

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420879

研究課題名(和文)凍結融解と応力の作用を同時に受ける岩石のハイブリット損傷の評価

研究課題名(英文) Synergetic effect of constant stress and freeze-thaw action on damage development in rock specimen

研究代表者

児玉 淳一 (KODAMA, JUN-ICHI)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70241411

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：試験実施が容易な三次元的な冷却条件で凍結融解作用と一定応力を同時に与えた室内試験を実施し、岩石の損傷に及ぼす両作用の相乗効果(ハイブリット損傷)について検討した。そして、変形挙動の分析から、両方を同時に作用させると片方のみを作用させた場合に比べて損傷の発達が速くなること、一定応力を作用させることにより損傷の発達方向が特定の方向に限定されることなどを見出し、ハイブリット損傷の存在を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Synergetic effect of constant stress and freeze-thaw action on damage development in a rock specimen was investigated by laboratory tests under 3-dimensional cooling conditions. It was found that damage development by both constant stress and freeze-thaw action was more than that by constant stress or freeze-thaw action based on analysis of deformation behavior. It was also found that applied constant stress controlled orientation of damage development.

研究分野：岩盤工学

キーワード：岩石 凍結融解作用 一定応力 ハイブリット損傷 変形挙動

1. 研究開始当初の背景

法先と呼ばれる岩盤斜面の最下部では大きな応力が集中するため、クリープ変形と呼ばれる時間に依存した変形が進行し、場合によっては破壊に到ることが知られている。また、寒冷地における岩盤斜面を対象とした場合、上述した法先の応力集中に加え、岩石の損傷を進展させる因子がある。すなわち、岩石・岩盤には凍結融解作用により次第に損傷が累積し、岩種によっては崩壊にいたるものがある。このように寒冷地の岩盤斜面の表層では上記の2つの作用が同時に働くため、その長期安定性の評価には、これらをハイブリッドした損傷の把握した上、損傷の進展を定式化し、寿命を予測することが重要となる。

筆者らは、X線CTを用いて凍結融解作用による岩石内のき裂の進展プロセスを解明し、また、薄片観察により一定応力の下で花崗岩の中のき裂の進展の特徴を明らかにするなど、多方面から岩石の凍結や長期的な挙動の研究に取り組んできた。当初はこれらの研究が独立に実施されていたが、研究メンバーが研究会や学会で寒冷地における岩盤斜面の安定性の評価に関して議論をする中で本研究課題の発想が生まれてきた。すなわち、凍結融解作用と応力が岩石の損傷の進展に与える影響の大小についての議論に及んだときに、両者の相乗効果に関するアイデアが生まれた。そこで、この考えの妥当性を確かめるために、本研究課題を立案した。

2. 研究の目的

まず、新たに作製した1次元冷却・加熱システムを用いて岩石供試体を冷却し、装置の性能を把握したうえで、1次元的に冷却した供試体と三次元的に冷却した供試体を用いて、冷却条件が岩石の強度・変形性に与える影響を明らかにする。次に、一定応力と凍結融解作用を同時に与えた試験を実施し、両者の相乗効果による岩石の損傷の特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 1次元冷却・加熱装置の性能評価：図1に示す1次元冷却・加熱装置を用いて以下の手順で供試体を冷却し、供試体の内部温度の測定を行った(図2)。2台の恒温水槽を用意し、各々を、ホースを介して内部に水路を設けた金属ピースと接続する。2つの金属ピースの間に供試体を挟む。恒温水槽、ホース、金属ピース内に不凍液を循環させる。不凍液の温度を制御することにより金属ピースの温度を制御し、供試体を冷却する。この時、2台の恒温水槽内の不凍液の温度を独立に制御し、供試体の下部から上部へ向かって一方向に冷却を進める。また、温度管理のため、ホースを断熱チューブで覆い、供試体と金属ピースを低発泡ポリスチレンビーズ(粒径1~5mm)に埋没させて断熱する。

(2) 冷却条件が岩石の強度・変形性に与え

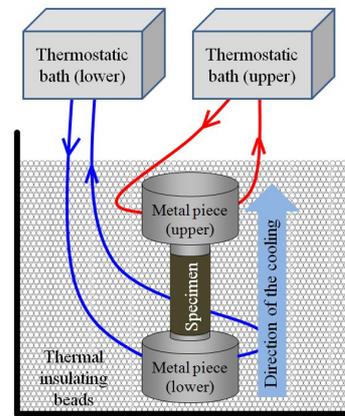


図1 一次元冷却システムの概略

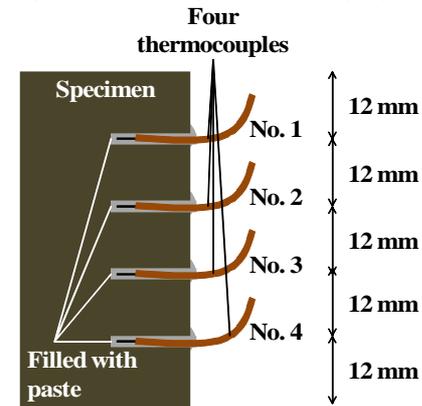


図2 供試体の内部温度の測定方法

る影響：一次元冷却、三次元冷却の両条件で冷却した美唄砂岩と支笏溶結凝灰岩供試体を用いて、一軸圧縮試験を実施し、軸ひずみと径ひずみを測定する。軸ひずみ速度と試験温度は各々、 4.2×10^{-4} /s、-20 とし、各条件下で、4~7回ずつ試験を実施する。

(3) 一定応力と凍結融解作用によるハイブリッド損傷の有無の確認：含水飽和させた支笏溶結凝灰岩の供試体を用いて、通常のクリープ試験とハイブリッド試験を交互に実施する(図3)。まず、一定応力の大きさを8.2MPaに設定し、通常のクリープ試験とハイブリッド試験をそれぞれ2回実施した。その後、応力を10.3MPaに設定し、通常のクリープ試験とハイブリッド試験をそれぞれ2回実施する。なお、ハイブリッド試験では温度を+20 ~ -20 の間で変化させ、その周期は8時間とする。8.2MPaと10.3MPaの一定応力は、それぞれ、+20 の下での含水飽和供試体の一軸圧縮強度の40%と50%である。

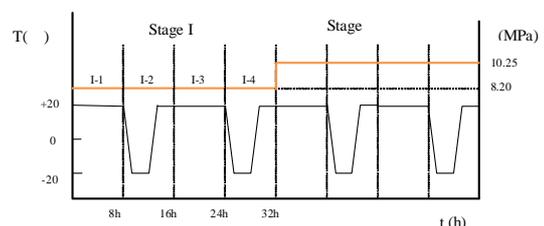


図3 クリープとハイブリッドの交代試験

4. 研究成果

(1) 1次元冷却・加熱装置の性能評価：1次元冷却における含水飽和供試体の内部温度の変化を図4に示す。図中の線図は、各々図2中のNo. 1, 2, 3, 4の熱電対の温度と恒温水槽の温度センサで測定した不凍液の温度である。供試体内部の温度は直線的に減少し、最終的には一定の値に収束したが、No. 1~4の温度には差が見られる。下部のNo. 4

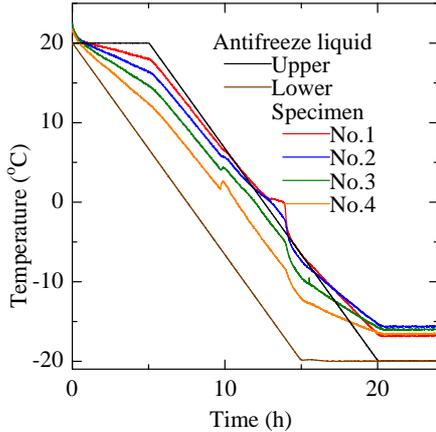


図4 一次元冷却時の供試体の内部温度の変化(支笏溶結凝灰岩)

の温度の低下が最も早く、No. 3がこれに続く。このことより、期待した通り一次元冷却では供試体下部から冷却が進んでいることがわかる。なお、10~15h付近で一時的に温度が上昇しているが、これは、間隙水の過冷却が破れ、氷に相転移した際の発熱の影響であると考えられる。

(2) 冷却条件が岩石の強度・変形性に与える影響：含水飽和状態にある支笏溶結凝灰岩と美唄砂岩の応力-ひずみ線図の例を、それぞれ図5, 6に示す。参考として、室温下における一軸圧縮試験における線図も示している。これらの図より、両岩石ともに、一次元冷却した供試体と三次元冷却した供試体の応力-ひずみ線図は互いに類似していることがわかる。

含水飽和状態にある支笏溶結凝灰岩と美唄砂岩の一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比、ピーク応力におけるひずみ(以降、限界ひずみと呼ぶ)の平均値を表1, 2に示す。

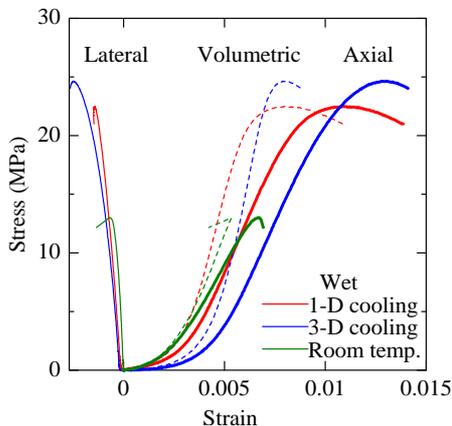


図5 応力-ひずみ線図の例(支笏溶結凝灰岩)

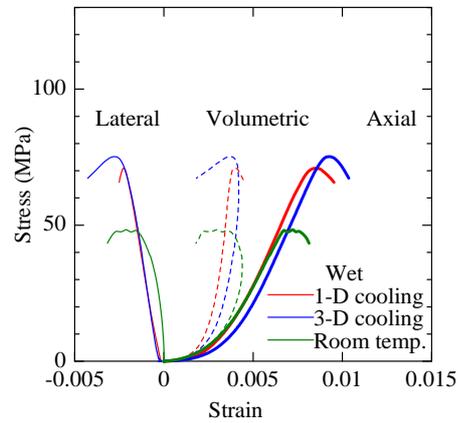


図6 応力-ひずみ線図の例(美唄砂岩)

なお、ヤング率とポアソン比は、一軸圧縮強度の40~60%の範囲内のデータに対して最小二乗法を適用して求めた。また、荷重初期の軸ひずみには、エンドピースと供試体の隙間の閉塞によるひずみも含まれていると考えられる。このひずみに起因する限界軸ひずみのばらつきを排除するため、応力-軸ひずみ線図の直線部分の接線が横軸と交わる点(応力が0の点)を求め、限界軸ひずみの算出にはこの点からのひずみの値を用いた。参考として、室温下における一軸圧縮試験の結果も示している。表中の括弧内の数値は標準偏差である。

表1 支笏溶結凝灰岩の強度・変形性

力学的性質	1次元	3次元
UCS (MPa)	22.4(1.9)	24.5(1.4)
ヤング率 (GPa)	3.5(0.5)	3.2(0.5)
ポアソン比	0.20(0.02)	0.19(0.04)
限界ひずみ ($\times 10^{-3}$)	軸	8.8(0.8)
	径	-1.7(0.3)
		9.8(1.2)
		-1.9(0.4)

表2 美唄砂岩の強度・変形性

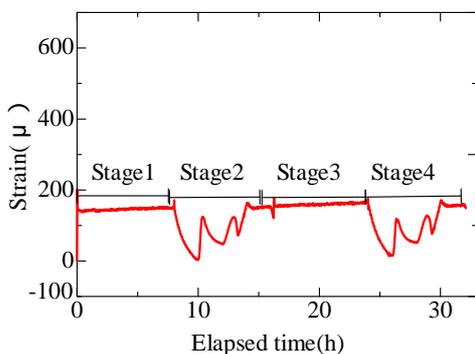
力学的性質	1次元	3次元
UCS (MPa)	73.8(6.3)	76.8(5.1)
ヤング率 (GPa)	13.1(0.6)	14.2(0.6)
ポアソン比	0.30(0.02)	0.32(0.03)
限界ひずみ ($\times 10^{-3}$)	軸	6.1(0.6)
	径	-2.4(0.3)
		5.7(0.4)
		-2.5(0.4)

両表より、限界ひずみのデータのばらつきは大きいものの、支笏溶結凝灰岩、美唄砂岩ともに、1次元と3次元で冷却した供試体の物性値には大きな差異は認められないことがわかる。また、一軸圧縮強度の平均値を見る限り、いずれの場合も3次元冷却の値は1次元冷却の値よりもわずかに大きく、少なくとも今回の冷却条件では、3次元冷却で供試体の劣化が進行したとはいえない。

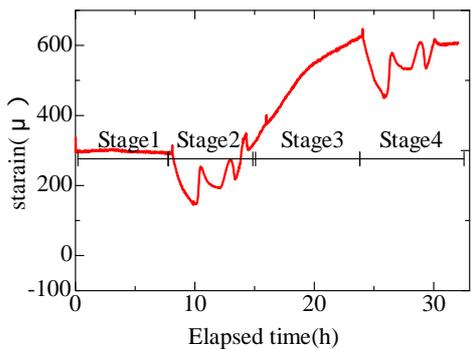
以上のことより、今回用いた支笏溶結凝灰岩と美唄砂岩では、3次元冷却時にも物性値の変化をもたらすような劣化は進行しておらず、氷点下における力学的性質の検討の際には、簡易的な3次元冷却で供試体を用意しても差し支えないと結論できる。

(3) 一定応力と凍結融解作用によるハイブリッド損傷の有無の確認：支笏溶結凝灰岩を用いたクリープ試験とハイブリッド試験の各応力レベルにおける横ひずみと経過時間の関係をそれぞれ図7に示す。縦軸のひずみは伸長を正としている。図より、クリープ試験では時間経過と共にひずみの値は膨張側に増加していることがわかる。応力レベル50%のStage3でひずみが大きく変化したことから、直前のハイブリッド試験が岩石の損傷に影響を与えた可能性がある。

ハイブリッド試験が岩石に与える損傷(以下、ハイブリッド損傷と呼ぶ)の効果を定量的に明らかにするために、Stage毎のひずみの増分を比較した結果を図8に示す。応力レベルが40%の時のひずみ増分には、次のような特徴が見られる。Stage2ではStage1より



(a) 応力レベル 40%



(b) 応力レベル 50%

図7 クリープ試験とハイブリッド試験における横ひずみの挙動

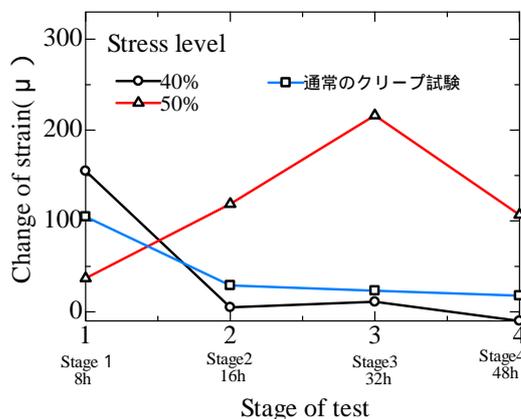


図8 各ステージにおけるひずみ増分

小さくなるが、Stage 3 ではわずかに大きくなり、Stage 4 では再び小さくなる。一方、応力レベル 50%の時のひずみ増分には、次のような特徴が見られる。Stage 2 のひずみ増分は Stage 1 より大きく、Stage 3 では急増している。そして、続く Stage 4 では減少している。一方、通常のクリープ試験では、時間の経過とともにひずみ増分が小さくなっている。したがって、上記の交代試験におけるひずみ増分の増加は、凍結融解作用による損傷によるものと考えられ、一定応力の下で凍結融解作用が働くと相乗効果により損傷はより発達することを示唆している。

以上のことより、寒冷地における岩盤斜面の安定性の評価には一定応力による損傷の発達に加え、凍結融解作用による相乗的な損傷の発達も十分に考慮する必要があると考える。

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5件)

児玉淳一, 畔原孝典, 福田大祐, 藤井義明, 凍結融解履歴を受ける泥質片岩と花崗岩の変形挙動と破壊プロセス, Journal of the Society of Material Science, Japan, 査読有, Vol. 63, 2014, pp.219-226.

S.Hara, J. Kodama, Y. Fujii, D. Fukuda, Y. Mitsui and T. Sugiura, Uniaxial Compressive Strength of Shikotsu Welded Tuff and Bibai Sandstone at Sub-zero Temperature, Rock Mechanics for Global Issues, 査読有, 2014, pp.151-159.

Y. Mitsui, S.Hara, K. Akabane, J. Kodama, T. Sugawara, D. Fukuda, and Y. Fujii, Creep Behavior of Frozen Shikotsu Welded Tuff, Rock Mechanics for Global Issues, 査読有, 2014, pp.119-127.

J. Kodama, N. Nakaya, Y. Nara, T. Goto, D. Fukuda, Y. Fujii and K. Kaneko, Observation of Failure Process of Rocks Subjected to Freeze-Thaw Cycles Using X-ray CT, Rock Mechanics for Global Issues, 査読有, 2014, pp.628-634.

三井善孝, 児玉淳一, 原翔平, 菅原隆之, 福田大祐, 藤井義明, 凍結した支笏溶結凝灰岩の力学的挙動の時間依存性, Journal of MMIJ, 査読有, Vol. 129, 2013, pp.433-439.

〔学会発表〕(計5件)

三井善孝, 児玉淳一, 原翔平, 福田大祐, 藤井義明, 氷点下における支笏溶結凝灰岩の力学的挙動, 平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会, 2015年9月16日~2015年9月18日, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)

三井善孝, 児玉淳一, 菅原隆之, 福田大祐,

藤井義明, 1 次元のおよび 3 次元に冷却した岩石の氷点下における一軸圧縮試験, 資源・素材学会平成 27 年度春季大会, 2015 年 3 月 27 日~2015 年 3 月 29 日, 千葉工業大学 (千葉県・習志野市)

三井善孝, 赤羽一輝, 児玉淳一, 菅原隆之, 福田大祐, 藤井義明, 岩石表面への氷の付着強度の測定, 資源・素材学会平成 26 年度春季大会, 2014 年 3 月 26 日~2014 年 3 月 28 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区)

赤羽一輝, 三井善孝, 児玉淳一, 菅原隆之, 福田大祐, 藤井義明, Sub-zero 温度領域における美唄砂岩のクリープ試験, 資源・素材学会平成 26 年度春季大会, 2014 年 3 月 26 日~2014 年 3 月 28 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区)

赤羽一輝, 三井善孝, 児玉淳一, 菅原隆之, Sub-zero 温度領域における支笏溶結凝灰岩のクリープ寿命の評価, 資源・素材学会北海道支部平成 25 年度春季講演会, 2013 年 6 月 15 日, 北見工業大学 (北海道・北見市)

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・准教授

研究者番号: 60435386

中村 大 (NAKAMURA DAI)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 90301978