2.5$ と規定している。他にも、ベディングエラー<sup>例えは7)</sup>の影響を回避して、供試体の中央の変形を計測する方法が提案されている<sup>8)9)</sup>。

ところで、著者らは異方性材料が要素試験で示す変形挙動を調べている<sup>例えは10)</sup>。図-1のように、異方性材料の

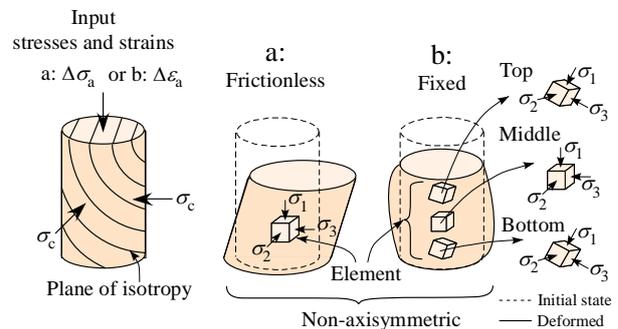


図-1 端面の条件で変化する面内等方性材料の変形と応力<sup>10)</sup>

応力増分とひずみ増分は非共軸なので、図-1(a)のように端面摩擦が無い条件でもひずみの主軸が回転してせん断変形を生じる。また、端面を載荷軸の垂直方向に完全固定した図-1(b)の条件では、端面近傍のひずみの主軸が載荷軸と一致するのに伴い応力の主軸が傾斜するが、供試体の中央では側方の拘束が無いので応力の主軸が逆に載荷軸に近づく。これに対し著者らは図-1(a)のような異方性供試体の要素応答を正確に計測するため、スライダ機構付きキャップを提案している<sup>11)12)</sup>。このキャップを実装した試験が異方性材料に有効なことは数値解析的に確認されているものの<sup>13)</sup>、その実験的な検証や、さらに、等方性材料を対象とした通常の三軸試験への適用性は確認されていない。

本研究では、層理を含み明確な異方剛性をもつ凝灰岩

(通称田下石)<sup>12)</sup>で、高さ直径比 $h/d=2.0$  ( $h=100\text{mm}$ ,  $d=50\text{mm}$ )の供試体を作製し、幾つかの端面条件(スライダ機構やテフロンシートの有無)に対して圧密排水三軸圧縮試験を実施し、結果を比較した。通常の三軸圧縮試験としての軸ひずみと軸差応力および体積ひずみの関係を比較し、著者らが提案した異方性材料のための三軸圧縮試験<sup>11)</sup>の結果が一般的な三軸試験の結果としても利用できるか議論する。さらに、供試体のひずみテンソルを算出し、端面摩擦によって異方性材料が受ける影響を実験的に明らかにする。

## 2. 三軸圧縮試験

### (1) 三軸圧縮試験の端面条件と試験ケース

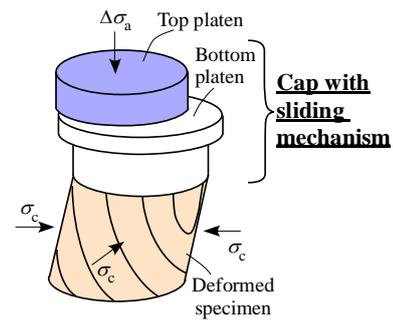
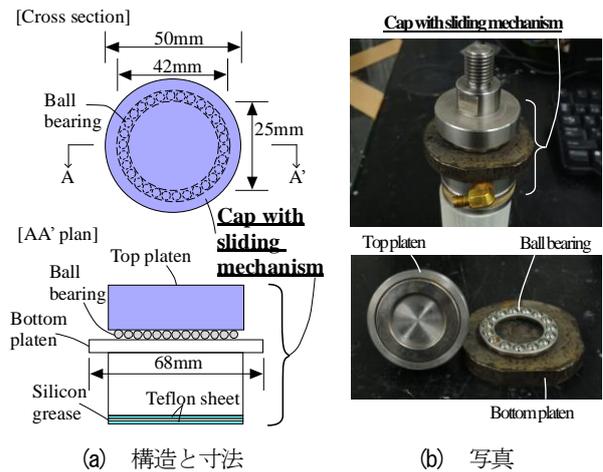
三軸圧縮試験において異方性供試体の要素応答を得るには、端面摩擦の低減が重要であり、そのため、著者らは低摩擦のスライド機構付きキャップを開発している<sup>12)</sup>。このキャップは、**図-2**に示すように上板と下板に分かれており、その間にボールベアリングが環状に設置され、供試体上端に荷重軸に垂直な方向への相対変位を自由とする構造である。これに加え、供試体とキャップおよびペダスタルの境界に低摩擦(静摩擦係数約0.04)のテフロンシートを2枚ずつ敷設し、シート間にはシリコングリスを塗布することで更に摩擦を低減している。このキャップを実装した三軸試験装置とキャップ周りの寸法を**図-3**に示す。

本研究では、**図-2**の端面条件を基本ケース(Case1)とし、**表-1**のようにスライダおよびテフロンシートの有無を考慮した4ケースに対して応力ひずみ関係におよぼす端面条件の影響を検討する。供試体は、栃木県宇都宮市内の地下約100 mから採取された凝灰岩を用いた。**図-4**に示すように明瞭な層理が端面から30°の傾斜をなすよう、30cm角のブロックから円柱供試体(直径 $d=50\text{mm}$ , 高さ $h=100\text{mm}$ )を4本採取した。供試体は、いずれも地盤工学会基準<sup>9)</sup>に従って試験前に飽和させており、湿潤密度は $\rho_t=1.71-1.72\text{ g/cm}^3$ でばらつきは少ない。なお、供試体の端面は平行度(JIS B 0621)を0.05mm以下に成形した。

### (2) 三軸試験の手順とひずみテンソルの計測方法

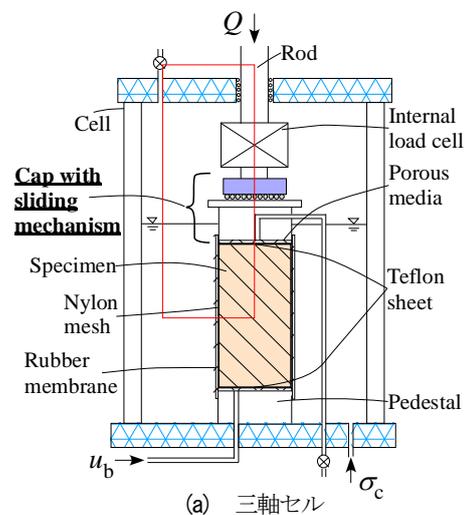
試験は、有効拘束応力 $\sigma'_c=1.0\text{MPa}$ (セル圧 $\alpha=1.2\text{MPa}$ , 背圧 $u_b=0.2\text{MPa}$ )で等方圧密し、ひずみの応答が一定値になった後、排水条件下で軸圧縮した。軸圧縮時の軸ひずみ速度は既往検討<sup>12)</sup>を参考に0.03%/minとし、単調に荷重を行った。

変形の計測は**図-5**のように、直交座標系(X, Y, Z)で微小ひずみテンソルを120°間隔で供試体側面に貼り付け

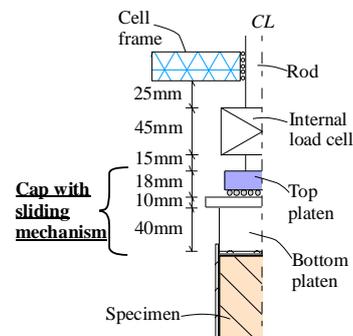


(c) キャップの動作

図-2 スライド機構付きキャップ<sup>12)</sup>



(a) 三軸セル



(b) (a)の赤線部の寸法

図-3 スライド機構付きキャップを含む三軸試験装置<sup>12)</sup>

た3枚の3ゲージ式ロゼットゲージから求めた。なお、ゲージの貼付位置は既往研究<sup>8,9)</sup>と同様に、端面の影響を最も受けにくい供試体の中央とした。

いま層理の傾斜 $\xi$  (本研究では $\xi=30^\circ$ )が $X$ 軸の回転のみで表されるように直交座標系 $(X, Y, Z)$ を設定すると、9枚のひずみゲージ (3枚のロゼットゲージ) で計測した直ひずみ成分 $x^n (n=1\sim 9)$ と列ベクトルで成分表示した微小ひずみテンソル $\varepsilon_{ij} (i, j = X, Y, Z)$ の関係は次式で表される<sup>14)</sup>。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{E}^T \mathbf{E})^{-1} \mathbf{E}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

ここに、

$$\mathbf{x}^T = (x^1 \ x^2 \ x^3 \ x^4 \ x^5 \ x^6 \ x^7 \ x^8 \ x^9)$$

$$\mathbf{E}^T = (\varepsilon_{XX} \ \varepsilon_{YY} \ \varepsilon_{ZZ} \ 2\varepsilon_{XY} \ 2\varepsilon_{ZY} \ 2\varepsilon_{ZX})$$

である。また、 $\mathbf{E}$ は9枚のひずみゲージの単位方向ベクトルから定まる9行6列の行列で、本研究の座標軸の設定において次式で与えられる。

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & -0.43 & 0 & 0 \\ 0.38 & 0.125 & 0.5 & -0.22 & -0.25 & 0.43 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.75 & 0.25 & 0 & 0.43 & 0 & 0 \\ 0.38 & 0.13 & 0.5 & 0.22 & -0.25 & -0.43 \end{pmatrix}$$

なお、式(1)は計測値 $\mathbf{x}$ からひずみテンソル成分 $\boldsymbol{\varepsilon}$ を最小二乗法により定めるので、ひずみゲージの枚数が多いほど電気ノイズなどの計測誤差の影響を低減する効果が期待できよう。

### 3. 試験結果と考察

表-2には等方圧密時に排水が概ね終わり、変形が収束した時点 $t$ の微小ひずみテンソルの成分を示す。直ひずみは圧縮方向を正とし、せん断ひずみは反時計回りを正としてテンソルで示す。

まず、通常の三軸試験の結果整理として、直ひずみを全ケースで比較すると、 $XX$ 成分は0.03% - 0.04%、 $YY$ 成分は0.48 - 0.71%、 $ZZ$ 成分は0.041 - 0.056%の値の範囲にあり、 $\xi = 30^\circ$ の供試体では概ね同程度の直ひずみが得られたことがわかる。

つぎに、異方性材料の観点で試験結果を考察すると、等方性材料では等方的な応力増加に対して等方的に変形するが、各ケースのひずみテンソルの $XX, YY, ZZ$ 成分

表-1 試験ケース (○:有, ×:無)

Case	Wet density $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Sliding mechanism	Teflon sheet
1	1.72	○	○
2	1.71	○	×
3	1.71	×	○
4	1.72	×	×

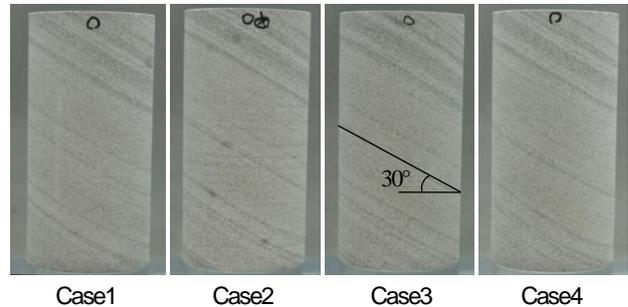


図-4 層理を含む田下石供試体

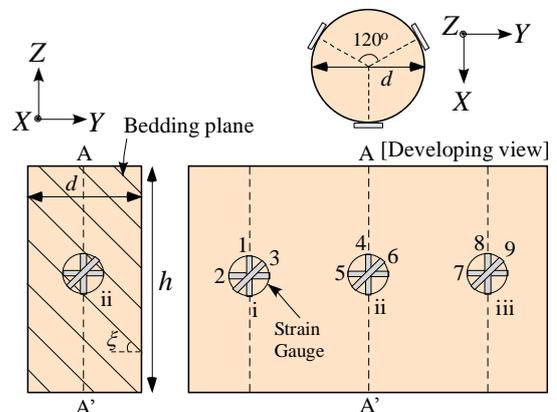


図-5 ひずみゲージの貼り方

(直方向の成分)は互いに異なることから、別報<sup>12)</sup>と同様に、層理を含む田下石が明確な異方性をもつことがわかる。また、スライダ機構とテフロンシートの両方を導入したCase 1に対し、他のケースではせん断ひずみ (ひずみテンソルの $XY, ZY, ZX$ 成分)が小さかった。これは、Case 1に比べて他のケースでは端面摩擦が大きく、図-1(b)のようにせん断変形が抑制されたためと考える。表-3には表-2のひずみテンソルから得た主ひずみを示す。各ケースの主ひずみの大きさは互いに異なり、ここでも田下石の異方性を確認できる。この3主ひずみの方向については、図-6のように、その方向への単位ベクトルの $XY$ 面と $ZY$ 面への射影により表示する。図-7には等方圧密時の変形が一定に落ち着いた時点の主ひずみ方向を示す。最大、中間、最小主ひずみ方向はそれぞれ赤線、緑線、青線で表示した。理論的には、等方圧密時の主ひずみ方向は異方性の卓越方向と一致し<sup>10)</sup>、当該試料では、最大主ひずみ方向の傾斜が層理の傾斜に応じて変化する<sup>12)</sup>。また、既往検討<sup>12)</sup>では最大主ひずみ方向と載荷軸方向( $Z$ 軸方向)がなす角度は層理の傾斜よりも1.3-1.5倍

表-2 等方圧密時のひずみテンソル

Case	$t$ (min)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\varepsilon_{ij}$ (%) ( $i, j = X, Y, Z$ )					
			XX	YY	ZZ	XY	ZY	ZX
1	61	1.00	0.040	0.066	0.041	-0.014	0.060	-0.028
2	76	0.99	0.038	0.071	0.049	-0.008	0.015	0.006
3	61	0.99	0.030	0.048	0.051	-0.006	0.018	0.005
4	75	1.00	0.034	0.052	0.056	-0.005	0.018	0.008

表-3 等方圧密時の主ひずみ

Case	$t$ (min)	$\sigma'_c$ (MPa)	$\varepsilon_i$ (%) ( $i = 1, 2, 3$ )		
			1	2	3
1	61	1.00	0.125	0.034	-0.012
2	76	0.99	0.080	0.048	0.030
3	61	0.99	0.068	0.038	0.023
4	75	1.00	0.072	0.044	0.026

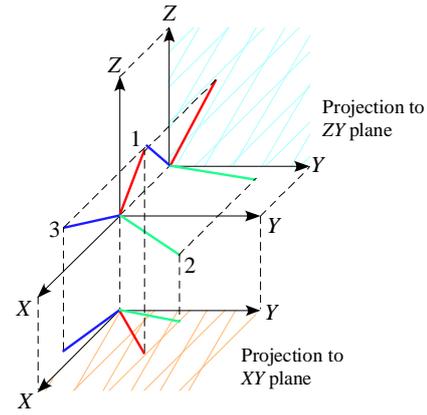


図-6 XY面, ZY面への主ひずみ方向 (1,2,3) の射影

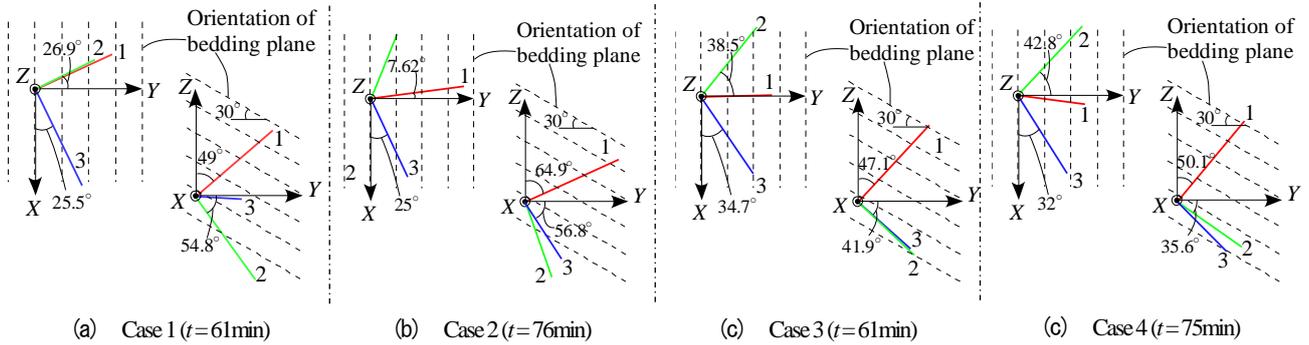


図-7 等方圧密時の主ひずみの方向

大きい値を示すことから、Case 1, 3, 4の各ケースの結果は妥当と考えられる。Case 2は最大主ひずみ方向の傾斜が層理の傾斜に対し2.2倍も大きい値を示した。

図-8にはCase 1~Case 4のそれぞれのケースに関する軸応力増分 $\Delta\alpha_x (=q)$ と直ひずみの各成分および体積ひずみを比較する。直ひずみ増分 ( $\Delta\varepsilon_x, \Delta\varepsilon_y, \Delta\varepsilon_z$ ) は全ケースでほぼ同じ値が荷重レベルに依らず得られた。体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_v$ も各ケースで概ね等しい値を示し、 $\Delta\varepsilon_z \div 0.5$ をピークとして、その後、体積膨張している。これらの結果からも、 $h/d=2.0$ の供試体を用いれば、端面の条件にほとんど依存しない直ひずみを得られることが示されたと言えよう。

つぎに、異方性特定のための三軸試験として結果を考察する。Case 1~Case 4のそれぞれのせん断ひずみ増分を図-9に比較すると、各ケースの応答が明確に異なる挙動を示す。特に、傾斜方位方向 (Y方向) のせん断ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{zy}$ は荷重初期の $\Delta\varepsilon_{zy} \leq 0.025\%$ では最も低摩擦な条件のCase 1が卓越するとともにケースごとの違いが著しい。つづいて、図-10には軸圧縮時のひずみ増分の主値を比較する。各ケースで概ね同様の応力ひずみ関係が得られている。図-11には荷重初期 ( $\Delta\alpha_x / \Delta\alpha_{x, \max} = 0.06$ ) における軸圧縮時のひずみ増分の主軸方向の射影を各ケース毎に比較する。端面摩擦の抑制が最も期待できるCase 1の最大主ひずみ方向の傾斜 (Z軸と1軸のなす角度) が

他のケースに比べ最も大きく、 $11.2^\circ$ 傾いている。この荷重レベルでは、Case 1, Case 2, Case 3, Case 4の順に最大主ひずみ方向の傾斜が小さくなる。傾斜が最も小さいケースは、スライダ機構とテフロンシートの両方を導入しないCase 4であり、これは、FEM解析<sup>13)</sup>と調和的な結果である。

以上のように、通常の三軸試験の計測項目 (直ひずみ、体積ひずみ) は、高さ直径比 $h/d=2.0$ の供試体 (地盤工学会基準を満たす) であれば、端面条件の影響は小さかった。このことから、著者らが提案する三軸試験<sup>11), 12)</sup>が通常の三軸試験としても正しい応力とひずみの関係を取得できることがわかった。一方、ひずみテンソルの分析からは、三軸試験時のせん断ひずみが端面摩擦の影響を受けて変化しひずみの主軸の傾斜が変化することもわかった。異方性特定法においては、ひずみの主軸方向を正確に特定することが重要となるため、端面摩擦を極力、低減する必要性が実験的に示されたと言えよう。

#### 4. まとめ

本研究では、明瞭な層理を含み異方剛性を持つ凝灰岩<sup>12)</sup>を用い、端面条件 (スライダ機構やテフロンシートの有無) をいくつか変えた圧密排水三軸圧縮試験を実施

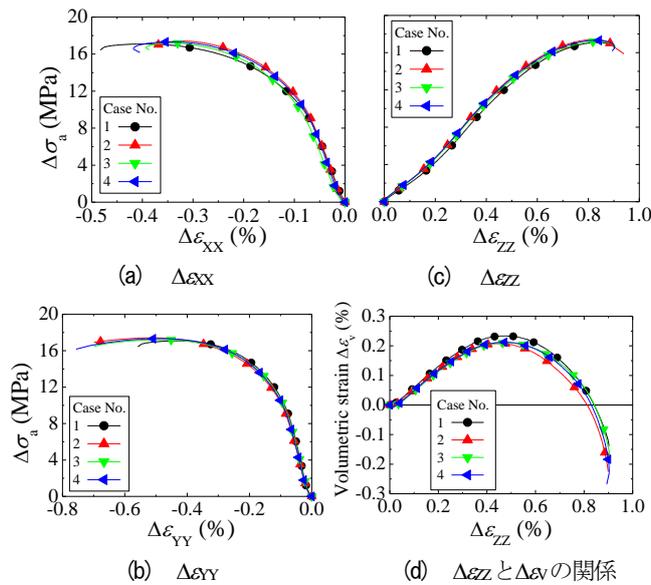


図-8 軸圧縮時の直ひずみ増分および体積ひずみ増分

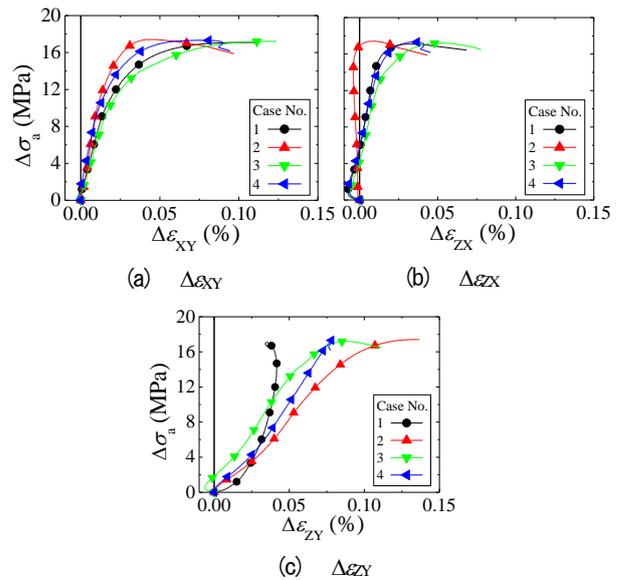


図-9 軸圧縮時のせん断ひずみ増分

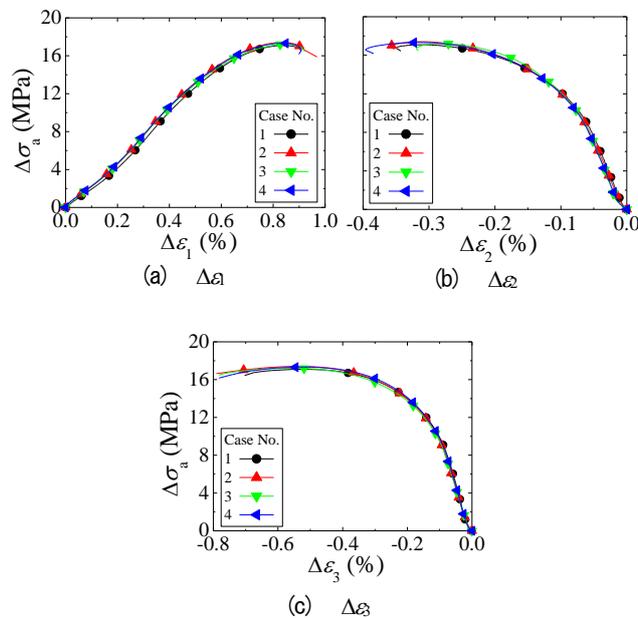


図-10 軸圧縮時のひずみ増分の主値

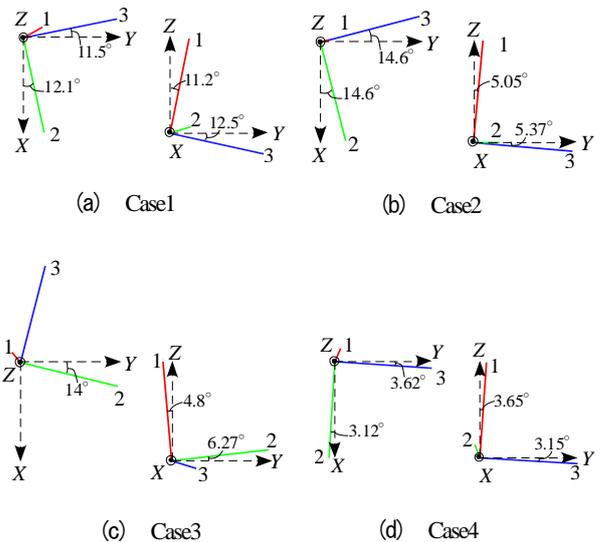


図-11 軸圧縮時のひずみ増分の主軸方向  
( $\Delta\sigma_a/\Delta\sigma_{a,max}=0.06$  時点)

した。

等方性材料を想定した計測項目の軸ひずみ、体積ひずみおよび軸応力の関係は、基準の範囲内の供試体寸法 ( $h/d=2.0$ ) では、端面条件にほとんど依存しないことがわかった。これにより、異方性特定のための三軸圧縮試験を用いても通常の三軸試験としての正しい試験結果が得られることが確認された。

一方、供試体のひずみテンソルを分析すると、実際は、直ひずみ以外のせん断ひずみが生じており、端面の条件の違いがひずみの主軸の回転に違いとして現れることがわかった。全ケースの中で最も低摩擦なスライダ機構

とテフロンシートの両方を備えたケース<sup>12)</sup>に対し、他のケースではひずみの主軸の傾斜が $5^\circ$ 以上異なっており、これにより、著者らの異方性特定法<sup>11)</sup>によって評価される異方剛性などが大きく影響を受けると考えられ、異方性の特定においては端面摩擦を極力、除去する必要性が実験的に示せたと言えよう。

今後、ここで議論した端面摩擦が異方剛性の特定法<sup>例えは11)</sup>に及ぼす影響を検討する予定である。

## 謝辞

宇都宮大学の清木隆文准教授と大谷石産業株式会社の

飯村淳氏には供試体の選定時にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) Boehler JP.: *Applications of Tensor Functions in Solid Mechanics*, pp. 3 – 11, Springer, 1987.
- 2) Akai K., Yamamoto K. and Arioka M.: Experimental research on the structural anisotropy of crystalline schists. *Proc. 2nd Congress of ISRM*, Vol. 2, pp. 181 – 186, 1970.
- 3) Bishop AW. and Green GE.: The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 4, pp. 243 – 266, 1965.
- 4) Tatsuoka F., Molenkamp F., Torii T. and Hino T.: Behavior of lubrication layers of platens in element test, *Soils Found.*, Vol. 24, No. 1, pp. 113 - 128, 1984.
- 5) 地盤工学会：土の圧密排水三軸圧縮試験方法, JGS0524-2009.
- 6) 地盤工学会：岩石の圧密排水三軸圧縮試験方法, JGS2534-2009.
- 7) Molenkamp F. and Tatsuoka F.: Discussion of“Compression of free ends during triaxial testing”, *J. Geotech Engrg.*, Vol. 109, No. 5, pp. 766-771, 1983.
- 8) Hoque E., Tatsuoka F. and Sato T.: Measuring anisotropic elastic properties of sand using a large triaxial specimen, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 19, No. 4, pp.411 – 420, 1996.
- 9) Besuelle P., Desrues J. and Raynaud S.: Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sand stone in a triaxial cell, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 37, pp. 1223 – 1237, 2000.
- 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*, 9(4), pp.479-493, 2014.
- 11) Togashi, Y., Kikumoto, M. and Tani, K.: An experimental method to determine the elastic properties of transversely isotropic rocks by a single triaxial test, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol.50, No.1, pp.1-15, 2017.
- 12) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫, 細田光一, 小川浩司：一回の三軸試験による凝灰岩の異方剛性の測定とその検証, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 12, No. 1, pp.123 -134, 2017.
- 13) 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫：境界条件に依存した異方性材料の非一様な変形特性と降伏強さ, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol. 72, No. 3, pp.283-293, 2016.
- 14) 荻原啓太, 菊本統, 谷和夫, 岡田哲実, 高倉望: 地中埋設型センサーによるひずみテンソルの計測法, 第 42 岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 274-279, 2014.

## INFLUENCE OF END RESTRAINT ON SEDIMENTARY SOFT ROCK DURING TRIAXIAL COMPRESSION

Yota TOGASHI, Mamoru KIKUMOTO, Kazuo TANI,  
Koichi HOSODA and Koji OGAWA

Four consolidated- drained triaxial tests using tuff specimen were conducted to compare stress- strain relationships due to end restraint. For conventional triaxial test, normal strains and volumetric strain of specimens with ratio of height and diameter,  $h / d = 2.0$  are almost not influenced whether with or without sliding mechanism and Teflon sheets. On the other hand, for evaluating strain tensor, each shear strain components get absolutely different values due to end restraints. Importance of decreasing end friction for anisotropic materials is shown.