

III-11

多孔質軟岩の凍結・融解による劣化特性に関する実験的研究

東北大学工学部 学生員 ○恩田 千早

東北大学工学部 学生員 白 鏞

東北大学工学部 正 員 京谷 孝史

1.はじめに

岩石が零度以下となると含有水が凍結し、それに伴う体積膨張によって内部構造が損傷を受け岩石は劣化する。東北日本において冬期から春先にかけて起こる岩盤崩落事故は、少なからずこうした凍結融解による岩石の劣化に遠因を求めることができる。本研究では、こうした凍結融解による岩石の劣化過程の理解を目的として、多孔質軟岩の一つである大谷石を用いて、その物理的性質および力学的な特性が凍結融解によってどのように変化するかを実験的に調べるものである。

2. 実験方法及び環境設定

90cm×30cm×15cmの大谷石のブロックから直径5cm×高さ12cmの円柱形供試体を作成した。ISRMの指針に従って供試体の端面は0.02mm以内の平滑さ、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。凍結融解試験に際しては次の3種類の供試体を用意した。

- 乾燥試料：110℃の炉で48時間乾燥させる。
- 初回のみ飽和させた試料：凍結融解を繰り返す前に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、水中に48時間浸す。
- 毎回飽和させた試料：(b)同様に凍結融解を繰り返す前に飽和させ、さらに1サイクル終わる毎に再び真空ポンプで脱気しながら、水中に2時間浸して飽和させる。

また、凍結融解過程における温度環境は次のように設定した。

- 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に近くするために凍結時は-15℃、融解時は20℃とした。
- 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2(℃/min)とした。
- (b)、(c)の供試体については、ラップで供試体を密封し、恒温槽内での凍結融解過程において水分が逃げないようにした。
- 凍結融解の繰り返し回数は、(a)の供試体は0, 10回、(b)の供試体については0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10回、(c)の供試体については0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8回とした。
- 凍結融解で所定の回数繰り返したら、(a)、(b)、(c)の試料は48時間110℃の恒温槽内で乾燥させる。さらに(c)の試料の半数については真空ポンプで脱気させながら、デシケータ内で水中に48時間以上浸して飽和試料とした。

このような設定条件下で凍結融解の繰り返しを行い、乾燥または飽和させる度に、超音波パルス法によって縦波弾性波速度 V_p の測定を行い、その後一軸圧縮試験を実施して静的弾性係数（ヤング率）、一軸圧縮強度を測定した。

またこの実験と平行して直径3cm×高さ3cmの円柱形供試体を使って、上の実験と同様にして、(a)、(b)、(c)の試料を用意し、同じ環境設定のもとで空隙率を測定した。空隙率は所定回数の凍結融解の後48時間110℃の恒温槽内で乾燥させ、その後は、真空ポンプで脱気させながら、水中に48時間以上浸して乾燥時と飽和時の重量差を求めることによって割り出した。

3. 実験結果と考察

3-1 サイクル数の増加に伴う平均空隙率の変化

図1にサイクル数の増加に伴う平均空隙率の変化を示す。図中dは乾燥試料、wは初回のみ飽和させた試料、wdは毎回飽和させた試料（圧縮試験時乾燥）、wdwは毎回飽和させた試料（圧縮試験時飽和）を表す。また平均空隙率とは供試体の空隙率の平均増加量(%)に実験で使用した大谷石の初期の平均空隙率40%を加えた値である。

空隙率は、供試体内部の水が凍結するときに生じる体積膨張によって増加する。図1を見ると全ての試料はサイクルの増加とともに空隙率も増加している。ただし、4, 5サイクルまでは全ての試料は同様に増加するが、それ以降は試料wd,wdw(毎回飽和)はほぼ一定で増加するに対し、試料w(初回飽和)の増加幅は減少する。このことは試料wは空隙が4サイクルまでである程度大きくなっ

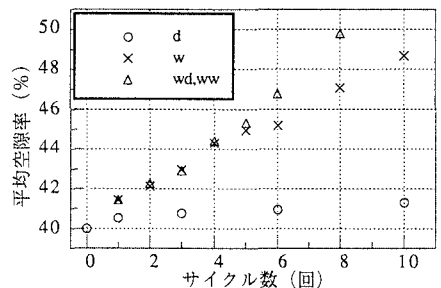


図1 サイクル数と平均空隙率の関係

た結果、もともと存在していた水だけでは、凍結して水の体積が膨張しても4サイクルまでほどの変化は生じないことを表している。

3-2 平均空隙率と縦波弾性波速度 (V_p) の関係

図2に平均空隙率と V_p の関係を示す。図をみると、測定時に乾燥状態にある試料w(初回飽和;乾燥)と試料wd(毎回飽和;乾燥)はほぼ同様の傾向を示し、 V_p は空隙率が42%までに急激に、42~46%までは緩やかに減少し、その後、0.4km/s付近ではほぼ一定の値に落ち着く。一方、飽和状態で測定した試料ww(毎回飽和;飽和)は、空隙率が増加するにしたがってほぼ直線的に減少し、1.4km/s付近ではほぼ一定の値に落ち着く。空気弾性波伝播速度が0.331km/s、水のそれが1.485km/sであることを考えれば、大谷石は凍結融解によって空隙率が45%以上に達すると、間隙を満たしている空気あるいは水より速く弾性波を伝えるような内部構造が存在しない程劣化していると推測される。このことは、凍結融解によって構造がほとんど破壊されたことを表す岩石固有の空隙率の存在を示唆している。

乾燥試料dにおいて V_p が減少したのは、温度変化によりわずかな空隙率の増加があったためである。

3-3 平均空隙率と静的弾性係数(ヤング率)の関係

図3に平均空隙率とヤング率の関係を示す。図から全ての供試体について、ヤング率は空隙率の増加に伴ってほぼおなじ傾向で減少していく様子が読みとれる。ヤング率は、空隙率が44%までは急激に減少し、それ以上になると変化は小さくなり、45%以上ではほとんど変化しなくなる傾向は弾性波伝播速度 V_p と同様である。

ここで、どの空隙率においても、ヤング率の大きさは、試料w(初回飽和;測定時乾燥)、試料wd(毎回飽和;測定時乾燥)、試料ww(毎回飽和;測定時飽和)の順番を保っていることが興味深い。試料wのヤング率が試料wd、wwよりも常に大きいのは、凍結される内部の水の量の違いに基づく劣化状態の差である。また、試料wdのヤング率が試料wwのそれより常に大きいのは、空隙を満たすのが空気か水かという差による。

3-4 平均空隙率と圧縮強度(σ_c)の関係

図4に平均空隙率と圧縮強度の関係を示す。図より、試料w(初回飽和;測定時乾燥)と試料wd(毎回飽和;測定時乾燥)はほぼ同様の傾向を示し空隙率45%までは圧縮強度が同じように減少するが、その後試料wは緩やかに減少するのに対し、試料wdはそれ以前と同様な傾向を示す。このことは空隙率45%以上では試料wの空隙中の水の割合がそれまでと同様に岩石に劣化を与えるほど十分ではなくなったことを示唆している。

試料ww(毎回飽和;測定時飽和)の圧縮強度は初期の空隙率40%から常に試料wd(毎回飽和;測定時乾燥)の半分程の値をとりながら減少する。このことは岩石内部の空隙を満たす物質が空気か水かによる。

3-5 正規化した空隙率と圧縮強度の関係

図5に正規化した空隙率と圧縮強度の関係を示す。図4と図5を比較すると、図4では圧縮試験時に乾燥状態の供試体と飽和状態の供試体では空隙率と圧縮強度の関係に大きな違いがあるのに対し、図5では全ての供試体が空隙率と圧縮強度の関係が同じであることは興味深い。このことは試料ww(毎回飽和;測定時飽和)は圧縮強度は小さかったが、空隙率が増加するにしたがって圧縮強度が減少する割合は試料w(初回飽和;測定時乾燥)と試料wd(毎回飽和;測定時乾燥)と同じである。つまり、空隙を満たす物質が水であっても空気であっても正規化した空隙率と圧縮強度の関係は同じであることを意味している。

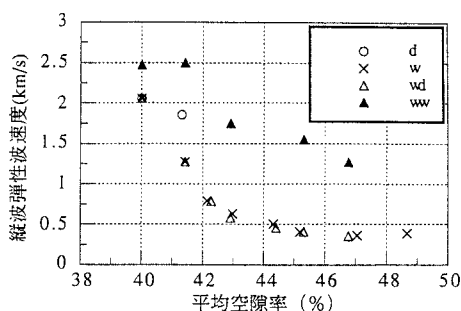


図2 平均空隙率と V_p の関係

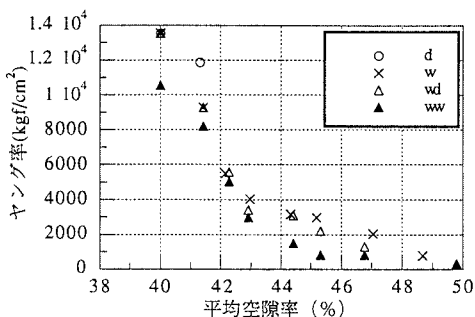


図3 平均空隙率とヤング率の関係

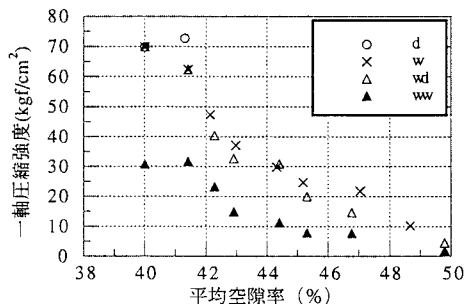


図4 平均空隙率と圧縮強度の関係

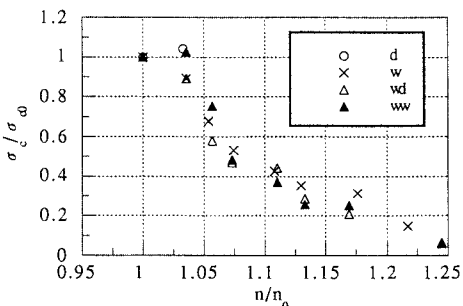


図5 正規化した空隙率と圧縮強度の関係