HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	大きな変状が発生した蛇紋岩中のトンネルでの応力解析に用いるパラメーターの値に関する提案
Author(s)	尾上, 義将; 池田, 奈央; 金井, 康将 他
Description	一般社団法人資源・素材学会 平成31(2019)年度 春季大会、2019年3月6日～8日、千葉工業大学 津田沼キャンパス、習志野市
Citation	資源・素材講演集, 6 (2019) (1 (春・千葉))
Issue Date	2019-03-06
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73953
Type	conference paper
File Information	02_2K0101-10-10.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

一般講演
資源開発技術／開発機械／岩盤工学
2019年3月7日(木) 09:00 ～ 11:45 第1会場 (6号館 3階 631講義室)

[2K0101-10-10] 大きな変状が発生した蛇紋岩中のトンネルでの応力解析に用いるパラメーターの値に関する提案
Proposal on Parameters for Stress Analysis of a Deformed Tunnel in Serpentinite

○尾上 義将[1]、池田 奈央[1]、金井 康将[1]、藤井 義明[1]、児玉 淳一[1]、福田 大祐[1] （1. 北海道大学）
○Yoshimasa Onoe[1], Nao Ikeda[1], Yasumasa Kanai[1], Yoshiaki Fujii[1], Zyuniti Kodama[1], Daisuke Fukuda[1] （1. Hokkaido University）

キーワード：変状、トンネル、蛇紋岩、コンプライアンス可変型構成方程式、応力解析
Deformation, Tunnel, Serpentinite, Variable Compliance Type-Constitutive Equation, Stress Analysis

トンネル工事では蛇紋岩と遭遇した際に大きな変形が発生し、施工が困難となる場合がある。このメカニズムを理解する一助となすために、コンプライアンス可変型構成方程式を組み込んだトンネルの応力解析を予定している。そこで、構成方程式に用いるパラメーターを求めるために、二種類のひずみ速度（主に10^{-5} s^{-1}、10^{-4} s^{-1}）を一定軸ひずみ毎に入れ替えて載荷する方法を用い、主に粘土状の蛇紋岩について一軸・三軸圧縮試験を行った。また、定ひずみ速度での載荷中に、破壊直前で定応力制御に切り替えることにより一軸クリープ試験も実施した。試験で得られた応力ーひずみ線図をコンプライアンス可変型構成方程式であらかた再現できることを確認した。応力解析には、初期ヤング率として10^{-5} s^{-1}における三軸圧縮試験の50%ヤング率の平均値240 MPa、初期ポアソン比は三軸圧縮試験で0.5前後となったが、別の研究機関での解析に用いられている0.4、粘着力・内部摩擦角として10^{-5} s^{-1}の一軸圧縮試験・三軸圧縮試験の結果から26.4 kPaと8.2度、定数*a*、時間依存性の程度を決める定数*n*、ピーク強度以降の応力ーひずみ線図の傾きを決める定数*m*については、三軸圧縮試験の応力ーひずみ線図がよく再現できた1×10^{-4} s^{-1}、40、-20を提案した。

©一般社団法人資源・素材学会

1. はじめに

トンネル工事では蛇紋岩と遭遇した際に大きな変形が発生し、施工が困難となる場合がある。このメカニズムを理解する一助となすために、コンプライアンス可変型構成方程式（大久保・福井、1997）を組み込んだトンネルの応力解析を予定している。そこで、構成方程式に用いるパラメータを求めるために、二種類のひずみ速度を一定軸ひずみ毎に入れ替えて載荷する方法を用い、主に粘土状蛇紋岩について一軸・三軸圧縮試験を行った。また、定ひずみ速度での載荷中に破壊直前で定応力制御に切り替えることにより一軸クリープ試験も実施した。試験結果に基づいて、パラメータを提案する。

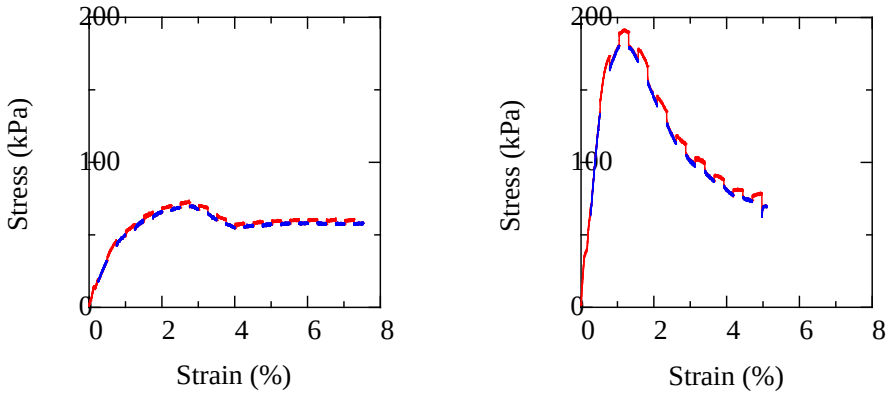
2. 一軸圧縮試験

2.1 実験結果

採取された直径 50 mm のボーリングコアのうち軟弱でかつ連続し、試験が可能そうな部分をサンプリングし、水を使わずに長さ約 100 mm に切断した。ポリエチレン製エンドピースを取り付け、乾燥を防ぐために側面をポリ袋（4 号）で覆い試験に供した。

ひずみ速度 10^{-4} s^{-1}と 10^{-5} s^{-1}（os01 と os02 は 10^{-3} s^{-1}と 10^{-5} s^{-1}）を軸ひずみ 0.25%ごとに入れ替えて（Hashiba et al., 2006）、軸ひずみ 7.5%まで載荷した。軸ひずみは試験機のストローク、径ひずみはダイヤルゲージを用いて計測した。室温は 295 K に制御した。

応力ーひずみ線図の例を図 1 に示す。



(a) os3 応力ーひずみ線図　　(b) os8 応力ーひずみ線図

図 1 一軸圧縮試験の応力ーひずみ線図の例

2.2 構成方程式による再現

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を用いた（式(1)）。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。

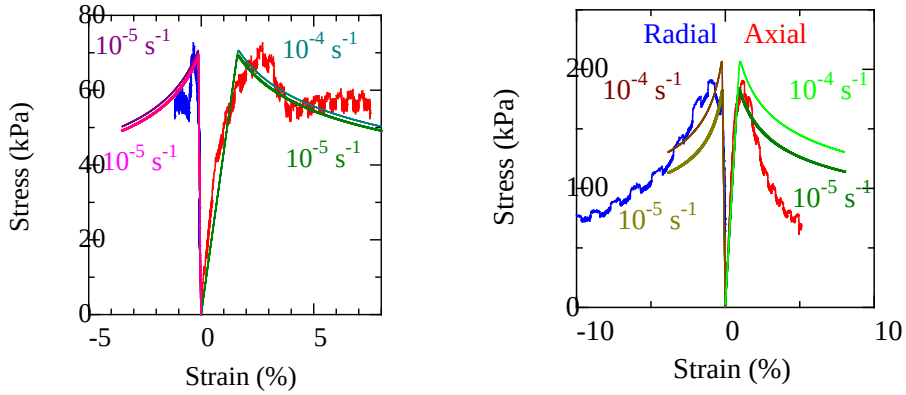
$$\frac{\mathrm{d}\lambda^*}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{t_0}\left(\frac{m}{n+1}\right)^{\frac{m}{n-m+1}} (\lambda^*)^m (\sigma^*)^n \tag{1}$$

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5-\nu_0}{\lambda^*} \tag{2}$$

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{\lambda_0} \tag{3}$$

ここで、λ^*は正規化したコンプライアンス、λ_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）、νはポアソン比、ν_0はポアソン比の初期値（今回の計算では 50%接線ポアソン比を用いた）、σは応力、σ^*は UCS 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。

試験の結果から計算した各パラメータ（表 1）を構成方程式に代入し、時間刻み 0.1 s で逐次計算を行ったところ、応力やひずみの挙動をあらかた再現することができた（図 2）。



(a) os3　　(b) os8

図 2 試験結果と計算結果の比較の例

表 1 一軸圧縮試験の再現に用いたパラメータ

供試体	n	m	初期ヤング率 E_0 [MPa]	代表時間 t_0 [s]	定数 a [s^{-1}]	初期ポアソン比 ν_0	最大主応力 σ_c [kPa]	m/n
os3	122.4	22	4.31	2500	2.75×10^{-4}	0.067	69	0.18
os8	39.8	7.6	21.43	1050	6.48×10^{-4}	0.232	181	0.19

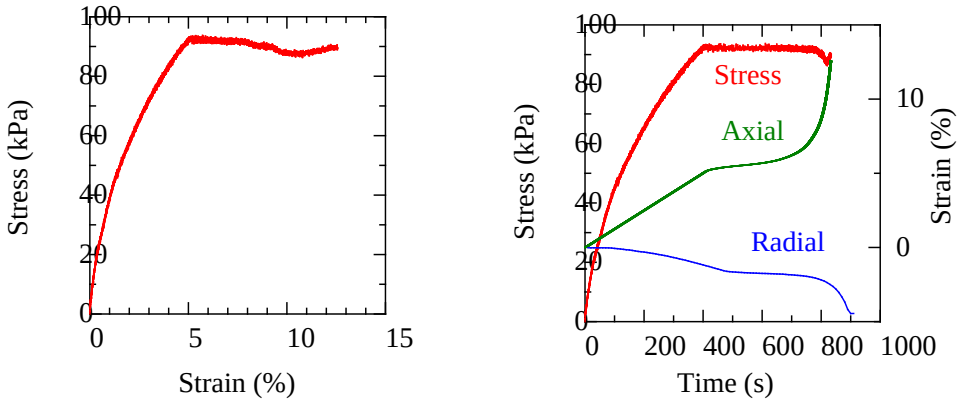
3. 一軸クリープ試験

3.1 実験結果

一軸圧縮試験とは別のボーリングコアのうち、連続していて試験が可能そうな部分をサンプリングした。供試体の作成については、一軸圧縮試験と同様である。

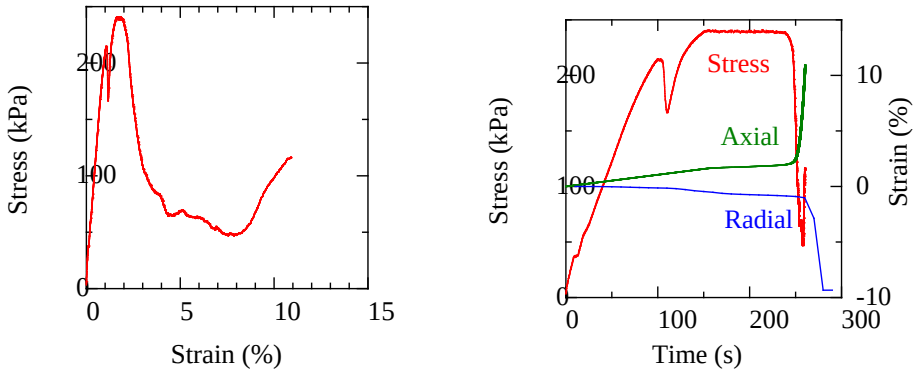
ひずみ速度 10^{-4} s^{-1}で載荷し、供試体が破壊する直前で定応力制御に切り替え、最長で 12 日間載荷を行った。そのほかの実験方法や条件は一軸圧縮試験と同じである。

軟弱部を中心に 18 回の試験を行ったが、多くの供試体が定応力制御に移行する前に破壊に至ったり、定応力制御にしたものの試験中には破壊に至らなかったりした。破壊に至った例を図 3，4 に示す。



(a) 応力―ひずみ線図　　(b) 応力とひずみの経時変化

図 3 供試体 c04 の結果



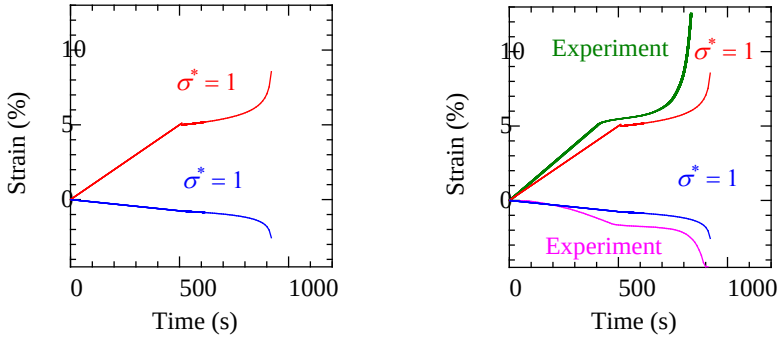
(a) 応力―ひずみ線図　　(b) 応力とひずみの経時変化

図 4 供試体 c15 の結果

3.2 構成方程式 による再現

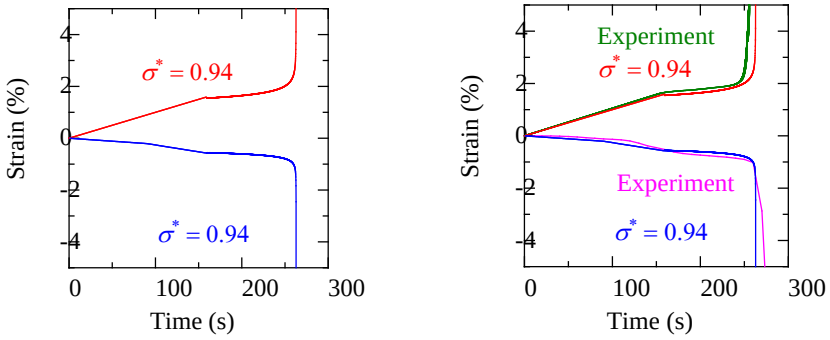
一軸クリープ試験の結果より、各供試体の 50%接線ヤング率と 50%接線ポアソン比を求め、それぞれ E_0、ν_0とした。n、m、t_0は一軸圧縮試験の結果から求めた値の平均値を用いることとした。UCS についてもクリープ試験の結果からは読み取ることができないため、一軸圧縮試験の結果（軟弱部平均 90 kPa 程度、堅硬部平均 140 MPa 程度）を参考にして、適当な値になるよう設定した。

これらの値（表 2）を式に代入し、定応力制御に切り替えた軸ひずみまでは 10^{-4} s^{-1}の定ひずみ速度の載荷を、その後定応力での載荷を時間刻み 0.1 s で逐次計算したところ、n、m、t_0のパラメータを変更しなくても、UCS を変化させることで実験結果をあらかた近似することができた。



(a) 計算結果　　(b) 実験結果との比較

図 5 供試体 c04 の計算結果



(a) 計算結果　　(b) 実験結果との比較

図 6 供試体 c15 の計算結果

表 2 一軸クリープ試験の再現に用いたパラメータ

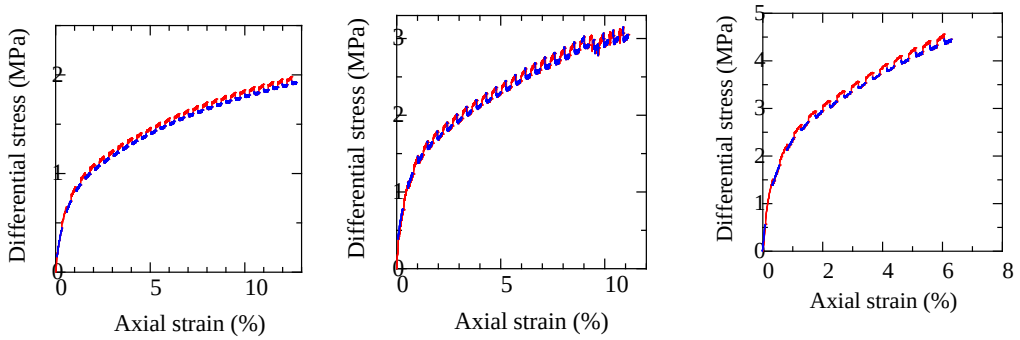
供試体	n	m	初期ヤング率 E_0	代表時間 t_0	定数 a	初期ポアソン比 ν_0	最大主応力 σ_c	σ^*
			[MPa]	[s]	[s^{-1}]		[kPa]	
c04	62	9	1.8947973	2700	2.678×10^{-4}	0.2088	0.0966	1
c15	62	9	30	2700	2.678×10^{-4}	0.23	0.255	0.94

4. 三軸圧縮試験

4.1 実験結果

現地の有効かぶり圧の 0.5 倍、1 倍、2 倍にあたる 1.7 MPa、3.4 MPa、6.8 MPa の三種類の封圧を負荷し、間隙水圧をかけずに排水状態で実験を行った。載荷前の圧密時には 3 t 法の要請に準じて圧密を行った。ひずみ速度は 10^{-4} s^{-1}と 10^{-5} s^{-1}を軸ひずみ 0.25%ごとに入れ替えて軸ひずみ 10%まで載荷した。

すべての供試体がひずみ硬化を示した（図 7）。



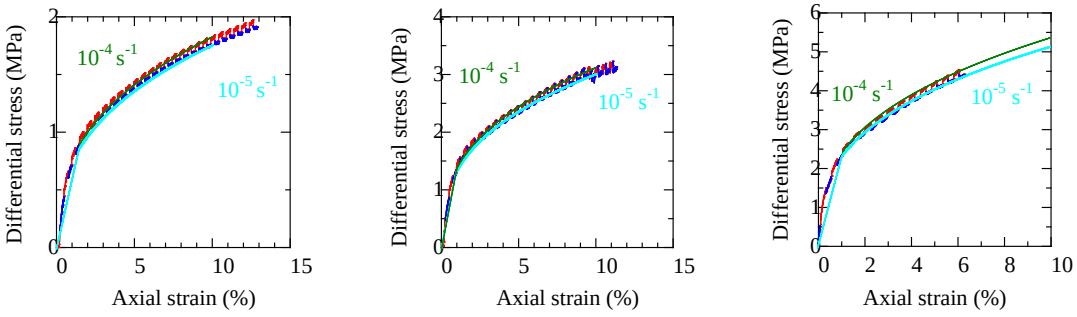
(a) os33（封圧 1.7 MPa）　(b) os35（封圧 3.4 MPa）　(c) os43（封圧 6.8 MPa）

図 7 三軸圧縮試験の応力ーひずみ線図の例

4.2 構成方程式による再現

一軸圧縮試験と同様の計算方法で軸ひずみ 10%まで計算した。降伏点応力をσ_c、原点と同点を結ぶ直線の傾きを E_0とした。供試体毎のばらつきが大きいため、、大久保・福井（2001）の提案する分類 $n=10$、20、40、60 のうち、すべての供試体の載荷速度依存性を概ね再現できる値 $n=40$ を使用することとした。a、mは三軸圧縮試験からは求めることができないため、a は一軸圧縮試験の結果（1×10^{-4}～1×10^{-3}程度）を参考に 10^{-3} s^{-1}、m は試験結果の再現の程度が良い値を用いることとした。50%接線ポアソン比については三軸圧縮試験で 0.5 前後となったが、別の研究機関で 0.4 程度と評価されていることも参考に 0.4 とした。

表 4 に示すパラメータを用いて、応力ーひずみ線図はあらかたシミュレートできた（図 8）。



(a) os33（封圧 1.7 MPa）　(b) os35（封圧 3.4 MPa）　(c) os43（封圧 6.8 MPa）

図 8 試験結果と計算結果の比較の例

表 4 三軸圧縮試験の再現に用いたパラメータ

供試体	封圧 [MPa]	n	m	初期ヤング率 E_0 [MPa]	定数 a [s^{-1}]	最大主応力 σ_c [MPa]	m/n	ν_0
os33	1.7	40	-24	60.27	1.0×10^{-3}	0.886	-0.6	0.4
os35	3.4	40	-22	141.2	1.0×10^{-3}	1.35	-0.55	0.4
os43	6.8	40	-22	227.62	1.0×10^{-3}	2.39	-0.55	0.4

5. 数値解析に用いるパラメータ

Okubo et al. (2013) や Amo et al. (2016) では、n は封圧とともに増加している。本試験でも三軸圧縮試験だけならそのような傾向も伺えるが、一軸のデータも考慮すれば、そのような現象はみられない（図 9）。また、含水率との相関もみられなかった（図 10）。さらに n について、

$$n = APc + BWc + C \tag{4}$$

ここで、P_cは封圧（MPa）、W_cは含水率（%）、A(MPa^{-1})、B(%$^{-1}$)、C(–)は係数、を仮定して重回帰分析を行ったところ、A=–3.03 (MPa^{-1}), B= 0.61 (%$^{-1}$), C= 51.9 という値が得られた。しかし、重相関決定係数は R= 0.34 と小さく、A、Bの P値は 0.32、0.84 と大きく、n と封圧や含水率との相関が低いことが確認された。

これらから、コンプライアンス可変型構成方程式により試験で得られた応力ーひずみ線図をあらかた再現できるパラメータとして、初期ヤング率は三軸圧縮試験の平均値 145 MPa、初期ポアソン比は 0.4、粘着力、内部摩擦角ϕは三軸圧縮試験の 32.8 kPa、7.8°、定数 a、時間依存性の程度を決める定数 n、ピーク強度以降の応力ーひずみ線図の傾きを決める定数 m については、三軸圧縮試験の応力ーひずみ線図がよく再現できた 1×10^{-3} s^{-1}、40、–20 を応力解析に用いるパラメータとして提案する。

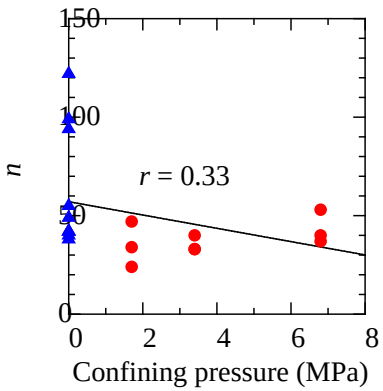


図 9 封圧と n との関係

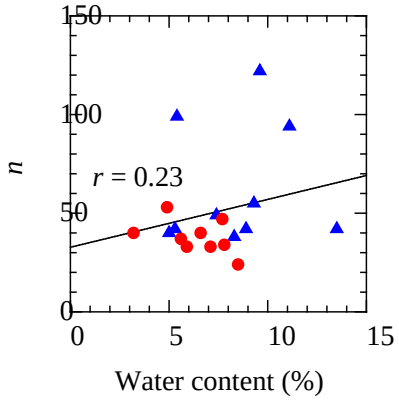


図 10 含水率と n との関係（▲:一軸 ●:三軸）

6. 結言

蛇紋岩中のトンネルの変状メカニズムを解明する一助となすための応力解析に用いるパラメータ算出を目的として各種岩石試験を行い、得られたパラメータを用いた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試みた。試験と再現の結果に基づいて数値解析に用いるパラメータを提案した。今後は数値解析を実施し、まず変状の再現を試みる予定である。

引用文献

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

Amo, K., Fujii, Y., Kodama J. and Fukuda, D. (2016), Effects of Confining Pressure on Strain Rate-Dependent Deformation and Failure of Kimachi Sandstone, RMC12-P54, Proc. 9th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS9), PO32-P90, Oct. 19

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, Issue 6, 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 and Mining Sciences, Vol. 58, pp. 180-185