

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560805

研究課題名（和文）岩石の絶対強度の解明とサブゼロ温度領域におけるその応用

研究課題名（英文）Time-independent strength of rock under sub-zero temperature

研究代表者

児玉 淳一（KODAMA JUN-ICHI）

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70241411

研究成果の概要（和文）：

岩石を対象に、時間や環境の影響を受けない「絶対強度」の概念を提案するとともに、サブゼロ温度領域における岩石のクリープ変形、クリープ寿命に与える間隙氷の影響について検討した。その結果、支笏溶結凝灰岩に関しては、絶対強度の存在を明らかにすることはできなかったが、応力レベルが小さくなると乾燥供試体のクリープ寿命より含水飽和供試体のクリープ寿命の方が短くなるという工学的に重要な現象を見出した。

研究成果の概要（英文）：

Concept of time-independent strength under various environments was proposed. Then, impact of pore ice on creep deformation and creep life of rock was investigated under sub-zero temperature. Time time-independent strength could not be found on Shikotsu welded tuff. However, it was found that creep life of water saturated specimen was shorter than that of dry specimen at low stress level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：地殻工学

1. 研究開始当初の背景

常温下における岩石の強度の時間依存性はサブクリティカルき裂進展と呼ばれる岩石内でのゆっくりとしたき裂進展現象によるものと理解されており、この現象は、応力腐食と呼ばれる応力（圧力）の助けを借りた鉱物と水との間の化学反応（結合の分断）により現われると解釈されている。したがって、

岩石の破壊現象は時間や水環境などの影響を強く受け、岩石の強度は一意に定義できないと考えられてきた。筆者らは、平成 17 年度～19 年度に「科学研究費補助金」の交付を受け、Sub-zero 温度領域（0～-30 程度）における岩石の強度・変形特性について、実験的な検討を行うとともに、その破壊プロセスに関して理論的な考察を行っており、次の

ような重要な知見を得た。(1) 含水飽和状態で凍結した岩石の強度は、顕著な載荷速度依存性を示し、載荷速度が速くなるほど大きくなる。(2) 乾燥状態における岩石の強度は載荷速度に依存せず一定の値を示す。上記(1)は、インクルージョンとして機能する岩石内の間隙氷の力学的性質が載荷速度の影響を受けるためと解釈できる。一方、上記(2)に関しては、氷点以下の温度では上述した応力腐食が極めて起こりづらくなると考えれば理解できる。以上のことは、常温下と異なり、氷点下では次のような現象が発現する可能性を指摘している。十分に遅い載荷速度の下では含水状態の強度は乾燥状態強度と等しくなり、氷点下における岩石の強度は含水状態によらず固有の値(絶対強度)を示す。絶対強度以下の応力を長期間負荷し続けても、岩石は破断しない。寒冷地における岩盤構造物の設計においては、この絶対強度の存在は極めて意義深いものと考えられる。

2. 研究の目的

サブゼロ温度領域における岩石を対象に、上述した絶対強度の有無を実験的に調べることが本研究の目的である。具体的には、間隙氷の有無による岩質材料の破壊プロセスの違いを明らかにした上、クリープ寿命やクリープ変形の応力レベル依存性について検討し、絶対強度の有無を検証する。

3. 研究の方法

(1) 破壊プロセスの観察：岩質材料を用いて氷で充填された単一の巨視き裂を有する供試体を作製する。そして、一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行い、それぞれ載荷中に CCD カメラを用いて巨視き裂からの破壊の発生の様子を観察する。

(2) クリープ変形・寿命の解明と絶対強度の検証：多孔質岩石の代表である凝灰岩を対象に、一軸圧縮応力下でクリープ試験を実施し、クリープ応力とクリープ寿命の関係、クリープ変形の特徴などについて検討するとともに、未破壊の供試体の寿命の予測方法について検討する。さらに、サブゼロ温度領域における岩石の時間依存挙動の理解を深めるために、本研究で得られたクリープ寿命の応力依存性と既往の研究で明らかにされている「一軸圧縮強度の載荷速度依存性」の関係について考察する。

4. 研究成果

(1) 破壊プロセスの観察：一軸圧縮応力下では岩質材料の強度により破壊プロセスが

異なることが明らかになった。すなわち、強度が大きい供試体では、岩質部分に微小き裂が発生した後、間隙氷の破壊が進行するのに対し、強度の小さい供試体では、先に間隙氷の破壊が認められた。このことは、圧縮応力下における凍結岩石の破壊プロセスが岩石の強度により異なることを示唆している。また、前者の供試体では、まず、き裂先端付近に微小き裂が発生するが、このき裂の成長は停止し、その後の応力の増大によりき裂先端からせん断破壊が進行した(図1)。



図 1 圧縮応力下における岩質材料の破壊プロセス(間隙氷有り)

圧裂引張試験の観察では2通りの破壊プロセスが認められた。岩質部分と間隙氷の境界面が剥離した場合の強度は、き裂を氷で充填しない場合の強度とほぼ同じであるが、間隙氷を貫通するき裂が発生した場合(図2)の強度は、き裂を氷で充填しない場合の強度よりかなり大きくなった。これより、凍結岩石の引張強度は、岩石部分と氷の接合状態に依存すると考えられ、き裂面の粗さや屈曲性が高い岩石ほど、凍結による引張強度の増加は大きいものと予想される。



図 2 引張応力下における岩質材料の破壊プロセス(間隙氷有り)

数値解析により両試験における応力状態を分析した結果、一軸圧縮試験より圧裂引張試験の方が、間隙氷の充填によるき裂先端の応力集中の緩和率が大きいことがわかった。間隙氷の影響が圧縮強度より引張強度の方

に強く現れるのは、この応力緩和率の違いが原因であると考える。

(2) クリープ変形・寿命の解明と絶対強度の検証：凍結状態にある岩石も室温下におかれた岩石と同様に、1次クリープ、2次クリープ、3次クリープの3つの変形・破壊プロセスを経て最終破断にいたること(図3)、クリープ応力が小さくなるとクリープ寿命は指数関数的に長くなること、含水飽和状態で凍結させた供試体(含水飽和供試体)の方が自然乾燥状態で凍結させた供試体(乾燥供試体)よりも変形量・変形速度が大きくなることなどが明らかになった。

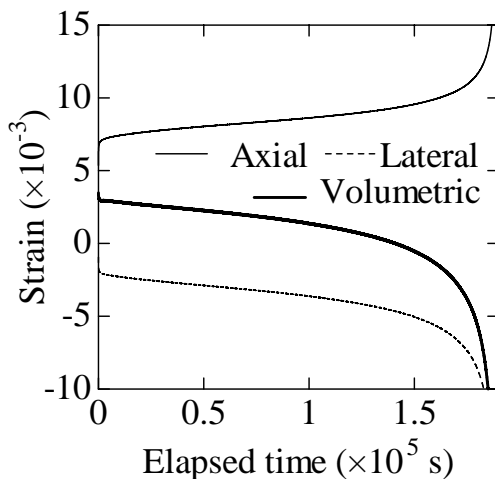


図3 含水供試体のクリープ曲線の一例

しかし、予想した絶対強度より小さな応力レベルにおいても最終破断が起きることが複数個の供試体で確認され、少なくとも凝灰岩に関しては絶対強度の存在を確認することはできなかった。ただし、岩石の寿命の予測方法と凍結状態における岩石の長期強度に関して、次のような重要な知見が得られた。一定応力を載荷してから10s後のひずみ速度とクリープ寿命の間には両対数座標上で直線近似でき(図4)、これらの近似式から未破壊の供試体の寿命が予測できる。

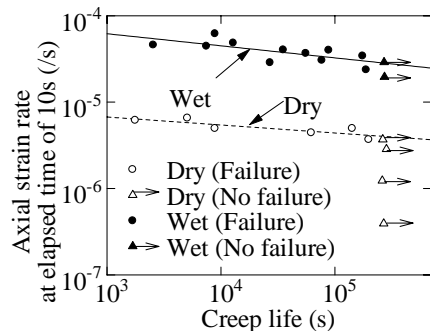


図4 $t=10s$ の軸ひずみ速度とクリープ寿命の関係

乾燥供試体に比べて含水飽和供試体の方が

一軸圧縮強度は大きく、高い応力レベルでは、含水飽和供試体のクリープ寿命の方が長くなる。ところが、ある程度クリープ応力のレベルが小さくなると、含水飽和供試体のクリープ寿命の方が短くなる(図5)。このことは、間隙水が岩石の力学的性質に与える影響は複雑であり、載荷速度や応力レベルにより異なる可能性があること、寒冷地における岩盤の長期安定性の評価には含水飽和状態で凍結した岩石の長期的な力学的性質を十分に考慮する必要があることなどを指摘している。

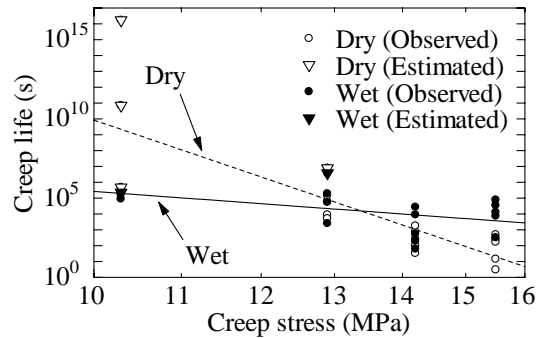


図5 クリープ寿命とクリープ応力の関係

一軸圧縮強度の載荷速度依存性とクリープ寿命の応力レベル依存性の間には相関が認められる。このことは、両者の破壊プロセスには類似点があること、片方の関係(依存性)からもう一方の関係(依存性)を推定できることを意味している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

児玉淳一、原翔平、三井善孝、藤井義明、Sub-zero温度領域における支笏溶結凝灰岩と美唄砂岩の一軸圧縮強度と破壊プロセス、Journal of MMIJ、査読有、Vol.129、2013、pp.21-28

児玉淳一、中谷匡志、奈良禎太、後藤龍彦、藤井義明、金子勝比古、凍結融解作用を受ける岩石の破壊プロセスと耐久性の評価、Journal of MMIJ、査読有、Vol.127、2011、pp.117-126

〔学会発表〕(計4件)

児玉淳一、原翔平、三井善孝、菅原隆之、第13回岩の力学国内シンポジウム、2013年1月9日、沖縄コンベンションセンター(沖縄)

三井善孝、原翔平、岩谷優子、児玉淳一、菅原隆之、氷点下における支笏溶結凝灰岩のクリープ特性、資源・素材2012(秋田)

2012年9月13日、秋田大学（秋田）
原翔平、児玉淳一、菅原隆之、凍結状態にある支笏溶結凝灰岩と美唄砂岩の強度と変形、資源・素材 2011（堺）、2011年9月28日、大阪府立大学（大阪）
門脇辰弥、田中恒祐、児玉淳一、菅原隆之、凍結した岩質材料の一軸圧縮下における破壊過程の観察、資源・素材学会北海道支部平成22年度春季講演会、2010年6月18日、北海道大学クラーク会館（札幌）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

児玉 淳一（KODAMA JUN-ICHI）
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70241411

(2) 研究分担者

小玉 齊明（KODAMA NARIAKI）
函館工業高等専門学校・助教
研究者番号：60435386
藤井 義明（FUJII YOSHIAKI）
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70192309
中村 大（NAKAMURA DAI）
北見工業大学・工学部・准教授
研究者番号：90301978

(3) 連携研究者

（ ）

研究者番号：