



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	蛇紋岩中でのトンネル掘削時に生じた大きな変状のメカニズムと変状に先だって計測された変形挙動
Author(s)	藤井, 義明; 金井, 康将; 早川, 貴将 他
Description	2020年度資源・素材関係学協会合同秋季大会（仙台）. 2020年9月8日～10日. オンライン開催, 宮城県.
Citation	資源・素材学会秋季大会講演集, 7(2), 3K0201-06-02
Issue Date	2020-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/79281
Type	conference paper
File Information	04_Fujii2020.pdf



一般講演

開発機械／岩盤工学／資源経済と社会システム／資源開発技術

2020年9月10日(木) 09:00 ～ 11:30 第2会場

[3K0201-06-02] 蛇紋岩中でのトンネル掘削時に生じた大きな変状のメカニズムと変状に先だって計測された変形挙動
Mechanism of Severe Damage at a Tunnel in Hokkaido, Japan during Construction in Serpentinite and the Deformation Preceding the Damage

○藤井 義明¹、金井 康将¹、早川 貴将¹、池田 奈央¹、尾上 義将¹、児玉 淳一¹、福田 大祐¹、淡路 動太² (1. 北海道大学、2. 清水建設)

○Yoshiaki Fujii¹, Yasumasa Kanai¹, Takamasa Hayakawa¹, Nao Ikeda¹, Yoshimasa Onoe¹, Jun-ichi Kodama¹, Daisuke Fukuda¹, Dota Awaji² (1. Hokkaido University, 2. Shimizu Corporation)

キーワード：蛇紋岩、トンネル、変状、変形、破壊時刻の予測

Serpentinite, Tunnel, Damage, Deformation, Prediction of failure time

あるトンネルの蛇紋岩中での掘削時に切羽で大きな変状が生じた。このトンネルの、さらに重装備な支保での再掘削中に、変状のメカニズムについて検討するために蛇紋岩試料が採取され。この試料について一軸圧縮・一軸クリープ・三軸圧縮・三軸クリープ試験が行われた。ここでは、変状の観察記録と岩石試験の結果から、大変状のメカニズムについて定性的に考察する。また、今後の同様なトラブル回避に役立てることを目的とし、変状に先立って計測されていた変形挙動から大変状の時刻と規模を予測する方法についても考察する。なお、数値解析に基づいた定量的な考察については、稿を改めて報告する予定である。

1. はじめに

北海道中軸部で掘削中の、あるトンネルの蛇紋岩中切羽において、2014 年 1 月に、切羽の押し出し・盤膨れ・インバートの座屈等の変状が観察された(荒川ら、2016)。この変状は、2 か月以上にわたり、天盤崩落を引き起こしながら、坑口方向に 400 m 拡大した。当該トンネルは、円形断面と極厚吹付けコンクリートを併用して再度掘削され、2020 年 6 月現在、再掘削切羽が最初の変状箇所を通過したところである。

北海道中軸部におけるトンネル工事では蛇紋岩に遭遇することは珍しくなく、種々の難工事が記録されている。したがって、蛇紋岩中のトンネル掘削における変状メカニズムを知る事は、類似の岩盤におけるトンネル掘削の安全を確保し、時間とコストを縮減するために重要と考えられる。そこで、変状における主因となり、また、変状メカニズムを明らかにするために大変重要と思われる、蛇紋岩の力学的特性について一軸・三軸圧縮試験により明らかにしようと試みた。

ここでは、まず、観察された変状について断面の鉛直変位・内空変位の計測結果も交えて簡単に説明する。次に、岩石試験の結果について述べる。変状メカニズムについて、観察・計測・実験結果に基づいて定性的に検討する。

2. 変状の概要

変状が生じたのは、北海道中軸部に位置する延長 4686 m の道路トンネルである。岩盤は、Fig. 1 左側から、白亜系泥岩、地質年代不明の蛇紋岩、ジュラ系・白亜系の玄武岩質枕状溶岩・水冷破碎岩・砂岩、白亜系泥岩砂岩互層となっている。掘削は両坑口から行われ、変状は、Fig. 1 左側からの切羽が蛇紋岩部分に達した時に生じ、この時のかぶり深さは 260 m であった。

蛇紋岩中の切羽では、4t 油圧ブレイカーによる機械掘削が行われ、掘削断面は 125~131 m²、上半のライニング内半径 R は 5.75 m であった。鏡ボルトと AGF により切羽と天端の安定が図られ、側壁にはロックボルトが打設された。鋼枠・吹付けコンクリートは二重に施工された。早期閉合のため切羽の 7 m 後方で施工されたインバートの内半径は当初 3 R で設計されたが、踏前の安定性を高めるために 1.5 R に変更された。

変状の拡大は以下のようであった (Fig. 2)。

- I 2014 年 1 月に切羽の押し出し、盤膨れ、インバートの座屈が発見された。
- II 数日のうちに盤膨れと吹付けの損傷が坑口側に向かって 180 m 拡大した。
- III 最初の変状から 50 日後に切羽から 250 m 位置で天盤崩落が生じた。
- IV 盤膨れと吹付けの損傷は天盤崩落から 150 m 坑口側まで緩やかに進展した。

吹付けに取り付けられたターゲットの変位が測定され、内空変位が算出された (Fig. 3)。切羽から 56.8 m 後方の断面 A では、掘削直後の大きな変形速度が時間とともに減少している (Fig. 4)。変形速度は正月休みに増加し、変状が発生しても増加し続けているが、変状発見の次の日を最後に計測は不能となった。

切羽から 296.5 m 後方、天盤崩落の坑口側端部に位置する断面 B では正月休みの前に変形は完全に収束し、鉛直変位には浮き上がる傾向さえみられる (Fig. 5)。ところが、正月休み明けに変形は再開し、ほぼ一定の速度で、天盤崩落まで増加を続けている。天盤崩落により計測は不能となった。

変状部分では、その後、鋼枠と 400 mm 厚の吹付けで支保された半径 3.74 m の導坑が掘削された。さらに、外側から 400 mm + 400 mm + 350 mm 厚の三重の鋼枠 + 吹付けで支保した半径 7.55 m の円形断面の本坑に拡幅され、再掘削切羽は、2020 年 6 月現在、崩落発生時の切羽位置を通過したところである。

3. 岩石試料

再掘削トンネルから直径 50 mm のボーリングを行い、天盤崩落部側壁のコアを採取・速やかにビニール袋に保存した。コアは、塊状・葉片状・粘土状・堅硬部に分類された (Fig. 6)。XRD (X 線回折分析、Table 1) によれば、堅硬部は蛇紋岩化が完全ではなく、苦土かんらん石・磁鉄鉱などを含有し、変状に主要な役割を果たしたとは考えられないので岩石試験には供しなかった。

塊状試料はクリソタイル・リザルダイトを中量、ブルーサイトを少量含み、かんらん石・輝石を含有せず、完全に蛇紋岩化されていた。粘土状試料も類似の鉱物構成で、塊状試料が粘土化したものと判断された。

4. 一軸圧縮試験

4.1 交替ひずみ速度

コアを試験直前に長さ約 100 mm に切断した。コアの損傷が予想されたため、切断には水を使用しなかった。通常のステンレス

製エンドピースを用いると、エンドピースの重量で破壊する可能性があったので、ポリエチレン製の軽量エンドピースを用いた。乾燥を防ぐためにポリエチレン製のチューブをかぶせた。軸ひずみはストロークを供試体長さで除して求めた。荷重が小さいので 250 kN の機械式材料試験機のたわみは小さい。径ひずみは、径方向の変位を供試体直径で除して求めた。供試体が軟弱なため、ひずみゲージや通常の変位計を取り付けることはできなかった。そこで、径方向変位として、ダイヤルゲージを用いて測定した、供試体に輪ゴムで固定したプラスチック製ターゲット間の距離変化を用いた。

ひずみ速度は、強度の載荷速度依存性を知るために、軸ひずみ 0.25%毎に 10^{-5} s^{-1} と 10^{-4} s^{-1} とした (Hashiba et al., 2006)。室温はエアコンで 295K に保った。供試体の含水率を知るため、試験後の供試体は 353K で 24 時間以上乾燥させ、乾燥前後の質量を測定した。

やや穏やかなひずみ軟化挙動がみられる応力-ひずみ線図 (Fig. 7) から、2 種類のひずみ速度に対応する UCS (一軸圧縮強度) を読み取ることができる。UCS は 16 kPa~194 kPa の間に広く分布しており、粘土状・葉片状・塊状供試体の間に明らかな差異は認められない (Fig. 8)。深度 260 m における有効かぶり圧は飽和単位体積重量 23 kN/m^3 を仮定すれば、3.4 MPa、地山強度比は 0.0047~0.057 となる。

強度の載荷速度依存性を表わす指標として以下で求めることのできる n を用いる。

$$n = \Delta \log(d\varepsilon/dt) / \Delta \log \sigma_{\max} - 1 \quad (1)$$

小さい n は強度の載荷速度依存性が高いことを示す。岩石の粘性変形の原因には応力腐食 (Freiman, 1984) の他に、粘土鉱物の粘性変形等もあるが、この指標は応力腐食指数とも呼ばれる。応力腐食指数は両対数グラフ上にプロットした応力拡大係数-亀裂速度の関係の傾きとしても求められる。この類のプロットは、たとえば、ダブルトーション試験 (Williams and Evans, 1973) における亜臨界な亀裂成長 (Atkinson, 1984) において得ることができる。

ダブルトーション試験では、1 つの板状試験片について、変位を一定とした応力緩和試験から得られる減少する応力拡大係数と減少する亀裂速度のデータから n を求めることができる。圧縮試験の場合は、通常、多数の供試体に様々なひずみ速度で試験を行い、得られた強度とひずみ速度をプロットし、回帰直線の傾きから算出される。交替ひずみ速度試験を行うと、1 つの供試体から 2 つ、あるいはそれ以上のひずみ速度における強度が得られるので、供試体間の強度のばらつきに悩まされることなく、その供試体の n を求めることができる。

算出された n も 38~122 の間に広く分布した (Fig. 9)。しかしながら 10 のうち 7 つのデータは 38~55 の間に分布している。 n と UCS や含水率との相関係数は 0.21、0.11 であり、高い相関は見られなかった。

4.2 クリープ

供試体や試験装置は交替ひずみ速度試験と同様である。供試体間の強度のばらつきが大きいのでクリープ応力を設定せず、ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} で圧縮し、応力-ひずみ線図の傾きが減少し、破壊が迫っていると判断された時に一定応力制御に切り替えた。

いくつかの供試体は載荷途中で破壊してしまったが、2 つの供試体についてクリープ破壊までのデータを取得することができた。もう 2 つの供試体は所定の時間 (3 または 7 日) 内にクリープ破壊に至らなかった。クリープ破壊までのデータの例を Fig. 10 に示す。一次クリープは不明瞭であるが 2 次クリープがみられる。それ以降、クリープ応力が非常に小さいためにやや制御は不安定なものの、3 次クリープを示し、クリープ破壊に至っている。供試体間の強度のばらつきのために、通常みられるはずの、クリープ寿命とクリープ応力との負の相関関係はみられない (Fig. 11a)。供試体数が少ないものの、クリープ応力の代わりにクリープ制御開始時の軸ひずみを採用すれば、ひずみが小さくなると寿命が長くなる傾向は認められ、径ひずみを用いれば、この傾向がさらに顕著になるのは Fujii et al. (1999) の指摘する通りである。

5. 三軸圧縮試験

5.1 交替ひずみ速度

一軸試験と同様に作製した供試体を用い、排水を促進するために側面を濾紙で覆った。ステンレス製エンドピースと共に熱収縮チューブで被覆し、三軸ベッセルにセットした。材料試験機は一軸試験と同じものを用いた。封圧はシリンジポンプを用いて載荷した。間隙水は供試体両端から大気圧へ開放した。供試体が流失してしまうため、エンドピースと供試体との間にも濾紙を、破れないように 10 枚程度重ねて挟んだ。軸ひずみはストロークを供試体長さで除して求めた。封圧水の排水量を断面積で除した面積ひずみの半分を横ひずみとみなした。

封圧は 1.7、3.4、6.8 MPa の 3 通りとした。これらは、上述のように見積もった有効かぶり圧の 1/2、1、2 倍である。供試体はまず所定の封圧下で 8 時間圧密した。ほとんどの場合、3t-法で必要とされる最小時間を満たしていた。圧密中に間隙水が流出したため、少なくとも圧縮開始時に供試体は飽和していたと考えられる。

一軸試験と同じ交替ひずみ速度で圧縮した。全ての供試体が延性的なひずみ硬化挙動を示した (Fig. 12)。軸ひずみ 1%程度

で降伏しているようであるが、明瞭な降伏点は見られなかった。軸ひずみ 6%の時の応力を残留強度とし、その载荷速度依存性を表わす n を求めてみると、差応力で求めれば一軸とほぼ同様 (Fig. 13a) で、全応力の場合は一軸よりも大きかった (Fig. 13b)。いずれの場合も封圧とは弱い正の相関を示した。摩擦角は 10^{-5} s^{-1} で 14.8° 、 10^{-4} s^{-1} で 15.6° と、通常の岩石より小さい。ブルーサイトを含有する蛇紋岩の摩擦角は小さいことが知られており (坂下ら、2016)、今回の結果もブルーサイトの影響が考えられる。

5.2 多段階クリープ

供試体と実験装置は交替ひずみ速度試験と同様である。軸ひずみ 1%程度で降伏し、ひずみ硬化挙動を示しているのでクリープ破壊は期待できず、多段階クリープ試験を行った。一軸同様、クリープ応力は設定せず、代わりに、ひずみ速度 10^{-4} s^{-1} で圧縮し、軸ひずみ 0.5、1、2、4%で 24 時間の一定応力制御に切り替えた。一定応力制御中に超えた設定値はスキップした。11 本の供試体全てが 7 日間の実験期間中には一次クリープのみを示し、二次・三次クリープやクリープ破壊はみられなかった (Fig. 14)。したがって、クリープ応力と二次クリープ速度 $d\varepsilon/dt$ から n を求めることはできなかった。

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = A\sigma^n \quad (2)$$

ここで σ は正規化したクリープ応力、 A は定数である。

6. 考察

計測された変形挙動 (Fig. 4) は一次・二次・三次クリープのようにもみえる。したがって、このトンネルの激しい変状 (Fig. 2) は、岩盤の著しい時間依存性変形とクリープ破壊の結果であるとみなされてしまう可能性がある。しかし、変状は、2014 年 1 月以前に進行していた可能性にも注意が必要である。つまり、Fig. 4 の変形挙動は、一次・二次・三次クリープを経て変状に至ったことを示すものではなく、むしろ、変状の結果として生じた変形を示している。また、強度の载荷速度依存性を示す n にしても、通常の岩石について 10 から 80 であることが知られており (Okubo et al., 2013)、今回の n は、この範囲に入っている。すなわち、今回調査した蛇紋岩の変形の時間依存性は普通の岩石の範囲であり、取り立てて著しいものではない。

それでは、なぜ、当該現場では著しい時間依存性の変状が生じたのであろうか？トンネル周辺の蛇紋岩の UCS は著しく小さい。したがって、その後、いかなる支保を施そうとも、自由面となった瞬間に完全に降伏し、ゆるみ域は応力を再配分しながら岩盤奥部へと拡大したと考えられる。その拡大は吹付けによる拘束圧でほぼ停止するものと思われるが、切羽の進行に伴い、かぶり深さと粘土状蛇紋岩の割合が増大し、また、蛇紋岩の亀裂が流れ盤状となったため (荒川ら、2016)、通常の岩石同様のクリープ変形により徐々に増加する吹付けに作用する塑性圧 (= 岩盤の拘束圧) はさらに増大し、吹付け自体にクリープ破壊を引き起こした可能性が考えられる。

吹付けの破壊に伴い岩盤への拘束圧が減少すると、ゆるみ域の拡大が再開し、破壊した吹付けに隣接した健全な吹付けに作用する塑性圧が増大、クリープ破壊が連鎖的に生じると思われる。通常の岩盤であれば、地山の強度により、連鎖的な破壊はある程度で収まるはずであるが、これが、既に完全に変位が収束していた部位を越え、400 m も拡大したのは、蛇紋岩の粘着力・摩擦角がともに極端に小さいため、吹付けの破壊による拘束圧の減少がゆるみ域の拡大と塑性圧の増大に与える影響が、通常の岩石よりも大きかったためと考えられる。

7. 結言

当該トンネルの蛇紋岩切羽における著しい変状 (Fig. 2) のメカニズムを明らかにするため、当該トンネルから採取した蛇紋岩の一軸・三軸圧縮試験を行った。実験で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 岩石供試体の UCS は著しく小さい $16 \text{ kPa} \sim 194 \text{ kPa}$ の範囲であった (Fig. 8)。これに伴い、地山強度比も $0.0046 \sim 0.057$ という著しく小さい値であった。
- (2) ほとんどの供試体の n は $37 \sim 55$ の範囲となり (Fig. 9)、これは変形の著しい時間依存性を示すものではない。
- (3) 三軸圧縮試験において全ての供試体はひずみ硬化挙動を示した (Fig. 12)。残留強度の摩擦角は、 10^{-5} s^{-1} で 14.8° 、 10^{-4} s^{-1} で 15.6° と、通常の岩石よりも小さかった。
- (4) 一軸クリープではクリープ破壊がみられた (Fig. 10) が、三軸クリープでは一次クリープのみがみられた (Fig. 14)。

以上から、このトンネルの大変状は、蛇紋岩岩盤自体のクリープ破壊というよりも、むしろ、蛇紋岩の、通常の岩石と同程度の時間依存性変形による塑性圧の下で生じた吹付けの連鎖的クリープ破壊の可能性があると考察された。もちろん、数値解析等を用いたさらなる定量的な検討が必要である。しかしながら、その場合でも、蛇紋岩岩盤自体の変形・破壊と同時に、吹付けのクリープ変形・クリープ破壊挙動を考慮することが重要と考えられる。

引用文献

荒川大輔・楡井賢司・今野秀一(2016)、蛇紋岩地質の強大な地圧による変状について、平成 27 年度北海道開発技術研究発表会
 小川修・島田武・高橋民雄(2020)、音中トンネルにおける蛇紋岩境界部の掘削工法検討について、2019 年度北海道開発技術研究発表会
 坂下孝則・佐々木博一・堀田靖文(2016)、蛇紋岩中のブルーサイト含有量と強度特性について、平成 27 年度北海道開発技術研究発表会
 Atkinson, B. K. (1984), Subcritical crack Growth in Geological Materials, J. Geophys. Res., Vol. 89, B6, pp. 4077-4114.
 Freiman, S. W. (1984), Effects of Chemical Environments on Slow Crack Growth in Glasses and Ceramics, J. Geophys. Res., No. B6, pp. 4072-4076
 Fujii, Y., Kiyama, T., Ishijima, Y. and Kodama, J. (1999), Circumferential Strain Behavior During Creep tests of Brittle Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 36, No. 3, pp. 323-337
 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, Issue 6, pp. 180-185
 Williams, D. P. and Evans, A. G. (1973), A Simple method for studying slow crack growth, Journal of Testing and Evaluation, Vol. 1, pp. 264-270.

Table 1 XRD results (Ant: antigorite, Chr: chrysotile, Liz: lizardite, Br: brucite, For: forsterite, Mt: magnesite, +++++: Very abundant, +++: Abundant, ++: Moderate, +: Little, -: None).

Sample	Ant	Chr	Liz	Br	For	Mt
Massive	-	++	++	+	-	-
Clayish	-	+++	+++	-	-	-
Very hard	+++++	+++++	-	+++	++	++

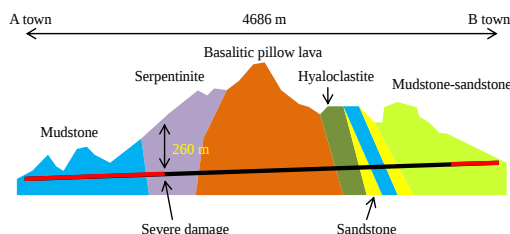


Fig. 1 Simplified geologic sectional view (after Arakawa et al., 2016).

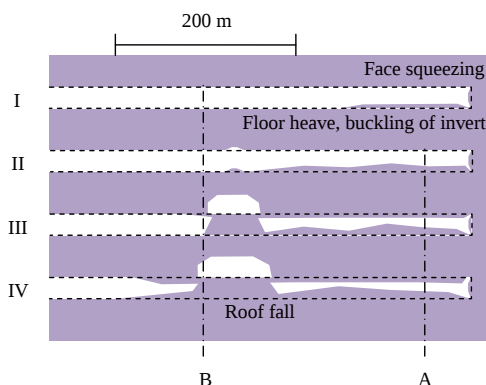


Fig. 2 Schematic figure of the severe deformation (after Ogawa et al., 2020)

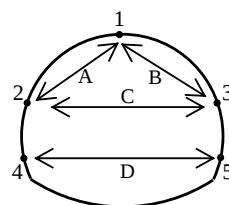
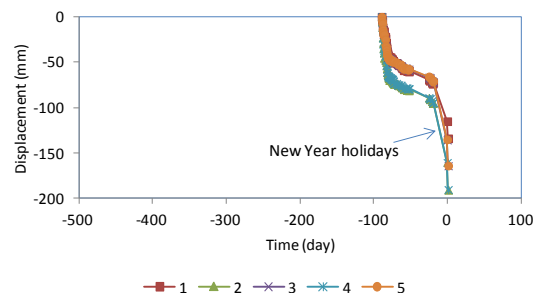
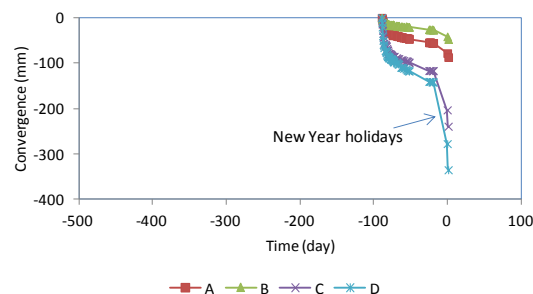


Fig. 3 Monitoring section for the displacements 1-5 and the definition of convergences A-D, viewing from the entrance to the face.

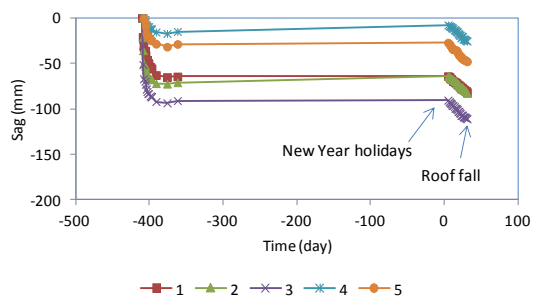


(a) Vertical displacement

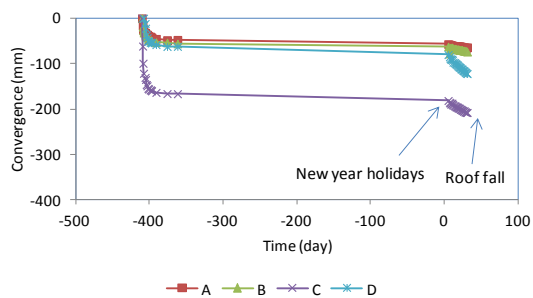


(b) Convergence

Fig. 4 Monitored deformation at the section A (56.8 m behind the face). Negative values indicate (a) downward and (b) contraction. Time is set to zero at the discovery of the damage (Jan. 6, 2014).

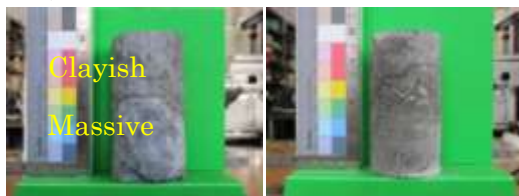


(a) Vertical displacement

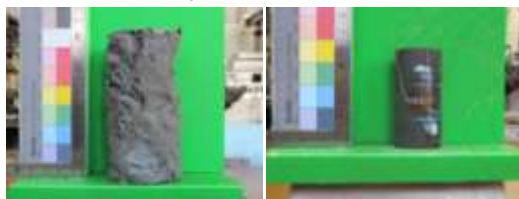


(b) Convergence

Fig. 5 Monitored deformation at the section B (296.5 m behind the face and the edge at the entrance side of the roof fall). Negative values indicate (a) downward and (b) contraction. Time is set to zero at the discovery of the damage (Jan. 6, 2014).



(a) Massive and clayish (os01) (b) Foliated (os08)



(c) Clayish (os03) (d) Very hard

Fig. 6 Examples of the serpentinite specimens.

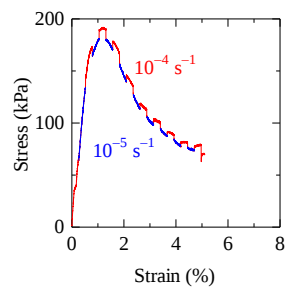


Fig. 7 Example of stress-strain curves in uniaxial compression test (os08).

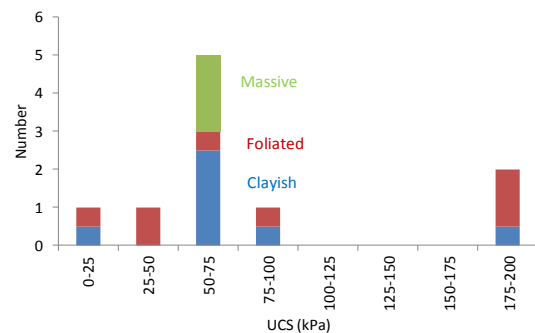
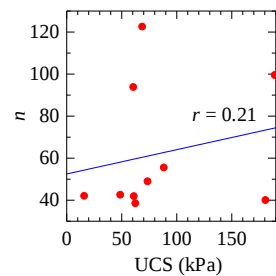
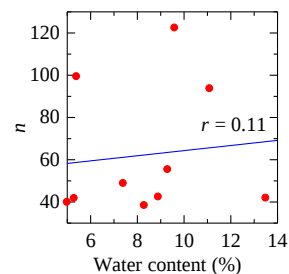


Fig. 8 Distribution of UCS. A mixed specimen of A and B was counted as 0.5 A and 0.5 B (10^{-5} s^{-1}).



(a)



(b)

Fig. 9 Relationship between n and (a) UCS ($d\sigma/dt = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) or (b) water content.

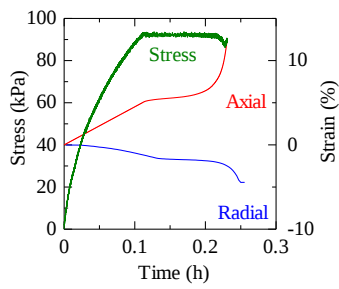
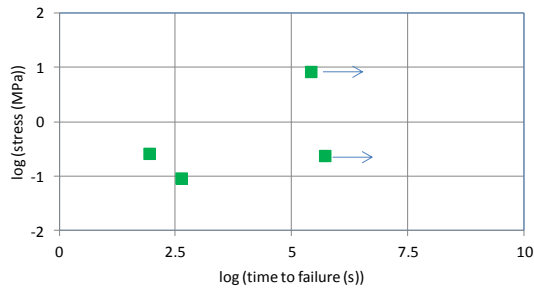
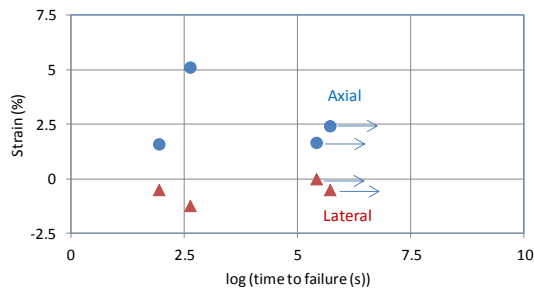


Fig. 10 Example of the results of the uniaxial creep test.



(a) Creep stress vs. time to failure



(b) Strain at beginning of the creep control vs. time to failure

Fig. 11 Time to failure in the uniaxial creep test. The arrows denote that the specimens did not fail.

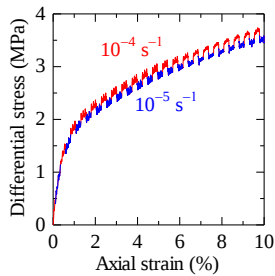
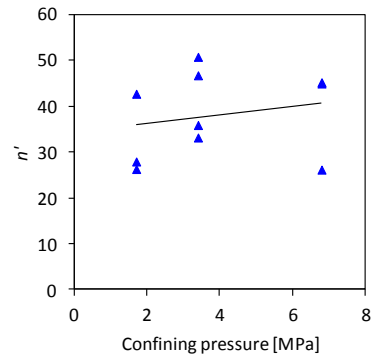
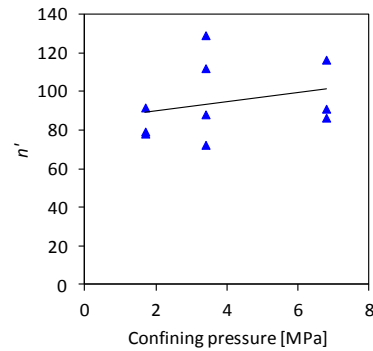


Fig. 12 Examples of triaxial stress-strain curves (os45, 6.8 MPa).



(a) Differential stress ($r = 0.21$)



(b) Total stress ($r = 0.27$)

Fig. 13 The n' -values from the alternating strain rate triaxial test.

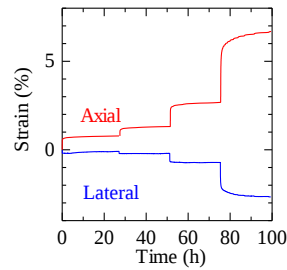


Fig. 14 Example of the results of the triaxial creep test.