



|                  |                                                                                   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 大きな変形が発生したトンネルで採取された蛇紋岩の三軸圧縮試験における変形・破壊挙動                                         |
| Author(s)        | 池田, 奈央; 藤井, 義明; 尾上, 義将 他                                                          |
| Description      | 資源・素材学会平成30(2018)年度春季大会、2018年3月27日（火）～29日（木）、東京大学 本郷キャンパス、東京                      |
| Citation         | 資源・素材学会春季大会講演集(2018), 5(1), 1201-10-06                                            |
| Issue Date       | 2018-03-27                                                                        |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/68618">https://hdl.handle.net/2115/68618</a> |
| Type             | conference paper                                                                  |
| File Information | MMIJ2018.1201-10-06.pdf                                                           |



一般講演

## 資源開発技術・岩盤工学

2018年3月27日(火) 09:00 ~ 11:45 第2会場 (3号館3F, 33号講義室)

### [1201-10-06] 大きな変形が発生したトンネルで採取された蛇紋岩の三軸圧縮試験における変形・破壊挙動

#### Deformation and Failure Behavior of Serpentinite from a Largely Deformed Tunnel under Triaxial compression

○池田 奈央<sup>1</sup>、藤井 義明<sup>1</sup>、尾上 義将<sup>1</sup>、児玉 淳一<sup>1</sup>、福田 大祐<sup>1</sup> (1. 北海道大学)

○Nao Ikeda<sup>1</sup>, Yoshiaki Fuji<sup>1</sup>, Yoshimasa Onoe<sup>1</sup>, Junnichi Kodama<sup>1</sup>, Daisuke Fukuda<sup>1</sup> (1. Hokkaido university)

キーワード：蛇紋岩、三軸圧縮試験、コンプライアンス可変型構成方程式

Serpentinite, Triaxial Compression Test, Variable Compliance Type-Constitutive Equation

トンネルの施工中に蛇紋岩と遭遇した場合、トンネルに大きな変形が発生し施工が困難となる場合がある。このような変形メカニズムを理解する一助となすため、当該トンネルで採取された蛇紋岩の基礎的な力学物性値の評価、岩石の変形・破壊挙動を表すコンプライアンス可変型構成方程式に用いられるパラメータの導出、コンプライアンス可変型構成方程式による試験結果の再現を目的とした。それらを達成するために、当該トンネルの蛇紋岩を塊状蛇紋岩のみで構成される堅硬部と葉片状蛇紋岩や粘土状蛇紋岩を含む軟弱部の2種類に分類し、軟弱部に対してひずみ速度を一定の軸ひずみごとに入れ替える手法を用いる三軸圧縮試験を行った。試験の結果から、蛇紋岩の力学物性値や、コンプライアンス可変型構成方程式の定数の一つであり、岩石の時間依存性の程度を表すパラメータである $n$ を導出し、同手法を用いて行った一軸圧縮試験から得られた結果との比較を行った。

## 1. 背景および目的

トンネルの施工中に蛇紋岩と遭遇した場合、トンネルに大きな変形が発生し、施工が困難となる場合がある。このような変形のメカニズムを理解する一助となすため、当該トンネルで採取された蛇紋岩の基礎的な力学物性値の評価、岩石の変形・破壊挙動を表すコンプライアンス可変型構成方程式に用いられるパラメータの導出、コンプライアンス可変型構成方程式(大久保・福井, 1997)による試験結果の再現を試みている。ここでは、当該トンネルで採取された蛇紋岩について、ひずみ速度を一定の軸ひずみごとに入れ替える手法を用いて三軸圧縮試験を行った。蛇紋岩はその形態によって塊状蛇紋岩、葉片状蛇紋岩、粘土状蛇紋岩の三種類に分類した。そのうち、塊状蛇紋岩のみで構成される供試体を堅硬部、葉片状蛇紋岩や粘土状蛇紋岩を含む供試体を軟弱部と呼ぶことにし、三軸圧縮試験は軟弱部に対してのみ行った。

## 2. 軟弱部の三軸圧縮試験

### 2・1 供試体

当該トンネルより採取された直径 50 mm のボーリングコアを、乾式で長さ約 100 mm になるよう切斷した。切斷後は含水率を保つために、ラップをかけ真空パック中で、試験直前まで保存した。

### 2・2 実験条件

現地の応力・水圧の推定値より、封圧を 1.7, 3.4, 6.8 MPa の 3 種類とした。ひずみ速度は先行の一軸圧縮試験(池田ら, 2017 a, b)と同様に  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  と  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  とし、軸ひずみ 0.25% 毎に入れ替えて(Hashiba et al., 2006)、軸ひずみ 15% まで載荷した。軸ひずみは試験機のストローク、横ひずみはシリンジポンプ内の水量の変化より計測した。室温は 295 K に制御した。供試体は不飽和のまま間隙水圧をかならずに排水状態で載荷した。

軸載荷の前に供試体を圧密した。圧密に必要な時間  $T$  の推定には 3t 法を採用した。3t 法では体積ひずみ-圧密時間(log) グラフにおいて最大勾配が現れるまでの時間を  $t$  とし、求める圧密時間を  $T = 3t$  とする。図 2.1 の例では  $t = 120 \text{ min}$  であるため、圧密のための最低時間は  $3t = 360 \text{ min} = 6 \text{ h}$  であるが、試験の都合上原則 18 h として試験を実施した。圧密時に排水がみられたため、軸圧縮する直前の供試体は飽和していたと判断される。

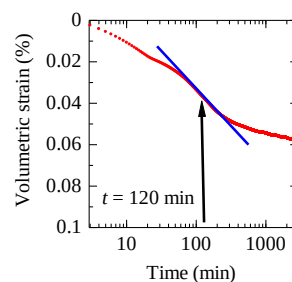


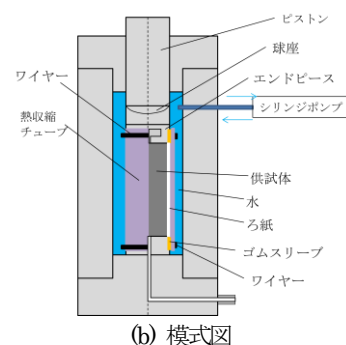
図 1 圧密時のグラフ(供試体 31 の例)

### 2・3 実験装置

供試体は三軸ベッセル(図 2a)にセットして試験に供した。エンドピースの供試体との接触部には、排水孔が設けられている(図 2b)。試験中に排水孔から供試体が流出するのを防ぐために、エンドピースと供試体の間には濾紙を 5~10 枚挟んだ。排水を誘導するために供試体側面に濾紙を巻いた。封圧水が供試体内に侵入しないように、エンドピースはゴムスリーブを介して、熱収縮チューブで被覆し、ワイヤーで締結(図 3)した。



(a) 写真

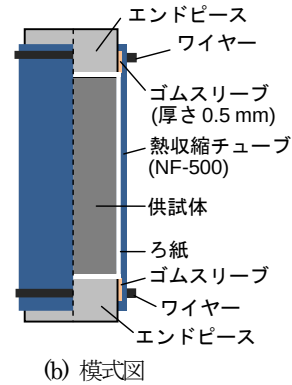


(b) 模式図

図 2 セットされた供試体



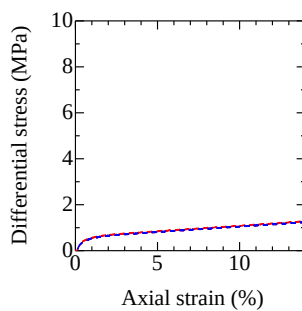
(a) 写真



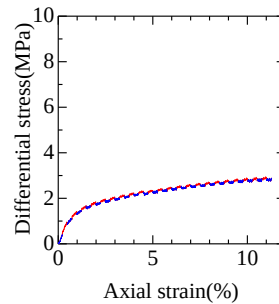
(b) 模式図

図3 被覆された供試体

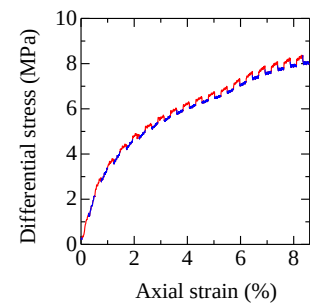
**2・4 実験結果** 実験は供試体 31~42 の 12 回行い、正確なデータを求めるために実験方法は順次改良した。供試体 31~33 までは熱収縮チューブと供試体に巻くための濾紙を使わず、供試体とエンドピースをゴムスリーブで覆っていた。供試体 34 から供試体に濾紙を巻き付け、熱収縮チューブを使用した。供試体 34 では封圧を大きくしたことで、供試体がエンドピースとの間の濾紙を突き破って、下蓋の排水孔から流出したのでこの部分に挟む濾紙を 10 枚に増やした。供試体 37~39 はシリジポンプ内の水が満タンとなり試験中封圧を下げるができなくなり失敗となった。よって供試体 37~39 を除いた 8 つの実験データに関して以下に示す。応力-軸ひずみ線図の例を図 4 に示す。封圧水の侵入により供試体が破壊した供試体 34 を除くと、応力-軸ひずみ線図は上に凸で明らかなひずみ硬化型で降伏点は認められないため、軸ひずみ 10%における軸応力値を強度とみなした。



(a) 封圧 1.7 MPa (供試体 31)



(b) 封圧 3.4 MPa (供試体 42)



(c) 封圧 6.8 MPa (供試体 40)

図4 応力-ひずみ線図の例

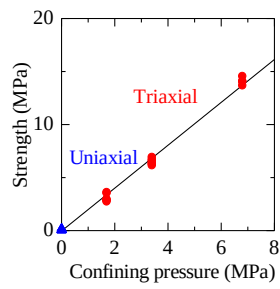
### 3. 封圧と諸物性値の関係

8 つの実験データから強度を算出し、一軸圧縮試験のデータを加え、 $x$  軸を封圧、 $y$  軸を強度 (全応力) としてプロットした (図 5a)。これから粘着力  $c$  と摩擦角  $\phi$  を求めると  $c = -0.035$  MPa、 $\phi = 19.8^\circ$  となった。粘着力を 0 と仮定すると、摩擦角は  $\phi = 19.7^\circ$  となった (図 5b)。

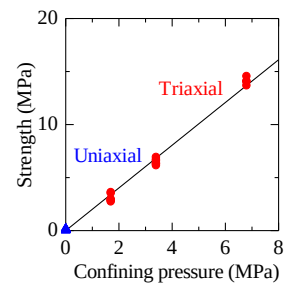
Okubo et al. (2013) では  $n$  は封圧とともに大きくなるとされているが、三軸圧縮試験の結果ではそのような傾向はみられなかった (図 6a)。しかし、一軸圧縮試験のデータとともにプロットすると、封圧とともに増加する傾向がみられた (図 7a)。

初期ヤング率は封圧と強い正の相関を示した (図 6b, 7b)。これは供試体が封圧により圧密されたためと考えられる (図 8)。50% 接線ヤング率は、三軸のみのデータだと封圧と強い正の相関を持つように見える (図 6c) が、一軸のデータを加えると相関は弱く、やや増加する傾向がある程度である (図 7c)。

封圧の値に関わらずポアソン比は 0.5 程度であった (図 9)。これは、封圧が一軸圧縮強度 (10~200 kPa、池田ら、2017a, b) よりはるかに大きく、塑性流動しているためと思われる。

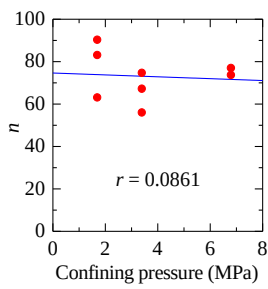


(a) 粘着力を0と仮定しない場合

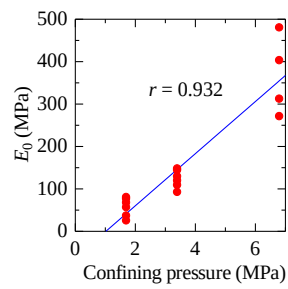


(b) 粘着力を0と仮定した場合

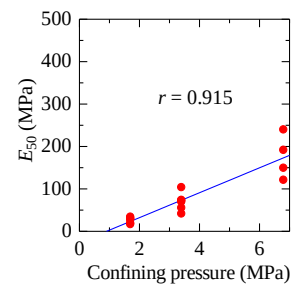
図5 封圧と強度との関係



(a)  $n$

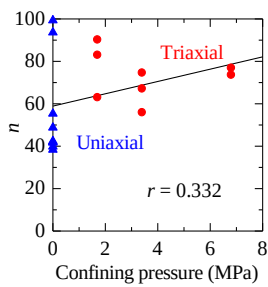


(b) 初期ヤング率

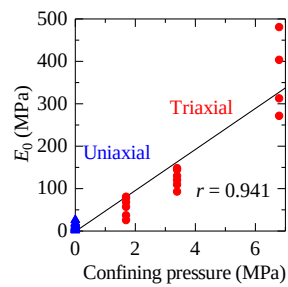


(c) 50%接線ヤング率

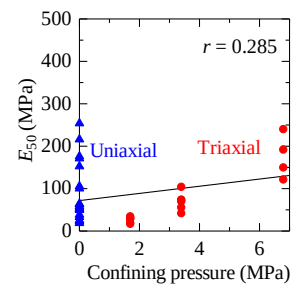
図6 封圧と諸物性値との関係



(a)  $n$



(b) 初期ヤング率



(c) 50%接線ヤング率

図7 封圧と諸物性値との関係

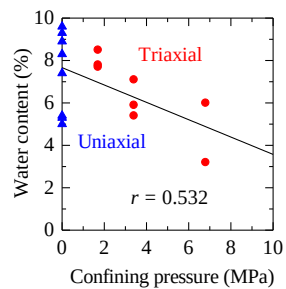
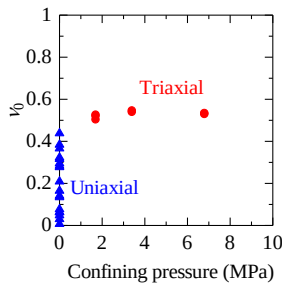
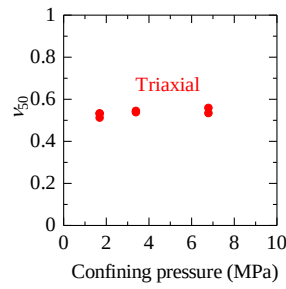


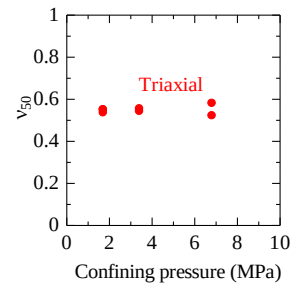
図8 封圧と試験後の含水率との関係



(a) 初期ポアソン比



(b) 50%接線ポアソン比 (ひずみ速度 10⁻⁴ s⁻¹)



(c) 50%接線ポアソン比 (ひずみ速度 10⁻⁴ s⁻¹)

図9 封圧とポアソン比との関係

#### 4. 試験結果の計算による再現

##### 4・1 コンプライアンス可変型構成方程式

試験結果を再現するために、大久保・福井（1997）によって提案されたコンプライアンス可変型構成方程式（式(1)）を用いた。この構成方程式は時間とともに増加するコンプライアンス（ヤング率の逆数）で岩石の変形・破壊挙動を表す。

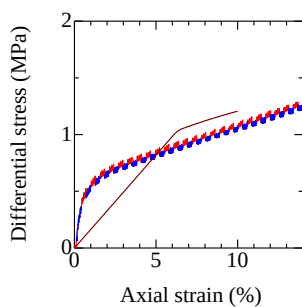
$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \frac{1}{t_0} \left( \frac{m}{n+1} \right)^{\frac{m}{n-m+1}} (\lambda^*)^m (\sigma^*)^n \quad (1)$$

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (2)$$

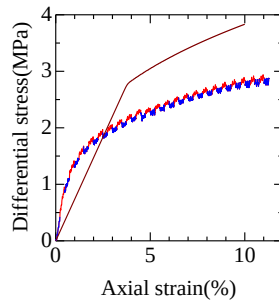
$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (3)$$

ここで、 $\lambda^*$ は正規化したコンプライアンス、 $\lambda_0$ はコンプライアンスの初期値（今回の計算では50%接線ヤング率を用いた）、 $\nu$ はポアソン比、 $\nu_0$ はポアソン比の初期値、 $\sigma$ は応力、 $\sigma^*$ は最大差応力で正規化された応力、 $t_0$ は時定数（軸ひずみ速度 10⁻⁵ s⁻¹の時にピーク応力に達するまでの時間）、 $n$ は変形の時間依存性を表すパラメータ、 $m$ は延性の程度を表すパラメータである。

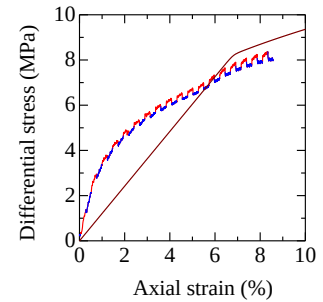
試験の結果から求めたパラメータを構成方程式に代入し、ひずみ速度を 10⁻⁵ s⁻¹ として時間刻み 0.1 s で逐次計算を行った。三軸圧縮試験からは  $t_0$ 、 $m$  を求めることができないため、 $t_0$ は一軸圧縮試験の結果より求められた値を、 $m$ には  $m = -0.5n$  をそれぞれ代入した。



(a) 封圧 1.7 MPa (供試体 31)



(b) 封圧 3.4 MPa (供試体 42)



(c) 封圧 6.8 MPa (供試体 40)

図10 計算による再現結果の例

(1)式では、代入した強度に至るまでの応力—ひずみ線図は直線であらわされるため、ひずみ 10%における応力を $\alpha$ として計算すると応力—ひずみ線図の挙動を再現することができない（図10）。これを改善するために、降伏点のように見える点（図11中の緑の点）の応力を $\alpha$ 、原点と緑の点を結ぶ直線の傾きを $E_0$ とみなした。 $m$ の値として、 $-1 < m/n < 0$ の範囲のうち応力—ひずみ線図の近似の程度がよい値を採用する（表1）と、三軸圧縮試験の応力—ひずみ線図をあらかじめ再現することができた（図12）。

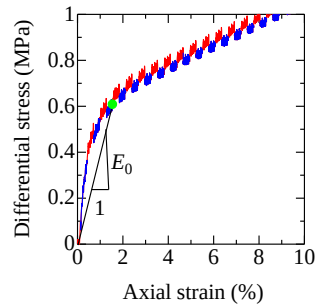
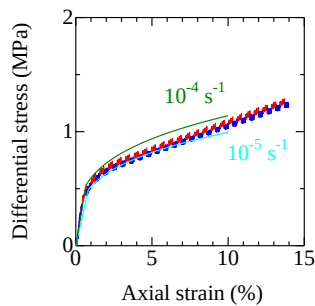


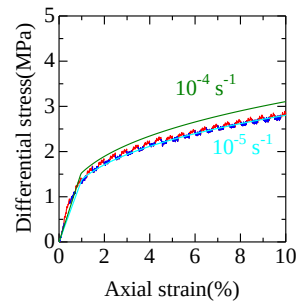
図 11  $\alpha$  と  $E_0$  の決定(供試体 31)

表 1 軟弱部の三軸圧縮試験再現のための各定数

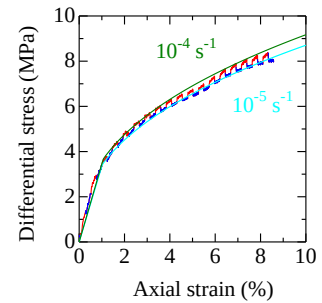
| 供試体 | 封圧[MPa] | $n$  | $m$   | $m/n$ | $t_0$ [s] | $\alpha$ [MPa]                    |                                   | $E_0$ [MPa]                       |                                   |
|-----|---------|------|-------|-------|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|     |         |      |       |       |           | ひずみ速度<br>$10^{-4} \text{ s}^{-1}$ | ひずみ速度<br>$10^{-5} \text{ s}^{-1}$ | ひずみ速度<br>$10^{-4} \text{ s}^{-1}$ | ひずみ速度<br>$10^{-5} \text{ s}^{-1}$ |
| 31  | 1.7     | 63.0 | -25.2 | -0.40 | 1850      | 0.488                             | 0.471                             | 80.1                              | 59.8                              |
| 42  | 3.4     | 74.6 | -33.6 | -0.45 | 1850      | 1.42                              | 1.34                              | 156.7                             | 137.4                             |
| 40  | 6.8     | 73.6 | -51.5 | -0.70 | 1850      | 3.45                              | 3.33                              | 345.7                             | 335.0                             |



(a) 封圧 1.7 MPa(供試体 31)



(b) 封圧 3.4 MPa(供試体 42)



(c)封圧 6.8 MPa(供試体 40)

図 12 計算による再現結果の例

## 5. 結言

大きな変形が生じたトンネルで採取された蛇紋岩の、基礎的な力学物性値の評価、岩石の変形・破壊挙動を表すコンプライアンス可変型構成方程式に用いられるパラメータの導出、コンプライアンス可変型構成方程式による試験結果の再現を目的として、当該トンネルの蛇紋岩の軟弱部に対して、ひずみ速度を一定の軸ひずみごとに入れ替える手法を用いる三軸圧縮試験を行った。応力-ひずみ線図は上に凸で応力のピークや明瞭な降伏点は認められず、軸ひずみ 10%の応力を強度とみなし、粘着力を 0 と仮定すれば摩擦角は  $19.7^\circ$  となった。 $n$  は 60~90 程度と一軸試験の軟弱部と近い値を示し、封圧と共にやや増加する傾向を示した。初期ヤングは約 20~500 MPa で、封圧と強い正の相関を示した。50%接線ヤング率は約 20~250 MPa で、封圧と弱い正の相関を示した。試験から求めたパラメータでは応力-ひずみ線図をうまく近似できなかったが、降伏点の応力とそれまでの割線ヤング率を用いると三軸圧縮試験の応力-ひずみ線図をあらかた再現することができた。

今後は三軸クリープ試験の実施と、今までに行った結果との比較、また、コンプライアンス可変型構成方程式を用いたトンネル変形の三次元数値解析の実施を予定している。

## 参考文献

- 池田奈央・児玉淳一・藤井義明・福田大祐(2017a), 大きな変形が発生したトンネルで採取された蛇紋岩の一軸圧縮応力下における変形・破壊挙動、資源・素材学会北海道支部春季講演会講演要旨集, pp. 1-2
- 池田奈央・児玉淳一・藤井義明・福田大祐(2017b), 大きな変形が発生したトンネルで採取された蛇紋岩の一軸応力状態における変形・破壊挙動とコンプラ

イアンス可変型構成方程式による再現、資源・素材講演集 2017(札幌)、PY2-81

大久保誠介・福井勝則(1997)、コンプライアンス可変型構成方程式の定数について、資源と素材、Vol. 113, pp. 561-564

Hashiba, K., Okubo, S. and Fukui, K. (2006), A New Testing Method for Investigating the Loading Rate Dependency of Peak and Residual Rock Strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, pp. 894-904

Okubo S, Hashiba K. and Fukui K. (2013), Loading Rate Dependency of the Strengths of Some Japanese Rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 58, pp. 180-185