

(108) 高温、拘束圧下における軟岩の熱膨張特性

清水建設㈱ 正会員 ○木下直人

清水建設㈱ 正会員 安部 透

Thermal Expansion Behavior of Confined Soft Rock at High-Temperatures

Naoto KINOSHITA, Shimizu Corporation

Tohru ABE, Shimizu Corporation

Abstract

The thermal expansion behavior of a sandstone and a tuff was measured at confining pressures of 0, 0.29, 0.98 and 2.94MPa to 280 °C. These Neogene Tertiary sedimentary rocks have the mechanical properties as soft rock. At temperature above 140°C for the sandstone and 110°C for the tuff, these samples indicate contraction as the temperature is increased. And the contraction continues above 200 °C under confining pressures of 0.98 and 2.94MPa. For the first temperature cycle to 280°C, negative permanent strains are produced, and the value of the permanent strains increases with pressure. These results indicate that the dehydration and resultant contraction, which appears not to be a factor in the expansion behavior of hard rock, plays a major role in that of soft rock.

1. はじめに

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きた^{1)~4)}。そして、花崗岩質岩石の熱膨張挙動は、主として構成鉱物の熱膨張挙動と、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックの発生とによって支配されていると考えられている。一方、堆積岩は、火成岩とは全く異なった要因によって熱膨張挙動が支配され、複雑な挙動を示す場合があるにもかかわらず、まだ研究例はあまり多くない。Lappin⁵⁾は、大気圧下において凝灰岩の熱膨張挙動を調べ、ある種の凝灰岩は100 °C前後以上の温度において線膨張係数が負になることを指摘している。また、筆者ら⁶⁾は、大気圧下において9種類の堆積岩について、30°Cから500 °Cまでの温度範囲における熱膨張特性を調べ、軟岩と硬岩とでは熱膨張特性が全く異なること、および軟岩の熱膨張挙動は、100 °C前後において脱水にともなう収縮現象がみられるなど、硬岩のそれに比べて複雑であることなどを明らかにしている。しかし、これらの測定は、いずれも大気圧下で行われている。軟岩の熱膨張挙動は、硬岩よりもはるかに拘束圧の影響を受けやすいと考えられるのにもかかわらず、拘束圧下において、軟岩の熱膨張特性を調べた例は、筆者の知るかぎりでは報告されていない。そこで、拘束圧下において、30°Cから280 °Cまでの温度範囲における新第三紀の砂岩および凝灰岩の熱膨張挙動を調べたので、その結果を報告する。

2. 実験概要

大気圧下における線膨張係数の測定には真

表-1 岩石試料の単位体積重量、間隙率および一軸圧縮強度

岩石の種類	単位体積重量 kN/m ³	間隙率 %	一軸圧縮強度 MPa
新第三紀凝灰岩	13.5	43.5	16.2
新第三紀砂岩	15.3	44.3	12.5

空理工(株)製の押し棒式熱膨張計(DL-1500Y型)を、拘束圧下における測定にはMTS社製の線膨張係数測定装置の一部を改良したものを用いた。

測定に用いた岩石は、新第三紀の砂岩(神奈川県産)および新第三紀の凝灰岩(栃木県産)であり、これらの試料の単位体積重量、間隙率および一軸圧縮強度を表-1に示す。両者ともに間隙率が40%以上、一軸圧縮強度が20MPa以下であり、軟岩に属している。供試体寸法は、直径30mm、高さ100mmとし、デシケータ内で1週間以上乾燥させた後測定を行った。

測定時の拘束圧は、両方の岩石とも、0, 0.29, 0.98, 2.94MPaとした。大気圧下における測定では、供試体を設置し、30℃/hの昇温速度で300℃まで加熱し、約2時間一定温度を保持した後、加熱時と同じ速度で30℃まで冷却しながら線膨張ひずみと残留ひずみを測定した。そして、熱履歴の影響を調べるため、同一試料について2回繰り返し測定を行った。また、拘束圧下における測定では、20℃/hの昇温速度で280℃まで加熱し、約2時間一定温度を保持した後、加熱時と同じ速度で30℃まで冷却しながら線膨張ひずみと残留ひずみを測定した。ただし、冷却過程においては、大気圧下においても、拘束圧下においても、強制的に冷却を行っていないため、100℃以下になると、冷却速度はかなり遅くなっている。

3. 実験結果

大気圧下および拘束圧下における凝灰岩の線膨張ひずみの測定結果を図-1に、また昇温時および降温時の線膨張係数を求めた結果を図-2と図-3に示す。ただし、大気圧下における測定に関しては、1回目の測定結果のみを示している。

大気圧下では室温から約90℃、0.29MPa以上の拘束圧下では室温から約130℃までの温度範囲において、線膨張ひずみは温度上昇にともなってほぼ直線的に増加している。この直線部分の線膨張係数は、図-2に示すようにほとんど拘束圧に依存せず、 $(1.2 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 前後の値を示している。約140℃以上になると、試料は収縮し、線膨張係数は負の値を示す。拘束圧が小さい場合には、収縮する温度範囲が狭く、例えば、大気圧下では180℃以上になると再び温度上昇にともなって膨張するようになる。それに対して、拘束圧が大きい場合には、さらに収縮を続け、例えば拘束圧0.98MPaの場合には230℃、拘束圧2.94MPaの場合には250℃以上になってから膨張に転ずる。280℃

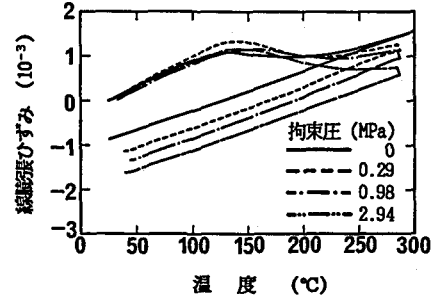


図-1 凝灰岩の線膨張ひずみと温度の関係

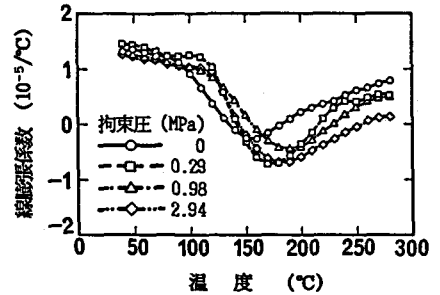


図-2 昇温時における凝灰岩の線膨張係数と温度の関係

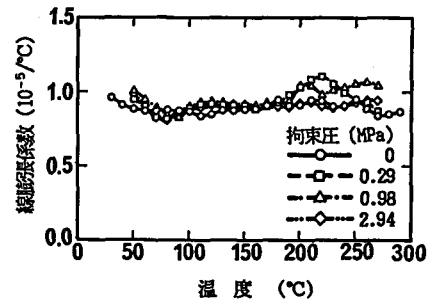


図-3 降温時における凝灰岩の線膨張係数と温度の関係

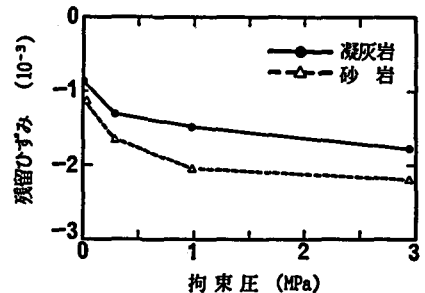


図-4 残留ひずみと拘束圧の関係

(大気圧下では 300℃) で一定温度を保持している際には、大気圧下では試料は収縮しないが、拘束圧下では、収縮を続けており、拘束圧が大きいほど顕著な収縮を示す。冷却時の挙動は、加熱時のそれに比べてはるかに単純であり、線膨張係数は拘束圧にも温度にもほとんど依存せず、 $(0.8 \sim 1.1) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ の範囲の値を示している。

残留ひずみの測定結果は図-4のようになっており、大気圧下でも約 0.9×10^{-3} の負の残留ひずみを生じている。

拘束圧下では更に負の残留ひずみが大きくなり、例えば、拘束圧 2.94 MPa の場合には、 1.8×10^{-3} と、大気圧下の約 2 倍の値を示している。

大気圧下および拘束圧下における砂岩の線膨張ひずみの測定結果を図-5に示す。ただし、大気圧下では、1回目の測定結果のみを示してある。室温から約 110℃までの温度範囲における線膨張ひずみは温度上昇にともなってほぼ直線的に増加している。この直線部分の線膨張係数は、図-6に示すように、凝灰岩のそれよりもかなり小さな値を示している。そして、拘束圧に依存する傾向がみられ、大気圧下では $0.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 前後の値を示しているのに対して、拘束圧 2.94 MPa では約 $0.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ であり、大気圧下における値よりもかなり小さい。約 110℃以上になると、大気圧下ではあまり膨張しなくなり、 $(0.1 \sim 0.2) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ という非常に小さな線膨張係数を示す。また、拘束圧 0.29 MPa 以上では、試料は収縮し、線膨張係数は負の値を示す。特に、160℃までの温度範囲では、著しい収縮現象がみられる。凝灰岩の場合と同様に、拘束圧が大きくなるほどより高温になるまで収縮現象が続いており、拘束圧 0.98 MPa 以上では、280℃になっても収縮現象が続いている。280℃(大気圧下では 300℃) で一定温度を保持している際にも試料は収縮を続けている。凝灰岩の場合とは異なり、大気圧下でも収縮現象がみられる。冷却時の挙動は、凝灰岩の場合と同様に、加熱時のそれに比べてはるかに単純であり、線膨張係数は、図-4に示すように、ほとんど拘束圧に依存しない。そして、270℃前後では $(0.7 \sim 0.8) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 、150℃前後では $(0.5 \sim 0.6) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 、50℃前後では $(0.4 \sim 0.6) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ と、全体的に凝灰岩よりもかなり小さい値を示しており、また、温度下降にともなって単調に減少する傾向を示している。残留ひずみの測定結果は図-4のようになっており、全体的に凝灰岩よりも大きな負の残留ひずみを生じている。また、凝灰岩の場合と同様に拘束圧が大きくなるにしたがって、負の残留ひず

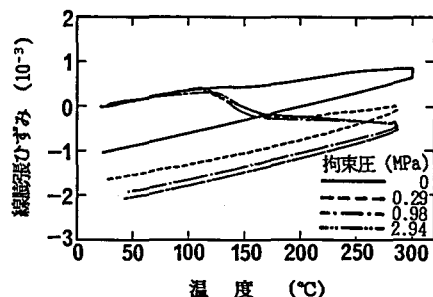


図-5 砂岩の線膨張ひずみと温度の関係

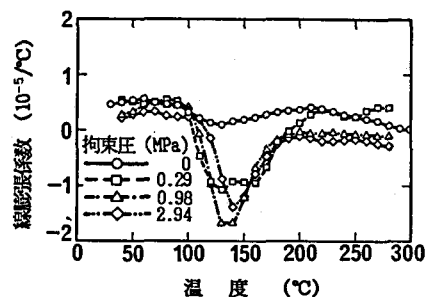


図-6 昇温時における砂岩の線膨張係数と温度の関係

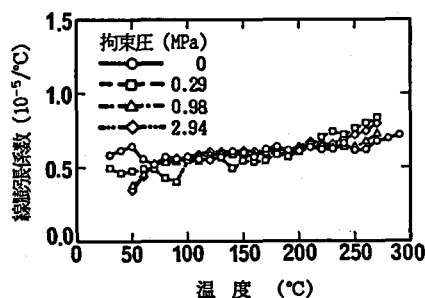


図-7 降温時における砂岩の線膨張係数と温度の関係

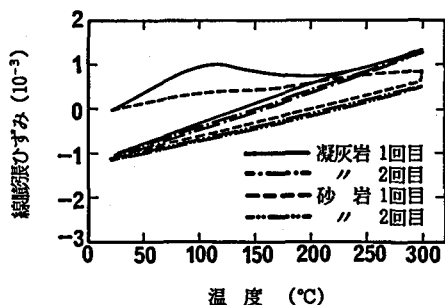


図-8 2回繰り返し測定時の線膨張ひずみと温度の関係

みが大きくなっている。

同一試料について、大気圧下において、2回繰り返し測定を行った結果は図-9のようになっており、砂岩も凝灰岩も、1回目の測定結果と2回目のそれとは全く異なっている。2回目の測定においては、昇温時も降温時も、1回目の降温時の測定結果とほぼ一致しており、昇温時も試料の収縮現象がみられない。

3. 考察

今回測定した新第三紀凝灰岩では 140℃、砂岩では 110℃以上になると、大気圧下においても、拘束圧下においても、試料は収縮傾向を示している。このような試料の収縮現象は、花崗岩や安山岩といった火成岩や、古第三紀以前の硬岩に属する堆積岩にはみられず、軟岩だけに固有の現象であるが、その原因としては、吸着水等の脱水による試料の収縮が考えられる⁶⁾。また、試料の収縮は、拘束圧が大きくなると特に著しいが、これは、加圧によって脱水が促進されるためであると考えられる。

軟岩の熱膨張挙動が吸着水等の脱水の影響を大きく受けているのであれば、これらの岩石の比熱もまた脱水の影響を受けると考えられる。そこで、今回の実験に用いた新第三紀の凝灰岩、砂岩と、古第三紀の砂岩（北海道産）、頁岩（北海道産）について、室温から 300℃までの温度範囲で比熱の測定を行ってみた。その結果を図-9に示す。新第三紀の凝灰岩および砂岩についてのみ2回繰り返し測定を行ったが、1回目の測定では、100℃以上になると、両者ともに急激に比熱が増大し、140℃付近でピーク値を示している。2回目の測定では、全体的にやや値が小さくなっており、また、高温になって急激に比熱が増大するという現象もみられない。これらの測定結果は、1回目の測定では、100℃以上になると脱水が起これ、多量の脱水エネルギーを必要とするが、2回目の測定では、脱水後の供試体を用いているので、全体的に水分が減少した分だけ比熱が小さくなるとともに、100℃以上になっても、脱水エネルギーを必要としないと考えることにより説明することができる。1回目の測定において比熱の値がピーク値を示す温度は脱水が最も盛んな温度であると考えられるが、それは、熱膨張挙動の測定において、試料が最も著しい収縮を示す温度にほぼ対応している。また、大気圧下における線膨張係数測定前後の重量変化は、凝灰岩で 3.9%、砂岩で 2.2%であったが、これらの重量変化量は、1回目と2回目の比熱の測定値の差が脱水によると考えた場合に推定される重量変化量とほぼ対応している。

一方、古第三紀の砂岩および頁岩の比熱の測定値は、新第三紀の凝灰岩、砂岩のそれとは全く異なった値を示している。既往の研究結果によれば、高温下岩石の比熱の測定値は、岩石の種類による差があまりなく、どの岩石も同じような値を示している⁷⁾が、今回測定した古第三紀の堆積岩もそれらと同様な値を示している。このように、新第三紀の軟岩に属する堆積岩と古第三紀以前の硬岩に属する堆積岩とでは、高温下における熱膨張特性や比熱が全く異なっており、前者のみが吸着水等の脱水の影響を大きく受けることが明らかになった。

岡本ら⁸⁾によれば、堆積物が固結し岩石になる過程は、①圧密、②押固め、③のり付けの3領域に分けることができると考えられている。そして軟岩は、吸着水の脱水と、それにとまう押固めによって特徴づけられる②の領域にあり、固有の物理的性質や力学的性質をもっている。今回の測定結果は、物理的性質や力学的性質だけでなく、熱的性質に関しても、軟岩は固有の性質をもっていることを示している。

4. おわりに

新第三紀の凝灰岩および砂岩について、温度30℃～280℃、拘束圧0、0.29、0.98および2.94MPaの条件

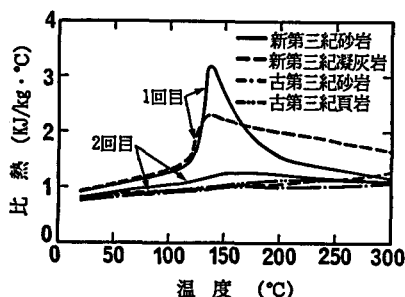


図-9 新第三紀および古第三紀堆積岩の比熱と温度の関係

下で熱膨張挙動を調べた結果以下のことが明らかになった。

(1) 凝灰岩では 140℃, 砂岩では 110℃以上になると, 温度上昇にともない試料は収縮傾向を示す。試料が収縮する温度範囲は, 拘束圧が大きいほど広範囲におよぶ。拘束圧が 0.98MPa および 2.94MPa の場合には 200℃以上になっても試料は収縮を続け, 特に砂岩では, 280℃になっても収縮現象が続く。

(2) 降温時における挙動は, 昇温時のそれに比べてはるかに単純であり, 線膨張係数は, ほとんど拘束圧に依存しない。また, 温度依存性もあまり大きくない。

(3) いったん収縮した試料は, 冷却しても元に戻らず, 負の残留ひずみを生ずる。そして, 拘束圧が大きくなるにしたがって, 負の残留ひずみは大きな値を示す。

(4) 同一試料について, 2回繰り返して測定を行うと, 1回目と2回目とは結果が全く異なる。2回目の測定においては, 昇温時も降温時も, 一回目の降温時の測定結果とほぼ一致しており, 昇温時も試料の収縮現象がみられない。

(5) 高温における堆積軟岩の熱膨張特性は, 硬岩に属する堆積岩のそれとは異なり, 吸着水等の脱水による収縮の影響を大きく受ける。

参 考 文 献

- 1) Cooper, H.W. and Simmons, G. : The effects of cracks on thermal expansion of rocks, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol. 36, pp. 404 ~ 412, 1977.
- 2) Heard, H.C. : Thermal expansion and inferred permeability of Climax quartz monzonite to 300℃ and 27.6MPa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 17, pp. 289 ~ 296, 1980.
- 3) Bauer, S.J. and Handin, J. : Thermal expansion and cracking of three confined, water-saturated igneous rocks to 800℃, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16, pp. 181 ~ 198, 1983.
- 4) 木下直人, 安部 透 : 拘束圧下における花崗岩質岩石の熱膨張特性に関する研究, 第19回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp. 241 ~ 245, 1987.
- 5) Lappin, A.R. : Preliminary thermal expansion screening data for tuffs, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND78-1147, 1980.
- 6) 木下直人, 奥野哲夫 : 高温下における堆積岩の熱膨張特性に関する研究, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 378 ~ 379, 1987.
- 7) 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.
- 8) 岡本隆一, 緒方正虔, 小島圭二 : 土木地質, 新体系土木工学 14, 技報堂出版, pp. 92 ~ 98, 1984.