

(50) 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

清水建設㈱ 正会員 ○木下直人
清水建設㈱ 安部 透

1. はじめに

地下空間利用の多様化にともない、岩石・岩盤の高温特性の評価が重要な問題となり、これに関連した研究が多く行われるようになってきている。しかし、高温下岩石の熱膨張特性に対する拘束圧の影響を研究した例はわが国では全くなく、海外でも少ない。今までの測定例^{1)~3)}では、高温下岩石の線膨張係数は温度と圧力の両方に依存するが、測定精度が充分でないこともあって、単純な関係にはなっていない。そこで、拘束圧下において、岩石の線膨張係数を測定する装置を導入し、それを用いて花崗岩質岩石の熱膨張特性に関する研究を実施してきた。本論文は、新しく導入した装置の測定精度について確認した結果および花崗岩質岩石の熱膨張特性に対する拘束圧の影響について調べた結果をまとめたものである。

2. 実験概要

大気圧下における線膨張係数の測定には真空理工㈱製の押し棒式熱膨張計(DL-1500V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を用いた。拘束圧下における線膨張係数の測定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差動トランス型変位計を用いて加圧盤間の相対的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。変位計が設置されている部分の温度は、供試体周辺の温度が300℃になった場合でも、50℃以下に保たれるようになっている。また加圧盤は、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。

測定に用いた岩石試料は、茨城県産の稲田花崗岩であり、その基本物性、鉱物組成および粒径を表-1に示す。互いに直交する3方向(以下A方向、B方向、C方向と記す)の弾性波速度測定結果から判断すると、稲田花崗岩は顕著な力学的異方性を示しており、B方向の弾性波速度は他の2方向の弾性波速度よりも明らかに遅い。

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のち測定を行った。大気圧下における測定の場合の昇温(降温)速度は30℃/hとしたが、更に遅い速度で測

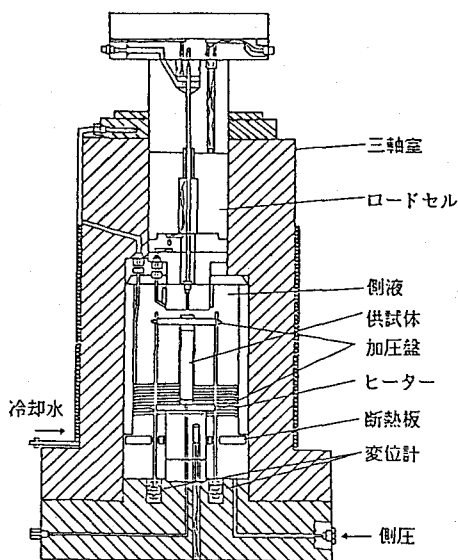


図-1 線膨張係数測定用三軸室

表-1 岩石試料

単位体積重量(kN/m ³)		26.2
間隙率(%)		1.3
P波速度(m/s)	A方向	4260
	B方向	4020
	C方向	4220
鉱物組成(%)	石英	42
	斜長石	22
	微斜長石	31
	黒雲母	4
	角閃石	1
粒径(mm)	範囲	0.3~8.0
	平均	2.8

定した場合の値と比較することにより、30℃/hでも昇温（降温）速度の影響がないということは既に確認されている⁴⁾。拘束圧下における測定では、昇温（降温）過程において供試体内の温度ができるだけ様になるようにするため、昇温（降温）速度を20℃/hとした。所定の昇温速度で280℃まで加熱しながら、供試体の線膨張ひずみの測定を行い、約2時間一定温度を保持した後、熱履歴の影響を調べるため、加熱時と同じ速度で30℃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。なお、大気圧下の測定においても、拘束圧下における測定においても、標準試料として熔融石英を用いることにより装置の温度ドリフト量を求め、それに対する補正を行っている。

最初に、拘束圧下における線膨張係数測定装置の測定精度を確認するために、30℃から280℃の温度範囲で、アルミニウムの線膨張係数を測定し、押棒式熱膨張計(DL-1500Y型)を用いて、同一試料の線膨張係数を測定した結果と比較した。次に花崗岩質岩石について、熱膨張特性の異方性を調べるために、大気圧下において、互いに直交する3方向の線膨張係数を測定した。そして、その後9.8MPaおよび29.4MPaの拘束圧下において、同じ温度範囲でA方向およびB方向の線膨張係数を測定した。試験数は、大気圧下では各方向3個ずつ、拘束圧下では各条件毎に1個ずつとした。

3. 実験結果および考察

拘束圧下における線膨張係数測定装置を用いてアルミニウムの線膨張ひずみを測定し、大気圧下測定装置を用いて同一試料の線膨張ひずみを測定した値と比較した結果を図-2に示す。

30℃から 280℃の温度範囲における平均的な線膨張係数は、それぞれ $2.32 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ および $2.35 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ であり両者は良く一致している。また、各温度における線膨張係数を求めてみても、両者は良く一致している。したがって、この装置を用いることにより、大気圧下における測定とほぼ同様な精度で線膨張係数を測定できることが確認された。

図-3に、花崗岩の線膨張ひずみの典型的な測定例を示すが、加熱時のこのような線膨張ひずみと温度の関係に基づいて、今回測定

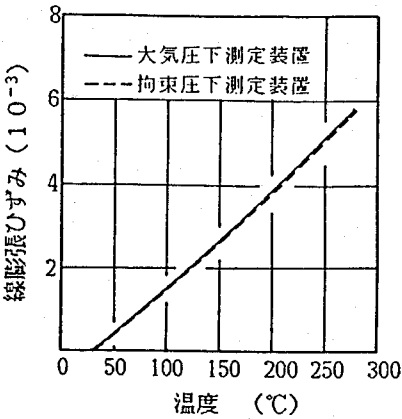


図-2 アルミニウムの線膨張ひずみ

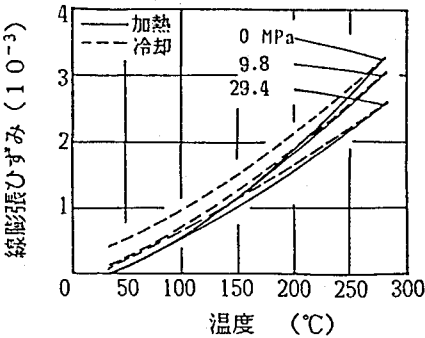


図-3 花崗岩の線膨張ひずみの測定例

表-2 花崗岩の線膨張係数測定結果

方向	拘束圧 (MPa)	試験数	線膨張係数 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)				
			30~80℃	80~130℃	130~180℃	180~230℃	230~280℃
A	0	3	8.3 (0.08)	11.6 (0.05)	14.2 (0.05)	16.0 (0.22)	17.4 (0.22)
B	0	3	7.6 (0.22)	10.4 (0.33)	13.1 (0.41)	15.4 (0.37)	16.6 (0.08)
C	0	3	8.4 (0.05)	11.7 (0.14)	14.0 (0)	15.9 (0.24)	17.3 (0.29)
A	9.8	1	7.8	10.4	13.3	14.2	15.0
B	9.8	1	8.1	10.1	12.8	13.6	15.1
A	29.4	1	7.9	9.2	10.7	11.4	13.0
B	29.4	1	7.8	8.8	10.5	11.2	11.8

した温度範囲を5つの区間に区切り、各区分毎に線膨張係数を求めた。その結果を表-2に示す。大気圧下における測定の場合には、各方向3個ずつ測定を行っているので、平均値と標準偏差を併せて示した。標準偏差は最大でも $0.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、測定値のばらつきは小さい。

熱膨張特性の異方性を調べるために、大気圧下において、互いに直交する3方向について、線膨張係数と温度の関係を求めた結果を図-4に示す。この場合横軸の温度としては、線膨張係数を求めた各区分の中央の温度の値を用いている。A方向とC方向の線膨張係数は同じ値を示しているのに対して、B方向の線膨張係数は他の2方向より小さく、異方性を示している。B方向は弾性波速度が遅い方向であり、したがって、熱膨張特性の異方性と力学的異方性とは対応している。Cooper⁵⁾は、大気圧下において花崗岩の熱膨張特性の異方性を調べ、微小クラックが最も発達している面に直交する方向の線膨張係数が最も小さくなることを指摘しており、今回の結果はそれと一致している。一方、9.8MPaと29.4MPaの拘束圧を作用させた場合のA方向とB方向の線膨張係数には明瞭な差が認められない。これは、拘束圧を作用させることによって微小クラックが閉塞し、異方性を示さなくなったものと考えられる。

図-5は、花崗岩の線膨張係数と温度および拘束圧との関係を示したものである。拘束圧が増加すると花崗岩の線膨張係数は小さくなるが、線膨張係数の拘束圧依存性は温度が高くなるほど著しい。例えば、55°Cでの線膨張係数は、A方向、B方向ともに拘束圧の影響をほとんど受けないに対し、255°C、29.4MPaでの拘束圧は拘束圧0のときの値の71~75%になっている。

図-6は、花崗岩の線膨張係数測定時の残留ひずみと拘束圧の関係を示したものである。花崗岩の残留ひずみは、拘束圧の増加にともなって減少する。そして拘束圧が29.4MPaになるとB方向の残留ひずみは0になり、A方向でも 1.0×10^{-4} 以下のごくわずかな残留ひずみが存在するだけになる。

表-1に示した花崗岩の鉱物組成を用いて線膨張係数を計算し、測定結果と比較、検討を行った。線膨張係数の算定には次に示すTurnerの式を用いた。

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i E_i V_i}{\sum E_i V_i}$$

ここで α は岩石の線膨張係数、 α_i 、 E_i 、 V_i はそれぞれi番目の鉱物の線膨張係数、弾性係数、体積密度である。各鉱物の線膨張係数は温度に依存し、図-7に示した体積膨張係数の値の1/3であるとして求め

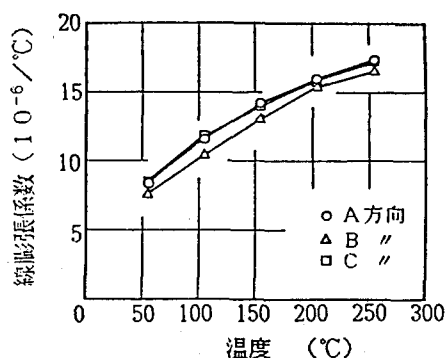
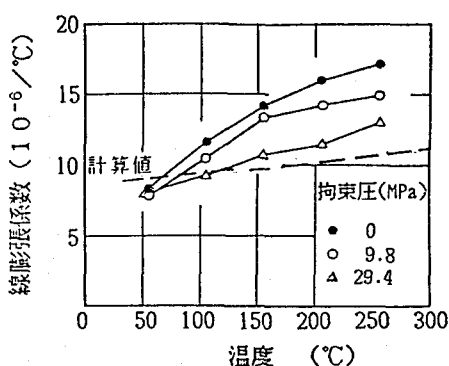
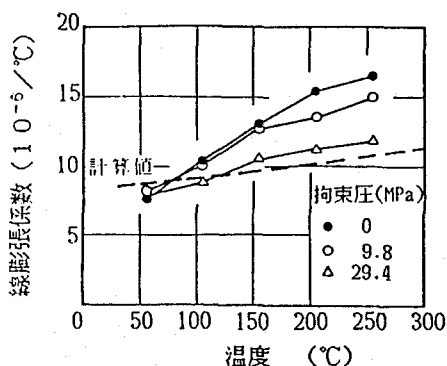


図-4 花崗岩の線膨張係数の異方性 (大気圧下)



a) A方向



b) B方向

図-5 線膨張係数と温度の関係

た。また、鉱物の弾性係数は温度によらず一定であるとした。このようにして計算された花崗岩の線膨張係数を図-5に示す。残留ひずみが0であった、拘束圧 29.4MPaにおけるB方向の線膨張係数の値と比較すると、高温になるにしたがって計算値が測定値より小さくなる傾向があるものの、全温度範囲において両者はほぼ一致している。

以上の結果は、次のような考えでよく説明することができる。大気圧下において花崗岩を加熱し、ある温度以上になると、鉱物粒子間の熱膨張率の不一致による微小クラックが発生し始め、その量は温度の上昇にともなって増加する。したがって、大気圧下における線膨張係数は、室温付近では鉱物組成に基づいて計算した値と一致するが、温度が高くなるにしたがって、計算値よりも大きな値を示すようになる。拘束圧を作用させると、微小クラックが発生し始める温度が高くなり、発生量は減少する。そして、280℃までの温度範囲では、29.4MPaの拘束圧を作用させると微小クラックの発生を抑えることができ、残留ひずみはほとんど生じなくなる。したがってこの場合の線膨張係数は、高温になっても鉱物粒子の線膨張係数だけによって決定されることになり、鉱物組成に基づいて計算した値と一致する。

4. おわりに

稲田花崗岩の熱膨張特性に関する研究の結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 今回製作した装置を用いることにより、拘束圧下でも、大気圧下における測定とほぼ同様な精度で線膨張係数を測定することができる。

(2) 大気圧下では、微小クラックが存在することにより熱膨張特性に異方性が見られる場合でも、拘束圧下では、微小クラックが閉塞するため、異方性を示さなくなる。

(3) 室温付近における線膨張係数は拘束圧の影響を受けないが、温度が高くなるにしたがって線膨張係数の拘束圧依存性が大きくなる。高温では拘束圧が増加すると線膨張係数は小さくなる。

(4) 残留ひずみが発生しないような高拘束圧下における線膨張係数の測定値は、鉱物組成に基づいて計算した値とほぼ一致する。

参考文献

- 1) Heard, H.C.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 17, pp. 289~296, 1980
- 2) Heard, H.C. and Page, L.: J. Geophys. Res., Vol. 87, pp. 9340~9348, 1982.
- 3) Bauer, S.J. and Handin, J.: Vol. 16, pp. 181~198, 1983.
- 4) 奥野哲夫、木下直人: 土木学会第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 176~180, 1985.
- 5) Cooper, H.W. and Simmons, G.: Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 36, pp. 404~412, 1977.
- 6) Kozu, S. and Saiki, S.: Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 3, Vol. 2, pp. 203~238, 1925.
- 7) Kozu, S. and Ueda, J.: Proc. Imp. Acad. Japan, Vol. 9, pp. 262~264, 1933.
- 8) Kozu, S. and Ueda, J.: Proc. Imp. Acad. Japan, Vol. 10, pp. 25~28, 1934.
- 9) Rosenholtz, J.L. and Smith, D.T.: Am. Mineral, Vol. 27, pp. 344~349, 1942.

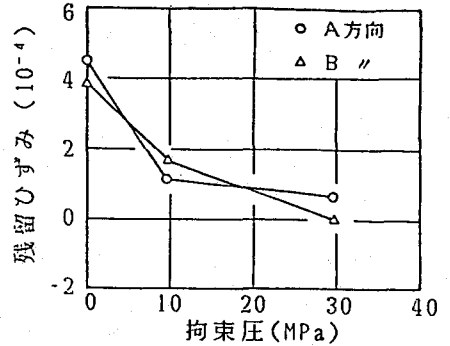


図-6 残留ひずみと拘束圧の関係

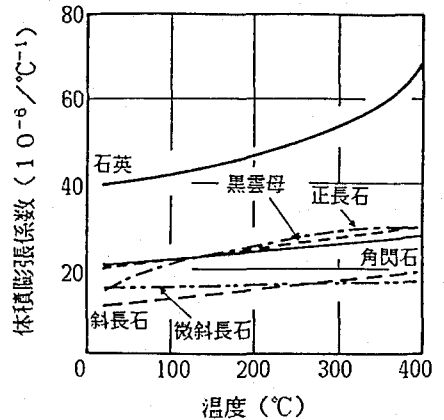


図-7 鉱物の体積膨張係数と温度の関係^{(1)~(9)}

(50) Thermal Expansion Behavior of Confined Granitic Rock

by Naoto KINOSHITA

Tohru ABE

Institute of Technology,
SHIMIZU Construction Co., Ltd.

Abstract

The coefficient of thermal linear expansion α was determined for Inada granite at confining pressure P of 0, 9.8 and 29.4 MPa and at temperature from 30 to 280 °C by use of a new apparatus. Preceding to the thermal expansion measurement of rock samples, the measured α of an aluminum sample by the new apparatus was compared with that by another apparatus which had already been confirmed by accuracy. The results showed that α for confined rock samples could be determined with enough accuracy. Inada granite has anisotropy in thermal expansion under atmospheric pressure because of the anisotropic microcrack distribution. However, the anisotropy in α disappears at 9.8 and 29.4 MPa by crack closure. The thermal expansion coefficient measured around room temperature is independent of pressure. As the temperature is increased, the dependence of pressure upon thermal expansion increases. At high temperature, α decreases as P is increased. The measured α at 29.4 MPa agrees with the average α of the constituent minerals. The facts described above conclude that the thermal expansion behavior of Inada granite can be determined both by the thermal expansion of constituent minerals and by the microcrack formation. These microcracks are formed as a result of thermoelastic property differences between adjacent grains and the rate of the microcrack formation decreases with the increase of pressure.