

熱水が岩石の強度および変形特性に及ぼす影響

EFFECT OF HEATED WATER ON STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF ROCKS

稲田善紀*・横田公忠**・時川 忠***

By Yoshinori INADA, Kinutada YOKOTA and Tadashi TOKIKAWA

Recently a multiple-purpose utilization of heated water which is produced by utilizing the exhausted heat from waste incineration equipment, solar energy and geothermal energy, is now being put into practice in Japan. One of the possible measures is temporary storage of heated water which is sent up from underground openings excavated in rock mass near the ground-surface. In this case, as the rock mass around openings would be affected by heated water, the stability of openings is an important problem. To investigate this problem, we need to know the strength and deformation characteristics of rocks affected by heated water. This paper describes change of rocks strength and deformation that were measured in heated water and at high temperature.

1. 緒 言

石油の代替エネルギーとしての地熱エネルギーの利用がすでにわが国の多くの地域で実施され、これまで蒸気を利用して発電に、また熱水を利用して地域暖房、給湯、農業や養魚業などに幅広く利用されてきている¹⁾。しかし、地熱エネルギーの利用は地域が限定されることが大きな隘路となっているのが現状である。一方、今後都市部などの人口集中地域では生活の質の向上等と相まってますます熱水が利用されることが予想される。そこでゴミ焼却場や発電所などで発生する各種排熱や太陽エネルギーなどを利用して水を熱水に変え、季節や時間帯に左右されず安定した供給を行うために一時的に地下岩盤内に設けた空洞に貯蔵する方法が考えられる。この場合、空洞の安定性が問題となるので本論文ではその基礎となる熱水が岩石の強度変形特性にどのような影響を及ぼすかについて実験的に求め、同時に乾燥状態の岩石の高温下での挙動を実験的に求め比較検討した結果を述べる。ただし本論文では、熱によって強度や変形がどの程度影

響を受けるかを傾向として定性的にとらえることを目的としているので微視的視野に立った場合には多くの問題が残されていることをあらかじめ断っておきたい。

2. 熱水の影響を受けた岩石の強度特性

(1) 実験材料および実験方法

本実験に使用した岩石は、花崗岩（愛媛県越智郡大島産、通称大島みかげ）および安山岩（愛媛県上浮穴郡久万町産、通称久万石）である。

供試体は、同一ブロックにおいて同一方向に採取した円柱状コアを圧縮試験用のものは直径3 cm、長さ6 cmに、また引張試験用のものは、試験を圧裂試験で代用したので直径3 cm、長さ3 cmに成形した。いずれも端面の平行度および平坦度には特に留意して成形し、精度1/100 mmダイヤルゲージにて測定し、すべての供試体について中心部および周辺部の高低差を5/100 mm以内におさえるようにした。

実験に先立ち、供試体を a) 室内で1週間以上自然乾燥させた後デシケータ内でさらに1週間乾燥させたもの、b) この状態のものをを用い、デシケータ内を真空にしたまま蒸留水を入れて浸潤させ、さらに水中の気泡が岩石表面に付着して水が供試体内に浸入するのを妨げないように真空を併用しながら24時間抜気したものの2

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 愛媛大学助手 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 愛媛大学研究生 工学部土木工学科(同上)

Table 1 Physical properties of rocks.

	Dry			Wet			Specific gravity (Dry)	
	Porosity (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	Porosity (%)	Water content (%)	Degree of saturation (%)	True specific gravity	Bulk specific gravity
Granite	1.99	0.16	20.67	1.99	0.54	70.86	2.673	2.625
Andesite	5.60	0.91	41.02	5.60	1.94	88.33	2.665	2.549

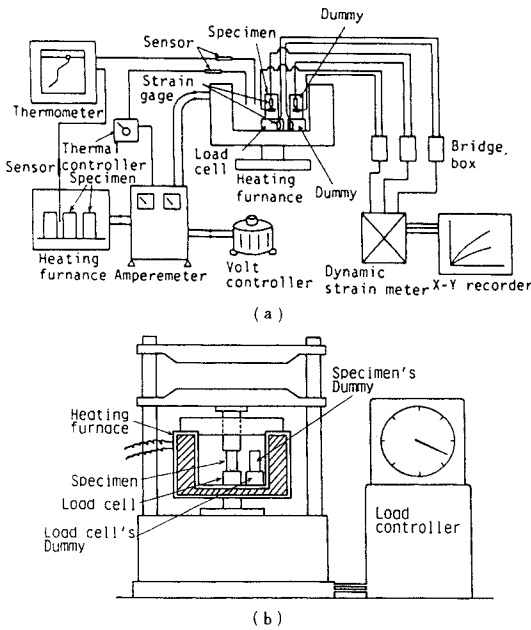


Fig.1 Schematic diagram of the apparatus for measuring strength and deformation of rocks at high temperatures.

種類の方法で処理し実験に供した。ここでは前者を Dry, 後者を Wet とよぶことにする。これらの物理的性質を調べた結果をとりまとめて Table 1 に示した。

実験は次の 2 通りの方法で行った。

(a) Dry の供試体を用いて室温下および 100°C の高温下にて実験を行った (以下 Dry 試験とよぶ)。

(b) Wet の供試体を用いて室温と同一温度に保った水中および約 100°C の熱水中で実験を行った (以下 Wet 試験とよぶ)。

なお、圧縮試験の際、供試体の表面にひずみゲージを貼付することにより、同時にひずみの測定も行った。

これらを概念的に示したものが Fig.1 (a), (b) である。

岩石の供試体を加熱する際、昇温速度が 200°C/h (3.3°C/min) 以下では熱衝撃による破壊が起こらないことが報告されているので²⁾、本実験では 2°C/min 以下で昇温した。昇温後供試体の表面温度と中心部の温度を

同一にするためには、直径 3 cm の岩石供試体の場合約 20 分間の保温が必要であることが別の実験により確かめられているが³⁾、本実験では念のため 60 分間の保温を行った後実験に供した。また、荷重速度は圧縮試験では 1~10 kgf/cm²/s の範囲内であれば強度に影響を及ぼさないことが報告されているので⁴⁾、本実験では 7 kgf/cm²/s で行った。

(2) 実験結果および考察

Fig. 2 および Fig. 3 は高温下における圧縮強度および引張強度の変化を示している。また、これらの値は原因が明らかでかつ極端に強度が低い 1~2 個の供試体を除きいずれも試料 10~12 個を平均したもので標準偏差も同時に示している。まず常温下において Dry の供試体を Wet にすると圧縮強度、引張強度とも、しかも安山岩、花崗岩とも低下している。吸水による強度低下の原因は、供試体表面近くの間隙内に水が浸入する際にマイクロクラックの拡大が行われたものと思われる。また安山岩については水潤させた供試体表面の有色鉱物に鋭利な刃物を接触させたところ容易に貫入させ得、かつ採取できた。採取された有色鉱物を顕微鏡にて観察した X 線分析を行った結果、これらの鉱物は変質緑泥石、斜長石、モンモリロナイト等であることがわかった。これらの鉱物は吸水により強度が低下するが、顕微鏡観察の結果平面

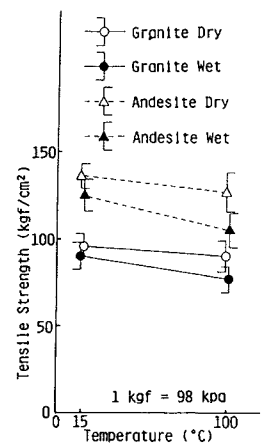
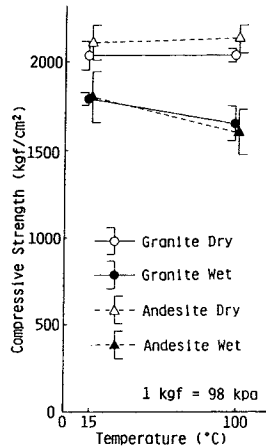


Fig. 2 The changes of the compressive strength at high temperatures.

Fig. 3 The changes of the tensile strength at high temperatures.

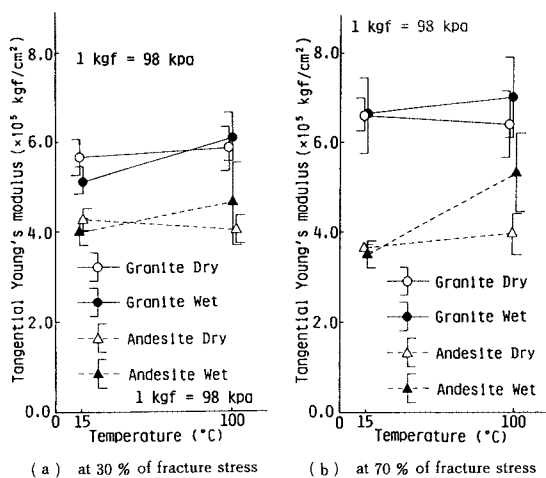


Fig. 4 Tangential Young's modulus at high temperatures.

的には面積で平均 6.5 % 含まれているので立体的にも同じような分布をしていると仮定すれば供試体全体では体積でほぼ $(\sqrt{6.5/100})^3$ すなわち、1.7 % 含まれていると推察される。

次に Dry 試験結果では花崗岩、安山岩とも 100°C 程度ではほとんど圧縮強度の低下がみられないが引張強度はやや低下の傾向がみられる。これは構成鉱物粒子の膨張の差異によって助長される潜在的マイクロクラックの拡大が、圧縮強度よりも引張強度においてより敏感に強度の低下として現われたものと思われる。

また、Wet 試験結果では両岩石とも、しかも圧縮強度、引張強度とも著しく低下している。これは表面から浸入した間隙水が試験時に水圧として働き、強度低下を生じさせたことによるものと思われ、特に安山岩では前述の吸水によって強度低下する鉱物が熱水下ではさらに促進されることや別の実験によりわずかながら熱水中に溶出することが確かめられているのでこれらのことが強度低下に影響を及ぼしているものと考えられる。

次に、圧縮試験時の応力-ひずみ曲線から破壊応力の 30 % 付近、70 % 付近の接線弾性係数およびポアソン比を求め、とりまとめたものが Fig. 4 (a), (b) および Fig. 5 (a), (b) である。

常温下では Dry の供試体を Wet にすることによっていずれも接線弾性係数の値が小さくなっている。このことは前述のとおり吸水によるマイクロクラックの拡大が原因であると思われる、特に安山岩では吸水鉱物の影響もあり、Wet の供試体の方が Dry よりもよりひずみやすくなっているものと思われる。このことは安山岩のポアソン比の値が Dry よりも Wet において値が大きいことからもうかがえることである。また、接線弾性係数の値は Dry 試験の結果ではその値はほとんど変化していな

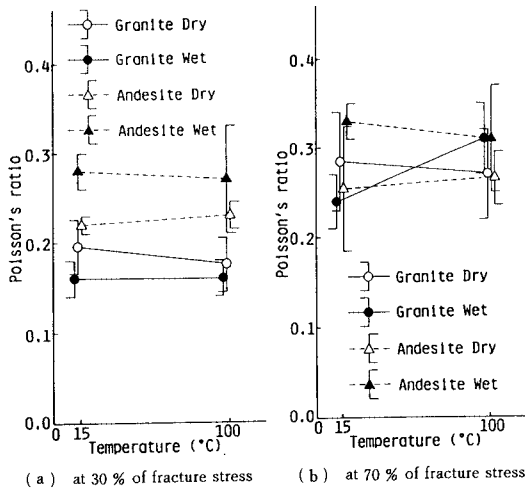


Fig. 5 Poisson's ratio at high temperatures.

いが、Wet 試験の結果ではいずれも値が上昇する傾向がみられる。熱水下では構成鉱物粒子の膨張および浸入した間隙水によって空隙がある程度密になり、見掛け上外部からの力に抵抗し弾性定数が大きくなったものと思われる。また、内部が密になることにより軸方向へ加えられた荷重も横方向へ伝わりやすくなることから、破壊応力の 30 % 付近でポアソン比がわずかながら増加し、さらに荷重が加えられた 70 % 付近で値が大きく増加していることから横ひずみの増加の割合が非常に大きいことを示している。

3. 熱水の影響を受けた岩石の変形特性

(1) 実験方法

本研究では炉内の試料の伸びを石英ガラス棒を介して測定すると同時に、岩石試料と石英ガラス棒との長さの和と同一の長さの石英ガラス棒の伸びを測定し比較することにより、岩石のみの伸びの値を容易に得ようとするものである。ここではこの方法を比較法とよぶことにする。実験方法を概念的に示したものが Fig. 6 である。比

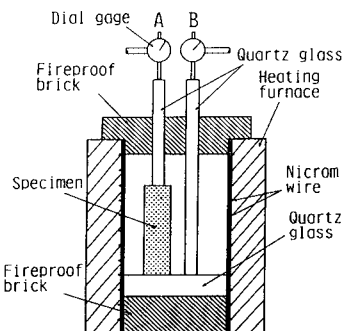


Fig. 6 Schematic diagram of apparatus for measuring of strain of rocks.

較法によって岩石のひずみは以下のとおり求め得る。

$$\Delta L_A = \Delta L_T + \Delta L_R + \Delta L_G \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta L_B = \Delta L_T + \Delta L_S + \Delta L_G \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

ΔL_A : A のダイヤルゲージによって測定される伸びの量

ΔL_B : B のダイヤルゲージによって測定される伸びの量

ΔL_T : (耐火レンガ)+(石英ガラス板)の伸び

ΔL_R : 岩石供試体の伸び

ΔL_S : 岩石供試体と同一長さの石英ガラス棒の伸び

ΔL_G : 岩石供試体上の石英ガラス棒と同一長さの石英ガラス棒の伸び

式(1) - 式(2)より

$$\Delta L_A - \Delta L_B = \Delta L_R - \Delta L_S$$

$$\therefore \Delta L_R = (\Delta L_A - \Delta L_B) + \Delta L_S$$

$$\therefore \epsilon = \Delta L_B / L = (\Delta L_A - \Delta L_B) / L + \Delta L_S / L \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

ϵ : 岩石のひずみ

L : 岩石供試体の元の長さ

式(3)において $\Delta L_A - \Delta L_B$ は 1/1 000 mm まで測定可能なダイヤルゲージを用いて測定し、 $\Delta L_S / L$ については石英ガラスの線膨張係数が一定値 (0.54×10^{-6} [$1/^\circ\text{C}$]) をとることが知られているので³⁾、これを用いた。

実験は次の2通りの方法で行った。

(a) Dry の供試体のひずみを室温から 100 $^\circ\text{C}$ の雰囲気温度に至るまでの径路中において 20 $^\circ\text{C}$ ごとに求め、昇温、降温のサイクルを2回繰り返した。

(b) Wet の供試体のひずみを室温と同一温度にした水温から沸点近く(約 95 $^\circ\text{C}$)に至るまでの径

路中において 20 $^\circ\text{C}$ ごとに求め、昇温、降温のサイクルを2回繰り返した。

なお、岩石供試体は前述の岩石の強度特性を求めた岩石と同一の花崗岩、安山岩を用い、直径 3 cm、長さ 10 cm に成形し、昇温速度は 2 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下で行った。

この場合、所要の温度に保った後約 40 分で伸びの量が変化しなくなったのでその伸びを測定した。

(2) 実験結果および考察

Fig. 7 は昇温時における岩石のひずみの変化を求めとりまとめたものである。

花崗岩、安山岩とも温度上昇に伴ってひずみの値は増加しているが、花崗岩の方が安山岩よりもかなり大きく増加している。これは花崗岩の方が安山岩よりも構成鉱物粒子が大きく、熱膨張量の差によって鉱物粒子間にマイクロクラックが発生しやすく、また高温になるほど発

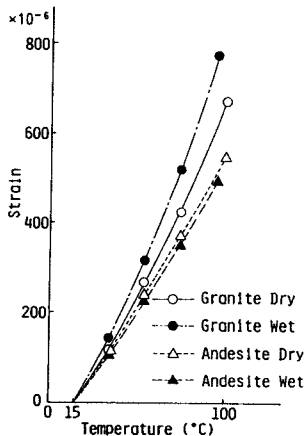


Fig. 7 The changes of strain of rocks at high temperatures.

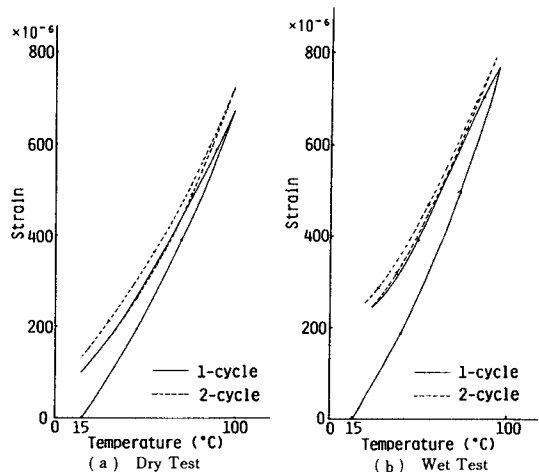


Fig. 8 The changes of strain of rocks after undergoing thermal hysteresis. (Granite)

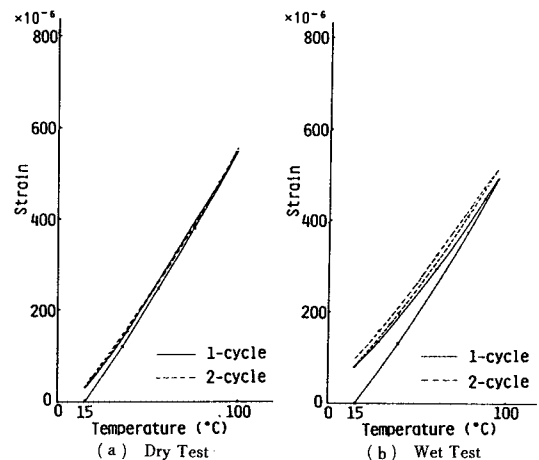
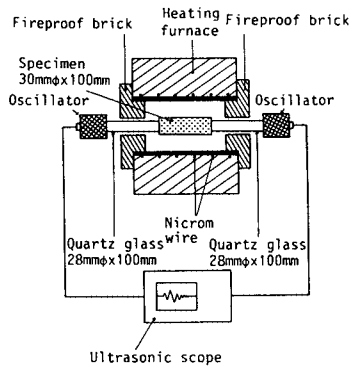


Fig. 9 The changes of strain of rocks after undergoing thermal hysteresis. (Andesite)

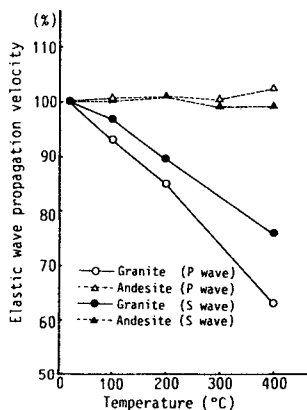
生量も増加すると考えられるのでこのことが原因になっているものと思われる。特に Wet の場合には吸水による影響も加わって同一温度のひずみも Dry のそれと比べて大きくなるものと思われる。

次に Fig. 8 (a), (b) および Fig. 9 (a), (b) に昇温、降温のサイクルを2回繰り返した場合の岩石のひずみの変化を示している。ただし、(a) は Dry 試験、(b) は Wet 試験の結果である。これらの図から各岩石とも室温下では残留ひずみがみられるが、Wet の岩石の方が Dry の岩石よりもその値が大きく、また花崗岩の残留ひずみが安山岩のそれよりもかなり大きい。また、これらの値は繰り返し回数が増加しても無限に増大してゆくのではなく、対数的にしかも数回の繰り返しである一定値に収束してゆくことがうかがえる。

以上の結果から、熱膨張によって発生するマイクロクラックの影響は安山岩よりも花崗岩の方が大きく受け、また、Dry の岩石よりも Wet の岩石の方が大きく受けることがわかり、このことが前述の両岩石の強度特性に影響を及ぼしているものと考えられる。なお、高温下で



(a) Schematic diagram of the apparatus for measuring



(b) The changes of elastic wave propagation velocity of rocks at high temperatures

Fig. 10 Elastic wave propagation velocity of rocks at high temperatures.

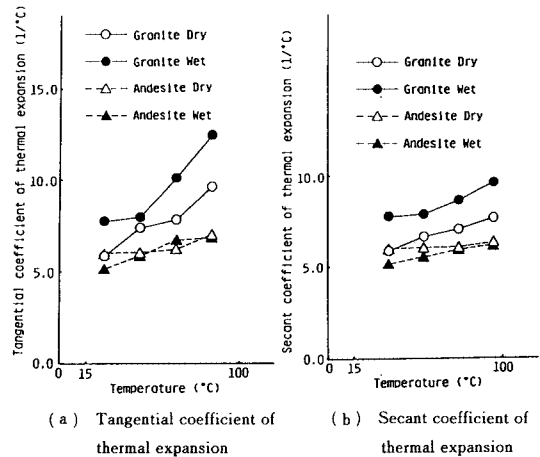


Fig. 11 The changes of coefficient of thermal expansion of rocks at high temperatures.

安山岩よりも花崗岩内に多くのマイクロクラックが生じていることについては、高温下で弾性波伝播速度を測定した別の実験結果からも推察される。すなわち、Fig. 10 (a), (b) にそれぞれ実験方法の概念とその結果を示したが、Fig. 10 (b) の結果から花崗岩が高温になるにつれてP波、S波とも伝播速度が著しく低下していることからマイクロクラックの増加がうかがえる。

今回はサイクルの繰り返しによる強度特性を求めているが、残留ひずみが無限に増大せず数回で対数的に収束してゆくことから、繰り返しによる強度も数回の繰り返しによってある値に収束してゆくものと推察される。

次に各温度におけるひずみから接線線膨張係数および割線線膨張係数を求めたものが Fig. 11 (a), (b) である。ここでは接線線膨張係数は所要温度近辺の平均勾配を表わし、割線線膨張係数は所要温度におけるひずみを初期の温度との差で除したものを表わしている。特に割線線膨張係数は熱応力を計算する際に便利なものである。両図から値が温度の上昇とともに増加してゆく傾向がみられ、特に花崗岩にその傾向が著しく、また Wet の方が値が大きい。これらの理由については前述のとおりである。

4. 高温の影響を受けた岩石の組織の変化

(1) 顕微鏡による岩石の組織の変化の観察

これまで高温下における岩石の組織の変化を顕微鏡で観察した結果が報告された例はない。そこで本論文では Fig. 12 のような装置を試作し長焦点レンズを用いて観察した。用いた岩石試料は直径 30 mm、厚さ 2 mm に成形した花崗岩で、所要温度に達してから約 1 時間保温した後観察した。Fig. 13 にその一例を示した。Fig. 13

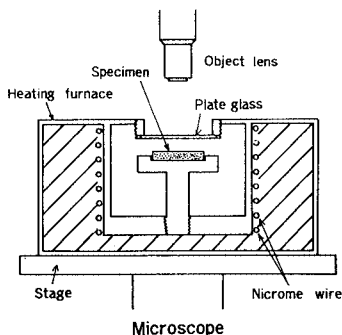


Fig. 12 Schematic diagram of the observation instruments.

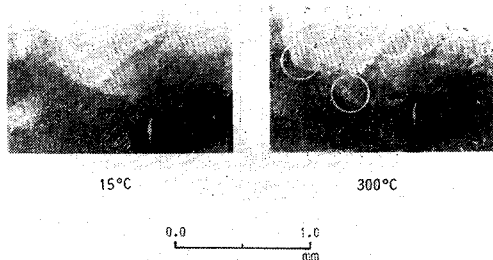


Fig. 13 The change of texture in rocks at high temperature.

から潜在的マイクロクラックの拡大が高温下で行われ、しかも石英と黒雲母の境界で発生していることがわかる。

(2) X線による岩石の組織の変化の解析

周知のとおり構成鉱物の結晶を3つの結晶軸 (a , b , c) と3つの軸角 (α , β , γ) とで表現する場合には6種類に分類され、これを結晶系という。X線回折装置を用い得られた結果を各結晶系の格子面間隔とミラー指数との関係式⁶⁾に代入することにより構成鉱物の結晶軸の長さの変化を求めたがそれらを取りまとめて Fig. 14 に示した。この図から石英は温度履歴を与えても結晶軸のうち a 軸, c 軸とも室温下での残留ひずみがみられず回復性を有しているが、黒雲母は a 軸, c 軸とも残留ひずみが温度上昇とともに大きくなり逆に b 軸は縮んでいる。これは a 軸, c 軸が大きく伸びることによってその影響で逆に見掛け上縮んだものかあるいは独自に縮む性質をもっているのかは現段階では明らかでない。また、正長石の場合は a 軸, b 軸, c 軸のいずれも温度上昇によって残留ひずみが大きくなっている。

以上のことから回復性を有する石英と、黒雲母または長石との境界でマイクロクラックが発生しやすいことが推察される。

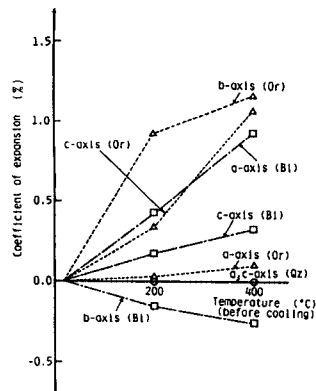


Fig. 14 The changes of length of a crystallographic axis of minerals.

5. 結 言

本論文では熱によって強度や変形特性がどの程度の影響を受けるかを傾向として定性的にとらえることを目的としているので、微視的視野に立った場合には多くの問題が残されているが本研究で得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) 室温下における花崗岩, 安山岩の強度は、圧縮強度, 引張強度とも乾燥状態 (Dry) よりも水潤状態の方が強度が低下する。

(2) 高温下 (100°C) における花崗岩, 安山岩の強度は、Dry 状態では圧縮強度はほとんど室温のそれと比べ変化しないが、引張強度はやや低下する。Wet 状態では、圧縮強度, 引張強度とも著しく低下する。

(3) 室温下における花崗岩, 安山岩の接線弾性係数の値は Dry 状態よりも Wet 状態の方が値が小さくなる。高温下 (100°C) では室温下と比べ Dry 状態ではその値がほとんど変化しないが、Wet 状態では上昇する。安山岩のポアソン比の値は Dry 状態よりも Wet 状態の方が大きい。

(4) 熱による岩石のひずみの変化を石英ガラス棒を用いた比較法によって容易に得られることを示した。花崗岩, 安山岩のひずみの値は、温度の上昇とともに増加するが安山岩よりも花崗岩の方がかなり大きい。また両岩石とも Dry 状態よりも Wet 状態の方が値が大きく、温度履歴を与えた場合の室温下での残留ひずみも同様である。特に花崗岩の Wet 状態の値は安山岩のその数の数倍大きい。両岩石とも温度履歴を数回与えることによって残留ひずみはある値に収束してゆく。

(5) 花崗岩, 安山岩の線膨張係数は、接線線膨張係数, 割線線膨張係数とも温度上昇とともにその値が上昇し、特に花崗岩にその傾向が著しく、Dry 状態よりも Wet 状態の方が値が大きい。

(6) 高温下での顕微鏡観察結果およびX線を用いた岩石の組織の変化の解析結果から、高温下では潜在的マイクロクラックが拡大してゆくことや石英と、黒雲母または正長石との境界でマイクロクラックが発生しやすいことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 養原善和・関岡 満：地熱発電所周辺における地熱熱水の多目的利用の現状，地熱，Vol. 11, No. 3, pp. 19~23, 1974.
- 2) 山口梅太郎・宮崎道雄：熱による岩石の強度の変化ある

いは破壊について，日本鉱業会誌，Vol. 86, No. 986, pp. 347~348, 1970.

- 3) 稲田善紀・八木則男：低温の影響を受けた岩石の力学特性，材料，Vol. 28, No. 313, pp. 979~985, 1979.
- 4) 岩石強度測定法特別委員会編：岩石強度試験に関するシンポジウムテキスト，日本鉱業会，1966.
- 5) Sydney P. Clark, J. R., Editor: Handbook of Physical Constants, The Geological Society of America, p. 95, 1966.
- 6) たとえば，浅田栄一・貴家恕夫・大野勝美：X線分析，共立出版，p. 32, 1971.

(1985. 12. 3・受付)