

一回の三軸試験による岩石の異方剛性の測定法の開発

Development of a method for measuring anisotropy of rocks in stiffness by a single triaxial test

横浜国立大学 准教授 菊本 統 (研究代表者)

埼玉大学 助教 富樫 陽太 (共同研究者)

(研究計画ないし研究手法の概略)

岩盤は堆積構造に応じた異方性をもつため、それを正確かつ効率的に把握することが極めて重要である。岩盤の異方性は従来、様々な方向でサンプリングした岩盤コアを用いて多数回の載荷試験を実施することで調査されてきたが、試験回数に比例して費用や労力が増大する上、試験回数を増やしても幾らか推定精度が改善するだけで、必ずしも正確には異方性を特定できなかった。

これに対して代表者らは、異方性材料の応力とひずみの非共軸性と三軸試験での異方性材料の非対称に変形特性 (図1) に着目し、岩盤の異方剛性の方向とパラメータを「一回の試験」で「正確に決定」する全く新しい三軸試験を提案している。本研究では、明確な異方剛性をもつ岩石試料 (田下石, 相模原泥岩) を用いて提案する新型三軸試験の実証実験を行った。装置は低摩擦のスライダー機構 (図2) を備え、載荷軸に垂直な方向に自由に変位できるキャップ (図3) により供試体の一様かつ非軸対称な変形 (図1(a)) を促し、それを計測・分析することで異方性を特定する。供試体側面には9枚のひずみゲージ (図4) を貼り付けて計測データからひずみテンソルを算出し、剛性パラメータを求めた。提案手法の検証は、従来の方法に基づいて複数回の試験を行って推定した異方剛性のパラメータと、提案手法により一回の三軸試験求めた値を比較することで行った。

(実験調査によって得られた新しい知見)

凝灰岩 (田下石) を用いた検討では、層理に対し平行方向と垂直方向にサンプリングした供試体 (直径  $d = 50 \text{ mm}$ , 高さ  $h = 100 \text{ mm}$ ) の一軸圧縮試験から従来法を用いて異方剛性を求めると、層理方向のヤング率が垂

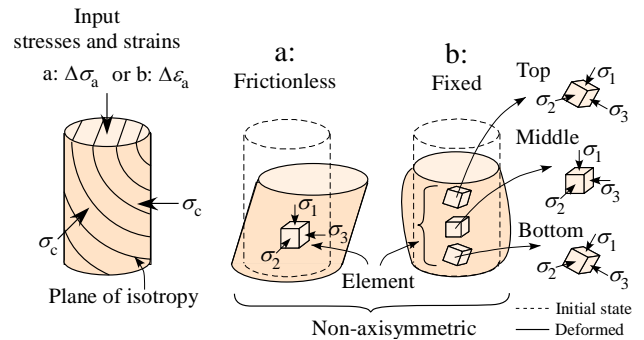


図1 三軸試験時の異方性岩石の変形



図2 三軸セル (左) と新しいキャップ (右)

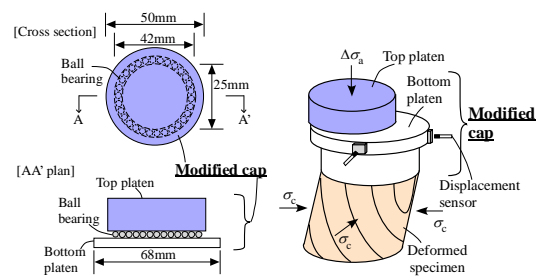


図3 キャップの構造 (左) と動き (右)

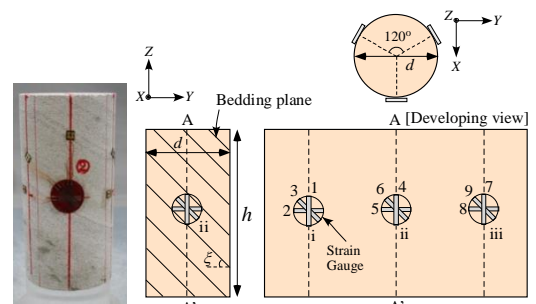


図4 ひずみゲージの貼り方

直方向よりも約1.5倍大きいことがわかった。端面から15°、45°、-45°傾斜した層理をもつ凝灰岩供試体の圧密排水三軸試験からは、等方圧密時に層理の傾斜に応じて主ひずみ方向が傾斜することを確認した(図5)。各ケースの等方圧密時の最大主ひずみ方向は概ね層理面の垂直方向を示し、等方圧密時の主ひずみ方向が層理に応じた異方性の方向と一致することを確認した。応力とひずみが非共軸になる様子は軸圧縮過程からも確認でき(図6)、等方圧密後からのひずみ増分の主軸方向は、層理の傾斜が15°のケースよりも45°、-45°のケースほうが大きく傾斜した。3ケース実施した三軸試験の各結果に提案手法を適用した結果、全てのケースで層理の傾斜と調和的な異方性の方向を取得でき、層理の傾斜が15°と45°のケースで概ね等しい異方剛性を特定できた(表1)。また、層理方向とその直角方向にサンプリングした2本の供試体の一軸圧縮試験から従来法を用いて測定した異方剛性は、著者らが提案した三軸試験による面内等方弾性の特定方法で定めた異方剛性と概ね調和的だった(表2)。層理の傾斜が-45°のケースについては、他のケースと異なりポアソン比が負の値に求まった。試料の不均質性の影響や一部のひずみゲージのデータに不具合があったものと考えられ、その妥当性については、今後、検討を進める予定である。以上のことから、提案手法を用いれば1回の三軸試験によって妥当な異方性の構成パラメータを特定できることが確認された。

つづいて、提案法による同様の三軸試験から図3のスライダーおよびテフロンシートの有無が凝灰岩の応力ひずみ関係に与える影響を検討した。供試体は層理が端面から30°の傾斜をなすように4本の円柱供試体をサンプリングした(表3)。軸圧縮時の各ケースの直ひずみ成分を図7に比較する。直ひずみ増分( $\Delta\epsilon_{xx}$ ,  $\Delta\epsilon_{yy}$ ,  $\Delta\epsilon_{zz}$ )は全ケースでほぼ同じ値が载荷レベルに依らず得られており、端面の条件にほとんど依存しないことがわかった。一方で、各ケースの

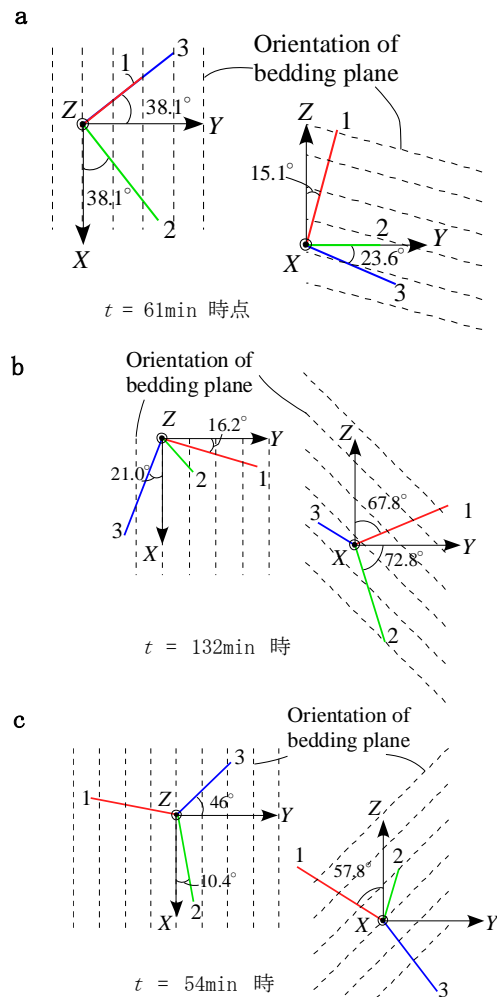


図5 等方圧密時の主ひずみの方向  
(a:  $\xi = 15^\circ$ , b:  $\xi = 45^\circ$ , c:  $\xi = -45^\circ$ )

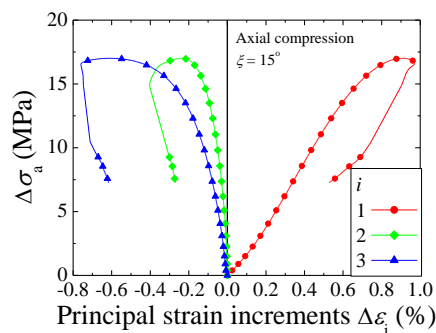


図6 軸圧縮時の3主ひずみ ( $\xi = 45^\circ$  の例)

表1 三軸試験による提案手法から特定した異方剛性

Testing condition	Orientations of bedding plane $\xi$ ( $^\circ$ )	$E_z$ (MPa)	$\nu_z$	$G_z$ (MPa)	$E_x$ (MPa)	$\nu_x$
	45	1804	0.090	1130	3490	0.260
	-45	959.8	0.207	1172	2597	-0.243

表2 複数の一軸試験で特定した異方剛性

Testing condition	Orientations of bedding plane $\xi$ (°)	$E_z$ (MPa)	$\nu_z$	$G_z$ (MPa)	$E_x$ (MPa)	$\nu_x$
		0 and 90	2020	0.193	1074	3060

表3 端面摩擦の有無を検討するケース

Case	Material	Dip angle $\xi$ (°)	Wet density $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	Sliding mechanism	Teflon sheet
1	Tage	30	1.72	✓	✓
2			1.71	✓	✗
3	Tuff	30	1.71	✗	✓
4			1.72	✗	✗

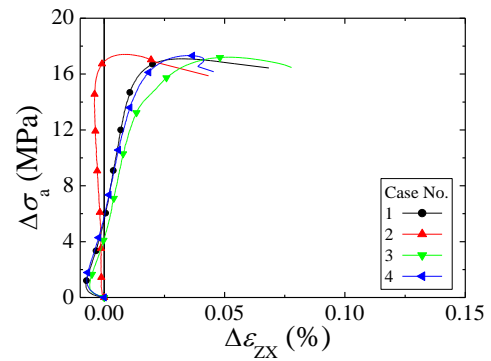
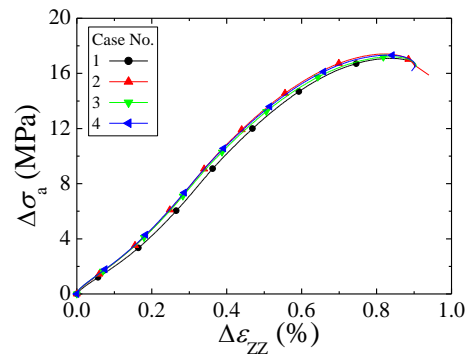
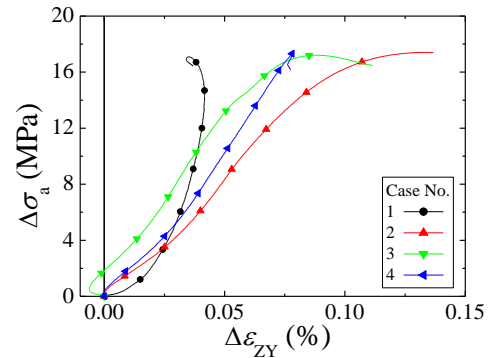
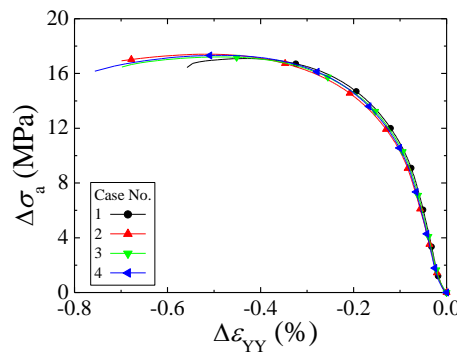
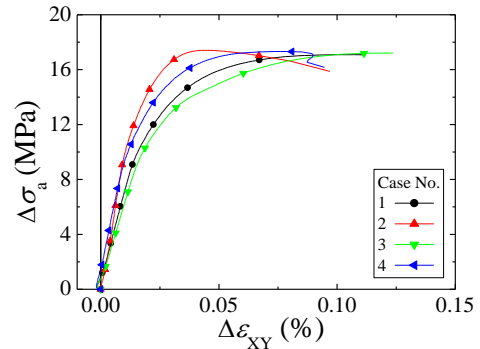
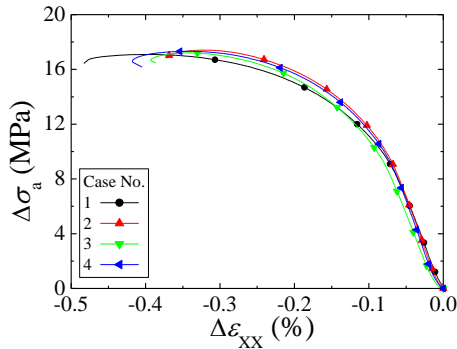


図7 軸圧縮時の直ひずみ増分  
(上: XX成分, 中: YY成分, 下: ZZ成分)

図8 軸圧縮時のせん断ひずみ増分  
(上: XY成分, 中: ZY成分, 下: ZX成分)

せん断ひずみ増分を図8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 $\Delta\epsilon_{ZY}$  は载荷初期の $\Delta\epsilon_{ZY} \leq 0.25\%$ 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。Case1のひずみ応答は理論計算による異方性材料本来の応答に近い挙動を示すことから堆積構造を有する堆積軟岩に対しては端面摩擦を極力除去する必要性が確認できた。

泥岩を用いた検討では、ブロックサンプルの三方向から供試体をサンプリングして (図9), 提案法にもとづく同様の三軸試験を行った。等方圧密と軸圧縮時の両方で計測したひずみテンソルから応力とひずみが明確に非共軸になる様子を確認できたことから、泥岩が異方的な変形特性をもつこ

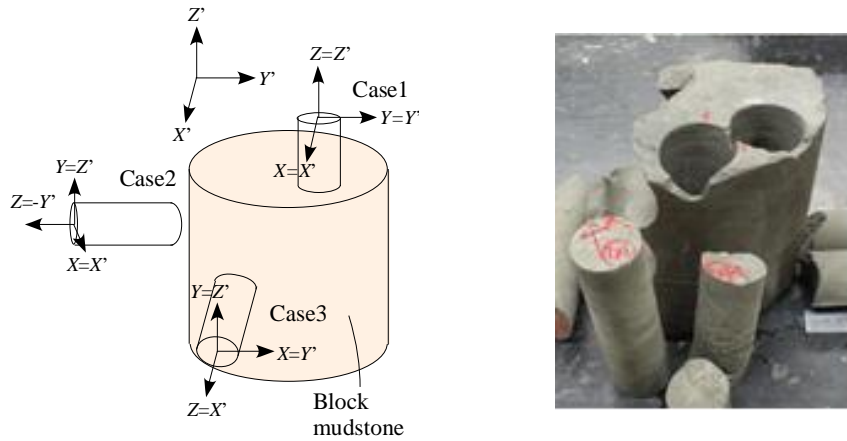


図9 ブロックサンプルから供試体の採取

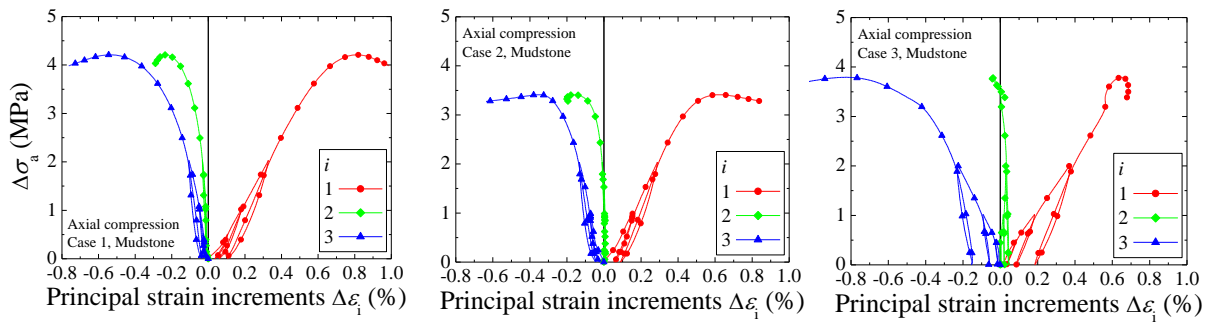


図10 軸圧縮時の3主ひずみ (左: Case1, 中: Case2, 右: Case3)

表4 特定した異方剛性

Case	Orientation of anisotropy		Anisotropic stiffness				
	$\zeta$ (°)	$\xi$ (°)	$E_z$ (MPa)	$\nu_z$	$G_z$ (MPa)	$E_x$ (MPa)	$\nu_x$
1	76	14	563	-0.08	519	308	0.42
2	24	106	379	0.13	461	722	-0.15
3	34	100	377	-0.04	191	654	-0.24

とがわかった (図10)。また、等方圧密時の主ひずみ方向から特定した異方性の卓越方向は、供試体や円柱のブロックサンプルでは目視確認できないが露頭では確認されている層理方向と概ね整合することがわかった。提案法で求めた泥岩の異方剛性は、サンプリング方向によらず概ね近い値を示すことから (表4)、泥岩においても本研究の妥当性を確認できた。

### (発表論文)

1. 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. 2, pp. 123-134, 2017年.
2. 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫, 細田光一, 小川浩司: 堆積軟岩の三軸試験と異方剛性の特定方法に与える端面摩擦の影響, 土木学会論文集C (地圏工学), vol. 74, no. 1, pp. 50-62, 2018年.
3. 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫, 細田光一, 小川浩司: 一回の三軸試験で特定した泥岩の異方弾性パラメータ, 材料, Vol. 67, No. 3, pp. 338-345, 2018年.
4. 富樫陽太, 菊本統, 谷和夫, 細田光一, 小川浩司: 端面摩擦が堆積軟岩の応力ひずみ特性に与える影響, 第45回岩盤力学に関するシンポジウム, 東京都, 2018年1月.