

高温の影響を受ける岩盤空洞の熱的挙動に関する一考察

STUDY OF THERMAL BEHAVIOR OF OPENINGS AFFECTED BY HIGH TEMPERATURES

稲田善紀*・木下尚樹**

Yoshinori INADA and Naoki KINOSHITA

The authors have proposed and discussed temporary storage of heated water in openings excavated in rock mountains. In this case, rock mass around the opening receives the affects of thermal hysteresis of high temperatures as the quantity of heated water continually changed according to its use. In this study, strength and deformation characteristics of some types of rocks were examined after receiving thermal hysteresis of high temperatures. The temperature and stress distribution around openings were analyzed by using FDEM and FEM. Then the effect of thermal hysteresis on thermal behavior of some types of rock mass around openings was discussed.

Key Words: thermal behavior, opening, heated water, thermal hysteresis

1. 緒 言

高温物質の岩盤内貯蔵としての「熱水貯蔵システム」はゴミ焼却等の廃熱を利用し熱湯を得、これを地域暖房や一般家庭への給湯、融雪道路、農漁業要など多目的に利用する場合の一時貯蔵施設として岩盤内空洞を利用するものであり、土地の立体的有効利用や省エネだけでなく、環境に与える影響も少ないことが挙げられる。この場合、空洞周辺岩盤は熱の影響を受けることとなる。そのため、熱応力の発生に伴う周辺岩盤の熱的な挙動を把握しておく必要がある。

本研究では岩盤内空洞に熱水を貯蔵した場合を想定し、代表的な数種類の岩盤について温度分布および応力解析を行い、周辺岩盤の熱的な挙動を検討することとした。その際必要となる岩盤物性については、解析に先立ち室内実験により高温の履歴を受けた岩石の諸物性を求め、考察した後に用いることとした。これにより、岩盤の物性の違いによる岩盤の熱的な挙動の違いについて考察した結果を述べる。

2. 高温の履歴が岩石の諸物性に与える影響

(1) 実験に用いる供試体

実験に用いた岩石は2種類の花崗岩、安山岩、砂岩および凝灰岩である。岩石ブロックから同一方向にコアドリルで試料を採取して各試験用に成形した。成形後、室内で1週間以上自然乾燥させた後、デシケート内でさらに1週間乾燥させた乾燥状態のもの(dry)と、乾燥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润状態のもの(wet)の2種類用意した。

* フェロー会員 工学博士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

** 正会員 工学修士 愛媛大学 工学部 環境建設工学科

実験に先立ち供試体に熱履歴を与える方法は以下のとおりとした。供試体の含水状態が変化しないようにポリエチレンフィルムで覆い、熱サイクル試験槽に入れ、昇温および降温速度を $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ として加熱、冷却した。また、履歴の最高および最低温度での保温時間は 60 分とした。本研究では、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特に着目し、考察する。

(2) 圧縮強度

供試体に熱履歴を与えた後、一軸圧縮試験を行った。供試体の寸法は $\phi 3 \times 6\text{cm}$ 、試験は wet の供試体については水中で行った。試験は荷重速度を一定として制御し、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。各試験に用いる供試体は 1 つの条件に付き 5 本とした。

図-1 は履歴幅 $15^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ の場合の履歴に伴う一軸圧縮強度の変化を示したものである。ここでは履歴を受ける前の各岩石の強度との比で表している。また、本研究では水が沸騰する直前の温度を便宜上 100°C と呼んでいる。いずれの岩石も履歴回数の増加に伴い強度は低下しているが、低下の割合は履歴とともに小さくなっている。また、凝灰岩では強度低下は大きいのに比べ、安山岩では小さい結果となった。強度が低下した原因としては岩石の構成鉱物粒子の熱膨張・収縮量の差異により、潜在的なマイクロクラックが拡大、増加したことが原因と考えられる。図-2 は履歴幅を変化させた場合の大島花崗岩の強度比を示したものである。いずれの履歴回数においても履歴幅が大きい方が強度比が小さくなっていることがわかる。次に履歴を与える際の拘束圧の影響を調べるため、供試体に履歴を与える際に高温高压三軸セルを用いて、拘束状態で $15^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ の熱履歴を与えたのち、一軸圧縮強度試験を行った。図-3 は履歴回数 10 回の花崗岩供試体を 15°C および 100°C の雰囲気温度で試験したものである。拘束圧が大きい方が圧縮強度の低下率が小さくなっている。これは、拘束圧により温度上昇による岩石の膨張を押さえるため鉱物粒子の変位が小さくなり、各鉱物粒子の熱膨張率が異なるために起こる潜在的マイクロクラックの助長・拡大が抑えられたためであると考えられる。

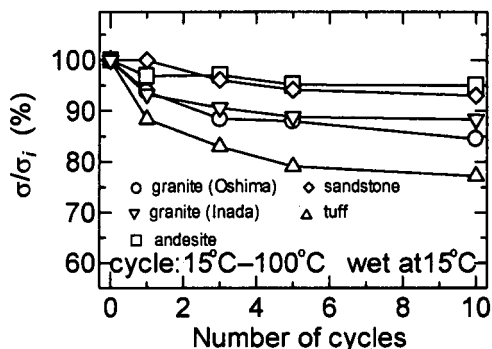


図-1 熱履歴に伴う圧縮強度の変化

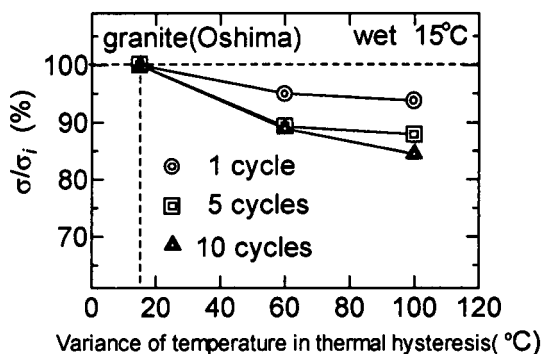


図-2 圧縮強度に及ぼす温度幅の影響

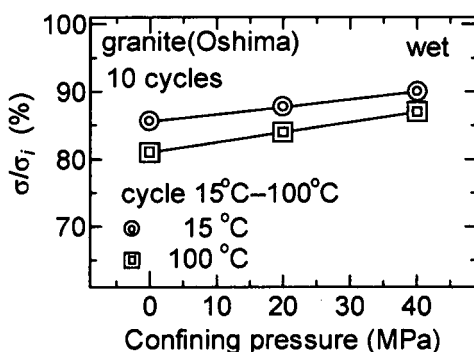


図-3 圧縮強度に及ぼす拘束圧の影響

(3) 履歴に伴うひずみおよび弾性波伝播速度

石英ガラス棒による比較法¹⁾により、温度履歴に伴

う試料のひずみを測定した。代表例として wet の大島花崗岩および安山岩に履歴を与えた場合の結果を図-4に示す。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、いわゆる残留ひずみがみられる。しかし履歴回数の増加に伴い、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。また、履歴に伴う弾性波伝播速度の変化を図-5に示した。この結果からもマイクロクラックの増加が推察される。

以上の結果から、岩石が熱履歴を受ける際、各構成鉱物粒子の膨張、収縮量が異なり、鉱物粒子内および粒子間のマイクロクラックが拡大、増加するものと考えられる。履歴回数が増加するのに伴い、強度、弾性係数の低下の割合が減少し、収束する傾向がみられたのは、ひずみや弾性波伝播速度の測定結果からも裏付けられるように、熱履歴により発生したマイクロクラックは、温度を室温に戻しても完全には元に戻らないが、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。

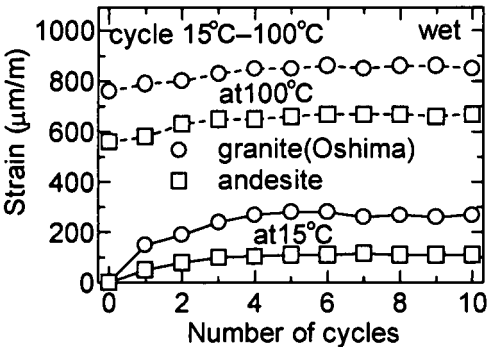


図-4 熱履歴に伴うひずみ

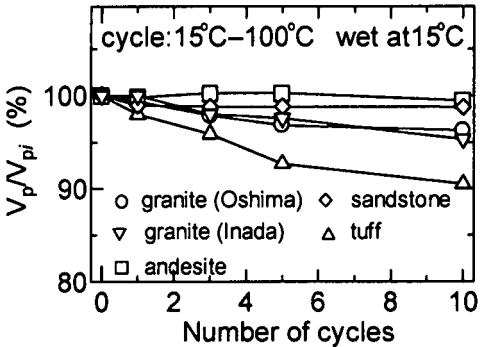


図-5 熱履歴に伴う弾性波伝播速度

(4)熱履歴による構成鉱物粒子の変化

ここでは、大島花崗岩を用いて花崗岩の主鉱物である石英、長石および雲母の各鉱物について、熱履歴に伴う結晶軸の長さの変化をX線回折法にて求めた。図-6は温度上昇に伴う結晶軸の膨張率を示している。各鉱物とも温度上昇に伴い膨張しているが、鉱物の種類、結晶軸により膨張率が異なることがわかる。図-7は熱履歴を受けた際の各サイクルの 15℃における膨張率である。各鉱物の結晶軸の長さは熱履歴を受けてもほぼ変化がないことがうかがえる。このことより、15℃～100℃の範囲では粒子単位での熱履歴による残留ひずみは非常に小さく、弾性的な挙動を示していることがわかった。

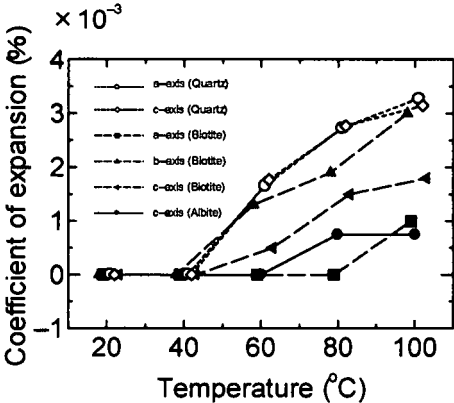


図-6 高温下における鉱物粒子の膨張率

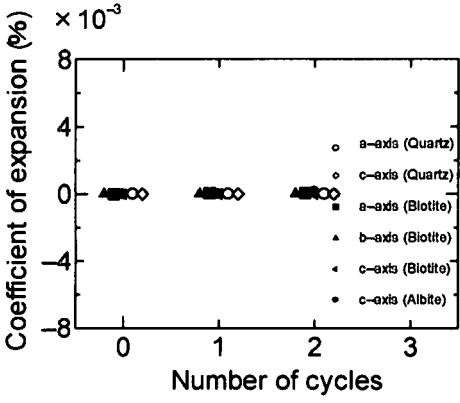


図-7 熱履歴に伴う鉱物粒子の膨張率

3. 熱履歴を考慮した空洞周辺岩盤の挙動解析

土被り 100m の地山岩盤内に直径 10m の単一円形空洞を設け、熱水(100℃一定)を貯蔵した場合の空洞周辺岩盤挙動について求めることとした。温度分布の経時変化は筆者らが提案している要素分割法²⁾により求めた。解析モデルの境界は空洞表面から 100m の位置とし、温度は 15℃とした。初期温度は岩盤部分で 15℃、空洞内部は 100℃とした。次に温度分布の解析結果を用いて FEM に時間の概念を取り入れた逐次破壊解析³⁾を行い、空洞周辺岩盤の応力分布を求めた。解析は平面ひずみ問題として取り扱い、破壊判定は Mohr の破壊包絡線説に従うものとした。初期応力は岩盤の自重と自重の 1/2 の側圧とし、そこに熱応力が重畳されるものとした。解析に必要となる岩石の物性値については前述の実験により求めた値を用いることとした。

熱水の貯蔵により発生する熱応力を重畳した応力分布を図-8および図-9に示す。大島花崗岩では、貯蔵 1 年後(履歴なし)においては、空洞の接線方向に大きな圧縮応力が生じている。その後、熱履歴を受けながら 10 年間経過した場合においては、発生する応力が減少していることがわかる。これは、熱履歴を受けると接線弾性係数が小さくなることに起因しているものと思われる。いずれの場合においても空洞は安定しており、大島花崗岩の空洞周辺岩盤が熱履歴を受けても空洞は安定しているものと考えられる。これは、前述の実験結果から花崗岩の圧縮強度は熱履歴を受けると 100℃においては 91%に低下する。しかし、接線弾性係数および線膨張係数においてもそれぞれ約 89%および約 77%に低下することから、解析から得られた空洞表面付近で発生する熱応力も約 74%に減少している。このことから空洞は破壊せずに安定している結果となったものと考えられる。

凝灰岩においては、空洞表面に発生する熱応力は花崗岩と比較して非常に小さい。これは、接線弾性係数が小さいためであると考えられる。また、応力分布の経時変化が小さい。これについても、発生する熱応力が花崗岩と比較して小さく、自重による応力が大部分を占めるためであると考えられる。また、凝灰岩においては貯蔵 1 日後において空洞の水平軸付近がせん断破壊することがわかった。これは、凝灰岩の強度自体が他の岩石と比較してかなり小さいためであると考えられる。また、履歴を受けた場合においては、せん断破壊が進行していることがわかった。

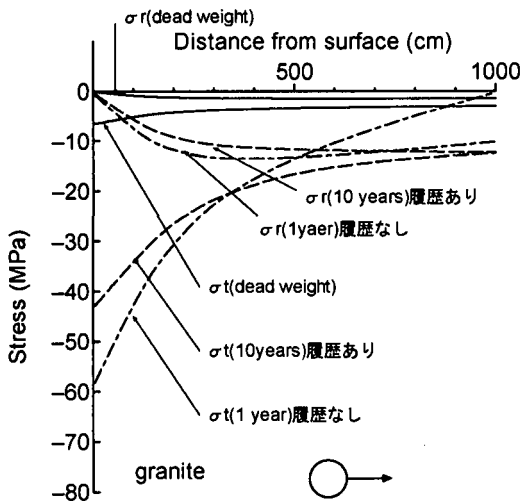


図-8 花崗岩岩盤における水平軸に沿った応力分布

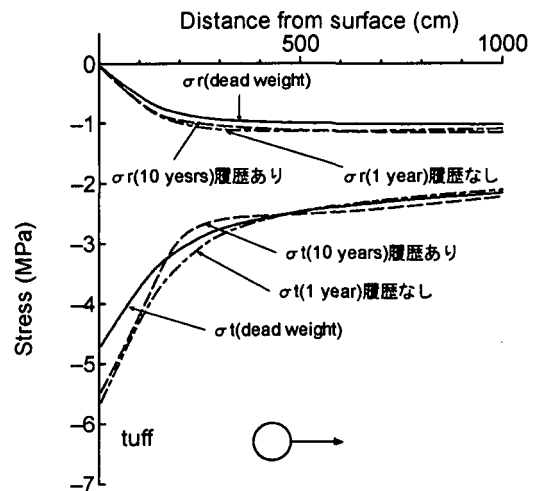


図-9 凝灰岩岩盤における水平軸に沿った応力分布

以上のように、熱履歴を考慮した物性を用いることにより、応力解析の結果も違いがでてくることがわかった。しかし、熱水のような高温物質を貯蔵する場合、実際の岩盤においては温度変化に伴い熱応力が発生するため、岩盤は熱履歴と応力履歴を同時に受けることとなり、この場合の物性を正確に把握することは、今後の課題と考えられる。また、高温・高圧下におけるクリープ現象などについても把握しておく必要があると考えられる。

4. 結 言

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。
- (2) 履歴に伴うひずみ、弾性波伝播速度およびX線回折の結果、岩石が熱履歴を受けると構成鉱物粒子の膨張率の違いにより潜在的クラックが拡大・増加するものと推察される。
- (3) 解析の結果、岩盤の種類の違いにより熱水貯蔵時の応力分布および挙動は異なっている。これは弾性係数の違いによって発生する熱応力が異なることによるものと考えられる。

本研究の遂行にあたり、当時愛媛大学大学院の学生であった宮本賢人氏（現 東興建設（株））には実験および解析でご協力いただいた。ここに謝意を表しておく次第である。

参考文献

- 1) 稲田善紀他：岩石の線膨張係数について，水曜会誌, 17, 5, pp.200-203, 1971.
- 2) 稲田善紀：岩盤工学, pp.180-188, 森北出版, 1997.
- 3) 稲田善紀：地下の空間利用, pp.112-119, 森北出版, 1989.