高温・低温の温度履歴を受けた花崗岩および凝灰岩の 強度・変形特性について†

稲田 善紀* 木下 尚樹*

Laboratory Experiments on Strength and Deformation of Granite and Tuff Subjected to Thermal Hysteresis of High and Low Temperatures

by

Yoshinori INADA* and Naoki KINOSHITA*

The authors have been proposed and discussed temporary storage of high and low temperature materials in openings excavated in rock mountain. Here, high temperature materials means such as heated water which is produced by surplus heat from garbage burning plants, while low temperature materials means such as LNG, LPG, frozen food etc. In this case, as the storage quantity of heated water, LNG and LPG will change with these use continually, rock masses around openings to store these materials will receive effects of thermal hysteresis of high and low temperatures. Therefore, obtaining the strength and deformation characteristics of rock affected by the thermal hysteresis becomes important for discussing the stability of the openings. In this study, strength and deformation characteristics of granite and tuff were examined after undergoing thermal hysteresis of high and low temperatures. From the results, it was found that the decreasing ratio of strength and deformation of rocks decrease with the increasing number of thermal hysteresis, and it is supposed that the value will converge to a constant value.

Key words : Rock, Strength and deformation characteristic, High and low temperatures, Thermal hysteresis

1 緒 言

近年、生活の質の向上により熱水の使用量が増加している。エネルギーの有効利用の観点から、ゴミ焼却時の廃熱を利用して、水を熱水に変え、各家庭への給湯や地域暖房等多目的に使用することが考えられる。この場合、一日の時間帯や季節による熱水の使用量の変動に関係なく安定した供給を行うための一時的な貯蔵施設が必要となってくる。一方、石油の代替エネルギーとしてのLNGやLPGの需要が増加の傾向にあり、また、冷凍食品の需要も増加の傾向を示している。今後これら高温物質や低温物質の貯蔵施設の増加が予想される。筆者らはこれまで高温物質や低温物質の貯蔵方法の一つとして、土地の立体的有効利用、環境保全および維持管理費の節減等が有利であると考えられる地山岩盤内に設けた空洞内に一時的に貯蔵することを提案し、検討を行ってきた。^{1)~7)}すなわち、高温下および低温下における岩石の強度・変形特性および熱物性値についてはすでに実験方法を開発し、実験結果を報告している。^{1)~3)}また、高温下および低温下におけるClass IIに属する岩石の破壊後の挙動を含めた強度・変形特性についても報告している。⁴⁾さらに、これらの値を用いて、高温物質や低温物質を地山岩盤内空洞に貯蔵した場合の温度分布、応力分布の経時変化を解析し、空洞の安定性や周辺岩盤の熱的挙動について検討を行ってきた。^{5)~7)}

実際に熱水やLPG、LNGを貯蔵した場合には、貯蔵量が変動することによって空洞周辺岩盤は高温や低温の影響を繰り返し受けることになる。このため貯蔵時の空洞の安定性や周辺岩盤の挙動を検討するためには温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性を把握しておく必要がある。しかし、既往の研究には高温あるいは極低温の履歴を受けた岩石の強度・変形特性に及ぼす履歴の温度幅、履歴回数、雰囲気温度および岩石の含水状態等の影響を調査研究した例はみあたらない。

本研究では、数種類の典型的な岩石を用いて熱サイクル試験装置にて試料に高温および低温の温度履歴を与えた後、室温下、高温下および低温下における強度・変形特性を実験により求め、履歴温度幅、履歴回数、雰囲気温度等の温度条件や岩石の空隙率、含水状態等の岩石の物理的性質が強度・変形特性に及ぼす影響について考察した。

2 温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性

2・1 実験に用いた供試体

実験に用いた岩石は花崗岩(愛媛県越智郡大島産)および凝灰岩(栃木県宇都宮市産)である。花崗岩には一般的にほぼ直交する3つの潜在的な裂面が存在し、rift plane, grain plane および hardway plane と呼ばれている。⁸⁾本研究においてもこの分類に従うものとして岩石ブロックの弾性波伝ば速度を測定することによりこれらの

† 原稿受理 平成10年7月6日 Received July 6, 1998

* 正会員 愛媛大学工学部環境建設工学科 〒790-8577 松山市文京町, Dept. of Civil & Environmental Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

Table I. Physical properties of rocks.

rocks	porosity (%)	moisture content ratio (%)	degree of saturation (%)	bulk specific gravity	true specific gravity
granite(dry)	0.80	0.09	28.54	2.650	2.669
granite(wet)	0.80	0.24	81.32	2.654	2.669
tuff(dry)	37.09	1.39	5.76	1.560	2.446
tuff(wet)	37.09	24.01	99.62	1.908	2.446

面を推定し、ここでは hardway plane に垂直となる方向にコアドリルで試料を採取した。凝灰岩についても弾性波伝ば速度を測定することにより堆積層を推定し、この面に対して平行となる方向にコアを採取した。試料は一軸圧縮強度試験用には $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、圧裂引張試験用には $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形した。各岩石は室内で1週間以上自然乾燥させた後、デシケータ内でさらに1週間乾燥させた乾燥状態のもの(dry)と、この状態のものを真空ポンプを用いて真空状態にし、5時間脱気しながら試料に蒸留水を浸潤させた湿潤状態のもの(wet)の2種類用意した。各岩石の物理的性質を Table I に示した。花崗岩では空隙率が小さいため空隙が互いにつながっておらず、供試体を dry にしても中心までは完全には乾燥していないものと推察される。また一旦 dry にした供試体を真空ポンプを併用して吸水させても水は浸入しにくいものと考えられる。凝灰岩は空隙率が大きく、空隙が互いにつながっており、供試体中心まで乾燥、湿潤したものと考えられる。このことが飽和度の違いに現れている。

2・2 温度履歴の与え方

岩石試料に温度履歴を与えるには熱サイクル試験装置を用いた。熱サイクル試験装置の概念図を Fig. 1 に示す。熱サイクル試験装置は $-170^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ の温度範囲内で任意の温度幅、履歴回数、保温時間、昇温・降温速度 ($0 \sim 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) で試料に温度履歴を与えることができる。実験に先立ち、制御温度と槽内温度を測定した結果、制御温度と槽内の平均温度との差は $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内で槽内の温度差も $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内であった。

温度履歴を与える方法は以下のとおりとした。まず、高温の温度履歴を与える場合には wet の試料は蒸留水に浸した状態で、dry の試料はそのままの状態で槽内に入れ、実験中の温度を測定するために温度センサーを wet、dry の供試体の中心（それぞれ1個）、wet の試料を浸し

た蒸留水の水槽内（3箇所）および槽内（25箇所）に設置した。この状態で 15°C の試料を 100°C まで加熱した。この場合、槽内の温度を直線的に上昇、降下させる必要があるため、熱源はヒーターと冷凍機を併用している。昇温速度は熱衝撃による影響を受けないとされている $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。⁹⁾ 水は1気圧の下では 100°C で沸騰するため、実際の実験では沸騰する直前の約 99°C で実験を行ったが、本研究ではこれを便宜上 100°C と呼ぶ。試料の中心の温度が 100°C であることを確認しながら60分間保温した後、 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ で降温させ 15°C の状態で60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。低温の温度履歴を与える場合には wet の試料は乾燥を防ぐため、ポリエチレンフィルムで覆った状態で槽内に入れ、冷却温度は LNG 貯蔵を想定し、 15°C から -160°C とした。この場合の熱源は液体窒素とヒーターとした。その他の条件は高温の温度履歴を与える場合と同様にした。また、履歴温度幅が岩石の強度・変形特性に及ぼす影響を求めるため、高温の場合は 60°C まで、低温の場合は -60°C および -100°C までの温度履歴も与えた。供試体には最高10サイクルまで温度履歴を与えた。

一般に岩盤、岩石の風化は、間隙水による岩石からの鉱物の溶出、温度変化による凍結、融解、蒸発作用、日光の直射などによる岩盤内の温度差等により、長い年月を経て進行し、粒子の小さい土等に変化する現象である。本研究における温度履歴は風化現象とは異なり、温度変化による各構成鉱物粒子の熱膨張、収縮量の違いによって発生すると考えられるマイクロクラックが強度・変形特性に及ぼす影響について着目し、考察している。

2・3 強度試験の方法

供試体に温度履歴を与えた後、含水状態が変化しないように供試体は履歴を与える場合と同じ状態にし、引き続き直ちに一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。Fig. 2 は高温下における強度試験の概念図である。実験中の雰囲気温度は室温（ここでは 15°C ）および履歴最高または最低温度とした。なお、高温の温度履歴を与える場合には、試験は wet の供試体については水中で、dry の供試体については空気で行った。低温の温度履歴を与える場合には、空気で行った。試験は荷重速度を一定として制御し、本実験では一軸圧縮強度試験の場合、花崗岩では 0.7MPa/s 、凝灰岩では 0.5MPa/s 、圧裂引張強度

Fig. 1. Schematic diagram of thermal cycle apparatus.

Fig. 2. Schematic diagram of the strength test.

試験の場合、花崗岩では50N/s、凝灰岩では20N/sで行った。また、一軸圧縮強度試験の際には供試体に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみと横ひずみを同時に測定した。この際、温度変化がひずみゲージやリード線に与える影響をキャンセルするためにダミーゲージを併用した。各試験に用いる供試体は1つの条件につき5本とした。

2・4 実験結果および考察

Fig. 3は温度履歴を与えた後、圧縮強度試験を行った結果をとりまとめたものである。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するに伴い、圧縮強度が低下している。これは例えば花崗岩の場合、主な構成鉱物である石英と正長石と比較すると、20℃から100℃で石英ではc軸に直角方向で0.49%膨張するのに対し、正長石ではb軸方向にはほとんど膨張しないように¹⁰⁾ 岩石の構成鉱物粒子が温度履歴を受けた際、それぞれの膨張、収縮量が異なり、鉱物粒子間のマイクロクラックが拡大されたためと考えられる。しかし、温度履歴回数が増加するに伴い圧縮強度の低下の割合が減少しており、今回の温度履歴幅ではいずれはある値に収束することがうかがえる。これは履歴の温度幅が一定であるために構成鉱物粒子の膨張、収縮量が履歴の回数に関わらず一定しており、発生するマイクロクラックもある一定以上にはならないためと考えられる。高温の温度履歴を受けた場合、wetとdryで比較すると、dryの方がいずれの場合にも圧縮強度が大きい。この原因は供試体表面付近の間隙内に水が浸入する際、マイクロクラックが拡大、増加することや、試験時に供試体に荷重がかかると間隙水が水圧として働き、強度の低下を生じさせたことによるもの、また、応力腐食による強度の減少などが考えられる。花崗岩のdryの試験では100℃と15℃の場合とではほとんど強度に差がみられないが、花崗岩のwetと凝灰岩のwetとdryの試験では100℃の方が強度が低下している。低温の温度履歴を受けた場合も温度履歴の回数が増加するに伴い、圧縮強度が低下しており、高温の温度履歴と同様に低温の温度履歴でも試料の膨張、収縮によりマイクロクラックが拡大、増加したことがうかがえる。室温下では高温の温度履歴の場合と同様にwetの試料はdryの試料に比べ圧縮強度は小さいが、-160℃の雰囲気温度の下ではいずれの場合についても室温下の場合に比べ、強度は上昇しており、特に凝灰岩のwetではdryの試料よりも圧縮強度が大きくなっている。これは室温下の場合に比べ-160℃では鉱物粒子が収縮して硬化したためと考えられる。また、空隙率が大きく、岩石自体の強度が小さい凝灰岩では、間隙中の水が氷結し氷の圧縮強度が低温下で上昇することや、膠結物質としての影響を受けたため、圧縮強度がdryより大きくなったものと考えられる。Fig. 4は各温度幅で履歴を受けた岩石の圧縮強度(σ)を履歴を受ける前の圧縮強度(σ_i)で除した値を圧縮強度比(σ/σ_i)として示したものである。ここでは代表例として花崗岩の室温下での結果を示している。これより

(a) granite, at high temperature

(b) tuff, at high temperature

(c) granite, at low temperature

(d) tuff, at low temperatures

Fig. 3. Compressive strength of rocks after undergoing thermal hysteresis.

Fig. 4. Relationship between compressive strength ratio (σ/σ_0) and variance of temperature in thermal hysteresis.

温度履歴幅が大きい方が強度低下も大きいことがわかる。

Fig. 5 は圧裂引張強度試験の結果をとりまとめたものである。圧縮強度と同様にいずれの場合においても温度履歴回数が増加するに伴い引張強度が低下し、収束する傾向を示している。高温の温度履歴を受けた場合については100℃での引張強度は室温下の強度に比べわずかながら小さい。低温の温度履歴を受けた場合についてはいずれの場合においても室温下の引張強度に比べ-160℃の場合は強度が大きくなっている。また室温下ではwetの試料はdryの試料よりも強度は小さいが、-160℃では

Fig. 6. Stress-strain curve of the compression tests.

(a) granite, at high temperature

(c) granite, at low temperature

(b) tuff, at high temperature

(d) tuff, at low temperature

Fig. 5. Tensile strength of rocks after undergoing thermal hysteresis.

(a) granite, at high temperature

(b) tuff, at high temperature

(c) granite, at low temperature

(d) tuff, at low temperature

Fig. 8. Relationship between tangential Young's

modulus ratio (E/E_i) and variance of temperature in thermal hysteresis.

(a) granite, at high temperature

(b) tuff, at high temperature

(c) granite, low temperature

Fig. 7. Tangential Young's modulus of rocks after undergoing thermal hysteresis.

Fig. 9. Poisson's ratio of rocks after undergoing thermal hysteresis.

wet の試料の方が強度が大きく、特に空隙率の大きい凝灰岩ではその傾向が著しい。このことから引張強度も圧縮強度と同様に空隙中の氷の影響を受けていることがうかがえる。

次に圧縮強度試験時に得られた応力-ひずみ曲線から代表的なものを選び、とりまとめたものを Fig. 6 に示す。温度履歴回数の増加に伴い、同一応力のひずみが増加している。また、履歴回数の増加に伴い、試験の初期の応力が小さい部分で、曲線の傾きが小さくなっている。これは圧縮することにより、発生したマイクロクラックを閉塞したことによるものと推察される。破壊応力の 30% 付近の接線弾性係数を求め、とりまとめたものが Fig. 7 である。いずれの場合においても温度履歴回数が増加するのに伴い接線弾性係数の値が低下しており、温度履歴によるマイクロクラックの拡大、増加がこの結果からもうかがえる。花崗岩では wet と dry の接線弾性係数の値の差は大きくないが、凝灰岩ではその差は大きく、低温下での試験において最も大きく現れている。ここでも空隙中の氷の影響が関与しているものと考えられる。また、前述の圧縮強度比と同様に接線弾性係数比 (E/E_0) を示したのが Fig. 8 である。接線弾性係数も履歴温度幅が大きい方が低下の割合が大きい。

次に破壊応力の 30% 付近のポアソン比を求めた結果をとりまとめたものが Fig. 9 である。高温の温度履歴を与えた場合においては温度履歴回数が増加するのに伴わずかながらポアソン比が低下しているが今回の実験結果からは大きな変化はみられなかった。また、室温と 100°C でのポアソン比はほぼ同じ値であった。一方、低温の温度履歴を与えた場合においては温度履歴回数が増加するのに伴い、凝灰岩のポアソン比が大きく低下しており、特に -160°C での wet の試料のポアソン比が最も低下している。また、室温でのポアソン比よりも -160°C でのポアソン比の方が値は大きい。

3 温度履歴に伴う岩石のひずみ、弾性波伝ば速度

前述の強度・変形特性は温度履歴に伴う試料の膨張、収縮の繰り返しによって発生するマイクロクラックの影響を大きく受けているものと考えられる。このことは試料の温度の履歴に伴うひずみにも影響を与えるものと考

Fig. 10. Change of strain of rocks.

Fig. 11. Relationship between residual strain, strain at 100°C and number of cycles.

Fig. 12. Change of Secant coefficient of thermal expansion.

えられる。そこで石英ガラス棒による比較法¹¹⁾により高温あるいは低温の温度履歴に伴う試料のひずみを測定した。供試体は $\phi 3 \times 10$ cm に成形し、高温および低温の温度履歴を与える条件は前述と同様にした。代表例として wet の花崗岩に高温の温度履歴を与えた場合の結果が Fig. 10 である。雰囲気温度が上昇するのに伴い、ひずみはほぼ直線的に増大しており、降下すると小さくなるが、温度履歴を受け室温に戻った場合には元のひずみの値にはならず、いわゆる残留ひずみがみられる。この場合の残留ひずみと繰り返し毎の履歴最高温度である 100°C におけるひずみを示したのが Fig. 11 である。温度履歴回数が増加するのに伴い残留ひずみは無限に増大するのではなく一定値に収束することがうかがえる。残留

Fig. 13. Elastic wave propagation velocity of rocks after undergoing thermal hysteresis.

Fig. 14. Relationship between elastic wave propagation velocity ratio (V_p/V_{pi}) and variance of temperature in thermal hysteresis.

ひずみが発生するのは岩石が熱膨張する際に構成鉱物粒子の膨張量がそれぞれ異なるため、構成鉱物粒子間のマイクロクラックが拡大され、温度を室温に戻しても拡大されたマイクロクラックは完全には元に戻らないことに起因しているものと考えられる。Fig. 12 は各温度履歴回数での室温下と高温下あるいは低温下におけるひずみの差を履歴温度幅で除した、いわゆる割線線膨張係数である。割線線膨張係数も温度履歴回数の増加に伴い低下し、収束する傾向がある。

次に温度履歴を受けた供試体の弾性波伝ば速度を測定した。Fig. 13 はその結果を示したものである。いずれの場合にも温度履歴を受けると弾性波伝ば速度は低下しているが温度履歴回数が増加するに伴い弾性波伝ば速度の低下の割合は減少し、ある一定値に収束する傾向がみられる。これらの結果からも温度履歴を受けると岩石のマイクロクラックは拡大されるが、今回の温度幅では無限に拡大される訳ではなく、ある一定値に収束するものと考えられる。このことが前述の強度特性にも影響を及ぼしているものと推察される。

また、前述の圧縮強度比や弾性係数比と同様に弾性波伝ば速度比(V_p/V_{pi})を示したのが Fig. 14 である。この場合も履歴温度幅が大きい方が値の低下の割合が大きく、前述の強度特性の結果を裏付けているものと考えられる。

4 結 言

本研究では温度履歴によって強度・変形特性がどの程度の影響を受けるかを傾向としてとらえることを目的としているため、微視的立場からみた考察に関する課題が残されている。本研究で得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 岩石の圧縮および引張強度は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなる。しかし、強度の減少の割合は温度履歴回数が増加するのに伴い小さくなり、ある値へ収束する傾向がうかがえる。空隙率の大きい凝灰岩は湿润状態では低温下においては間隙水の膠結物質としての影響を受け、強度が増大する。また、温度履歴幅が大きい方が強度低下も大きい。

(2) 接線弾性係数も温度履歴回数が増加するのに伴い減少の傾向があり、ここでも温度履歴によるマイクロクラックの拡大が関与しているものと考えられる。ポアソン比は高温の温度履歴では大きな変化は見られなかったが、低温の温度履歴を受けた凝灰岩では温度履歴回数が増加するのに伴い、ポアソン比は減少しており、特に-160°Cでのwetの試料で顕著であった。

(3) 温度履歴に伴う試料のひずみを測定した結果、温度履歴を受け室温に戻した場合には元のひずみの値にはならず、残留ひずみがみられた。しかし、温度履歴回数が増加するのに伴い残留ひずみは無限に増大するのではなく一定値に収束することがうかがえる。

(4) 温度履歴を受けると岩石の弾性波伝ば速度は低下するが、温度履歴回数が増加するのに伴い弾性波伝ば速度の低下の割合は減少し、ある一定値に収束する傾向がみられた。

参 考 文 献

- 1) 稲田善紀, 八木則男, 材料, **29**, 1221 (1980).
- 2) 稲田善紀, 八木則男, 材料, **29**, 1228 (1980).
- 3) 稲田善紀, 横田公忠, 時川 忠, 土木学会論文集, **370/III-5**, 217 (1986).
- 4) 稲田善紀, 国土新彦, 材料, **41**, 410 (1992).
- 5) 稲田善紀, 甲村雄一, 藤原郁都, 土木学会論文集, **445/III-18**, 65 (1992).
- 6) 稲田善紀, 木下尚樹, 関 正造, 松尾 暁, 成行 惇, 越智健三, 土木学会論文集, **547/III-36**, 211 (1996).
- 7) 稲田善紀, 木下尚樹, 中崎英彦, 上田貴夫, 土木学会論文集, **424/III-14**, 227 (1990).
- 8) 工藤洋三, 橋本堅一, 佐野 修, 中川浩二, 土木学会論文集, **370/III-5**, 189 (1986).
- 9) 山口梅太郎, 宮崎道雄, 日本鉱業会誌, **86**, 347 (1970).
- 10) Sydney P. Clark, JR., Editor, "Handbook of Physical Constants", p.78 (1966) The Geological Society of America.
- 11) 稲田善紀, 寺田 孚, 伊藤一郎, 水曜会誌, **17**, 200 (1971).