HOKKAIDO UNIVERSITY

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
Author(s)	池田, 奈央; 児玉, 淳一; 藤井, 義明 他
Description	資源・素材2017（札幌）：平成29年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 2017年9月26日～28日, 北海道大学, 札幌市
Citation	資源・素材講演集2017（札幌）, 4(2), PY2-81
Issue Date	2017-09-26
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67668
Type	conference paper
File Information	PY2-81.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

若手ポスター発表（Poster：MMIJ Students and Young Researchers）
岩盤工学（ Rock Engineering）
Rock Engineering
2017年9月26日(火) 15:30 ～ 17:30 ポスター会場2 N301 (N棟3階/Fl.3.,Build. N)

[PY2-81] 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
Deformation and Failure Behavior of Serpentinite from a Largely Deformed Tunnel under Uniaxial Stress States and Its Reproduction by the Variable Compliance Type-Constitutive Equation

○池田 奈央[1]、児玉 淳一[1]、藤井 義明[1]、福田 大祐[1]（1. 北海道大学）
○Nao Ikeda[1], Junichi Kodama[1], Yoshiaki Fujii[1], Daisuke Fukuda[1]（1. Hokkaido University）

キーワード：蛇紋岩、一軸圧縮試験、一軸クリープ試験、コンプライアンス可変型構成方程式
Serpentinite, Uniaxial compression test, Uniaxial creep 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。この変形メカニズムを理解する一助となすため、本研究の目的を、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とした。こ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、それぞれ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一軸圧縮試験、および、一軸クリープ試験を行った。一軸圧縮試験の結果、含水率と載荷速度依存性の相関は弱いことがわかった。また、初期ヤング率として50%ヤング率を用いると、一軸圧縮試験の応力ーひずみ線図をあらかた再現することができた。一軸クリープ試験の結果についても、構成方程式による再現を試みた。

©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。この変形のメカニズムを理解する一助となすために、本研究の目的を、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(大久保・福井、1997)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とした。これらを達成するために、当該トンネルの蛇紋岩を採取し、一軸圧縮試験および一軸クリープ試験を行った。

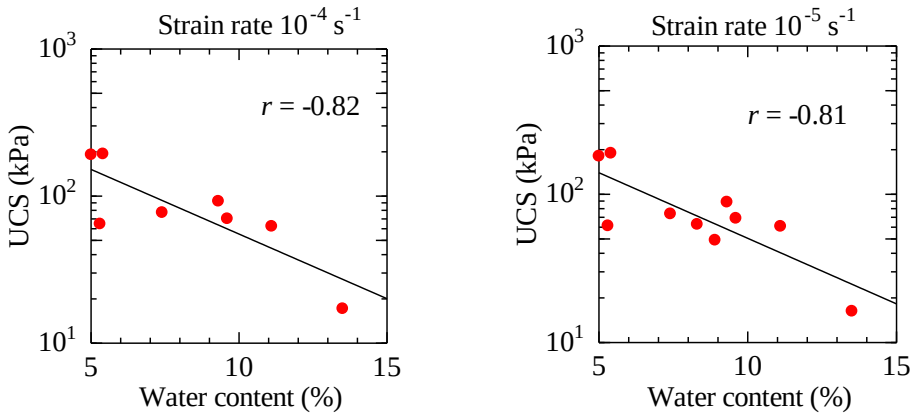
本研究では蛇紋岩を形態の違いによって、塊状蛇紋岩、葉片状蛇紋岩、粘土状蛇紋岩の 3 種類に分類し、粘土状蛇紋岩および葉片状蛇紋岩が含まれている供試体を軟弱部、塊状蛇紋岩のみで構成された供試体を堅硬部と呼ぶことにした。

2. 軟弱部の一軸圧縮試験

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}(供試体 01 と供試体 02 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。

ひずみ速度 10^{-4} s^{-1}、10^{-5} s^{-1} それぞれで、含水率と強度には強い負の相関がみられた(図 1)。含水率と後述する構成方程式のパラメータ n との相関は弱かった(図 2)。また、密度と強度には正の相関がみられた(図 3)。



(a) 10^{-4} s^{-1}　　(b) 10^{-5} s^{-1}

図 1 含水率と強度との関係

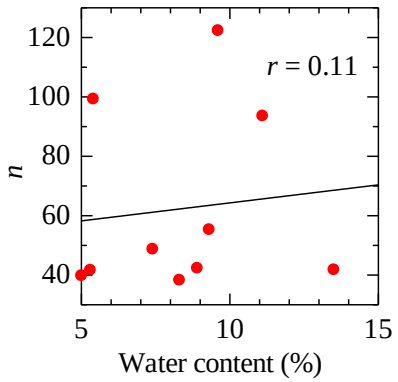


図 2 含水率と n との関係

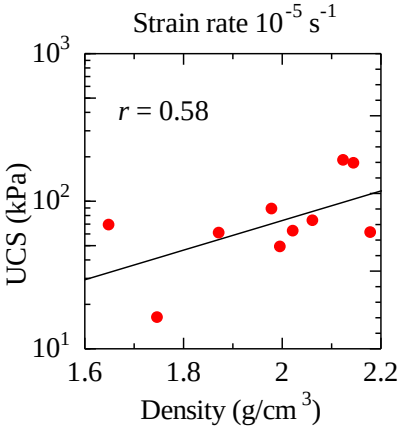


図 3 密度と強度との関係

3. 堅硬部の一軸圧縮試験

軟弱部と同じボーリングコアから、塊状でかつ連続している部分をサンプリングし、水を用いて直径 50 mm、長さ 100 mm、直径 30 mm、長さ 60 mm、直径 20 mm、長さ 40 mm の 3 種類に整形した。その後クロス型ひずみゲージ（共和電業、有効長 10 mm）を常温硬化型エポキシ系接着剤（共和電業、EP-34B）で貼付後、24 時間以上ビニールテープで加圧し、硬化させた。ステンレス製のエンドピースを取り付け、試験に供した。

ひずみ速度 10^{-3} 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 5%まで載荷した。軸ひずみは 50%UCS まではひずみゲージの値を用い、それ以降は試験機のストロークを補正した値を用いた。横ひずみはひずみゲージの値を用いた。そのほかの実験条件や方法は軟弱部と同じである。

含水率と強度(図 4)や、含水率と n(図 5)との相関は弱かった。また、密度と強度の間には強い正の相関がみられた(図 6)。

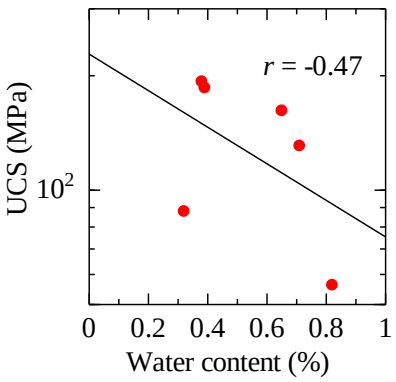


図 4 含水率と強度との関係

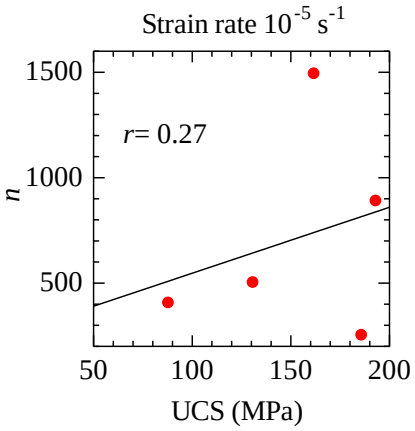


図 5 含水率と n との関係

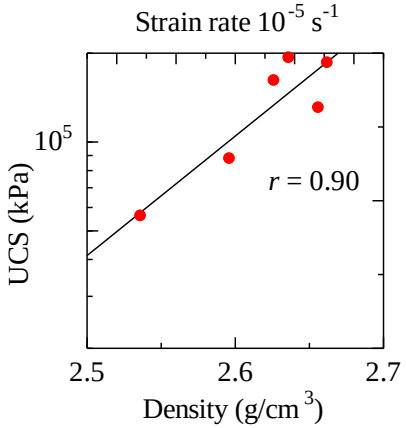


図 6 密度と強度との関係

4.一軸圧縮試験の計算による再現

試験結果を再現するために、大久保ら(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。

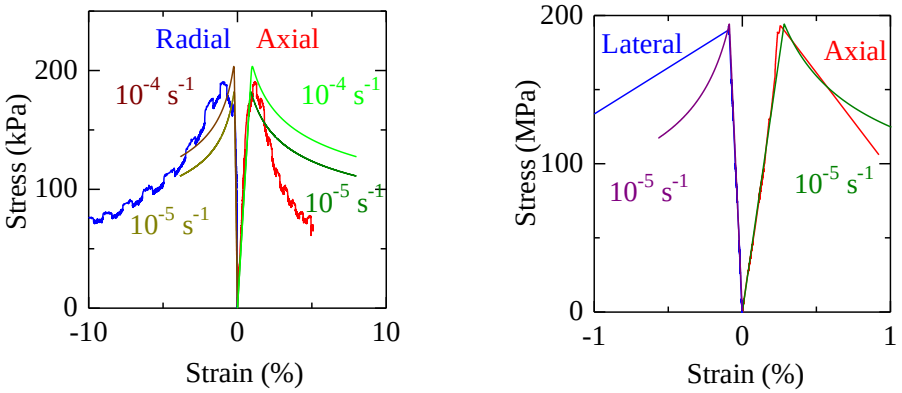
$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \frac{1}{t_0}\left(\frac{m}{n+1}\right)^{\frac{m}{n-m+1}} (\lambda^*)^m (\sigma^*)^n \tag{1}$$

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

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

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定数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、軟弱部、堅硬部ともに、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7)。



(a) 軟弱部(供試体08)　　(b) 堅硬部(供試体22)

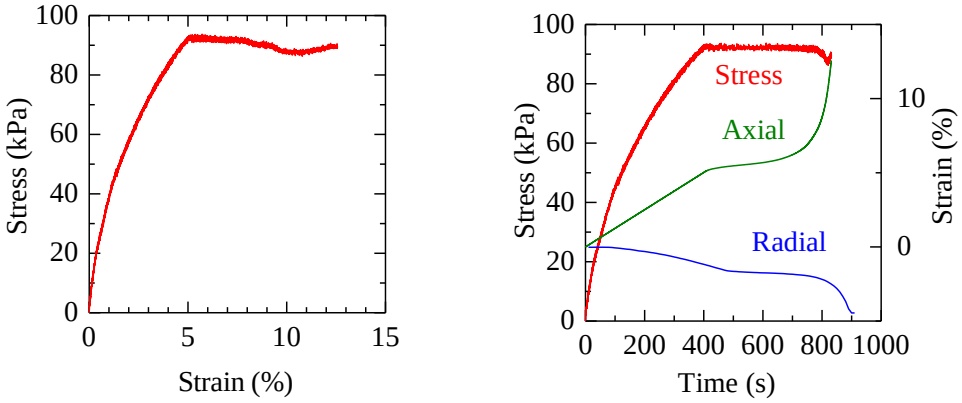
図7 試験結果と計算結果の比較の例

5. 一軸クリープ試験

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、軟弱部の一軸圧縮試験と同様である。

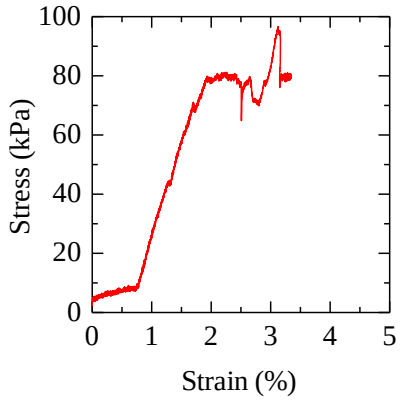
ひずみ速度10^{-4} s^{-1}で載荷し、供試体が破壊する直前で定応力制御に切り替え、最長で12日間載荷を行った。そのほかの実験方法や条件は軟弱部の一軸圧縮試験と同じである。

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。破壊に至った例は以下の3つの供試体である(図8~10)。3つの供試体はともに葉片状蛇紋岩と粘土状蛇紋岩で構成される軟弱部であった。

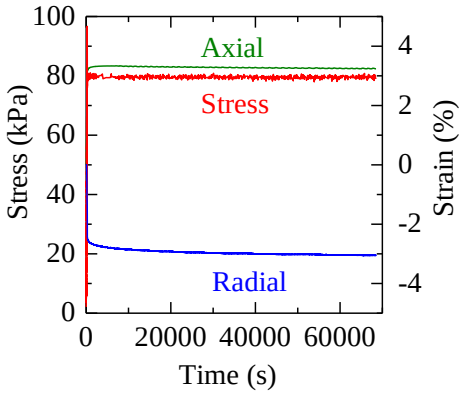


(a) 応力―ひずみ線図　　(b) 応力とひずみの経時変化

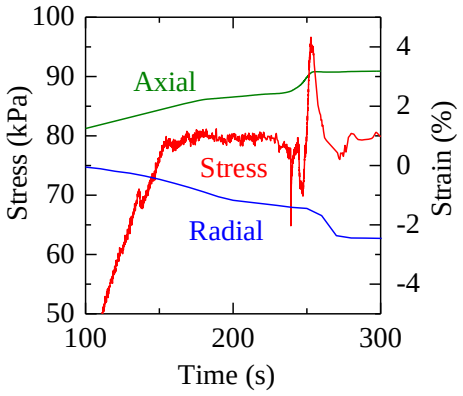
図8 供試体c04の結果



(a) 応力―ひずみ線図

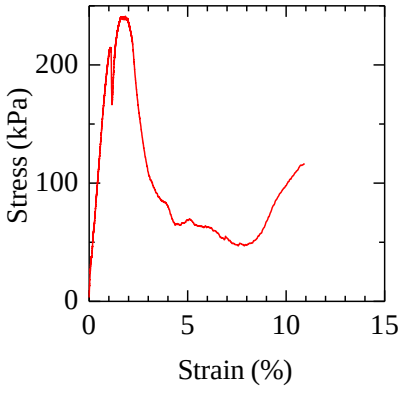


(b) 応力とひずみの経時変化

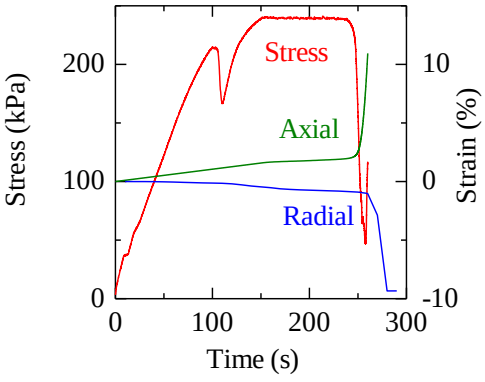


(c) 部分的破壊付近の拡大図

図 9 供試体 c08 の結果(部分的に破壊)



(a) 応力―ひずみ線図



(b) 応力とひずみの経時変化

図 10 供試体 c15 の結果

6. 一軸クリープ試験の計算による再現

以上の 3 つの供試体について、コンプライアンス可変型構成方程式を用いた計算による再現を試みた。

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

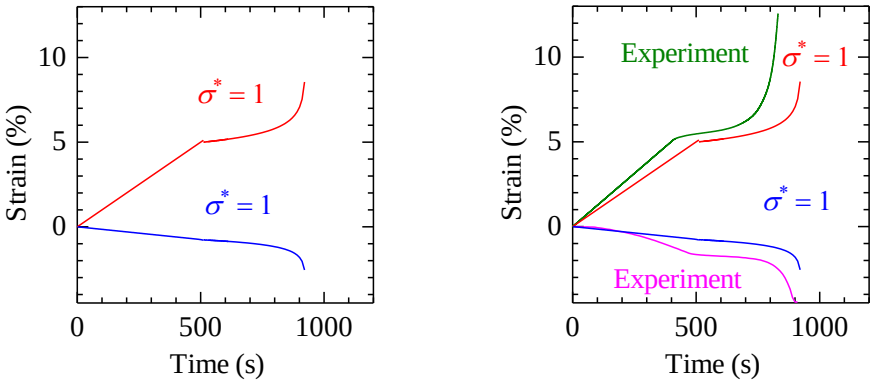
一軸圧縮試験の結果から求めた値の平均値を用いることとした。UCS についてもクリープ試験の結果からは読み取ることができないため、一軸圧縮試験の結果(軟弱部平均 90 kPa 程度、堅硬部平均 140 MPa 程度)を参考にして、適当な値になるよう設定した。

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。各供試体の UCS とクリープ応力は表 1 に示すとおりである。

表 1 計算の際に用いた応力

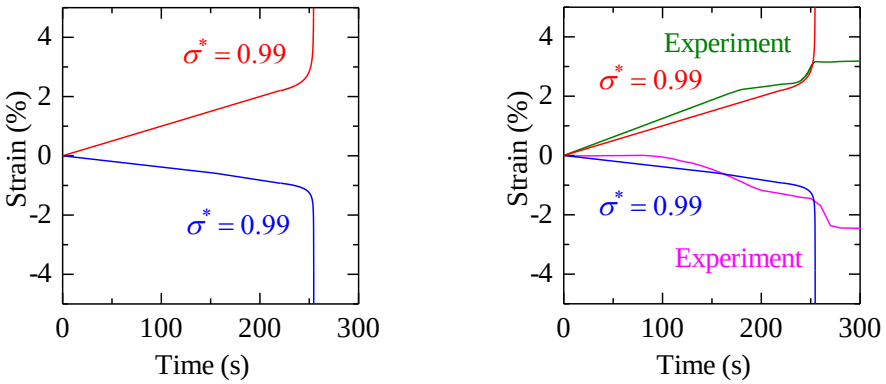
σ_c は設定した 10^{-4} s^{-1} の UCS、σ はクリープ応力、σ^* は正規化した応力

供試体番号	σ_c (kPa)	σ(kPa)	σ^*
c04	93.7	93.7	1
c08	80.0	79.2	0.99
c15	256	241	0.94



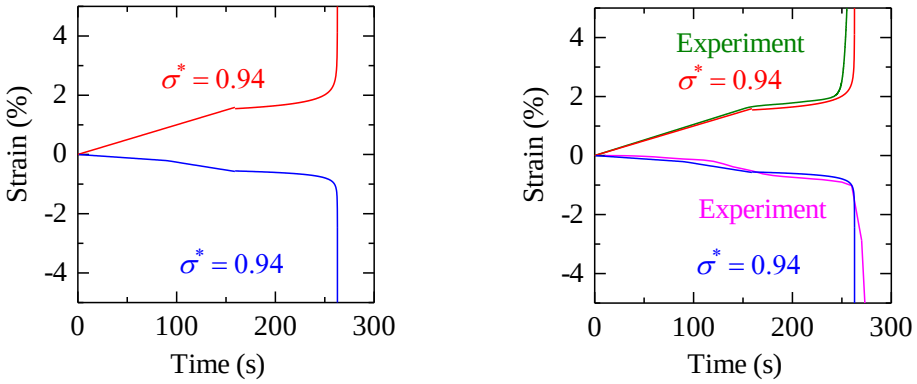
(a) 計算結果　　(b) 実験結果との比較

図 11 供試体 c04 の計算結果



(a) 計算結果　　(b) 実験結果との比較

図 12 供試体 c08 の計算結果



(a) 計算結果　　(b) 実験結果との比較

図 13 供試体 c15 の計算結果

計算の結果、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。

7. 結言

蛇紋岩の軟弱部と堅硬部に対し、一定のひずみ増分ごとにひずみ速度を切り替える手法の一軸圧縮試験と、一軸クリープ試験を行った。また、前者の結果からコンプライアンス可変型構成方程式を用いて両試験結果の再現を試みた。

一軸圧縮試験において、軟弱部の UCS は 90 kPa 程度と弱く、載荷速度依存性は一般的な岩石程度であった。堅硬部の UCS は 240 MPa 程度であり、載荷速度依存性は非常に小さかった。また、軟弱部、堅硬部ともに初期ヤング率として 50%ヤング率を用いたとき、大久保の式により応力やひずみの挙動をあらかた再現できた。一軸クリープ試験において、今回の試験方法では大きな応力レベルでの挙動を観察することができた。n、m、t_0を一軸圧縮試験から求めた値、E_0、ν_0をクリープ試験の応力―ひずみ線図から求めた値とし、UCS を加減することにより試験結果をあらかた再現することができた。

今後は三軸圧縮試験、三軸クリープ試験等を行う予定である。

参考文献

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

白水晴雄(1988)、粘土鉱物学、朝倉書店

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