

高温の温度履歴を受けた岩石の強度・変形特性

Strength and deformation characteristics of rocks after undergoing thermal hysteresis of high temperature

稲田善紀*・木下尚樹**・山田公雄***

Yoshinori INADA, Naoki KINOSHITA & Kimio YAMADA

Heated water which is produced by surplus heat from garbage burning plants and used for many purposes, is stored temporarily in openings excavated in rock mountain. In this case, the rock mass around openings will receive the effects of thermal hysteresis of high temperature for change of heated water quantity. Therefore, obtaining the strength and deformation characteristics of rock after undergoing thermal hysteresis of high temperature becomes important for discussing the stability of the openings. In this study, strength and deformation characteristics of granite were examined at high temperature and after undergoing thermal hysteresis of high temperature. Then the results were discussed.

1. 緒 言

ゴミ焼却等の廃熱を利用して得た熱水を各家庭の給湯や地域暖房等多目的に利用する場合、安定供給のための一時的な貯蔵が必要となってくる。筆者らは熱水のような高温物質の貯蔵方法として土地の立体的有効利用や環境保全等の観点から地山岩盤内に設けた空洞に直接貯蔵することを提案し、検討を行ってきている。実際に熱水を貯蔵した場合には、一日の時間帯や季節による使用量の変動によって空洞周辺岩盤は高温の影響を繰り返し受けることとなるため、貯蔵時の空洞の安定性を検討するためには熱履歴を受けた岩石の強度・変形特性を把握する必要がある。

本研究では、熱サイクル試験装置を用いて岩石試料に温度履歴を与えた後、室温下および高温下において強度・変形特性を求め考察した。

2. 温度履歴を受けた花崗岩の強度特性

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）である。花崗岩には一般的にほぼ直交する3つの潜在

* フェロー会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科

** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部環境建設工学科

*** 正会員 (株)芙蓉調査設計事務所 地質部 課長

的亀裂面が存在し、最もマイクロクラックが発達した面をrift plane、次いで2番目にマイクロクラックが発達した面をgrain plane、両者に直交する面をhardway planeと呼んでいる¹⁾。本研究ではこの分類に従うものとして岩石ブロックの弾性波伝播速度を測定することによりこれらの面を推定し、ここではrift planeおよびhardway plane にそれぞれ垂直となる方向にコアドリルで試料を採取した。以下前者をtype 1、後者をtype 2 と呼ぶ。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 $\phi 3 \times 3\text{cm}$ に成形した後、湿潤状態(wet)および乾燥状態(dry)³⁾にした。

2. 2 実験方法

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は任意の温度幅($-170^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$)、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、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。すなわち、槽内に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

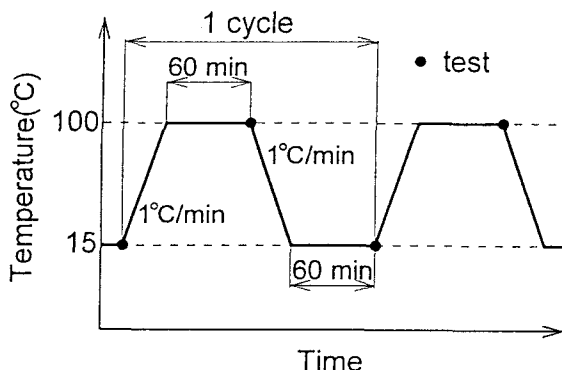


Fig.1 Schematic diagram of thermal hysteresis.

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Fig.1に示すように 15°C の試料を 100°C まで加熱した。その際の昇温速度は熱衝撃による影響を受けない速度³⁾の $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。また、水は1気圧の下では 100°C で沸騰するため、実際の実験では約 99°C であったが、本実験では、便宜上 100°C とする。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 の状態では60分間保温した。ここまでの過程を1サイクルとする。供試体は温度履歴を与えないもの、1, 2, 3および5サイクル温度履歴を与えたものの5種類とした。

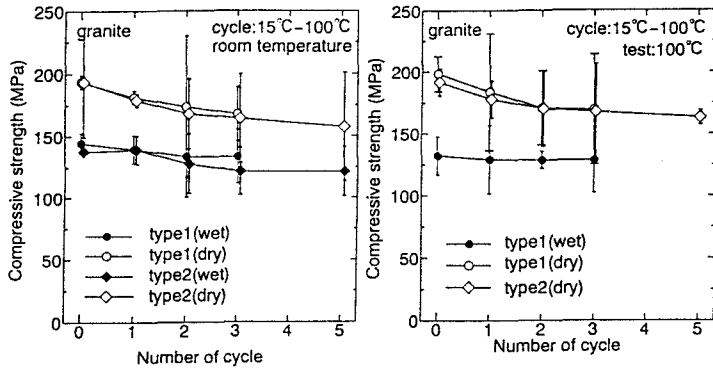
実験は一軸圧縮試験と圧裂引張試験を行った。実験中の雰囲気温度は室温(ここでは 15°C)および 100°C とした。 100°C の雰囲気温度で行う際には、温度履歴を与える場合と同条件で加熱した。なお、試験はwetの供試体については水中で、dryの供試体については空気中で行った。また、一軸圧縮強度試験の際には供試体に貼り付けたひずみゲージにより縦ひずみと横ひずみを同時に測定した³⁾。

2. 3 実験結果および考察

Fig.2(a),(b)は圧縮強度試験の結果をとりまとめたものである。また、Fig.3はそれぞれの温度履歴回数におけるtype 1 (wet)とtype 1 (dry)の結果を室温と 100°C との場合で比較したものである。

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。これは花崗岩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。

wetとdryの場合で比較すると、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、マイクロクラックの拡大が行われたものと考えられる。また、dryの試験では 100°C と 15°C の場合とではあまり強度に差がみられないが、wetの試験では 100°C の方が強度が低下し



(a) room temperature

(b) 100°C

Fig.2 Compressive strength of granite.

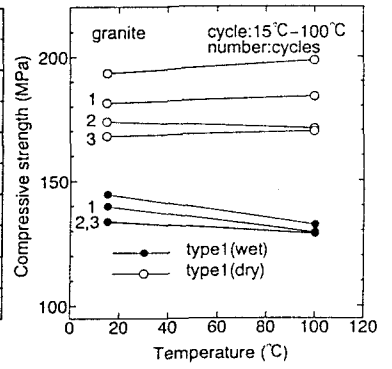
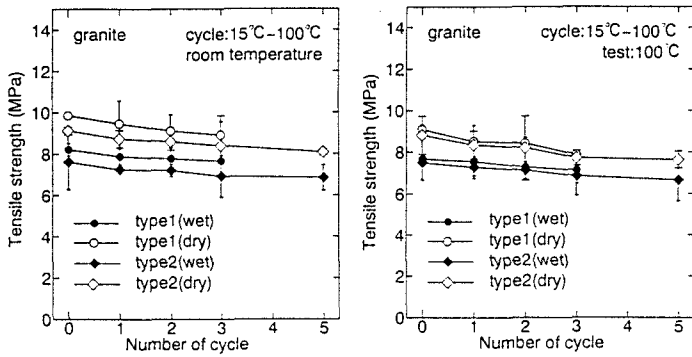


Fig.3 Change in compressive strength with temperature.



(a) room temperature

(b) 100°C

Fig.4 Tensile strength of granite.

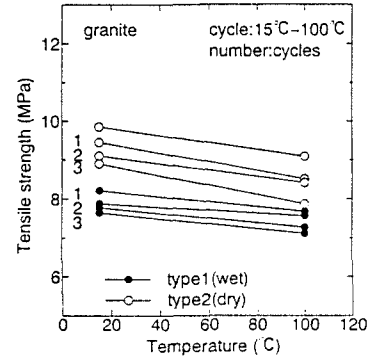
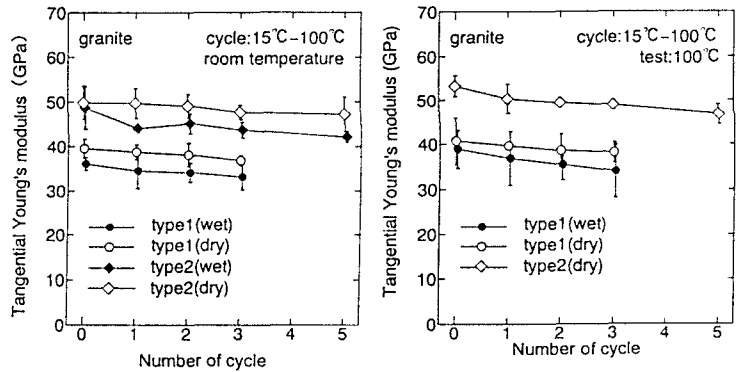


Fig.5 Change in tensile strength with temperature.

ている。これについても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と考えられる。

Fig.2(a)よりtype 1とtype 2で比較するとtype 1方がわずかながら強度が大きいとその差はあまりなく、異方性は圧縮強度についてはほとんどみられなかった。

Fig.4(a),(b)は圧裂引張強度試験の結果をとりまとめたものである。また、Fig.5はそれぞれの温度履歴回数に



(a) room temperature

(b) 100°C

Fig.6 Tangential Young's modulus of granite.

におけるtype 1 (wet)とtype 1 (dry)の結果を室温と100℃との場合で比較したものである。type 1とtype 2を比較するとtype 1の方が強度が大きく、異方性がややみられる。その他はの圧縮強度の場合と同様の傾向を示している。

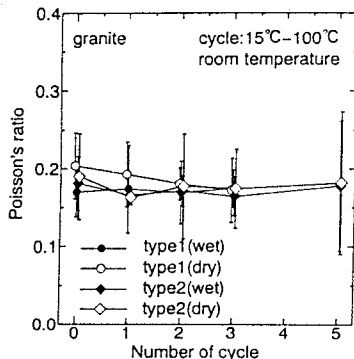
次に圧縮強度試験時に得られた応力-ひずみ曲線から破壊応力の30%付近の接線弾性係数およびポアソン比を求め、とりまとめたもの

がFig.6(a),(b)およびFig.7(a),(b)である。接線弾性係数はいずれの場合においてもdryよりもwetの方が小さく、吸水によるマイクロクラックの拡大がうかがえる。また、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がこの結果からもうかがえる。また、type 1とtype 2では約20%の異方性がみられた。ポアソン比については温度履歴回数が増加するのに伴いわずかながら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、いずれの条件下においても大きな違いはみられなかった。

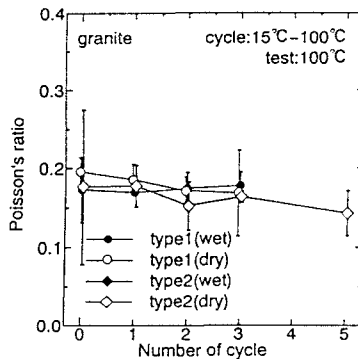
3. 温度履歴を受けた花崗岩の変形特性

ここでは石英ガラス棒による比較法⁹⁾により温度上昇および低下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、加熱、冷却の条件は2で述べた条件と同様にした。温度履歴回数は5回とした。

結果の代表例としてtype 1 (dry)の場合の結果をFig.8に示す。雰囲気温度が上昇するのに伴い、ひずみは大きくなり、降下すると小さくなるが、温度履歴を受けると残留ひずみがみられる。しかし、温度履歴回数が増加しても残留ひずみが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。このことはFig.9に示すように、温度履歴を受けた供試体の弾性波伝播速度を測定した別の実験結果からも推察できる。いずれの場合にも温度履歴を受けると弾性波伝播速度は低下しているが温度履歴回数が増加するのに伴い弾性波伝播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。これらの結果から温度履歴を受けると花崗岩のマイクロクラックは



(a) room temperature



(b) 100°C

Fig.7 Poisson's ratio of granite.

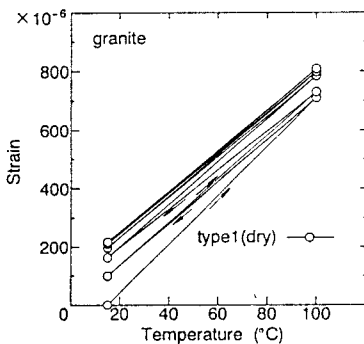


Fig.8 Strain of granite.

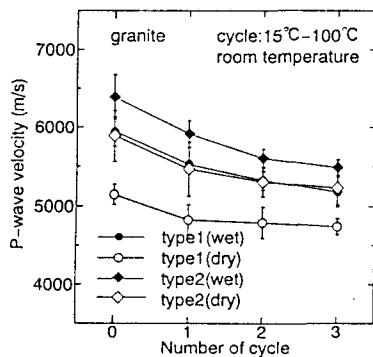


Fig.9 Elastic wave velocity of granite.

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。

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。また、温度履歴回数をさらに増加させた場合についても現在検討中である。今回は空隙率の小さい花崗岩について実験を行ったが、空隙率の大きい岩石についても実験を行う予定である。これらについては次の機会に報告する。

本研究を遂行するにあたり愛媛大学大学院の松嶋信行氏には実験にご協力頂いた。ここに御礼申し上げる。

参考文献

- 1)たとえば 工藤洋三・橋本堅一・佐野修・中川浩二：花崗岩の力学的異方性と岩石組織欠陥の分布，土木学会論文集，370，Ⅲ-5，pp.189-198，1986.
- 2)稲田善紀・横田公忠・時川忠：熱水が岩石の強度および変形特性に及ぼす影響，土木学会論文集，370，Ⅲ-5，pp.217-223，1986.
- 3)山口梅太郎・宮崎道雄：熱による岩石の変化あるいは破壊について，日本鉱業会誌，86，986，pp.347-348，1970.
- 4)稲田善紀・寺田孚・伊藤一郎：岩石の線膨張係数について，水曜会誌，17，5，pp.200-203，1971.