

(37) 高温下における岩石の線膨張特性

清水建設(株) 正会員 ○ 奥 野 哲 夫
清水建設(株) 正会員 木 下 直 人

はじめに

地下空間利用の多様化に伴い、岩石・岩盤の高温特性の評価が重要な問題となってきた。岩石の高温での線膨張特性は、鉱物粒子の持っている本来の線膨張特性やクラックの発生、あるいは鉱物成分の化学的反応などの多くの要因から特徴づけられ、各岩種により異なった複雑な挙動を示す。これらの多くの要因の中には、岩石内部に温度勾配が発生しないようなゆっくりとした昇温・降温条件においても、鉱物粒子の線膨張係数の違いやその異方性から、粒界に発生するマイクロクラックがあり、¹⁾ 岩石の力学特性や透水性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。²⁾ このような粒界に発生するマイクロクラックは、昇温および降温の両過程の線膨張ひずみから得られる残留ひずみと深く関係している。しかし、各岩種で線膨張特性は異なり、この特性に影響を与える多くの要因の中で、熱履歴を受けることによりどういった要因が卓越してくるかが明らかでない。そこで今回は3種類の岩石を用いて、室温から500℃の範囲で線膨張ひずみの測定を行い、さらに熱履歴の影響を詳細に調べるため、1種類の岩石で繰り返し加熱を行いながら線膨張ひずみを測定した。これらの測定結果と鉱物組成から計算した岩石の線膨張ひずみを比較・検討し、熱履歴を受けた後の岩石の線膨張特性に大きな影響を与える要因を調べた。

また、これらの測定に先だって、試料の寸法が異なることにより、線膨張ひずみの測定結果にどのような影響があるかを調べたので、その結果も報告する。

実験方法

今回の測定に用いた全試料を表-1に示す。用いた岩種は、稲田花崗岩、小松安山岩、秋吉大理石の3種類である。これらの試料は各岩種で同一の岩石ブロックから同じ方向にコアを抜き、整形したものである。なお、これらの岩石の鉱物組成と粒径を表-2に示す。

測定には押棒式の線膨張計を使用した。この線膨張計の測定温度範囲は、-155℃～1000℃であり、長さ最大200mm、直径最大30mmまでの寸法の試料を用いた測定が可能である。表-1に示したように、試料寸法の影響を調べるため、稲田花崗岩と小松安山岩について直径約5, 10, 20, 30mm (30mmは稲田花崗岩のみ)の試料を準備した。また、秋吉大理石の線膨張ひずみの測定には、直径約20mmの試料を用いた。

昇温(降温)速度は、全試料とも30℃/hとしたが、最も大きな直径30mmの稲田花崗岩の場合について、更にゆっくりとした温度変化で測定した値と比較することにより、30℃/hでも昇温(降温)速度の影響がないことを確認した。

加熱には電気炉を用い、室温から500℃付近まで加熱しながら大気圧下で線膨張ひずみを測定し、500℃付近で1時間保持し、その後熱履歴の影響を調べるため、再び室温付近まで冷却しながら同様に線膨張ひずみを測定した。この際、標

表-1 岩石試料

岩 種	試料番号	直 径 (mm)	長 さ (mm)	乾燥密度 (g/cm ³)	有効間隔率 (%)
稲 田 花 崗 岩	IG-1	4.80	62.15	2.61	1.2
	IG-2	11.75	101.40		
	IG-3	19.80	199.35		
	IG-4	29.80	198.30	2.63	1.3
	IG-5	17.45	194.80		
小 松 安 山 岩	KA-1	5.00	42.55	2.58	6.1 } 6.5
	KA-2	9.80	99.95	2.71	
	KA-3	19.58	181.68		
大 理 石	AM-1	19.68	193.00	2.72	0.7

表-2 岩石の鉱物組成と粒径

岩 種	鉱 物 名	組 成 (%)	粒径の範囲 (mm)	平均粒径 (mm)
稲 田 花 崗 岩	石 英	42	0.2~8.0	3.0
	斜 長 石	22	0.3~10.0	2.7
	カ リ 長 石	31		
	黒 雲 母	4	0.1~2.5	0.9
	角 閃 石	1		
小 松 安 山 岩	斜 長 石	22	0.05~2.5	0.25
	斑 晶 単斜輝石	5		
	斑 鉄 鉱	1		
	石英 (ガラス質)	72		
秋吉大理石	方 解 石	100	0.1~1.5	0.4

準試料として熔融石英を用い、昇温（降温）時の装置のドリフトに対する補正を行った。なお、室温の変化によるドリフト量は小さいので無視した。また、降温の過程では、所定の温度変化以上の急激な温度変化は与えないように制御しているが、室温に近づくとき所定の降温速度よりもゆっくりとした速度（自然冷却状態）となっている。以上の昇温・降温方法とは別に、稲田花崗岩の熱履歴の影響を詳細に調べるため、繰り返し加熱を行いながら測定を行った（試料番号IG-5）。これは室温から200℃までの温度範囲を30℃/hの速度で2回昇温・降温過程を繰り返し（ステップⅠ）、その後、温度範囲を室温から350℃に変えて同様に1回繰り返し（ステップⅡ）、さらに室温から500℃の温度範囲に変え2回繰り返し（ステップⅢ）もので、その間の線膨張ひずみを連続して測定した。

実験結果

1) 寸法の影響

稲田花崗岩と小松安山岩を用いて線膨張ひずみを測定し、試料寸法の影響を調べた結果を図-1に示す。これは、直径約20mmのIG-3とKA-3の昇温過程の線膨張ひずみを4次多項式で近似し、この近似式を基準として各寸法の昇温過程の線膨張ひずみとの差を示したものである。図にはIG-3とKA-3の近似精度を見るため、近似に用いた測定値との差も示している。近似の精度はIG-3で $\pm 1.0 \times 10^{-5}$ 以内、KA-3では $\pm 4.0 \times 10^{-5}$ 以内の精度となっている。この図から、稲田花崗岩は温度上昇に伴って寸法の小さな試料ほど線膨張ひずみが小さくなる傾向を示していることがわかる。特に直径4.8mmのIG-1が著しく小さな値を示し、500℃においてIG-3より約 1.5×10^{-3} もの小さな値を示している。これに対して、小松安山岩では明確な違いが認められない。

2) 各岩種の線膨張特性

直径約20mmの試料で得られた3種類の岩石の線膨張ひずみの測定結果を図-2に示す。また線膨張ひずみを温度の4次多項式で近似し、その近似曲線を微分することにより求めた線膨張係数を図-3に示す。これらから、各岩種により異なった線膨張特性を示していることがわかる。

昇温過程では、秋吉大理石が最も大きな線膨張ひずみを示し500℃で約 12.0×10^{-3} の値となり、次に稲田花崗岩が500℃で約 9.2×10^{-3} の大きな値を示している。これらの岩石の線膨張係数は、温度の上昇に伴って著しく増大している。これに対して小松安山岩では、500℃までに発生する線膨張ひずみは約 3.3×10^{-3} で、秋吉大理石や稲田花崗岩より小さく、線膨張係数はほとんど温度依存性を示さない。

降温過程では、秋吉大理石と稲田花崗岩で残留ひずみの発生が見られる。特に秋吉大理石が、室温で約 $8.0 \times$

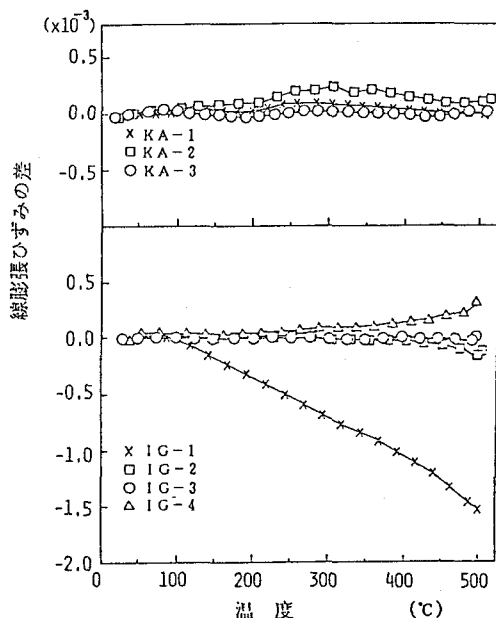


図-1 試料寸法による線膨張ひずみの違いと温度の関係

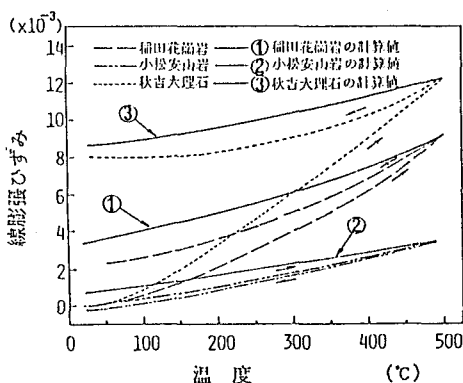


図-2 各岩種の線膨張ひずみと温度の関係

10^{-3} もの大きな値を示し、稲田花崗岩が約 2.1×10^{-3} の値を示す。また、これらの降温過程の線膨張係数は昇温過程よりも著しく小さく、秋吉大理石では 100°C 付近から線膨張係数が0に近くなる。小松安山岩は、昇温過程とはほぼ一致した経路で室温まで戻り、残留ひずみはほとんど発生していない。

また、稲田花崗岩について繰り返し加熱を行い、その間の線膨張ひずみを測定した結果 (IG-5) と、 500°C まで一度に加熱および冷却して測定した結果 (IG-3) と比較し、温度履歴による影響を詳細に調べた。図-1と同様に、IG-3の 500°C までの昇温過程の近似曲線と、IG-5の3つのステップの各1回目の昇温過程の線膨張ひずみの差を示したものが図-4である。ステップII、IIIの室温でのひずみ差は、それぞれ前ステップまでの残留ひずみを示すものである。この図から、熱履歴を受けた後は、温度上昇に伴って温度履歴のないIG-3の線膨張ひずみに近づき、それぞれのステップまでの最大温度履歴以上になると、温度履歴がない場合とはほぼ等しい線膨張ひずみとなり、温度履歴の影響が確認できる。これとは別に、繰り返し加熱を行った場合のステップIIIの残留ひずみと、一度に加熱した場合の残留ひずみを比較して、最大温度履歴以下の温度履歴が残留ひずみに与える影響を調べた。その結果、IG-3とIG-5で共に室温時に $2.0 \sim 2.3 \times 10^{-3}$ の残留ひずみを示し、その発生経路も類似していた。このことから、最大温度履歴以下の温度履歴は、その残留ひずみの発生に影響しないことがわかる。

考 察

1) 寸法の影響

表-2に示したように、稲田花崗岩では石英や長石の平均粒径がそれぞれ 3.0mm 、 2.7mm と比較的大きく、小松安山岩では斑晶の平均粒径が 0.25mm と小さい。また表-3³⁾⁴⁾ からわかるように、石英の体積膨張ひずみは他の鉱物より著しく大きい。稲田花崗岩はこれを多く含んでいる。以上のことから、鉱物組成や粒径の相違が寸法の影響の違いに反映しているものと考えられる。

2) 各岩種の線膨張特性

今回測定した岩石の鉱物組成から、稲田花崗岩、秋吉大理石、小松安山岩の線膨張ひずみを求め、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の式を用いたが、岩石および鉱物

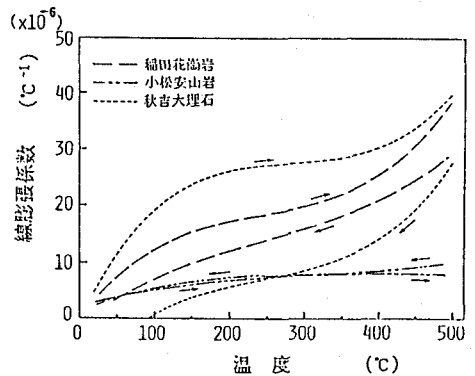


図-3 各岩種の線膨張係数と温度の関係

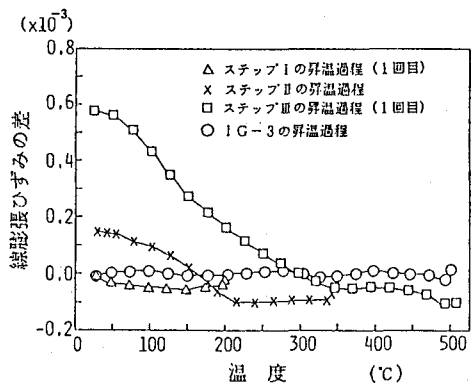


図-4 温度履歴の相違による線膨張ひずみの違いと温度の関係

表-3 各鉱物の弾性係数と体積膨張ひずみ³⁾⁴⁾
(20°C を 0 とした値)

鉱物名	弾性係数 (kgf/cm^2)	体積膨張ひずみ (%)				
		20°C	100°C	200°C	400°C	600°C
石英	9.83×10^5	0.0	0.29	0.70	1.75	3.18 (注)
斜長石 (稲田花崗岩)	8.01×10^5	0.0	0.11	0.30	0.72	1.22
斜長石 (小松安山岩)	8.50×10^5	0.0	0.10	0.24	0.55	0.95
カリ長石	6.77×10^5	0.0	0.13	0.40	0.64	1.16
黒雲母	7.10×10^5	0.0	0.16	0.36	0.76	1.58
角閃石	13.14×10^5	0.0	0.16	0.42	0.97	1.58
単斜輝石	14.37×10^5	0.0	0.15	0.35	0.83	1.37
磁鉄鉱	23.54×10^5	0.0	0.22	0.55	1.35	2.28
方解石	—	0.0	0.11	0.29	0.77	1.40
安山岩質ガラス (小松安山岩)	6.11×10^5	0.0	0.13	0.30	0.62	0.95

注) 550°C での値

は等方的であり、線膨張ひずみは体積膨張ひずみの $1/3$ であるとして求めた。

$$\alpha_v = \frac{\sum \alpha_i \cdot E_i \cdot V_i}{\sum E_i \cdot V_i}$$

α_v : 岩石の体積膨張係数 ($^{\circ}\text{C}$)
 α_i : 岩石鉱物の体積膨張係数 ($^{\circ}\text{C}$)
 E_i : " 弾性係数 (kgf/cm^2)
 V_i : " 体積率

計算には表-2、3に示した値を用い、各鉱物の体積膨張係数は各温度の体積膨張ひずみを温度の3次多項式で近似し、それを微分することにより求めた。ただし、小松安山岩の石基部分は、安山岩質のガラスであるとして、表-3に示した値を計算に用いた。その結果から、線膨張係数を積分して得られる各岩石の線膨張ひずみを図-2の中に示した。この図では、特に降温過程の線膨張ひずみと比較するため、500 $^{\circ}\text{C}$ での測定値を基準として、計算より得られた線膨張ひずみを示した。測定結果と計算結果を比較して、測定温度範囲で平均的に見れば、降温過程の線膨張ひずみは各岩種とも計算値に近く、小松安山岩では昇温過程も計算値に近い値となっている。

稲田花崗岩では寸法の影響で述べたように、石英の体積膨張係数が大きい。また秋吉大理石は、方解石の線膨張係数に大きな異方性がある。この方解石の異方性は、20 $^{\circ}\text{C}$ から100 $^{\circ}\text{C}$ までの加熱で、C軸に直角および平行な方向でそれぞれ0.189%、-0.042%と線膨張ひずみの符号まで異なる大きなものである。よって両岩種では、鉱物粒子間の線膨張係数の相違およびその異方性から、昇温過程で粒界にマイクロクラックが発生し、計算結果よりも大きな線膨張係数を示すものと考えられる。さらに、稲田花崗岩に繰り返し加熱を行いながら測定した結果から、最大温度履歴以下の温度履歴は残留ひずみの発生に影響しないことがわかったので、最大温度履歴以下では、粒界に発生したマイクロクラックは残留ひずみとして残り、主に鉱物の線膨張係数が岩石の線膨張係数の支配的要因となることがわかる。

小松安山岩では、その鉱物組成から、線膨張係数が大きく異なったり異方性を示す鉱物は少ない。そのため秋吉大理石や稲田花崗岩と異なり、粒界でのマイクロクラックの発生が少ないものと考えられる。

結 論

今回の高温における岩石の線膨張ひずみの測定で、次の事がわかった。

- 1) 稲田花崗岩のように粒径が大きく、鉱物粒子間の線膨張係数の相違が著しい岩石では、寸法効果がみられるので、少なくとも直径10mm以上の試料を用いる必要がある。
- 2) 秋吉大理石や稲田花崗岩のように、鉱物粒子間の線膨張係数の相違や異方性が著しい岩石と、小松安山岩のように鉱物粒子に線膨張係数の相違や異方性が少ない岩石では、残留ひずみの発生は大きく異なる。
- 3) 最大温度履歴以下の温度における岩石の線膨張ひずみは、主に構成鉱物の線膨張ひずみに支配される。

謝 辞

今回の研究で、鉱物組成の分析をお願いし、多くの御助言を賜った千葉大学理学部地学科 兼平教授に対して、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Richter, D. and G. Simmons, Thermal expansion behaviour of igneous rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 11, 403-411, 1974
- 2) Johnson, B., Gangi, A.F. and Handin, J., Thermal cracking of rock subjected to slow, uniform temperature changes, Proc. 19th U.S. Symp. Rock Mech., Reno, Nev., 259-267, 1978
- 3) 大草重康, 土木地質学, 朝倉土木工学講座, 70-73, 1972
- 4) B.J. Skinner, Thermal expansion, in : Handbook of Physical Constants, Geol. Soc. Am. Mem. 97, 75-96, 1966

(37) Linear thermal expansion properties of rocks at high temperatures

by Tetsuo Okuno
Naoto Kinoshita
Shimizu Construction Co.

Linear thermal expansion properties of rocks at high temperatures differ with each rock type, and are characterized by some different reasons.

In order to clarify a reason which has a remarkable effect on the thermal expansion properties of rocks subjected to slow and uniform temperature changes, the linear thermal expansion of three rock types has measured during both heating up to 500°C and cooling down to room temperature. Three rock types are Inada Granite, Komatsu Andesite, and Akiyoshi Marble. The measured values and calculated values from mineral composition are compared. In addition, size effects on the thermal expansion of Inada Granite and Komatsu Andesite have investigated.

The following results have been obtained.

- (1) Inada Granite; During heating up to 500°C, specimen 4.8mm in diameter indicates smaller linear thermal expansion than that of a specimen which has more than 10mm in diameter.
- (2) Komatsu Andesite; Residual strain at room temperature after cooling is very little.
- (3) The linear thermal expansion during cooling is similar to calculated value from each mineral composition for all rock types.

Therefore, the following conclusions are proposed.

- (1) a specimen which has more than 10mm in diameter should be used in order to measure linear thermal expansion for Inada Granite which has large average grain size and differential thermal expansion between grains.
- (2) Komatsu Andesite has smaller residual strain than Inada Granite and Akiyoshi Marble during cooling. (Komatsu Andesite has very little differential thermal expansion between grains and anisotropic thermal expansion in a grain. On the other hand, Inada Granite and Akiyoshi Marble have differential thermal expansion between grains or anisotropic thermal expansion in a grain.)
- (3) Linear thermal expansions of forming minerals have a dominant effect on the linear thermal expansion of rocks under the temperature which has been applied.