

多孔質軟岩（大谷石）の凍結融解による 力学特性劣化の定量的把握について

京谷孝史¹・白 鏞²・恩田千早³

¹正会員 工博 東北大学 助教授 大学院工学研究科土木工学専攻（〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06）

²学生員 理修 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻（同 上）

³正会員 電源開発（〒104-0061 東京都中央区銀座6-15-1）

東北日本においては、厳冬期から春先にかけて岩石の凍結融解に起因する岩盤斜面の崩落が問題となっている。そうした崩落の予測を可能ならしめるためには、凍結融解による岩石・岩盤の劣化特性を定量的に把握する必要がある。本研究では、大谷石を用いた凍結融解実験を行い、飽和度の違いによる空隙率の増加の差を調べ、それに伴う弾性波伝播速度、ヤング率、一軸圧縮強度の低下などを調べた。そして、凍結融解による劣化の程度は空隙水の飽和度に大きく依存すること、また、それら力学特性値が、測定時の供試体内部の水の有無によって大きく影響されること、しかしながら、その低下の割合は水の有無によらず、空隙率の増加の割合を説明変数として定量的に評価し得ることなどを確認し、その定量表現を与えた。

Key Words : Oya-tuff, porous rock, deterioration in freezing-thawing cycle

1. はじめに

岩盤の機械的風化作用の一つである凍結融解による劣化現象は寒冷地域や高山地域で著しい。東北日本においても、厳冬期から春先にかけて岩石・岩盤の凍結融解による劣化に起因する岩盤斜面の崩落が問題となっている^{1),2)}。

岩石の凍結融解による劣化は、岩石内部の空隙やき裂に浸潤した水の量に大きく影響を受けることは知られている。常温において水が岩石の強度に及ぼす影響については、「岩石においても有効応力原理は成立するか」といったテーマのもとに、1960年代から70年代にかけて実に多くの実験的研究がなされている³⁾。また、水が岩石内部に浸潤する様子や⁴⁾、乾湿の繰り返しで強度に及ぼす影響を調べた研究⁵⁾、さらには岩石内の水の凍結融解を物理現象としての側面から調べた研究等^{6),7)}が行われている。しかし、岩盤の安定性評価に結びつく力学特性に着目して、その凍結融解の繰り返しによる劣化過程、含水量の違いによる影響などを定量的に把握することを目的に行われている研究は多くはない。岩盤の凍結融解に起因する劣化現象は、定性的に認識されてはいるが定量的・具体的に理解されているとは言えず、劣

化程度の定量的な把握およびその予測手法などは確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では、大谷石を用いた凍結融解実験を行い、飽和度の違いによる空隙率の増加の差を調べると共に、それに伴う縦波弾性波速度、ヤング率、一軸圧縮強度といった力学特性値の低下の様子を調べ、凍結融解過程における岩石の劣化特性の定量的把握を試みるものである。

その結果、凍結融解による劣化の程度は、空隙水の飽和度に大きく依存するが、そのとき、劣化の程度に顕著な差が現れる飽和度の閾値が存在すること、また、縦波弾性波速度、ヤング率、一軸圧縮強度といった力学特性値が、それらの測定時の供試体内部の水の有無によって大きく影響されること、しかしながら、その低下の割合は水の有無によらず、凍結融解による空隙率の増加の割合を説明変数として定量的に説明し得ることなどを確認した。

2. 凍結融解繰り返し試験

(1) 試料の作成と準備

90cm×30cm×15cmの大谷石のブロックから、直

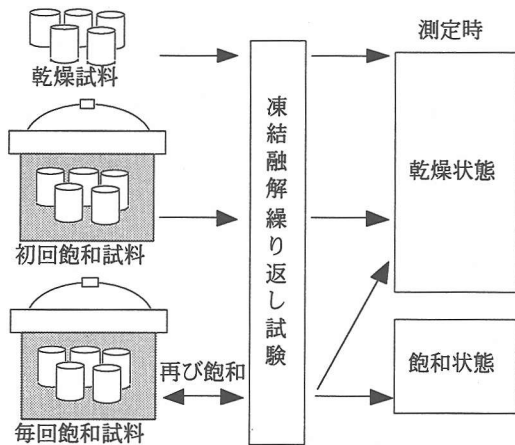


図-1 供試体の種類

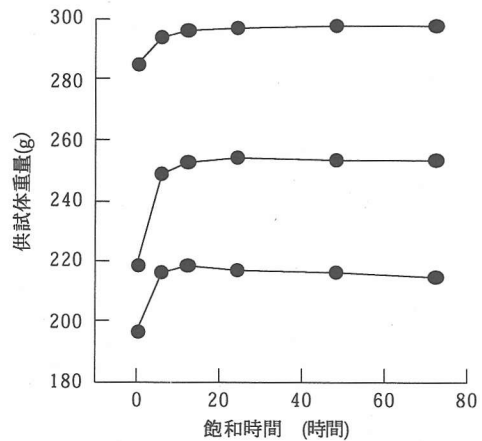


図-2 飽和時間と重量の変化

径5cm×高さ12cmの円柱供試体と、空隙率変化の測定用に直径3cm×高さ3cmの円柱供試体の2種類の供試体を作成した。ISRMの指針⁸⁾に従って供試体の上下端面の平行度は平面削削盤により0.02mm以内に、供試体中心からの偏りは0.05mm以内になるように端面整形した。

凍結融解作用における水の影響を調べるために、これら2種類の供試体を以下のような含水量が異なる3種類の試料グループに分けた(図-1)。

- (a) 乾燥試料：作成した供試体を自然状態で2週間置いた後、110℃の炉で48時間乾燥させる。
- (b) 初回飽和試料：凍結融解を繰り返す前に、蒸留水で満たしたデシケータに入れて真空ポンプで脱気しながら48時間吸水させる。48時間の吸水で十分なことについては、本実験に先立つ予備試験において、図-2に見るように、48時間程度の吸水で供試体の湿潤重量は変化がなくなり飽和状態とみなしてよい状態になることを確認している。
- (c) 毎回飽和試料：(b)と同様に凍結融解の前に飽和させるとともに、さらに凍結融解が1サイクル終了する毎に再び真空ポンプで脱気しながら、蒸留水中に2時間浸して飽和させ、常に飽和状態を維持する。ここでも、いったん飽和させた供試体については、凍結融解1サイクル終了後に2時間の吸水で十分なことは確認している。

上記3種類の試料は、供試体内の水の量の違いによる劣化の程度の違いを調べることが目的であるが、さらに、(c)の毎回飽和試料を用いて、凍結融解の繰り返しによって劣化した力学特性値(弾性波速度、ヤング率、一軸圧縮強度)が、測定時における供試体内部の水の有無によってどのように異なるかについても調べた。そのため、所定の凍結融解サイクル数を経た同一グループの試料をさらに二つのグルー

プに分け、一つは48時間110℃の恒温槽内で乾燥させ、他方のグループは再び飽和させて弾性波試験ならびに一軸圧縮試験を行うこととした。

(2) 凍結融解における環境の設定

凍結融解過程における実験環境は次のように設定した。

- 1) 凍結融解は恒温槽で行い、その温度差は北海道・東北地方の自然環境¹⁾に近くするために凍結時は-15℃、融解時は20℃とした。
- 2) -15℃で24時間、20℃で24時間、計48時間を1サイクルとした。温度の上昇ならびに下降の変化速度は熱応力の発生を避けるとことができるとされている⁹⁾2℃/minとした。
- 3) 初回飽和試料(b)、毎回飽和試料(c)の供試体についてはラップで供試体を密封し、さらにその表面にハマトイトゴムを塗って、恒温槽内での凍結融解過程においてできるだけ水分が逃げないようにした。
- 4) 凍結融解の繰り返し回数は、乾燥試料(a)の供試体は0、10回、初回飽和試料(b)の供試体については0、1、2、3、4、6、8、10回、毎回飽和試料(c)の供試体については0、1、2、3、4、5、6、8回とした。
- 5) 所定回数の凍結融解繰り返し終了後、試料(a)、(b)、および半数の(c)の供試体は48時間110℃の恒温槽内で乾燥させ、試料(c)の残りの半数は真空ポンプで脱気しながら、デシケータ内で蒸留水中に浸して2時間吸水させて再び飽和状態にした。

(3) 測定項目と測定方法

以上に述べた方法で所定回数の凍結融解サイクル

表-1 大谷石の初期物性値

密度	空隙率	一軸圧縮強度	縦波弾性波速度	ヤング率
(g/cm ³)	(%)	(MPa)	(km/sec)	(MPa)
1.36	40.47	7.43	2.06	1.35

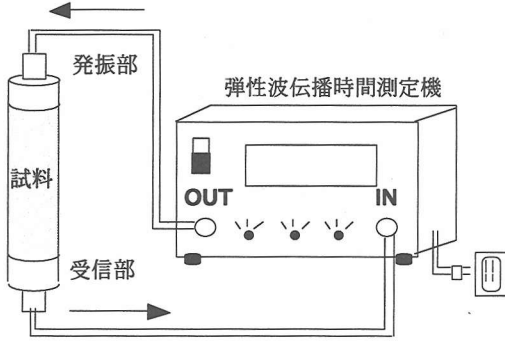


図-3 縦波弾性波速度の測定方法

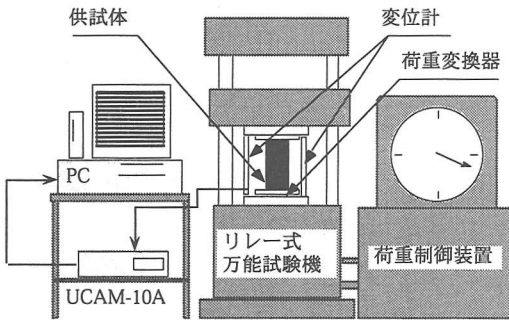


図-4 一軸圧縮試験機と自動データ処理システム

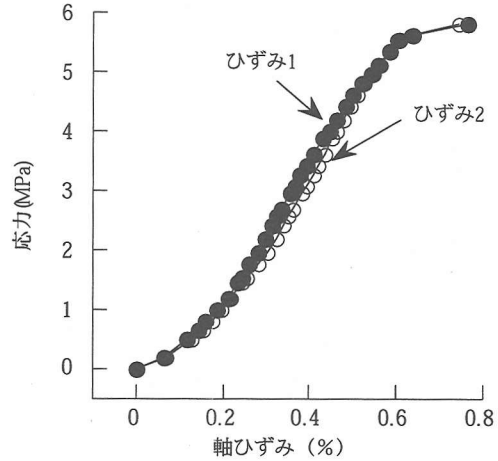


図-5 応力-ひずみ曲線

を繰り返した後、直径5cm×高さ12cmの供試体について、乾燥試料と初回飽和試料は乾燥状態にし、毎回飽和試料については半数を乾燥状態、残りの半数を飽和状態にした。

そして、各ケース5本ずつの供試体について、以下に述べる方法によって体積と重量、弾性波速度を測定し、最後には一軸圧縮試験を実施してヤング率と一軸圧縮強度を求めた。

また、これらとは別に、各ケースについて5本ずつの供試体を準備しておいて、各サイクル終了の度に体積と重量および弾性波速度を連続的に測定した。各項目の測定方法は以下のとおりである。

- 1) 供試体の体積および重量：精密秤を用いて重量を測定するとともに、測定供試体の直径を3カ所、高さを3カ所測定して体積を計算した。
- 2) 縦波弾性波速度 V_p ：図-3に示すようにして、超音波パルス法によって供試体の縦波弾性波の伝達時間を測定し、縦波弾性波速度を算出した。用いた超音波パルスの周波数は50kHz、伝達時間の測定精度は±1%である。
- 3) ヤング率と一軸圧縮強度：図-4に示すようなシステムによって、荷重増加速度を約0.1MPa/secとし

た一軸圧縮試験を実施し、荷重と変位のデジタルデータを自動計測した。加圧板と供試体の端面との間に摩擦力が生じないように供試体の上下端面にグリースを塗り、さらに加圧板との間にシリコンシートを貼った。得られた荷重と変位をそれぞれ供試体の初期断面積および高さで除して応力ひずみ曲線を描き、図-5に示すように、载荷初期の直線部分の傾きからヤング率を割り出すと共に、応力のピーク値を供試体の一軸圧縮強度とした。

さらに、直径3cm×高さ3cmの円柱形供試体に、上の測定に用いた直径5cm×高さ10cmの供試体と同様の凍結融解履歴を与え、その空隙率の変化を測定した。空隙率は所定回数の凍結融解の後、まず110℃の恒温槽内で48時間乾燥させて乾燥重量を測定し、その後、真空ポンプで脱気させながら蒸溜水中に48時間以上浸した後に飽和重量を求めて、その重量差を水の体積に置き換えて供試体初期体積で除すことによって算定した。

以上の測定を、各ケース毎に、大小2種類の供試体それぞれにつき5本ずつに対して実施し、その5本の供試体の平均値を測定値として採用した。

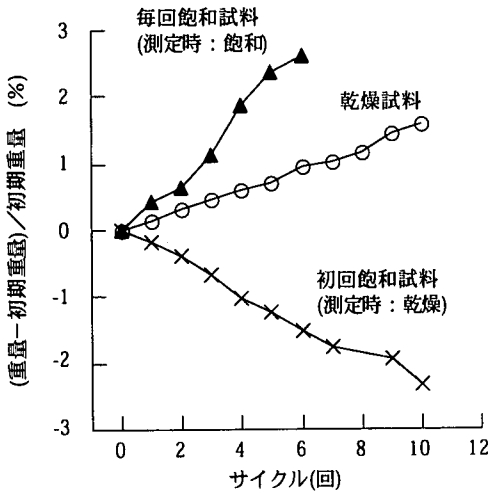


図-6 凍結融解サイクルと重量変化率
(同一グループの連続測定)

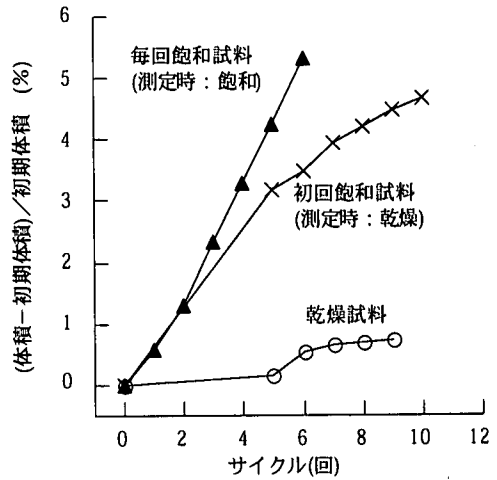


図-8 凍結融解サイクルと体積変化率
(同一グループの連続測定)

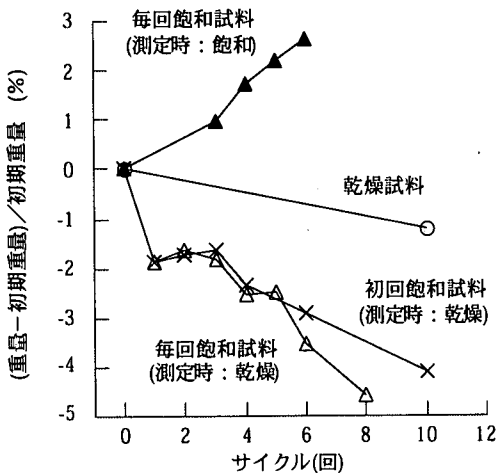


図-7 凍結融解サイクルと重量変化率
(履歴の異なるグループによる測定)

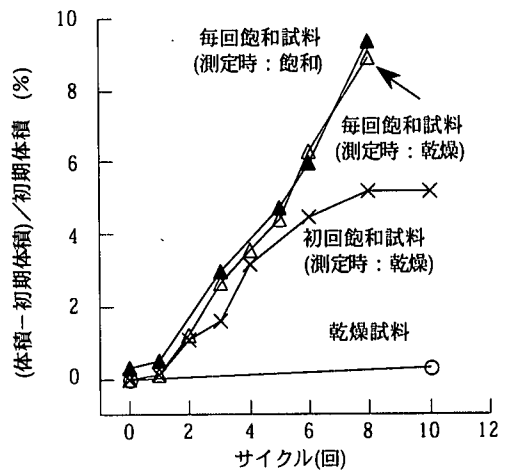


図-9 凍結融解サイクルと体積変化率
(履歴の異なるグループによる測定)

3. 実験の結果および考察

(1) 試料の初期物性値

本実験に用いた大谷石の凍結融解履歴を受ける以前の初期の物性値を表-1に示す。

(2) 供試体の重量、体積、空隙率の変化

a) 供試体重量の変化

凍結融解サイクル数と供試体の重量変化率の関係を図-6, 7に示す。図-6は同じ供試体グループについて連続的に測定した結果である。ただし、凍結融解の1サイクルの時間内では、毎回飽和試料を完全に乾燥させることはできないので、毎回飽和試料の乾燥重量は測定していない。

一方、図-7は異なる凍結融解履歴を与えた供試体グループについて、それらを一軸圧縮試験で壊す前に測定した結果であり、プロット点はそれぞれ異なる供試体グループの平均値を表している。

図-6に見るように、初回飽和試料の湿潤重量は凍結融解のサイクル数とともに減少し、乾燥試料の重量と毎回飽和試料の湿潤飽和重量はともに増加を示している。特に、毎回飽和試料の湿潤重量は4サイクル以降増加の割合が大きくなっている様子が読みとれる。

毎回飽和試料(湿潤飽和重量)については、空隙率が増加する結果として、その分だけ多くの水が供試体内部に蓄えられることを表している。

初回飽和試料(湿潤重量)が減少を示しているの

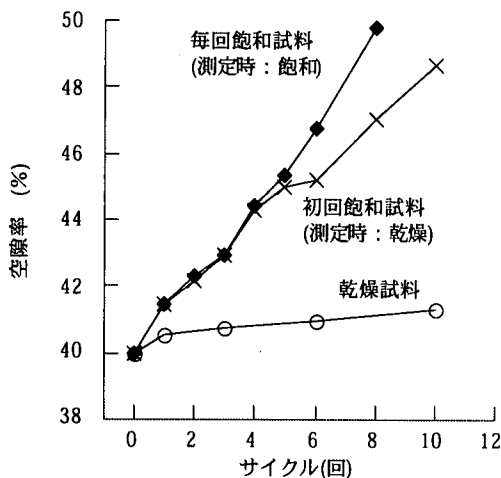


図-10 凍結融解サイクルと空隙率変化

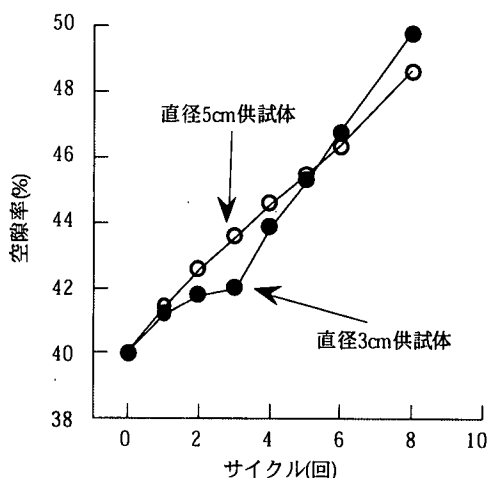


図-11 直径5cmと3cmの供試体の空隙率変化の比較

は、凍結融解の繰り返し過程において供試体内の水が少しずつ失われた結果である。また、乾燥試料の重量が少しずつ増加しているのは、恒温槽内において空気中の水分を吸収したためと考えられる。

図-7を見ると、毎回飽和試料の湿潤飽和重量は連続測定した結果と全く同じ傾向を示している。また、それ以外の3種類の試料については、一軸圧縮試験に供する前に2日間炉乾燥した乾燥重量をプロットしているが、それらはいずれも減少傾向を示している。凍結融解の繰り返しを受けているうちに、供試体表面の劣化が進んで細砕片が剥離したことによる。

b) 供試体体積の変化

図-8、9に供試体の体積変化を示す。上に示した重量変化と同様、図-8は同一供試体グループに対する連続測定の結果、図-9は凍結融解履歴の異なる供試体グループについての測定結果である。

これらの図から、全てのケースにおいて凍結融解の過程で供試体の体積が増加したことが判る。連続測定した結果の図-8および凍結融解履歴の異なる供試体グループの測定結果の図-9とともに、毎回飽和試料と初回飽和試料の体積増加量は5サイクルまでは同じような傾向を示しているが、5サイクル以降では、毎回飽和試料の乾燥体積と湿潤飽和体積がともに増加量が大きくなっている。

乾燥試料は凍結融解を繰り返しても体積はほとんど変わらないことが認められる。

c) 供試体空隙率の変化

空隙に存在する水が凍結によって体積膨張すると、岩石の内部構造は微視的クラックの発生や空隙の形状変化といった損傷を受ける。以上に示した供試体の重量と体積の変化は、そうした内部構造の変化(劣化)の結果である。凍結融解による内部構造の変化

をより直接的に把握するために、凍結融解の繰り返しに伴う空隙率の変化を調べた。

直径3cm×高さ3cmの供試体を用いて測定した空隙率の変化を図-10に示す。直径5cmの大きな供試体に比べて、直径3cmの供試体では供試体内部部までの冷却速度は異なる。しかし、毎回飽和試料について、5本の直径5cmの供試体の乾燥重量の平均値と、それら供試体の飽和重量の平均値との差から算定した平均空隙率の変化の様子は、図-11に見るように、同じ凍結融解履歴を受けた直径3cmの供試体について求めた平均空隙率と同じであることが確かめられた。したがって、2(2)節で述べたような凍結融解繰り返しの環境下では、冷却速度は異なっても、凍結融解繰り返しの結果として得られる空隙率の変化は直径3cmの供試体も直径5cmの供試体も同じであると考えることが判る。

さて、図-10では、全てのケースにおいて、試料の平均空隙率はサイクルが増えるに伴い増加している様子が見て取れる。しかし、5サイクルまでは初回飽和試料と毎回飽和試料の空隙率は同じ傾向で増加するが、それ以後では毎回飽和試料の空隙率の増加が大きい。このことは、水の供給がない初回飽和試料では、空隙が5サイクルまでにある程度大きくなった結果、もともと存在していた分の水の凍結による体積膨張では4サイクルまでに生じたような内部構造の損傷が起こらないことを表している。そして、このことは図-6~9に見た重量や体積の変化の様子が、4サイクル付近を境に毎回飽和試料と初回飽和試料とで異なる理由を示している。

d) 供試体の飽和度の影響について

それでは、具体的に初回飽和試料の供試体では水の飽和度はどうなっていたのであろうか。空隙率、

体積、重量の測定結果から、各サイクルにおける飽和度を算定した。

図-12に各サイクル開始時における恒温槽中の初回飽和試料と毎回飽和試料の水の飽和度を示す。図を見ると、初回飽和試料の飽和度は4サイクル開始時で92.5%、5サイクル開始時で89%である。このことから、大谷石では凍結融解の際に飽和度が92.5%までは完全飽和の場合と同等の内部構造の変化が生じるが、飽和度が89%になると完全飽和の場合ほどには内部変化が進行しないと言える。

実際、大気圧のもとで水が氷になるときの体積膨張率はおよそ1.09⁹⁾である。凍結時に飽和度92.5%の空隙において水がすべて氷となったとして計算すると、氷の体積は空隙の体積よりも大きな体積を得ることになる。

一方、飽和度が89%になると空隙に存在する水が氷に変化しても、その体積は空隙の体積を計算上では上回ることはないという結果を得る。空隙内部の水の凍結が、大気圧下と全く同じように起こるとは言えないし、水が氷になるときの膨張圧とそれが空隙の微視的破壊とどう結びつくかは、水の相変化と岩石基質部の力学特性との相互関係で決まる複雑な問題である。しかし、少なくともこの結果は凍結融解によって大きな劣化を引き起こし得る限界飽和度の存在を示唆している。

乾燥試料についても空隙率は凍結融解によって僅かに増加することが認められる。岩石骨格の温度変化に伴う膨張収縮の結果と考えられるが、供試体内部の水が凍結する場合と比べて、その影響ははるかに小さいことが判る。

(3) 縦波弾性波速度 V_p 、ヤング率、一軸圧縮強度の変化

a) 縦波弾性波速度 V_p の変化

サイクル数の増加に伴う縦波弾性波速度 V_p の変化を図-13、14に示す。図-13は同一供試体グループを連続測定したもので、図-14は凍結融解履歴が異なるグループの測定結果である。前節で見たように、水を含んだ供試体においては、凍結融解の繰り返しにより内部に微視的クラックが発生して空隙率が増加するが、岩石の内部を通過する縦波弾性波速度 V_p は、そうしたクラックの増加に伴って減少する様子が見られる。

図-14に示すように、初回飽和試料と毎回飽和試料の乾燥供試体では、縦波弾性波速度 V_p はほぼ同様の減少傾向を示し、3~4サイクルまでに急激に減少するが、その後は緩やかな変化を見せて0.4km/s付近で落ち着く様子が見とれる。空隙率の変化(図-

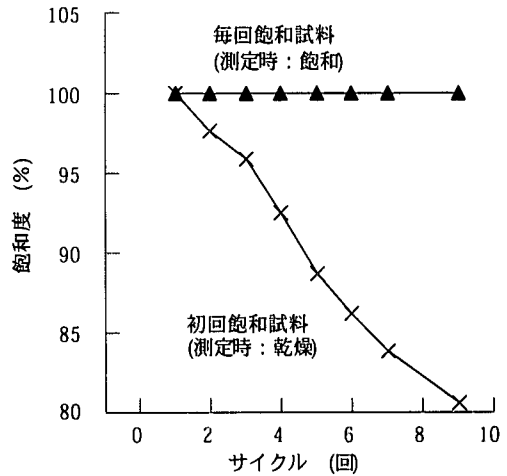


図-12 凍結融解サイクルと飽和度の変化

10) において見られたような毎回飽和試料と初回飽和試料の4サイクル以降の差は、弾性波速度では顕著に現れてはいない。

図-10に見られた空隙率の変化は直線的であるが、縦波弾性波速度の変化は下に凸の曲線を描く。このことは、空隙率という幾何学的指標で見れば一樣な変化であっても、その初期段階の変化において生じている岩石の初期構造の変化は、弾性波伝播特性という力学特性にとっては大きな意味を持ち、その後に関し空隙の増加は初期ほどの大きさの影響を持たないことを表している。

飽和状態で測定した供試体では縦波弾性波速度 V_p がほぼ直線的に減少している。その縦波弾性波速度は乾燥供試体のそれよりも大きい。それは増加した空隙やクラックに水が入り込んで縦波弾性波が伝わるのを補うためである。

サイクルが進んで縦波弾性波速度 V_p が一定に落ちてくのは、空気の縦波弾性波速度 V_p が0.331km/s、水の縦波弾性波速度 V_p が1.485km/s¹¹⁾であることを参考に考えれば、大谷石では凍結融解サイクルが十分に繰り返されると、空隙を満たしている空気あるいは水に比べて、それらよりも遙かに速く弾性波を伝えるような堅固な内部構造が存在しない程劣化することを示している。

乾燥試料では、縦波弾性波速度 V_p はいったんわずかな上昇を示した後に減少に転じ、最終的に10サイクル後には初期値に比べてわずかに減少した値を示している。この原因は定かではないが、乾燥炉において他の湿潤供試体から蒸発した水分を吸収することによるわずかな水分の変化と、温度収縮による構造の変化などが組み合わさった結果と推定される。しかし、いずれにせよ温度収縮が弾性波伝播速度に

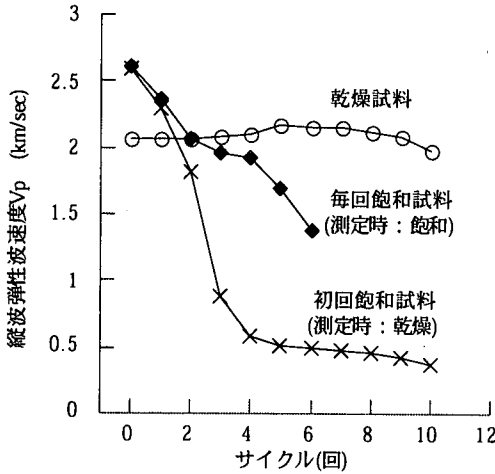


図-13 凍結融解サイクルと縦波弾性波速度の変化
(同一グループの連続測定)

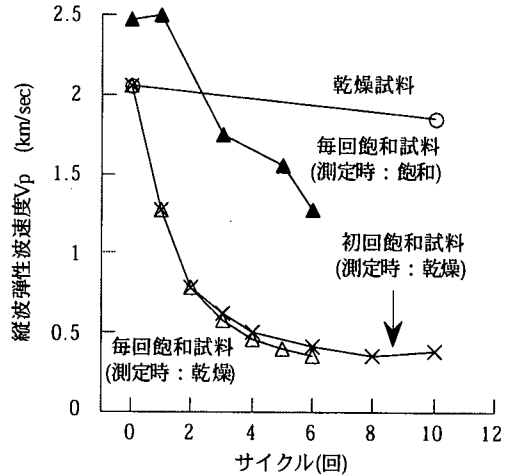


図-14 凍結融解サイクルと縦波弾性波速度の変化
(履歴の異なるグループによる測定)

及ぼす影響はわずかであることが判る。

b) ヤング率の変化

凍結融解サイクル数の増加に伴う供試体のヤング率の変化を図-15に示す。

凍結融解5サイクルまでは水の供給があったか否かに拘わらず、毎回飽和試料と初回飽和試料ではともに供試体が見るヤング率は減少している。5サイクル以降は毎回飽和させた供試体のヤング率は同じ割合で減少を続けるのに対し、初回飽和試料の減少は緩やかになる。これらの様子は、図-10で見られた空隙率の変化と調和的である。また、先に見た縦波弾性波速度の変化(図-13, 14)と同様、ヤング率の変化は下に凸の曲線を描いており、空隙率で見れば様な変化であっても、その初期段階の変化において生じている岩石の内部構造の変化はヤング率に大きく影響することを示している。

毎回飽和試料と初回飽和試料の5サイクル以降の縦波弾性波速度の変化(図-13)では、空隙率の変化に調和的な変化の様子は顕著に見られなかった。

空隙率に現れるような内部構造の変化に対しては、ひずみレベルが小さな弾性波伝播試験で得られる伝播速度の方が敏感であるように考えられたが、予想とは逆に、はるかに大きなひずみレベルの静的圧縮試験で得られたヤング率において、空隙率の変化に調和的な5サイクル以降の違いが現れたことは興味深い。また、毎回飽和試料において、飽和状態でのヤング率が常に乾燥状態のそれに比べて低めの値を示すことが判った。

c) 一軸圧縮強度の変化

サイクル数の増加に伴う一軸圧縮強度の変化を図-

16に示す。凍結融解の5サイクルまでは水の供給があったか否かに拘わらず、毎回飽和試料、初回飽和試料ともに一軸圧縮強度は減少する。しかし、5サイクル以降では初回飽和試料の一軸圧縮強度は緩やかに減少するのに対して、毎回飽和試料の乾燥状態での一軸圧縮強度はほぼ一定の割合で減少し続け、空隙率の変化と調和的な変化を示すことがヤング率と同様に興味深い。さらに、この一軸圧縮強度において特徴的なのは、毎回飽和試料について、凍結融解サイクル数に依らず、飽和状態で測定した強度が乾燥状態で測定した強度のほぼ半分ほどの値となっていることである。これは、ヤング率においても認められた傾向である。

水の存在によって岩石の圧縮強度が変化(低下)するという事実は、土とは比べものにならない程の堅固な初期構造を持つ岩石においても有効応力原理が成立することを暗示するかのようである。実際、これまでも岩石における有効応力原理の成立に関して多くの実験的研究がなされてはいるが³⁾、そのメカニズムは明解に説明されてはおらず、微視力学的な観点からの解明も含めて今後の検討を要することである。しかし、いずれにしても凍結融解によって劣化した岩石に水が供給されると強度が大きく低下するという事実は工学的に極めて重要な知見であると考えられる。

乾燥試料の一軸圧縮強度については、同図から凍結融解を繰り返しても変化はないと考えられ、温度収縮は強度に大きな影響を及ぼさないことを示している。

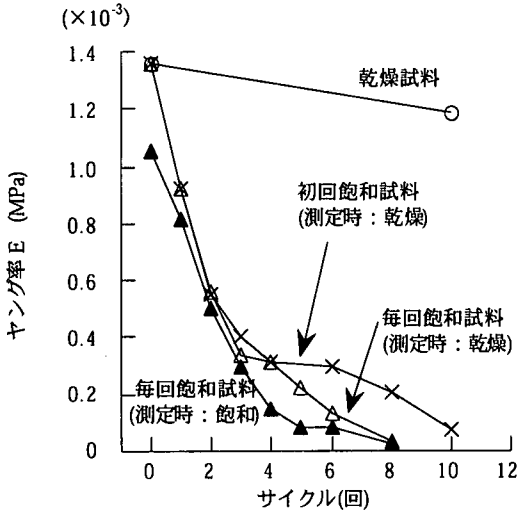


図-15 凍結融解サイクルとヤング率の変化

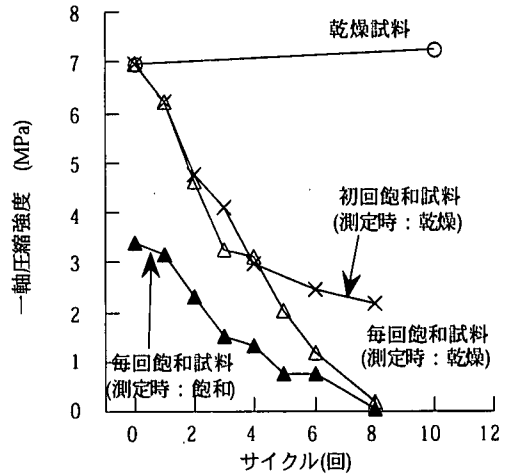


図-16 凍結融解サイクルと一軸圧縮強度の変化

4. 空隙率を指標とした劣化過程の定量化

本実験を通して明らかとなった大谷石の劣化特性をもとに、凍結融解における多孔質軟岩の劣化特性を具体的に式示することを考える。こうした定量表現は、凍結融解が原因となって起こる落石や斜面崩壊事故の防止、対策につながるものであると考えられる。

一軸圧縮強度などの劣化・低減を定量表現するための説明変数としては、凍結融解の繰り返し回数よりは、内部構造の変化を直接的に表す状態量である空隙率が適している。何故ならば、凍結融解の繰り返しによって岩石の内部構造が変化し、その結果、岩石が発揮する諸力学的特性に劣化傾向が現れるということは明らかであり、そうした図式に基づいた定量表現によってこそ物理的根拠が明確な予測評価を行うことができるからである。

以下では、まず、凍結融解の繰り返しによる空隙率の変化を関数表現し、その後、空隙率と諸力学的特性の劣化低減を空隙率を説明変数として表すことにする。

(1) 凍結融解の繰り返しによる空隙率増加の定量的記述

体積 V の岩石中に含まれる基質部の体積を V_m 、空隙の体積を V_v 、そして V_v 中に含まれている水の体積を V_w 、空隙率を n 、飽和度 S_r と表す。これらの間の関係は

$$\begin{aligned} V &= V_m + V_v \\ n &= \frac{V_v}{V}, \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \end{aligned} \quad (1)$$

である。ただし、ここでは空隙率および飽和度は百分率を用いず、無次元量として表していることに注意する。

3節(2)c,d)で述べたことから、凍結融解の繰り返しによる空隙 V_v の増加量は、その時点で空隙内において凍結する水の体積 V_w とその水が空隙をどの程度埋め尽くしているかを表す飽和度 S_r に比例すると考えられる。

また、水が無いときの岩石骨格部の温度収縮のみによる劣化は、図-10に見るように、水がある時のそれに比べて無視して良い。さらに、3節(2)c)での考察から、飽和度 S_r にある上方の閾値 S_r^u があって、飽和度がその値以上であれば、水の凍結による岩石内部の空隙の増加量は完全飽和状態 ($V_w = V_v$) と変わらないことが窺える。また、水の凍結による体積膨張によって空隙が押し広げられるためには空隙が十分な水で満たされている必要があることから、凍結過程において、空隙の増加が生じるための飽和度には下方にも閾値 S_r^l が存在することが考えられる。

これらのことを考慮して、繰り返し回数を T と表して連続量として扱うことにすると、空隙の体積の増加は

$$\frac{dV_v}{dT} = k\bar{S}V_w = k\bar{S}S_rV_v \quad (2)$$

と表すことができる。ここに、 \bar{S} は次のような上下方の閾値を考慮した換算飽和度である。

$$\bar{S} = \begin{cases} 1 & (S_r^u \leq S_r) \\ S_r & (S_r^l \leq S_r \leq S_r^u) \\ 0 & (S_r \leq S_r^l) \end{cases} \quad (3)$$

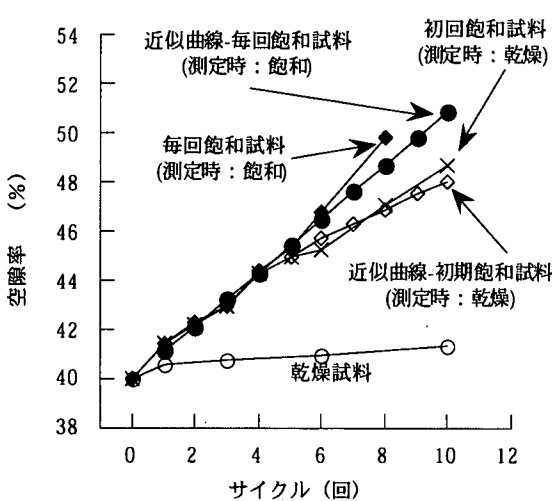


図-17 空隙率の変化とその近似曲線

比例係数 k は、水の凍結膨張圧による空隙の増加のし易さを与える。それは、岩石骨格と氷の間の相互作用によって決まるもので、岩石基質部の弾性係数と引張強度に主に支配され、また、そうした相互作用の結果として、飽和度の上下方の閾値 S_r^l 、 S_r^u が決まると考えられる。

ここで、式(2)最右辺の飽和度 S_r を換算飽和度 \bar{S} に置き換える。その結果、比例係数 k は当初のものとは異なるものになるが、それを改めて k と表すことにする。そうしておいて、両辺を岩石の体積 V で除して、 $dV/dT = dV_v/dT$ であることから成立する関係

$$\frac{dn}{dT} = \frac{d}{dT} \left(\frac{V_v}{V} \right) = \frac{1}{V} (1-n) \frac{dV_v}{dT} \quad (4)$$

を用いると、式(2)は次のように書き換えられる。

$$\frac{dn}{dT} = k \bar{S}^2 n (1-n) \quad (5)$$

式(5)においては \bar{S} および n が T の関数である。これを $T=0$ のとき $n=n_0$ なる初期条件のもとで解いて

$$n(T) = \frac{c_0 \exp \left(k \int_0^T \bar{S}^2 dt \right)}{1 + c_0 \exp \left(k \int_0^T \bar{S}^2 dt \right)} \quad (6)$$

ここに、

$$c_0 = \frac{n_0}{1-n_0} \quad (7)$$

を得る。

図-10に示されている毎回飽和試料 ($\bar{S}=1$) の空隙率変化から、 T の単位をサイクル数にとって式(6)中の係数 k を決めると、例えば $T=6$ の時に $n=0.46$ であることから $k=0.0442$ と定まる。

この k を用いて式(6)によって初回飽和試料の空隙率変化を予測する。まず、式(3)の上下方の閾値を $S_r^u=0.925$ 、 $S_r^l=0$ とする。初回飽和試料の \bar{S} は、図-12から近似すると

$$\bar{S} = \begin{cases} 1 & T \leq 4 \\ 0.925 - 0.025T & 4 \leq T \end{cases} \quad (8)$$

となる。 \bar{S} は不連続となるが領域を分けて扱えば良い。これを式(6)に用いて初回飽和試料の空隙率を計算したのが、図-17に示す近似曲線のプロットである。

図-17に見るように、式(6)は実験結果を良く近似しており、以上の考え方が妥当であることを示している。定める必要のあるパラメータは、凍結する水と岩石骨格との相互作用から決まる定数 k だけである。定数 k がより基本的な岩石の物性値とどのように関係するかという議論は、さらに微視力学的な考察を必要とし、それはまた別の新たな課題である。

(2) 空隙率の変化と弾性波伝播速度、ヤング率、一軸圧縮強度変化の関係

ここでは、3節で述べた力学特性の変化の様子を、空隙率を説明変数として再構成し、その定量表現を行う。そうすれば、上に述べた式(6)によって空隙率の変化が押さえられるので、力学特性の変化はその帰結として予測されることになる。

図-14に示した縦波弾性波速度 V_p 、図-15のヤング率、図-16の一軸圧縮強度それぞれを、図-10に見るサイクル数と空隙率の関係を基にして、横軸を空隙率に変えて整理した結果を図-18~20に示す。

説明変数を空隙率に置き換えたこれらの図では、サイクル数について整理していた元の図-14から図-16までと比べて、各特性値の変化の様子については大きな違いが見られないのは当然である。

しかし、空隙率で整理した結果、凍結融解の際に水の含ませ方が異なる初回飽和試料および毎回飽和試料ともに、乾燥時の各特性値はほとんど同じ変化をたどることがわかる。このことは、水の含ませ方の違いは空隙増加の程度に差を生じるのみであって、その結果、図-14から図-16においては各特性値が両試料で異なって現れていたにすぎないことを示している。そしてこのことは、説明変数に空隙率を選ぶことの妥当性を裏付けている。

同じ空隙率であっても、空隙が水で満たされているときは、各特性値は乾燥時と異なる値を示すことは既に述べたことである。弾性波伝播速度についていえば、水を含んだ場合にその値が上昇することは、水の体積弾性係数が空気のものよりも大きいことか

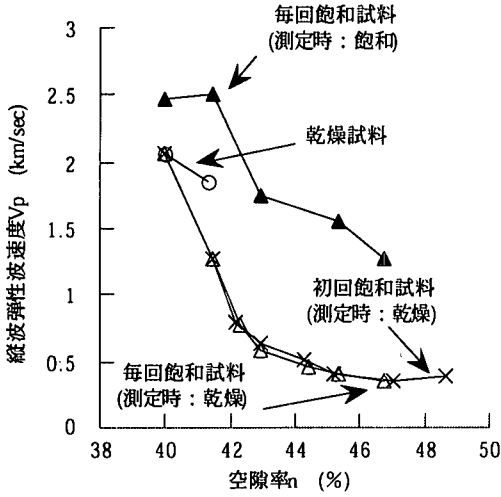


図-18 空隙率と縦波弾性波速度

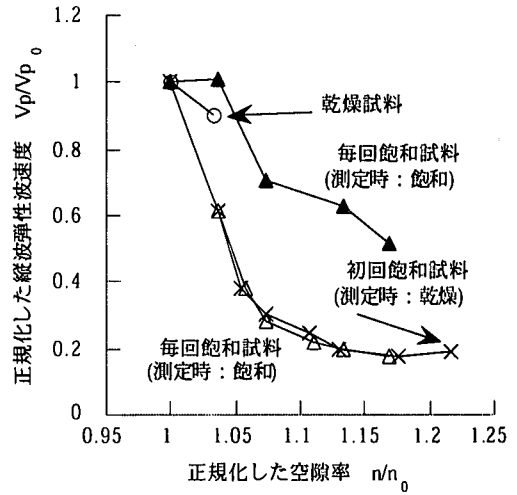


図-21 正規化した空隙率と弾性波速度の関係

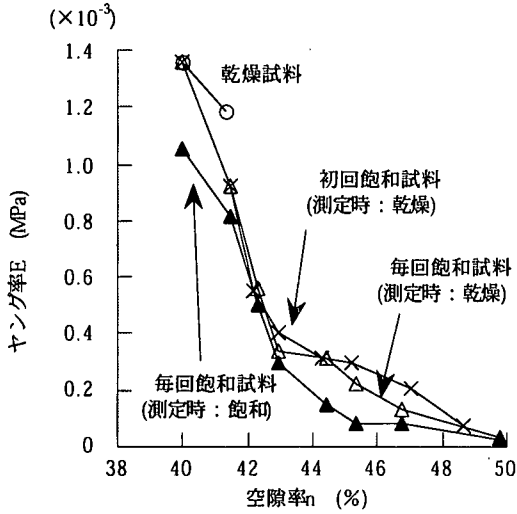


図-19 空隙率とヤング率

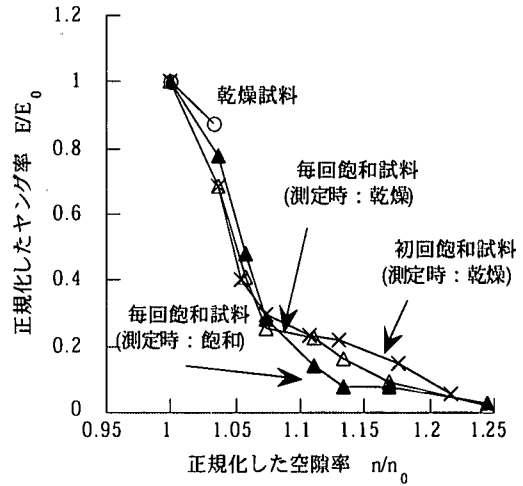


図-22 正規化した空隙率とヤング率との関係

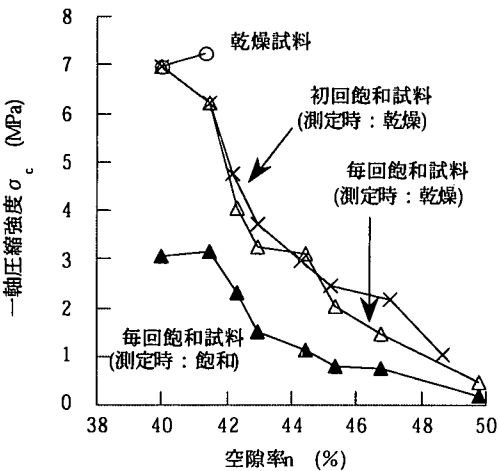


図-20 空隙率と一軸圧縮強度

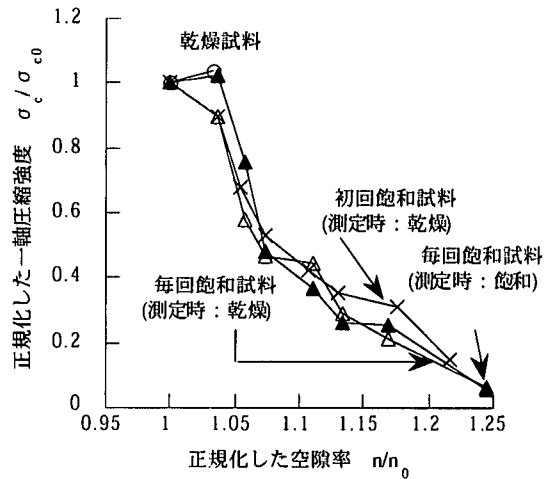


図-23 正規化した空隙率と一軸圧縮強度との関係

ら推測できることであり、実際、均質化法²⁾に代表されるような平均化手法による理論的な予測とも合致する。しかしながら、岩石が水を含むと、静的なヤング率と一軸圧縮強度がともに低下するという事実については、岩石力学は未だ明解な説明を与えてはいない。

そうした根本的メカニズムの解明が待たれることはいうまでもないが、現時点において岩盤の安定性を予測評価するためには、少なくとも現段階で明らかになった事実をもとに、それら力学特性の劣化を何らかの形で定量表現しておくことが望ましい。

ここでは、そうした定量的な関係を見つけるために、それぞれの特性値の初期値からの変化の割合が、空隙率の初期値に対する変化の割合と結びつけられると考え、図-18から図-20の縦軸と横軸をそれぞれの初期値で正規化した。そのようにして再構成した関係を図-21から図-23に示す。

図-21に見る弾性波伝播速度では、水の有無による差は変わらずに現れているが、図-22のヤング率および図-23の一軸圧縮強度については、水の有無に関わらずそれぞれの初期値に対する変化はほぼ同じ曲線をたどる。このことは、弾性波伝播速度については成り立たないが、ヤング率と一軸圧縮強度はそれぞれの初期値で正規化すると、水の有無に関わらず空隙率とほぼ一意的な関係がある可能性を示している。空隙中の水の有無による差について、理論的な予測と合致する弾性波伝播速度の変化については成立せず、逆に理論的に説明が難しいヤング率と一軸圧縮強度について成立するこの事実は、岩石中の水が発揮する力学的効果に関する興味深い課題を暗示している。しかし、本研究ではそれに言及せず、この事実をそのまま岩盤劣化の予測評価に役立つように、以下のような定量表現を与えることにする。

図-22, 23から、ヤング率および一軸圧縮強度は1から減少する凸曲線を描くので、それぞれ次式で表現することができる。

$$\frac{E}{E_0} = \alpha_E \exp\left(-\beta_E \frac{n}{n_0}\right) \quad (9)$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \alpha_\sigma \exp\left(-\beta_\sigma \frac{n}{n_0}\right) \quad (10)$$

ここに、水の有無に関わらず

E, E_0 : ヤング率およびその初期値

σ, σ_0 : 一軸圧縮強度およびその初期値

であり、 α, β はそれぞれの関係における定数である。

ちなみに、これらの定数を図-22, 23から定める

と、ヤング率の変化については：

$$\alpha_E = 3.19 \times 10^6$$

$$\beta_E = 14.12$$

また、一軸圧縮強度の変化については：

$$\alpha_\sigma = 7.30 \times 10^4$$

$$\beta_\sigma = 10.33$$

を得る。したがって、先に示した空隙率の変化を与える式(6)と、ヤング率と一軸圧縮強度の変化を与える式(9), (10)を用いれば、凍結融解による変形強度特性の劣化について定量的予測が可能となる。

5. おわりに

本研究では、凍結融解による岩盤の経年的な劣化に対する予測手法の確立を目指して、大谷石を用いた凍結融解実験を行い、飽和度の違いによる空隙率増加の程度を調べ、それに伴う縦波弾性波速度、ヤング率、一軸圧縮強度の低下の定量的把握を試みたものである。

その結果、凍結融解による劣化の程度は、空隙に存在する水の飽和度に大きく依存し、劣化の程度に顕著な差が現れる飽和度の閾値が存在すること、また、縦波弾性波速度、ヤング率、一軸圧縮強度などの力学特性値が、それらの測定時の供試体内部の水の有無によって大きく影響されること、しかしながら、その低下の割合は水の有無によらず、凍結融解による空隙率の増加の割合を説明変数として定量的に表現し得ることを確認した。

本研究で示した空隙率の増加を示す式や、空隙率を説明変数としてヤング率と一軸圧縮強度の変化を表した式などは、実験によって見いだした事実を現象論的に定量表現したものに過ぎない。しかし、空隙の増加を飽和度に依存した形で表現し、その空隙率を説明変数としてヤング率や強度の変化を記述するという枠組みは、単なるカーブフィッティングではなく、力学的な因果関係を踏まえた形になっているものと信ずる。

本研究で示した予測モデル中の諸係数は供試体从何らの応力も初期温度勾配も与えていない場合の結果を用いて定めている。実際の岩盤中の岩石に適用するためには、これらパラメータの拘束応力や熱的条件への依存性を明らかにする必要がある。また、劣化予測の際には飽和度の変化は既知としているが、岩盤中の岩石の飽和度を測定することは不可能に近く、直接的な測定に代わる岩石の飽和度の推定法を確立する必要がある。しかし、いずれにせよ本研究で示した枠組みは変わらない。

本研究で提案したモデル式中の定数の意味と背後に潜む力学的なメカニズム, さらには, 同じ空隙率であっても, 水を含むことによってヤング率と一軸圧縮強度は低下するが, その初期値から低下の割合は水の有無に関わらず空隙率と一対一の対応関係がつくという事実については, 岩石の内部構造と水や氷との相互作用を明らかにすることを通して, その力学的な理由を明確にしていかなければならない。今後の課題である。

参考文献

- 1) 間宮清, 千葉幸司: 火山灰のり面の凍結融解に伴う挙動について, 応用地質年報, No.7, pp. 85-102, 1985.
- 2) 福田正己, 播磨屋敏生, 原田敏一郎: 岩石の凍結融解による風化が基盤崩落に与える影響について, 月刊地球, Vol. 18, No. 9, pp. 574-578, 1996.
- 3) M.S.バターソン著, 荻野正二, 水田義明, 佐野修共訳: 実験岩石力学, 古今書院, 1981.
- 4) 柳谷俊, 寺田孚: P波とS波を使った弾性波CTによる岩石内を浸潤する水の観察, 土木学会論文集, 第382号/Ⅲ-7, pp. 83-89, 1987.
- 5) 一ノ瀬政友, 松井紀久男, 後藤研: 岩石の水分履歴による強度特性の変化, 資源・素材学会誌, Vol. 108, No. 1, 1992.
- 6) 福田正己: 岩石内の水の凍結融解について, 低温科学, 物理篇, 第29輯, pp. 225-229, 1971.
- 7) 福田正己: 岩石内の水の凍結融解についてⅡ, 低温科学, 物理篇, 第30輯, pp. 185-189, 1972.
- 8) International Society for Rock Mechanics Commission on standardization of Laboratory and field tests: Suggested method for the quantitative description of discontinuities in rock masses; International Journal of Rock Mech. and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 15, pp. 53-58, 1978.
- 9) 椿東一郎: 水理学 I, 森北出版, p. 201, 1973.
- 10) 江原昭次, 柳谷俊, 平尾一之, 寺田孚: 低温下の岩石の熱膨張について, 材料, 第32巻, 第363号, pp. 1403-1409, 1983.
- 11) V. S. Vutukuri, R. D. Lama: 岩石の力学的性質Ⅱ-試験に関する技術と結果一, 古今書院, p. 440, 1992.
- 12) Sanchez-Palencia, E.: Non-homogeneous media and vibration theory, Lecture Notes in Physics 127, Springer-Verlag, Berlin, 1980.

(1999. 5. 27 受付)

ON DETERIORATION OF OYA-TUFF IN FREEZING-THAWING CYCLE AND ITS QUANTITATIVE DESCRIPTION

Takashi KYOYA, Yong BAEK and Chihaya ONDA

In northern part of Japan, not a few rock slope failure has been occurred by the deterioration of rocks, which is caused by the repetition of freezing-thawing process. In order to keep the safety of such rock mass structures the deterioration process of rocks needs to be described quantitatively using some meaningful parameters. In this work, the deterioration process in freezing-thawing cycle of Oya-tuff, which is a famous soft porous rock in Japan, is investigated through laboratory tests and successfully described as a differential equation for the change of porosity. And then, the deterioration of the mechanical properties of rock, such as elastic wave velocity, Young's modulus and uniaxial compressive strength, are quantitatively described by functions of the porosity.