

天然のき裂を含む花崗岩質岩石の 熱膨張特性

八田敏行¹・熊坂博夫²・木下直人³・安部 透⁴

¹正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ グループ長
(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

²正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ 主任研究員
(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

³正会員 工博 株式会社地層科学研究所 取締役
(〒242-0014 神奈川県大和市上和田1794 鳥海ビル2F)

⁴正会員 清水建設株式会社 技術研究所 地下技術グループ
(〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)

高温、拘束圧下において、き裂を含まない岩石（花崗閃緑岩）、き裂を含む岩石および充填物のあるき裂を含む岩石のそれぞれについて、熱膨張試験を実施することにより、岩石の熱膨張特性に対するき裂および充填物の影響を調べた。その結果、き裂のない供試体の線膨張係数の測定結果とき裂を含む供試体のそれとはほぼ一致しており、岩石の熱膨張特性に対するき裂の影響は無視することができる。それに対して、充填物のあるき裂を含む岩石の場合には、加熱に伴って充填物が収縮することにより、き裂のない岩石の線膨張係数よりもはるかに小さくなる場合がある。したがって、岩盤の熱膨張特性を評価する際には、き裂の密度、充填物の種類と厚さによっては、充填物の影響を考慮することが必要になると考えられる。

Key Words : *high temperature, thermal expansion, natural fracture, granitic rock*

1. はじめに

高温下あるいは低温下において岩盤地下を利用する場合には、掘削時における岩盤の安定性を確保するとともに、岩盤地下利用時に作用する熱応力に対する安定性を確保することが重要である。地下に建設された岩盤内空洞の利用に伴って、周辺岩盤の温度が高温になる施設の例の一つとして、筆者ら¹⁾が提案している熱水岩盤貯蔵発電システムがある。これは、既存の原子力や石炭、石油火力発電所などにおいて、夜間運転時に発生する蒸気の一部を地下岩盤空洞内に熱水として貯蔵し、それを昼間蒸気の形で取り出して発電することにより負荷の平準化を図ろうというものである。この熱水岩盤貯蔵発電システムでは、空洞内に貯蔵される熱水の温度は200～300°C、圧力は2～5MPa程度と想定されている。このように、空洞周辺岩盤の温度が200～300°Cといった高温になる場合

には、空洞の熱応力に対する安定性を確保することが特に重要になり、そのような検討を行う際の、最も重要な物性の一つが岩盤の熱膨張特性である。

高温下における各種岩石物性の温度依存性に関する既往の研究については、Heuze²⁾、北野ら³⁾および木下⁴⁾によって整理され、報告されている。高温下岩石の熱膨張特性に関する研究は、従来主として火成岩を対象として行われてきている。特に花崗岩を対象とした測定は数多く実施されている。それらの結果によれば、常温における花崗岩の線膨張係数は、 $(5\sim 10)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の範囲にある。そして、400°Cまでは、温度上昇とともにほぼ直線的に増加し、常温における値の約4倍に達している⁴⁾。

高温下岩石の熱膨張特性に関する研究は、主として大気圧下において行われており、拘束圧下における研究例は少ない。例えば、花崗岩質岩石の熱膨張特性に対する拘束圧の影響に関しては、Heard⁵⁾、HeardとPage⁶⁾、Bauer

と Handin⁷⁾および木下ら⁸⁾ によって検討されており、いずれも拘束圧は線膨張係数を減少させる方向で影響を及ぼすという結果が得られている。

岩石の熱膨張特性と、き裂を含む岩盤としての熱膨張特性が一致するのか、それとも異なるのかについては、両方の考え方がある⁹⁾。き裂を含む供試体についての熱膨張試験は、試験中き裂に作用する応力を一定に保つ必要がある(き裂に作用する応力が変化すると、それに伴ってき裂の開口幅が変化する)ので、必ず拘束圧を作用させた状態で行う必要がある。従来、拘束圧下において岩石の熱膨張試験を行うこと自体が容易ではないため、き裂を含まない岩石についても、上に述べたように、試験例は多くない。さらに困難度の増すき裂を含む岩石供試体についての熱膨張試験はほとんど行われていない。したがって、岩盤の熱膨張特性の評価に際して、き裂の影響を考慮する必要性の有無に関しては、現在のところよくわかっていない。また、き裂を含む岩石の熱膨張特性の試験技術も確立されていない。

岩盤内のき裂には、充填物が含まれている場合が多い。充填物の熱膨張特性は温度依存性を示し、岩石全体の熱膨張特性に影響を及ぼす可能性がある。したがって、き裂を含む岩石の熱膨張特性について調べる場合、き裂そのものの影響だけでなく、充填物の影響についても把握する必要がある。また、例えば、熱水変質を受けているような場合には、き裂周辺の岩石が変質することにより、熱膨張特性も変化している可能性がある。

原位置において、複数のき裂を含む、一辺が 2m 前後の岩盤ブロックを切り出し、それを加熱した際の膨張量を測定することにより、岩盤の熱膨張特性を把握しようという試みも行われている¹⁰⁾⁻¹²⁾が、非常に複雑な測定結果が得られている。このような結果が得られている主要な原因は、試験中岩盤ブロック全体の温度を一樣に保ちながら、温度を変化させる必要があるにもかかわらず、それを実現することが非常に困難なためであることを考慮すると、現状では、新たな方法を開発しない限り、原位置において、き裂を含む岩盤ブロックを加熱することにより、岩盤の熱膨張特性を求めるのは非常に困難であると考えられる。したがって、供試体全体の温度を一樣に保ちながら温度を変化させることが比較的容易な室内試験により岩盤の熱膨張特性を推定できることが望まれる。もしも、熱膨張特性に対するき裂の影響がないという実験結果が得られれば、室内において岩石の熱膨張特性を測定し、その値をそのまま岩盤としての熱膨張特性とすることができる。

そこで、き裂を含まない岩石、き裂を含む岩石および充填物を有するき裂を含む岩石のそれぞれについて、高温、拘束圧下において熱膨張試験を実施することにより、岩石の熱膨張特性に対するき裂および充填物の影響を把

握することを試みた。

2. 実験の概要

(1) 試料

試料としては、釜石鉱山内から採取した栗橋花崗閃緑岩を用いた。インタクトな部分を構成している鉱物は、珪長質鉱物(石英、カリ長石、斜長石等)と苦鉄質鉱物(角閃石、黒雲母等)であり、前者が 80%程度、後者が約 20%を占めている。珪長質鉱物の中では、カリ長石が最も多く、続いて斜長石、石英の順である。石英の含有量は比較的少なく、5~10%前後である。

鉱山内に存在する連続性のあるき裂は、赤色~褐色の変質部を有するものと、そうでないものとに区別される。いずれも充填物を含んでいるものが多いが、前者の方が充填物が厚い傾向がみられる。赤色~褐色の変質部を有するき裂の充填鉱物は、緑泥石、方解石、沸石類、緑れん石、ブドウ石、変質部のないき裂のそれは方解石と沸石類である¹⁴⁾。前に述べたように、き裂を含む岩石の場合、き裂そのものだけでなく、き裂内の充填物やき裂周辺の変質部も熱膨張特性に影響を与えている可能性がある。そこで、これらの個々の影響について評価することができるようにするため、2種類のき裂(赤色の変質部を有するものと、そうでないもの)を含む、以下の5種類計6個の供試体について熱膨張試験を行った。試験個数は、既往の拘束圧下における試験⁵⁾⁻⁸⁾と同様に、試験条件毎に1個としている。

- ① き裂を含まない岩石を用いて大気圧下で試験
供試体番号: KG-1
- ② き裂を含まない岩石を用いて拘束圧下で試験
供試体番号: KG-2
- ③ 人工き裂を含む岩石
曲げ応力を作用させることにより、供試体軸方向にほぼ直交する方向に人工的なき裂を設けたもの
供試体番号: KG-3
- ④ 赤色の変質部のない天然のき裂を含む岩石
厚さ約 2mm の充填物を介在。以下き裂Cと記す
供試体番号: KG-4
- ⑤ 赤色の変質部を有する天然き裂を含む岩石
厚さ約 7mm の充填物を介在。厚さ約 36mm の変質部を有する。以下き裂Aと記す
供試体番号: KG-5
- ⑥ き裂の充填物を除去した岩石
き裂Aを含む供試体(KG-5)についての試験終了後に、平面研削盤を用いて充填物を除去した試料
供試体番号: KG-6
き裂を含まない供試体(KG-2)、き裂Cを含む供試体



a) き裂を含まない供試体 (KG-2) b) き裂Cを含む供試体 (KG-4) c) き裂Aを含む供試体 (KG-5)

写真-1 熱膨張試験用供試体

(KG-4) およびき裂Aを含む供試体 (KG-5) を写真-1 に示す。き裂の方向は、いずれも供試体軸にはほぼ直交している。

各供試体の寸法は、大気圧下における測定では、直径20mm、高さ100mm、拘束圧下における測定では、直径30mm、高さ100mmとすることを原則としたが、供試体KG-5とKG-6の場合は、それぞれ高さが78.0mmおよび71.5mmとやや短くなっている。

(2) き裂を含む供試体の成形方法

予備実験の結果、熱膨張試験用の供試体の直径は30mmと小さいので、ボーリング作業時にビットの先端がき裂部に到達すると、切り離されたボーリング・コアが回転することにより、き裂面が損傷を受けてしまうことが明らかになった。そこで、供試体の中心部にドリルを用いて小孔径の孔（孔径約6mm）をあけ、ボルトを挿入して締め付けることにより、切り離されたボーリング・コアが回転しないようにした後ボーリングを行った。その結果、き裂面で回転することなく供試体の成形を行うことができた。

(3) 熱膨張挙動の測定

熱膨張挙動の測定は、基本的には拘束圧下で実施したが、き裂を含まない岩石については、大気圧下での測定も実施した。使用した試験装置および試験方法は、基本的には、木下ら⁸⁾のそれと同じである。大気圧下における熱膨張試験には真空理工（株）製の押し棒式熱膨張計

(DL-1500Y型)を、拘束圧下における試験にはMT S社製の熱膨張試験装置の一部を改良したものを用いた。拘束圧下における試験に用いた三軸室の概要を図-1に示す。三軸室内を高温用シリコンオイルで満たし、所定の拘束圧を作用させた状態で、三軸室内の温度を徐々に変化させる。そして、三軸室下部に設置されている2個の差動トランス型変位計を用いて加圧盤間の相対変位を測定することにより、供試体の線膨張ひずみを測定できるようになっている。加圧盤は、熱膨張量ができるだけ小さいことが望ましいので、スーパーインバー製としている。

大気圧下における試験の場合の昇温・降温速度は30°C/h、拘束圧下におけるそれは25°C/hとした。所定の昇温速度で、大気圧下では300°C、拘束圧下では約265°Cまで加熱し、2時間一定温度を保持した後、加熱時と同じ速度で室温まで冷却しながら線膨張ひずみおよび残留ひずみの測定を行った。拘束圧下における測定の場合、同一供試体を用いて、最初に拘束圧3.0MPaで試験を行った後、拘束圧30MPaでの試験を実施した。

天然のき裂を有する供試体の場合、き裂部にメンブレンが食い込み、破損してしまう恐れがあるので、それを防止するため、供試体側面のき裂部周辺に銅箔を巻きつけた状態で試験を実施した。き裂を含む供試体を用いて試験を行う場合、試料採取・成形時にき裂面の接触状態が原位置におけるそれと異なった状態になり、それが試験結果に影響を与えることが懸念される。き裂の特性に対する試料の採取・成形の影響がどの程度あるかについてほとんど明らかになっていない現状では、その影響を

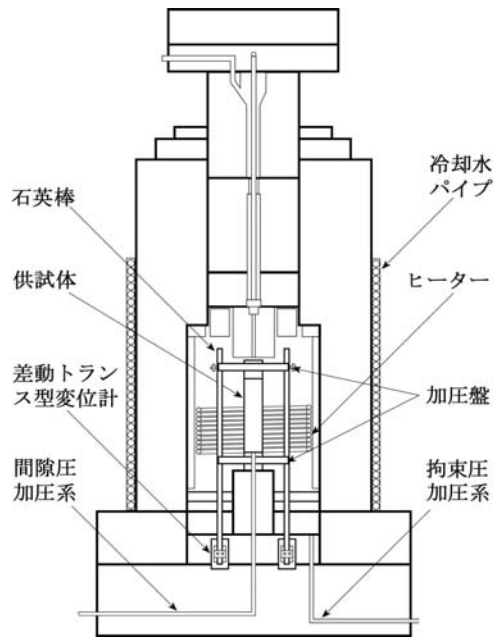


図-1 熱膨張試験用三軸室

考慮する定まった方法は存在しない。

Bartonら¹⁴⁾は、き裂に垂直応力を繰り返し作用させ、1回目のサイクルで大きな残留変形がみられる場合、それは試料採取時の乱れによるものであり、実際の原位置でのき裂は、3回目か4回目のサイクルと同じ圧縮変形特性を示すと考えるべきであるとしている。安部ら¹⁵⁾は、単一き裂の透水試験を実施する際に、Bartonらの指摘にしたがって、原位置においてき裂に作用していたと考えられる垂直応力を2回繰り返し作用させた後に所定の試験を実施している。き裂Aについて、実際に繰り返し载荷試験を行ってみた結果、繰り返し1回目の载荷時には大きな残留ひずみが発生しているのに対して、2回目の载荷時にはほとんど残留ひずみが発生しなかった。そこで、本試験においても、き裂を含む供試体を用いる場合には、予め試験時の拘束圧よりも少し大きな圧力(35MPa)で2回载荷・除荷を繰り返した後に熱膨張試験を実施した。

一般に、試験中における側液の温度と供試体の温度は一致しない。そのため、側液の温度をそのまま供試体の温度とみなすと、特に昇温や降温開始点付近における測定結果は、本来の岩石の熱膨張特性と比べ、大きな誤差を生じる可能性がある。したがって、試験中における供試体の温度を正確に求めることは非常に重要である。そこで、熱膨張挙動測定用の供試体とは別に、熱電対を埋設した温度測定用供試体を三軸セル内に設置し、その温度をそのまま供試体の温度とした。

大気圧下においても、拘束圧下においても、標準試料として熔融石英を用いた線膨張ひずみの測定を行うことにより試験装置の温度ドリフト量を求め、それに対する補正を行った。その際、熔融石英の線膨張係数は $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (一定)とした。

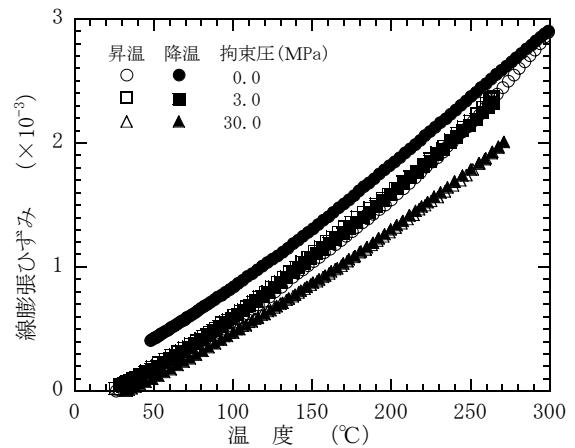


図-2 き裂のない供試体 (KG-1, KG-2) の線膨張ひずみと温度の関係

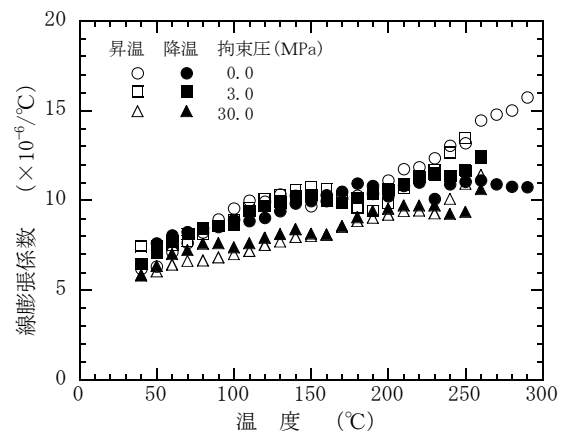


図-3 き裂のない供試体 (KG-1, KG-2) の線膨張係数と温度の関係

3. 試験結果と考察

(1) 栗橋花崗閃緑岩の線膨張係数の温度依存性

き裂のない供試体 (KG-1, KG-2) の線膨張ひずみの測定結果を図-2に、線膨張係数の測定結果を図-3に示す。

50°C前後における線膨張係数は $(6\sim7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、既往の花崗岩質岩石の線膨張係数測定結果と比較すると、やや小さめの値を示している。全体的に今回試験を行った栗橋花崗閃緑岩の線膨張係数の値はやや小さい。

大気圧下でも、拘束圧下でも、250°Cにおける昇温時の線膨張係数は50°Cにおけるその約2倍になっており、線膨張係数は温度依存性を示している。したがって、線膨張係数の温度依存性を考慮することは重要である。ただし、既往の測定結果^{3), 8)}では、250°Cにおける花崗岩質岩石の線膨張係数は、50°Cにおけるその2.1~2.4倍程度になっている場合が多く、それと比較すると、線膨張係数の温度依存性はやや小さい。このように、全体的に既往の測定値よりも線膨張係数が小さくなっているの

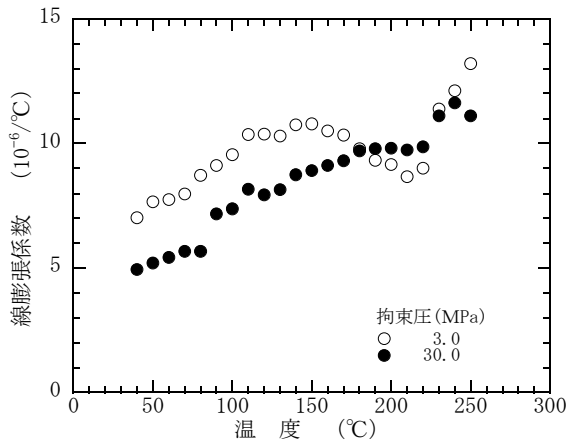


図-4 人工き裂を含む供試体 (KG-3) の昇温時線膨張係数と温度の関係

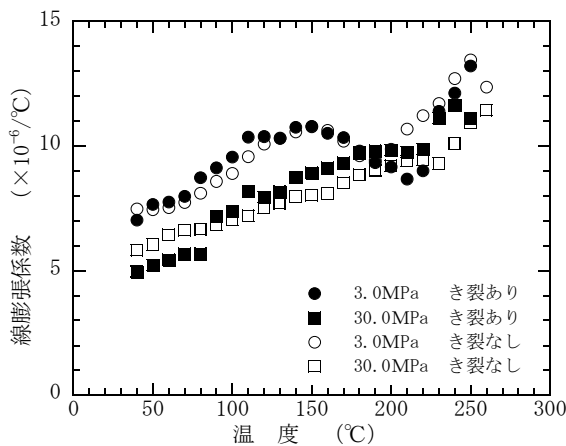


図-5 き裂のない供試体 (KG-2) と人工き裂を含む供試体 (KG-3) の昇温時線膨張係数の比較

は、石英の含有量が 5~10%程度と少ないためであると考えられる。石英は、主要な造岩鉱物のなかでは最も大きな線膨張係数を有しており、木下ら⁸⁾の測定した花崗岩質岩石の石英含有量は、25~42%である。降温時における線膨張係数の温度依存性は、昇温時におけるそれよりもやや小さい。

同一の供試体を用いて実施した、拘束圧 3.0MPa における昇温時の線膨張係数と拘束圧 30.0MPa でのそれとを比較すると、後者の線膨張係数の方が小さくなっている。したがって、栗橋花崗閃緑岩でも、既往の花崗岩質岩石と同様に、拘束圧の増加に伴って線膨張係数は低下していると考えられる。一方、大気圧下における昇温時の線膨張係数と拘束圧 3.0MPa でのそれとを比較すると、両者はほぼ同じ値を示しているが、これは、異なった供試体を用いて測定を行っていることから、供試体毎の熱膨張特性のばらつきの影響によるものと考えられる。

(2) 岩石の熱膨張特性に対するき裂の影響

人工き裂を含む供試体 (KG-3) の昇温時線膨張係数と

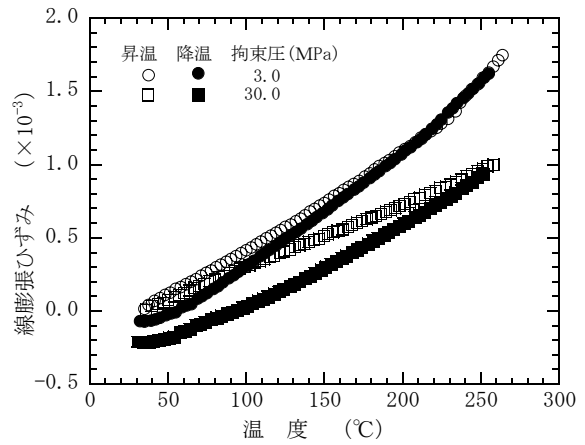


図-6 き裂Aを含む供試体 (KG-5) の線膨張ひずみと温度の関係

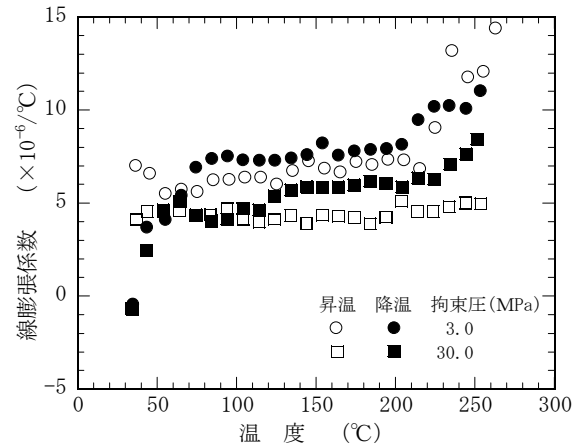


図-7 き裂Aを含む供試体 (KG-5) の線膨張係数と温度の関係

温度の関係を求めた結果を図-4 に示す。また、き裂のない供試体 (KG-2) と人工き裂を含む供試体の昇温時線膨張係数を比較した結果を図-5 に示す。ややばらつきはあるものの、人工き裂を含む供試体の線膨張係数と、き裂を含まない供試体のそれとはほぼ一致している。このように、充填物を含まない、き裂のみを含む供試体の場合には、き裂を含まない供試体とほぼ同じ熱膨張特性が得られていることから、岩石の熱膨張特性に対するき裂の影響は無視できると考えられる。

(3) 岩石の熱膨張特性に対するき裂充填物の影響

天然のき裂Aを含む供試体 (KG-5) の線膨張ひずみと線膨張係数の測定結果をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。き裂のない供試体と比較すると、昇温時においても、降温時においても、全体的に線膨張係数は小さい値を示している。

き裂のない供試体や、人工き裂を含む供試体では、同じ温度で比較すると、全体的に降温時における線膨張ひずみは、昇温時におけるそれとほぼ同じかまたはそれを

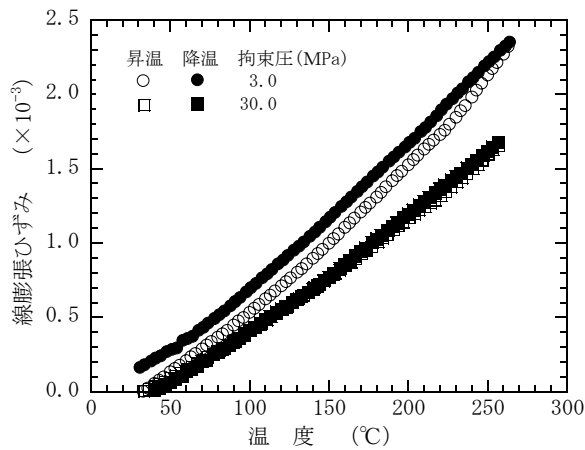


図-8 充填物を除去した供試体 (KG-6) の線膨張ひずみと温度の関係

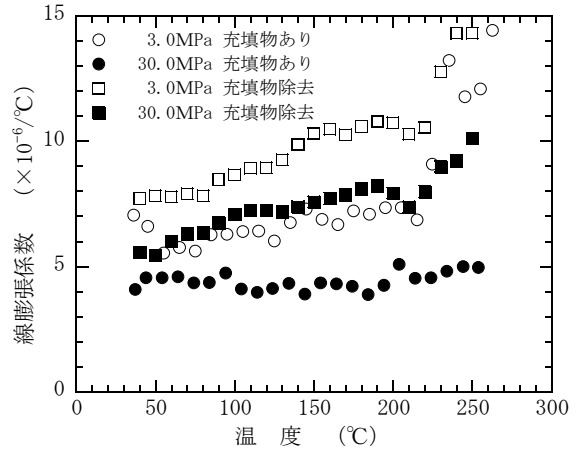


図-10 充填物の除去による昇温時線膨張係数の変化 (KG-5とKG-6の比較)

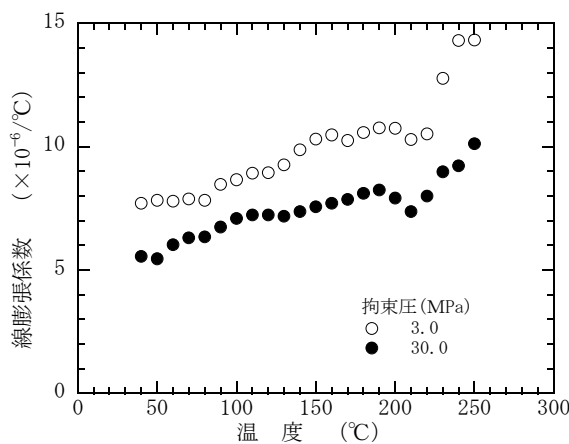


図-9 充填物を除去した供試体 (KG-6) の昇温時線膨張係数と温度の関係

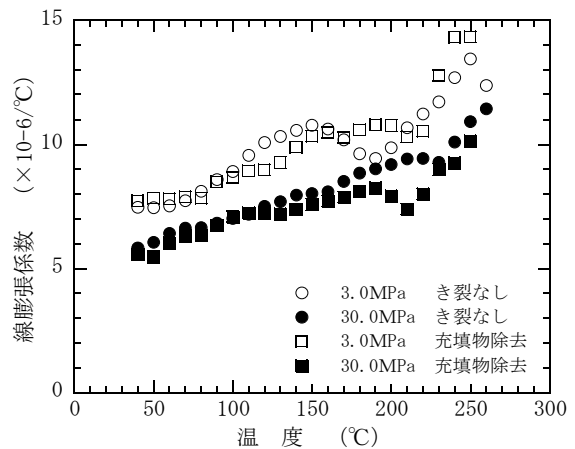


図-11 充填物を除去した供試体 (KG-6) とき裂のない供試体 (KG-2) の昇温時線膨張係数の比較

上回っており、試験終了時には残留ひずみをほとんど生じないかまたは正の残留ひずみ(膨張ひずみ)を生じている。それに対して、天然のき裂Aを含む供試体では、逆に降温時における線膨張ひずみは、昇温時におけるそれを下回っており、試験終了時には負の残留ひずみ(収縮ひずみ)を生じている。ただし、降温時において、温度が室温に近づくと、温度の低下に伴って線膨張ひずみは逆に増加するようになり、もしもこのままさらに長時間放置しておくと、残留ひずみはゼロに近づいていく可能性があることを示している。

き裂の充填物を除去した供試体 (KG-6) の線膨張ひずみと昇温時線膨張係数の測定結果を図-8 と図-9 に示す。また、天然のき裂Aを含む供試体 (KG-5) とき裂の充填物を除去した供試体 (KG-6) の昇温時線膨張係数を比較した結果を図-10 に示す。き裂充填物を除去したことにより、線膨張係数は全体的に増加している。特に、拘束圧 30MPa の場合には、平均的にみても約 1.7 倍になっており、高温になると約 2 倍になっているところもみられる。この結果は、き裂内の充填物は加熱に伴って顕著に

収縮しておりその影響は無視できないことを示している。また、き裂の充填物を除去した供試体では、図-8 に示すように、試験後正の残留ひずみ(膨張ひずみ)を生じているのに対して、充填物を含む場合には、図-6 に示すように、負の残留ひずみ(収縮ひずみ)を生じており、これも、加熱に伴う充填物の収縮の影響によると考えられる。

き裂の充填物を除去した供試体 (KG-6) と、き裂のない供試体 (KG-2) の昇温時線膨張係数を比較した結果を図-11 に示す。両者はほぼ一致していることから、供試体 KG-6 に含まれる赤色の変質部の熱膨張特性は、変質していない部分のそれとほぼ同じであると考えられる。

天然のき裂Cを含む供試体 (KG-4) の線膨張ひずみと昇温時線膨張係数の測定結果をそれぞれ図-12 と図-13 に示す。き裂Aを含む供試体とは異なり、試験終了時には負の残留ひずみ(収縮ひずみ)を生じてはいない。また、線膨張係数は、き裂のない供試体のそれとほぼ一致している。したがって、き裂Cの場合には、熱膨張特性に対する充填物の影響は小さい。このように、き裂Aを含む

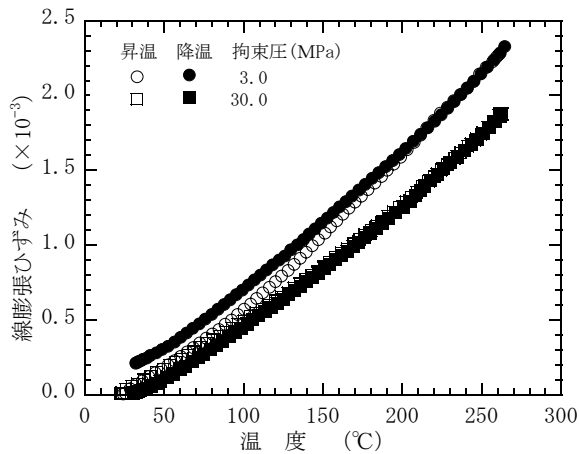


図-12 き裂Cを含む供試体 (KG-4) の線膨張ひずみと温度の関係

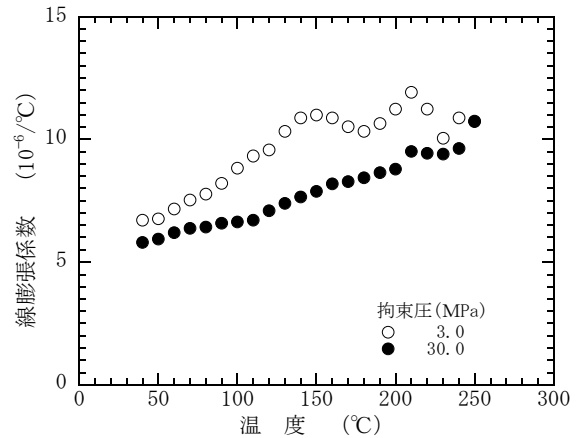


図-13 き裂Cを含む供試体 (KG-4) の昇温時線膨張係数と温度の関係

供試体 KG-5 とは異なった結果が得られたのは、き裂Cに含まれる充填鉱物がき裂Aのそれとは異なっているためであるとも考えられるが、もう一つの可能性として、き裂Cの場合は充填物の厚さが約 2mm と薄いので、充填物が同じであったとしても、その影響ははるかに小さくなっていることも考えられる。

今回試験に用いた天然き裂に含まれている充填鉱物は、緑泥石、方解石、沸石類、緑れん石、ブドウ石である¹³⁾。これらの鉱物のなかで、沸石類は加熱に伴って脱水することにより収縮することが知られており、充填鉱物が加熱に伴って顕著に収縮するのは、その影響によるということが考えられる。また、沸石類は、加熱に伴って脱水することにより収縮するが、その変化は可逆的であり、降温時において再び吸水すると元の体積に戻ることが知られている。き裂Aを含んでいる供試体 KG-5 では、拘束圧 3.0MPa でも 30MPa でも、降温時において室温に近づくと、温度の低下に伴って線膨張ひずみは逆に増加するようになり、もしもこのままさらに長時間放置しておくと、残留ひずみはゼロに近づいていく可能性があるような挙動を示している。このような挙動も、き裂内の充填物に沸石が含まれているとすれば説明することができる。ただし、今まで加熱や冷却に伴うき裂内充填物の挙動に関する検討データの蓄積がほとんどないこともあり、今後さらに多面的な検討を加えた後に、上に記した説明の妥当性を判断する必要があると考えられる。

今回の実験の結果、熱膨張特性に対するき裂の影響は無視することができ、充填物の影響だけ考慮すればよいということが明らかになった。したがって、き裂充填物の熱膨張特性を考慮した岩盤の熱膨張特性の評価方法を確立することにより、室内試験データに基づいて、岩盤の熱膨張特性を求めることが可能になると考えられる。

今回得られたような室内試験データに基づいて、実際

の岩盤の熱膨張特性を評価する際には、試験に用いた試料のき裂密度(き裂間隔)と岩盤のそれとの違いを考慮する必要がある。試験に用いた試料のき裂密度は 10 本/m (き裂間隔 0.1 m) に相当しているのに対して、実際の岩盤のき裂密度はそれよりはるかに小さい場合が多い。例えば、岩盤のき裂密度が 1 本/m であれば、き裂充填物の影響は室内試験のその 1/10 になり、無視することができる程度になる。

4. おわりに

室温から約 265°C (大気圧下では 300°C) までの温度範囲、0~30MPa の拘束圧下において、き裂を含まない岩石(花崗閃緑岩)、き裂を含む岩石および充填物を有するき裂を含む岩石のそれぞれについて、熱膨張試験を実施することにより、岩石の熱膨張特性に対するき裂および充填物の影響を調べた。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) き裂のない供試体の線膨張係数の測定結果と人工き裂を含む供試体のそれとはほぼ一致しており、熱膨張特性に対するき裂の影響は無視できると考えられる。
- (2) き裂Aに含まれる充填物は温度上昇に伴って収縮しており、供試体全体の熱膨張特性に顕著な影響を与えている。一方、き裂Cを含む供試体の線膨張係数はき裂のない供試体のそれとほぼ一致しており、熱膨張特性に対する充填物の影響は小さい。このように、き裂充填物は、その種類と厚さによっては、岩石の熱膨張特性に顕著な影響を与えることがある。
- (3) 今回の実験により、岩石の熱膨張特性に対するき裂の影響は無視することができ、充填物の影響だけ考慮すればよいという結果が得られた。今後、き裂充填物の熱

膨張特性を考慮した岩盤の熱膨張特性の評価方法を確立することにより、室内試験データに基づいて、岩盤の熱膨張特性を求めることが可能になると考えられる。

今回の実験では、既往の拘束圧下における試験と同様に、試験個数は試験条件毎に1個としている。しかし、例えば木下ら^{8), 16)}が実験に用いた試料と比較すると、今回用いた試料は、供試体による熱膨張特性のばらつきがやや大きいと考えられ、その結果、得られた結論の一部にややあいまいな部分が残されている。今後この種の実験を行う際には、供試体による熱膨張特性のばらつき的大小等を考慮して、適正な試験個数を決める必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 八田敏行, 熊坂博夫, 中川加明一郎, 小野純二: 熱水岩盤貯蔵発電システムの提案, 地下空間シンポジウム論文・報告集(審査付論文), 第8巻, pp.87-96, 土木学会, 2003.
- 2) Heuze, F.E.: High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks - A review, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.20, No.1, pp.3-10, 1983.
- 3) 北野晃一, 新 孝一, 木下直人, 奥野哲夫: 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査, 応用地質, 29巻, 3号, pp.36-47, 1988.
- 4) 木下直人: 高温下岩石の特性と熱応力による破壊挙動に関する研究, 山口大学学位論文, 1998.
- 5) Heard, H.C.: Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300°C and 27.6MPa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.17, pp.289-296, 1980.
- 6) Heard, H.C. and Page, L.: Elastic moduli, thermal expansion, and inferred permeability of two granite to 350°C and 55 Megapascals, *J. Geophys. Res.*, Vol.87, No.B11, pp.9340-9348, 1982.
- 7) Bauer, S.J. and Handin, J.: Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800°C, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, pp.181-198, 1983.
- 8) 木下直人, 安部 透, 奥野哲夫: 高温, 拘束圧下における火成岩の熱膨張特性, 土木学会論文集, 第511号/III-30, pp.69-78, 1995.
- 9) Gangi, A.F.: The variation of the thermal-expansion coefficient of cracked and porous rocks with pressure and temperature, *Proc. 28th U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp.391-398, 1987.
- 10) Hardin, E., Barton, N., Lingle, D., Board, M. and Voegele, M.: A heated flatjack test series to measure the thermomechanical and transport properties of in situ rock masses, *Office of Nuclear Waste Isolation, ONWI-260*, 1982.
- 11) Hardin, E., Barton, N., Voegele, M., Board, M., Lingle, R., Pratt, H. and Ubbe, W.: Measuring the thermomechanical and transport properties of a rockmass using the heated block test, *Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech.*, pp.802-813, 1982.
- 12) Black, M.T. and Cramer, M.L.: The design and construction of a block test in closely jointed rock, *Rockwell Hanford Operations*, RHO-BW-SA-286-P, 1983.
- 13) 天野健治, 吉田英一, 笹本 広: 釜石鉱山における栗橋花崗閃緑岩体中の割れ目形態と空隙構造, 応用地質学会中部支部平成7年研究発表会講演要旨集, pp.9-12, 1995.
- 14) Barton, N.R., Bandis, S.C. and Bakhtar, K.: Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.3, pp.121-140, 1985.
- 15) 安部 透, 松井裕哉, 堀田政國, 木下直人: 坑道掘削に伴うき裂の透水特性変化に関する基礎実験, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.268-272, 2000.
- 16) 木下直人, 安部 透: 高温下における堆積岩の熱膨張・収縮特性, 土木学会論文集, 第517号/III-31, pp.53-62, 1995.

(2003.4.14 受付)

THERMAL EXPANSION BEHAVIOR OF GRANITIC ROCK WITH A NATURAL FRACTURE

Toshiyuki HATTA, Hiroo KUMASAKA, Naoto KINOSHITA and Tohru ABE

Thermal expansion measurements of granitic rock at high temperature and confining pressure demonstrate the effect of fractures and fracture fillings. Based on mode of fractures, samples are grouped into those with: 1) no fracture, 2) a single artificial fracture and 3) a single natural fracture filled with materials. Results indicate that while fractures alone have very little effect on thermal expansion of the rock samples, fractures with fillings cause distinctive thermal expansion behavior due to contraction in fracture fillings during heating. Therefore, in evaluating rock mass thermal expansion behavior, the effects of fracture fillings should be considered in regard to fracture densities, compositions and thickness of fracture-filling materials.