



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	(学生発表：修士課程) 一次元及び三次元凍結融解試験における支笏溶結凝灰岩の変形挙動
Author(s)	野中, 聡志; 児玉, 淳一; 藤井, 義明 他
Description	一般社団法人資源・素材2021(札幌), 2021年9月14日～16日, 札幌市(オンライン開催). https://confit.atlas.jp/guide/event/mmij2021b/top
Citation	資源・素材講演集, 8(2021)(2(秋・札幌)), 2K0206-17-01
Issue Date	2021-09-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/82698
Type	conference paper
File Information	2K0206-17-01-1.pdf



若手・一般ポスター発表(ショート講演)

【若手・一般ポスター発表(ショート講演有)】地球・資源分野／環境・リサイクル分野

(Poster session & Short presentation) Earth & Resources Group / Environment & Recycling Group

2021年9月15日(水) 13:00 ~ 14:36 第2会場 (Webex)

[2K0206-17-01] (学生発表：修士課程) 一次元及び三次元凍結融解試験における支笏溶結凝灰岩の変形挙動
[Student presentation: Master's Course] Durability assessment of Shikotsu welded tuff subjected to freeze-thaw cycles in one-dimensional and Three-dimensional Tests

○野中 聡志¹、児玉 淳一¹、藤井 義明¹、福田 大祐¹、中村 大² (1. 北海道大学、2. 北見工業大学)

○Satoshi Nonaka¹, Junichi Kodama¹, Yoshiaki Fujii¹, Daisuke Fukuda¹, Dai Nakamura² (1. Hokkaido university, 2. Kitami institute of technology)

キーワード：凍結融解、支笏溶結凝灰岩、変形、X線CT、耐久性評価

Freeze-thaw, Shikotsu welded tuff, Deformation, X-ray CT, Durability assessment

寒冷地における岩石・岩盤構造物は、凍結融解作用を受けることにより次第に劣化していくが、気温の変化による温度の変化は構造物により異なる。岩盤斜面の温度変化は、岩盤表面から奥部に向かって一次元的に起こるのに対し、塀などに使用されている石材では、その周囲から中心に向かう三次元的な変化となる。したがって、凍結融解作用に対するこれらの構造物の耐久性の評価には、一次元的な温度変化に加え、三次元的な温度変化の下での検討が必要になる。本研究では、石材として北海道内で広く利用されている支笏溶結凝灰岩を対象に、一次元凍結融解試験と三次元凍結融解試験を実施し、その耐久性について評価した。一次元、三次元凍結融解試験ともに凍結時に岩石供試体の膨張挙動が確認されたが、P波速度と空隙率の変化は小さかった。供試体表面に小さな剥離が確認されたものの、X線CTによる供試体内部の観察では、亀裂の発生・進展は見られなかった。以上のことより、支笏溶結凝灰岩は、凍結融解作用に対する耐久性が非常に高い岩石であると考えられる。

1. はじめに

寒冷地における岩石・岩盤構造物は、凍結融解作用を繰り返し受けることにより次第に劣化・損傷するため、それらの長期的な安定性を評価するためには、凍結融解作用が岩石に与える劣化・損傷の影響を把握する必要がある。しかし、気温の変化による温度の変化は構造物によって異なる。岩盤斜面の温度変化は、岩盤表面から奥部に向かって一次的に起こるのに対し、塀などに使用されている石材では、その周囲から中心へと向かう三次元的な温度変化となる。したがって、凍結融解作用に対するこれらの構造物の耐久性の評価には、一次的な温度変化に加え、三次元的な温度変化の下での検討が必要となる。過去には12種類の岩石を対象に、三次元的な凍結融解試験を繰り返し実施し、それらの破壊プロセスの観察と凍結融解に対する岩石の耐久性を評価した研究¹⁾、5種類の岩石に対して、一次的な凍結試験を実施し、それらの凍上性を判定した研究²⁾が行われている。しかし、同一の供試岩石に対して一次元凍結融解試験と三次元凍結融解試験の両方を行いその差異について検討した研究事例は極めて少ない。そこで本研究では、石材として北海道内で広く利用されている支笏溶結凝灰岩(札幌軟石)を対象に、含水飽和状態にある供試体に対し、一次元凍結融解試験と三次元凍結融解試験の両方を実施して、ひずみの計測結果からそれぞれの試験における岩石の変形挙動を明らかにするとともに、乾燥重量、P波速度、空隙率の変化やX線CT画像の分析から、凍結融解作用による岩石の劣化・損傷について検討した。以下では、一次元凍結融解試験と三次元凍結融解試験を、それぞれ一次元試験と三次元試験と呼ぶことにする。

2. 試験方法

2.1 供試体

供試岩石には空隙率が約30%の支笏溶結凝灰岩を用い、岩石ブロックの流理面に対して垂直方向にボーリングを行い直径30mm、長さ60mmの円柱供試体を作製した。+80℃の恒温槽で24時間以上静置して乾燥させた後、純水中で24時間以上真空脱気を行い含水飽和状態とした。

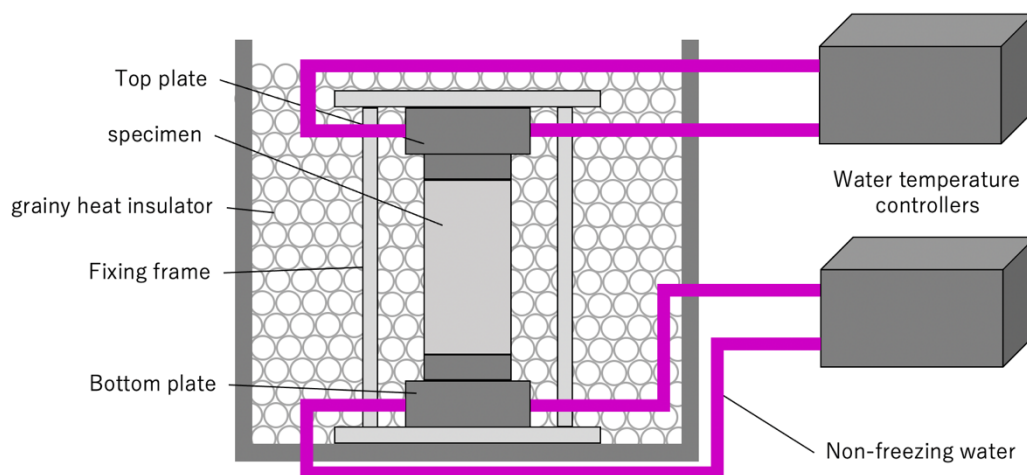


Fig.1 一次元試験の概略

2.2 試験装置

一次元試験(Fig.1)の概略は以下の通りである。2台のプログラム精密低温恒温水槽(東京理化器 NCB-310)にそれぞれホースを介して内部に水路を設けた金属製のプレートと接続し、2つのプレートの間に供試体を設置した。そして、それぞれのプレートに温度を制御した不凍水(40%エチレングリコール水溶液、凝固点-24℃)を循環させ、供試体温度を一方の端面からもう一方の端面へと一次的に変化させた。試験中は、ホースを断熱チューブ(日商エアロ製 AEROFLEX M032013)で、プレートと供試体を低発砲ポリエチレンビーズ(古川商店製ペアレビーズ、粒形1~5mm)で断熱した。三次元試験では供試体を特殊恒温槽(日本医化機器製作所製 LP-ZPS)内に静置し、試験を実施した。

3. 変形挙動を計測した凍結融解試験

3.1 試験条件

含水供試体を試験装置に設置し、以下に示す冷却・加熱条件で一次元及び三次元試験を行い、1サイクル10時間の凍結融解履歴を5サイクル与えた。一次元試験では、上部のプレートの温度変化に対し、下部のプレートの温度変化を2時間遅らせた(Fig.2(a))。三次元試験では、特殊恒温槽を用いて、温度変化は一次元試験の上部のプレートと同じ設定とした(Fig.2(b))。内部温度は供試体側面から孔を空け、深さ15mmの位置に熱電対を設置して測定した。供試体各位置の内部

温度を測定するために、供試体端面上部から 10 mm 刻みに T-1~T-5 の 5 箇所のデータを測定した(Fig.3)．内部温度の計測には T 型熱電対を用いた．それぞれの試験の各測定位置における 1 サイクル目の温度変化を Fig.2 中に示す．一次元試験では T-1→T-5 の順に温度変化が起きていることが確認された(Fig.2(a))．これに対し，三次元試験では各測定位置ではほぼ同時に温度変化が起きていることが確認された(Fig.2(b))．これらの結果より上述の冷却・加熱条件で，一次元試験では，供試体の上部から下部へと向かって一次元的な温度変化を与えることができ，三次元試験では，供試体周囲から三次元的な温度変化を与えることができることがわかった．以下，一次元及び三次元試験ではこれらの方法を用いて凍結融解試験を行った．

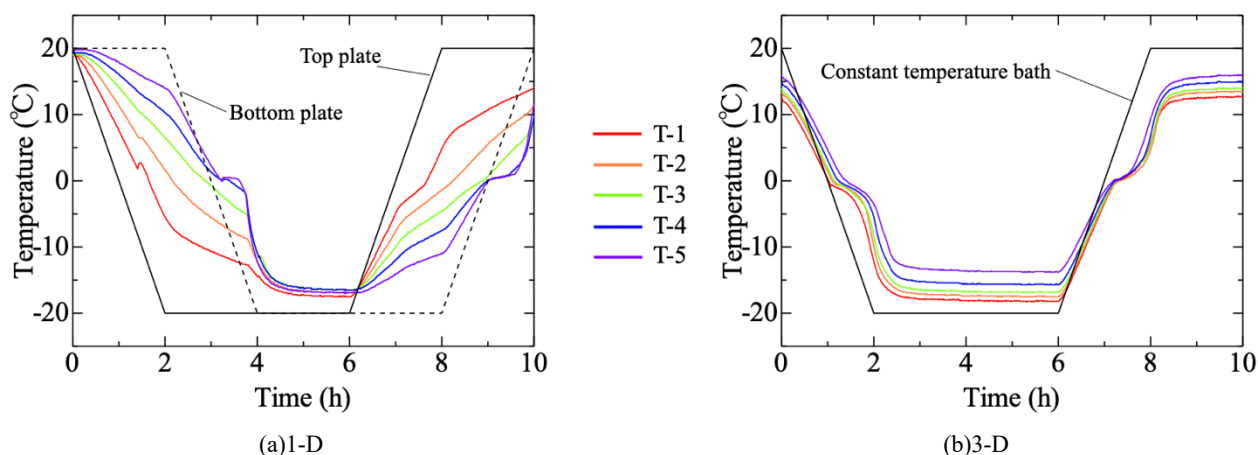


Fig.2 温度と時間の関係

3.2 計測項目

以下の試験ではひずみを計測した．測定に用いたひずみゲージは供試体側面に接着した．内部温度と同様にひずみの測定箇所は，供試体端面上部から 10 mm 刻みに S-1~S-5 の 5 箇所とした(Fig.3)．ひずみゲージは共和電業社製の KFGS-5-120-C1-11L1M2R を用いた．

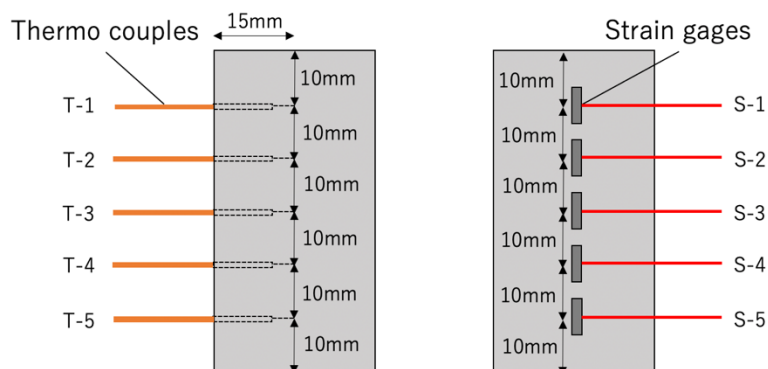


Fig.3 温度とひずみの計測方法

3.3 試験結果

(1) ひずみと時間の関係

一次元及び三次元試験の 1 サイクル目(N=1)と 5 サイクル目(N=5)のひずみと温度の関係を Fig.4, Fig.5 に示す．図中の縦軸は全て膨張を正としている．いずれの試験においても，ひずみの挙動より，冷却過程では時間の経過に伴い熱収縮が起きた後に体積膨張が見られ，その後再び熱収縮を示している．冷却過程における体積膨張は間隙水が凍結し，間隙水へと相変化する際に生じたものと考えられる．低温保持の過程では，ひずみの挙動は一定の値に収束しており，その後加熱過程では，時間の経過に伴い熱膨張が起きた後に間隙水の融解による体積収縮が見られ，その後再び熱膨張を示している．これらの挙動はいずれのサイクルにおいても認められ，両試験においても 1 サイクル目から 5 サイクル目にかけて大きな変化は見られなかった．各位置におけるひずみの挙動の変化は，温度変化と同様に，一次元試験においては S-1→S-5 の順に現れたのに対し，三次元試験においては 5 ヶ所ほぼ同時に変化が起きていることが確認できる．

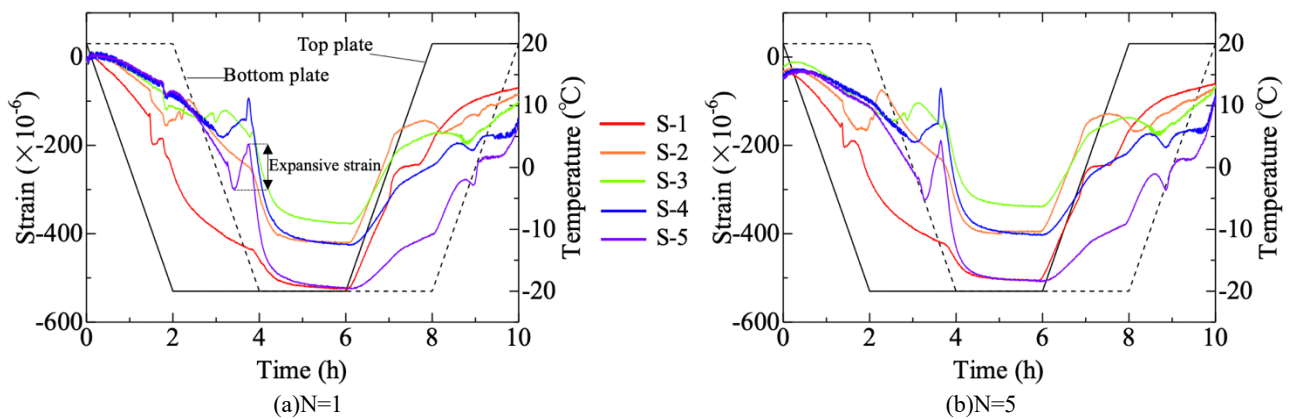


Fig.4 ひずみと時間の関係(1-D)

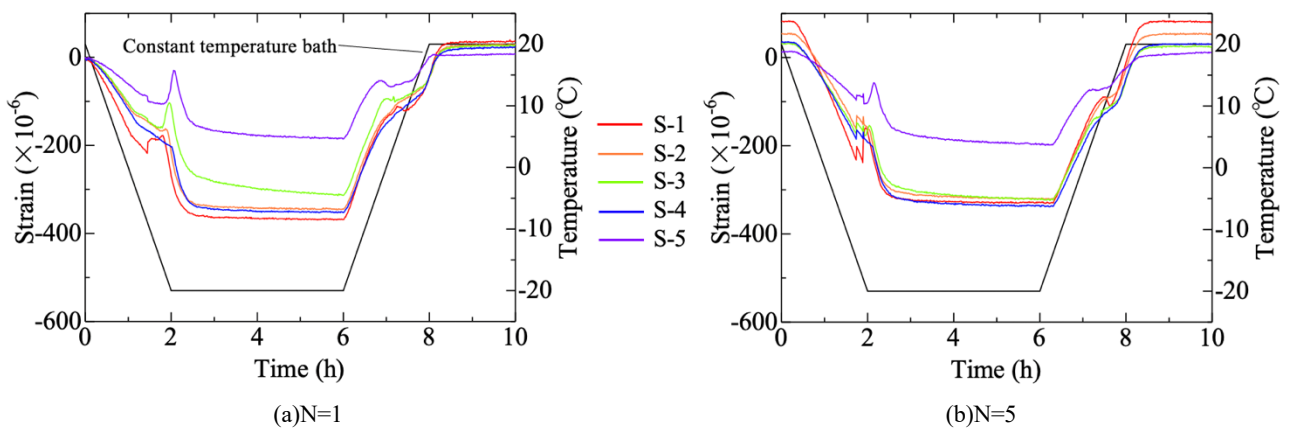


Fig.5 ひずみと時間の関係(3-D)

(2) 膨張ひずみ

上述したひずみ—時間線図の冷却過程で認められた体積膨張 (Fig.4(a)) を膨張ひずみと定義し、この膨張ひずみとサイクル数の関係を Fig.6 に示す。一次元試験においては、いずれの位置においてもサイクルが進むごとに膨張ひずみは大きくなる傾向が見られるが、その変化量は小さい。また供試体上部よりも下端面に近い S-4、S-5 の位置においてより大きな膨張ひずみが現れている。三次元試験においては、サイクル数の増加に伴う膨張ひずみの増加・減少に規則性は確認されなかった。また、測定位置による膨張ひずみの大きさにも相関は見られなかった。両試験における膨張ひずみは 0~150 μ 程度の値を示しており、温度変化方法の違いによる膨張量の差は認められなかった。

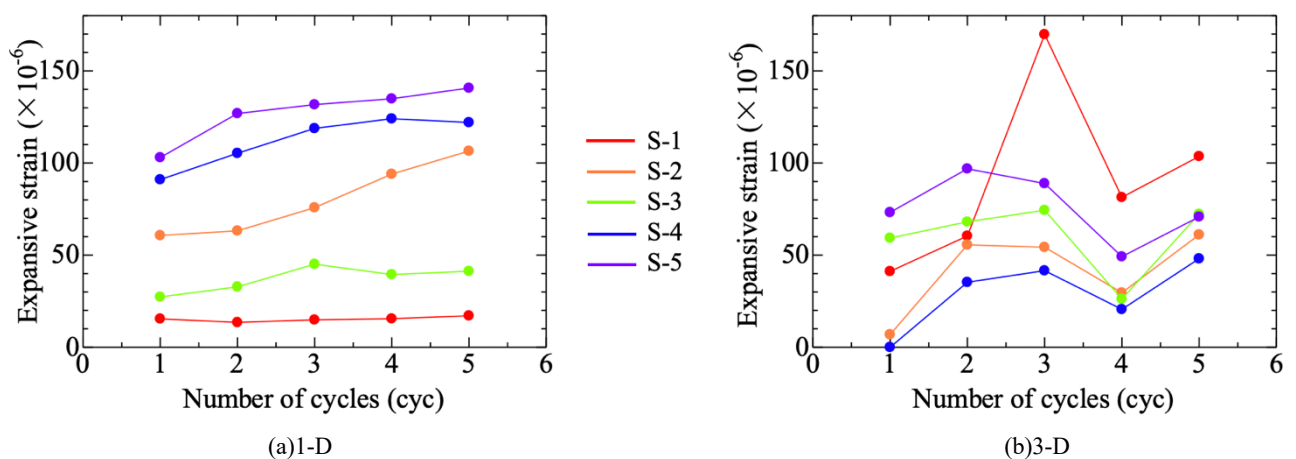


Fig.6 膨張ひずみとサイクル数の関係

(3) 累積残留ひずみ

各サイクルにおいて開始時と終了時のひずみの値の差を残留ひずみと定義し、この残留ひずみの累積値とサイクル数の関係を Fig.7 に示す。一次元試験では各サイクル終了時に温度が試験開始時の状態まで戻っていないため、1 サイクル目終了時のひずみの値を基準とし、2 サイクル目以降の累積残留ひずみを示している。一次元試験では、全ての測定位置において残留ひずみが膨張となるサイクルと収縮となるサイクルが存在し、S-1 を除くと、5 サイクル終了時点での累積膨張ひずみに大きな変化はない。S-1 では4→5 サイクル目に 60μ 程度の膨張ひずみが現れた。三次元試験では、1~3 サイクルまではいずれの測定位置においても膨張方向への変化が見られたが、その後は収縮方向への残留ひずみが現れ、累積残留ひずみの値には収束している傾向が見られた。

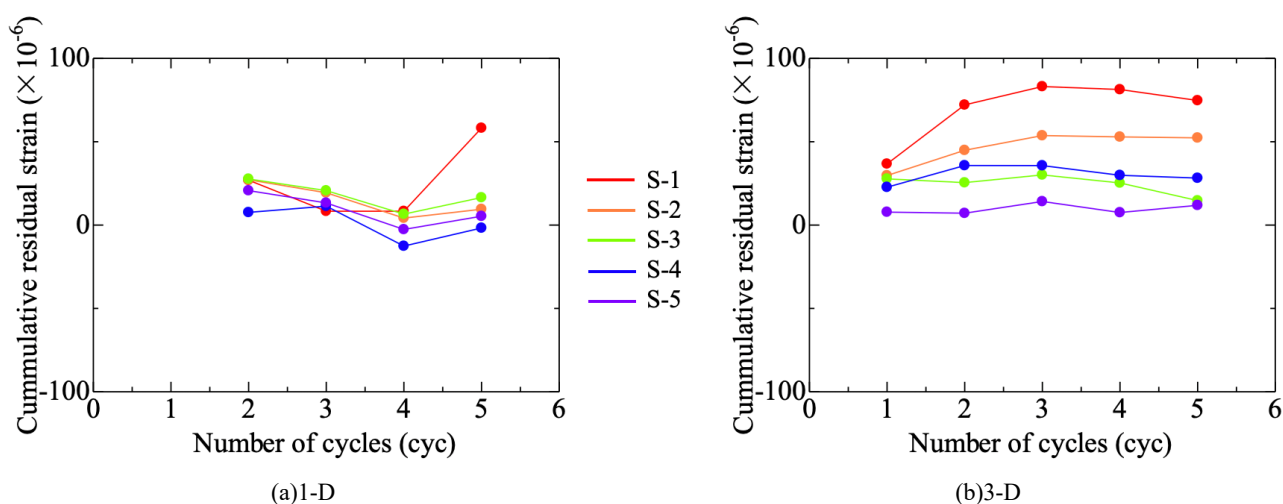


Fig.7 累積残留ひずみとサイクル数の関係

4. 物性値の計測と X 線 CT 画像の撮影を行った凍結融解試験

4.1 試験条件

供試体は、3 章の試験で用いたものとは別であり、一次元試験と三次元試験で、それぞれ 1 個と 3 個用意した。一次元試験と三次元試験の加熱・冷却条件はともに 3 章の試験と同じであるが、この試験では、10 サイクル毎に供試体を試験装置から取り出し、再び恒温槽で 24 時間以上乾燥させた後、純水中で 24 時間以上真空脱気を行い、含水飽和状態とした。一次元試験と三次元試験は、それぞれ 70 サイクルと 80 サイクルまで試験を行った。また、供試体の内部構造の変化を非破壊で観察するために、X 線 CT 画像の撮影を行った。使用した装置は、東芝 IT コントロールシステム製のマイクロフォーカス X 線 CT スキャナー (TOSCANER-30900 μ hd) である。本研究では、一度のスキャンで複数の断面画像を撮影することのできるコーンビームスキャンモードを用いた。X 線の管電圧と管電流は、それぞれ、130kV、62 μ A に設定し、スライス圧は 50 μ m、断面画像の画素数は 1024 $\times$ 1024 ピクセルとした。

4.2 計測項目

計測項目は、乾燥重量、P 波速度、空隙率である。乾燥重量と P 波速度は試験開始前と各サイクルの開始前の乾燥状態で測定し、空隙率は試験開始前と各サイクル開始前の含水飽和重量を用いて算出した。

4.3 試験結果

(1) 物性値の変化

試験開始前の測定値を基準として正規化した乾燥重量、P 波速度、空隙率とサイクル数の関係を Fig.9 に示す。Fig.9(a) より、一次元試験と三次元試験の乾燥重量はともに減少傾向を示すことがわかる。乾燥重量の減少は供試体表面の剥離によるものであると考えられるが、両試験の変化量は同程度であり、試験終了時点での値は 0.004 程度ととても微量である。Fig.9(b) より、P 波速度の変化も一次元試験では減少傾向にあることが確認できるが、その変化量は小さく、供試体によりばらつきはあるものの三次元試験においても、試験開始前の値との変化はあまり確認されなかった。Fig.9(c) より、一次元試験と三次元試験ともに、空隙率には試験開始直後の 10 サイクルで大きな増加が見られ、その後 30~40 サイクル程度まで緩やかな増加傾向が見られた。その後は減少や増加が見られたが、試験終了時点ではいずれの供試体においても初期状態からの変化量は 0.05 程度となっている。

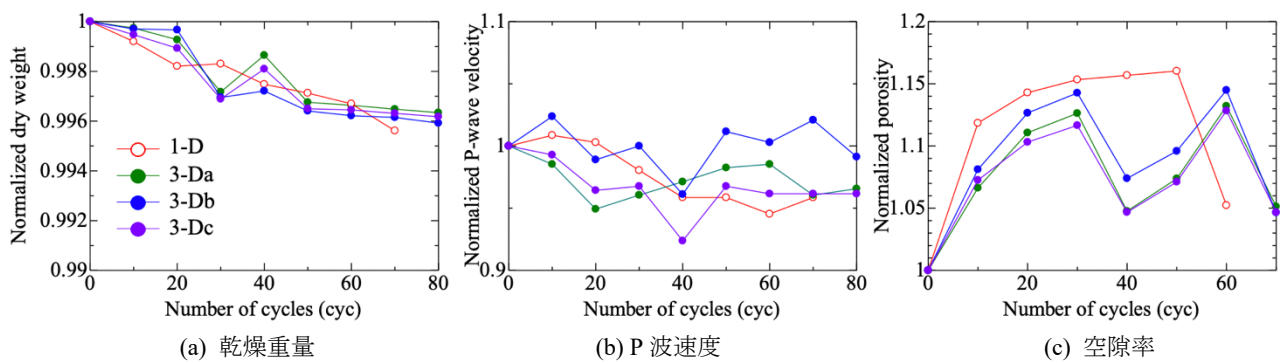


Fig.9 各物性値とサイクル数の関係

(2) X 線 CT 画像

Fig.10, Fig.11 に、それぞれ一次元試験と三次元試験の X 線 CT 画像を示す。一次元試験では試験開始前、40 サイクル、70 サイクル終了時に撮影を行い、三次元試験では試験開始前と 30 サイクル終了時に撮影を行った。CT 画像では密度が低い部分が暗色で表されるため、空隙や亀裂は岩石の基質部よりも暗色で表される。一次元凍結融解・三次元凍結融解ともに、サイクルの進行に伴う新たな内部亀裂の発生や進展、CT 値分布の顕著な変化は確認されなかったが、供試体表面において剥離が起きた箇所が複数確認された。これらの剥離は、主に Fig.10 の赤丸に示すように、供試体表面に岩片や鉱物片が露出している箇所で多く見られた。

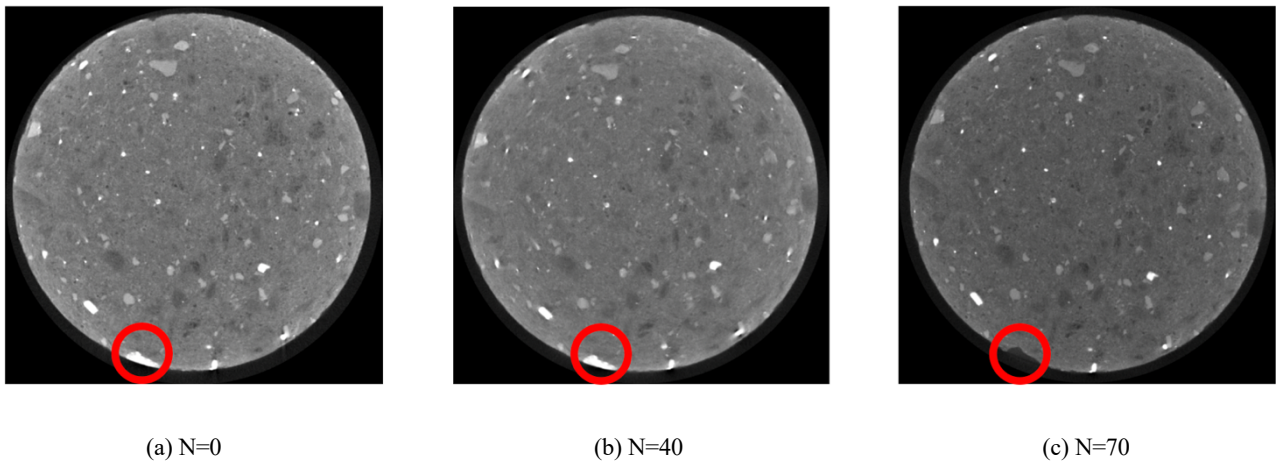


Fig.10 一次元試験の X 線 CT 画像

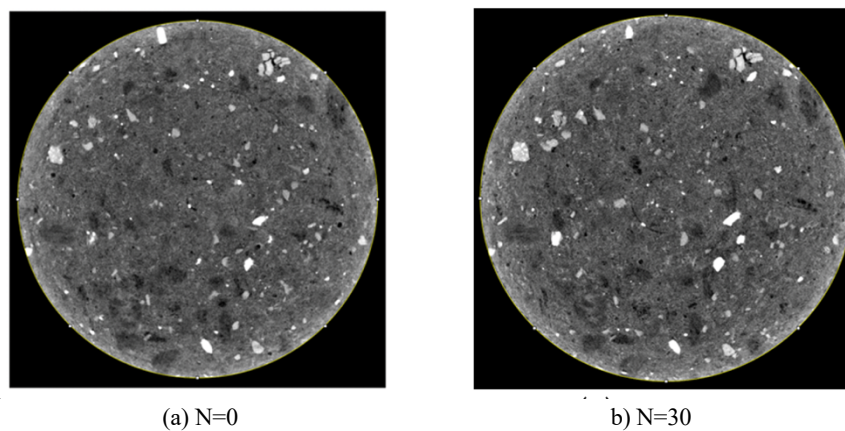


Fig.11 三次元試験の X 線 CT 画像

5. 考察

本研究で供試岩石に用いた支笏溶結凝灰岩の凍結融解に対する抵抗性を評価するために、以下では、他の凝灰岩を用いた三次元凍結融解試験に関する既存の研究結果との比較を行う。

(1) 膨張ひずみと残留ひずみ

門脇³⁾は本研究と同じ含水・温度変化条件において、3種類の登別溶結凝灰岩に対し、三次元凍結融解試験を行い、流理面に直交する方向のひずみの計測を行っている。3種類の岩石のうち、赤色凝灰岩と黒色凝灰岩は5サイクル以内に大きな亀裂が発生して破断に至っているが、赤色凝灰岩の1サイクル目と2~5サイクルの膨張ひずみは、それぞれ600 μ 程度と300 μ 程度であり、黒色凝灰岩の膨張ひずみは5サイクルを通して500~1500 μ 程度であった。また、5サイクル以内に亀裂の発生しなかった緑色凝灰岩でも、サイクル数を重ねるごとに膨張ひずみは増加し、1サイクル目では0 μ 程度、5サイクル目には200 μ 程度まで増加している。また、累積残留ひずみには次のような変化が見られている。赤色凝灰岩では、初めのサイクルにおいて300 μ 程度の残留ひずみが現れ、その後は緩やかな増加傾向を示している。黒色凝灰岩では、初めのサイクルにおいて500 μ 程度の残留ひずみが現れ、その後は膨張方向への増加傾向を示し、5サイクル終了時には1500 μ 程度の値となっている。緑色凝灰岩の残留ひずみは膨張方向への増加傾向を示しており、初めのサイクルで700 μ 程度の値を示したのち、5サイクル終了時には3000 μ 程度まで増加している。これらの結果より、低サイクル数で破断に至った岩石はいずれも、支笏溶結凝灰岩より大きな膨張ひずみを示しており、破断しなかった岩石でも、サイクルを重ねる毎に膨張ひずみが増加していく傾向が確認されたことがわかる。また、本研究では、サイクル数の増加に伴う残留ひずみの増加傾向は確認されなかったのに対し、登別溶結凝灰岩では、程度の差はあるものの、いずれの岩石でも、膨張方向への増加が確認された。膨張ひずみと残留ひずみは、微小亀裂の発生や進展による岩石内部の劣化・損傷を示しているため、これらのことから支笏溶結凝灰岩は、凍結融解作用により劣化しにくい岩石である可能性がある。

(2) 乾燥重量とP波速度、空隙率

児玉ら⁴⁾は、登別溶結凝灰岩の岩石ブロックから作製した一辺の長さが4cmの立方体状の供試体3個に対して、恒温槽内の温度を-10~20℃の間で変化させた1サイクル6時間の三次元凍結融解サイクルを繰り返し与え、10サイクル毎に供試体の乾燥重量、P波速度、空隙率の測定を行った。20~40サイクル程度で供試体の角や稜において剥離が起り始め、50サイクル終了時には、表面の大きな剥離や崩壊によって初期重量の5~60%程度減少している。また、測定面が崩壊するまでP波速度の計測を行った結果、10~20サイクル終了時には、いずれも初期値と比較して5~20%程度の低下が確認されている。空隙率はサイクルの進行に伴い、終始増加傾向にあり、60サイクル終了時には初期値と比較して、30~70%の増加が確認されている。以上の物性値の変化量は、いずれも本研究で得られた支笏溶結凝灰岩の物性値の変化量より明らかに大きい。乾燥重量の減少、P波速度の低下、空隙率の増加は、供試体の劣化・損傷や内部構造の変化を表している。したがって、これらの物性値の変化からも、本研究で用いた支笏溶結凝灰岩は劣化の進行が極めて緩やかであり、凍結融解抵抗性が高い岩石であることを示唆している。

6. まとめ

支笏溶結凝灰岩に対して一次元凍結融解試験及び三次元凍結融解試験を行い、凍結融解作用による岩石の劣化・損傷に与える影響について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 両試験ともに、膨張ひずみや残留ひずみは現れるが、岩石に著しい劣化・損傷を与える程度ではない。
- (2) 乾燥重量及びP波速度の低下、空隙率の増加が確認されたが、いずれも変化量は極めて小さい。
- (3) 両試験ともに、凍結融解サイクル数の増加に伴う亀裂の発生・進展等の内部構造の変化は認められなかった。
- (4) 以上のことから、支笏溶結凝灰岩は凍結融解抵抗性の高い岩石であると考えられる。

7. 引用文献

- 1) 児玉淳一、中谷匡志、奈良禎太、後藤龍彦、藤井義明、金子勝比呂(2011)、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, Vol. 127, pp. 117-126
- 2) 中村大、後藤隆司、鈴木輝之、伊藤陽司、山下聡(2008)、岩石の凍上に関する基礎的研究-岩石の内部構造、物性値の比較を基にした凍上メカニズムの解明-, Journal of MMIJ, Vol.124, No.4_5, pp.231-239
- 3) 門脇辰弥(2011)、気中と水中で凍結融解作用を受ける岩石の変形・破壊挙動、北海道大学工学院修士論文(未公開)
- 4) 児玉淳一、畔原孝典、小笠原弘典、後藤龍彦(1999)、凍結融解作用による凝灰岩の劣化進行速度と供試体寸法の関係、資源・素材'99(春季大会), pp 85-86