一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動

酒 井 昇*

Mechanical Behaviours of Heated Rocks under Uniaxial Compression

Noboru SAKAI

Abstract

In order to investigate the mechanical behaviours of heated rocks, Uniaxial compression tests are carried out on 4 kinds of typical rock types as AKIYOSHI marble, INADA granite, OGINO tuff and EMOCHI welded tuff under room temperature (20°C), 150°C, 450°C and 600°C.

From these tests, the following results are obtained. The mechanical behaviours of heated rocks are very different with each rock type. On AKIYOSHI marble and INADA granite, compressive strength and secant Young's modulus take larger values as temperature rises. The former rock indicates ductility over 300°C, and the latter rock yields at 600°C by only temperature before the axial load is applied. On OGINO tuff, the values of compressive strength and secant Young's modulus are slightly smaller to 300°C as temperature goes up, and these values are larger over 300°C. On EMOCHI welded tuff, these values are larger with rising temperature. Also, the value of strain at failure point becomes larger as temperature is higher, except EMOCHI welded tuff.

1. 緒 言

高温乾燥岩体 (H.D.R) の持つ熱エネルギーを抽出、利用するには、還元井を介して地表水を高温乾燥岩体に注入し、これを高温ガスまたは人工熱水として回収する方法が最も有効と考えられている¹⁾。これを実現するには、高温乾燥岩体の持つ熱エネルギーを自然水に移行させ、高温ガスまたは人工熱水にするための熱エネルギー交換の場、破碎帯を造成する必要がある。しかしながら、地下深部に賦存し 250~300°C と予想されている高温乾燥岩体内において人間が直接に破碎帯を造成することは不可能であり、必然的に熱応力または水圧の利用が検討され、熱応力破碎法ならびに水圧破碎法が注目されている。

ところで、高温乾燥岩体の岩盤に破碎帯を造成するには、高温加熱下における岩盤の力学的特性を知る必要があり、こうした面での研究が推進されるとともに、これを支える周辺技術の開発研究および基礎的研究が重視され、これに関連した報告も増加してきた^{4~10)}。

最近、高温下における岩石の力学的性質を調べた研究として報告されたなかに、稲田らの花崗岩ならびに安山岩について、400°C までの範囲で行った実験がある¹⁰⁾。この他、実験方法において多少相違するが、岩石の高温力学的特性を求めたものに、外尾ら^{4,5)}、山口ら⁶⁾、緒方ら⁸⁾ および Griggs ら⁹⁾ の報告があり、とくに、花崗岩の力学的、物理的、熱的な特性を概観したものとして Heuze の報告¹⁵⁾ がある。たとえば、花崗岩について、稲田らは 200°C でその圧縮強度が増加すると報告しており、同様な結果を示す者もいる⁶⁾ が、単純に温度の上昇とともに、その強度は低下すると報告している者もあり^{2),4)}、必ずしも同一ではない。このように、同一岩種についての高温力学的特性は、産地、岩石組織、試験方法によって、それぞれ異なると言い得よう。したがって、岩石の高温下での力学的性質については、より検討が必要であると思われる。

そこで、本試験では、試験結果の評価を行なうために、ばらつきの少ない岩石を試験することを考慮して、予備試験検討を行ない、秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩および江持熔結凝灰岩の4岩種をえらび、室温から600°C までの力学的性質を調べた。

* 宮城工業高等専門学校材料工学科

2. 岩石試料

岩石の力学的性質は、構成鉱物の種類、組み合わせ、結晶の大きさ、結合状態などによって異なる。この点を考慮し、本研究では、岩石試料として秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩の4岩種を試験に供した。

これら4岩種の顕微鏡下での特徴観察を以下に略述する。

(1) 秋吉大理石（山口県美祿郡秋吉台地方産）

ほぼ等粒の方解石の他形糖状組織を示し、へき開、双晶が発達している。

(2) 稲田花崗岩（茨城県笠間市産）

他形粒状組織で、主な構成鉱物は石英、正長石、微斜長石、斜長石、黒雲母である。長石はへき開が発達しており、石英には割れ目が多い。正長石、微斜長石はパーサイトをなすものがある。また、長石と石英には微文象組織を呈する部分があり、長石の一部は絹雲母化している。

(3) 荻野凝灰岩（福島県耶麻郡高郷村産）

主として、細粒の火山ガラス片からなり、極く少量の石英、斜長石を含んでいる。ガラス片の形は字状、棒状、板状などをなし、その大部分は脱ガラス化が進み沸石化、粘土鉱物化している。

(4) 江持熔結凝灰岩（福島県須賀川市産）

レンズ状組織を呈し、斜長石、普通輝石、紫蘇輝石、磁鉄鉱ならびに少量の黒雲母の破片を含んでいる。基質は、主としてガラスで、これに晶子を含んでいる。

試験片の作製に当たって、できるだけ測定結果のばらつきを抑えるため、同一岩石ブロックから圧縮方向が石目と直交するようにボーリングによりコアを抜き取り、このコアから直径 25mm、高さ 50mm の円柱状の試験片を作成した。なお、両端面の平行度は、 $\pm 2.5/100\text{mm}$ である。

整形された試験片は、整形に際して使用した水による含水量に基づくばらつきを防止するために、4時間自然乾燥し、ついで、乾燥剤を入れたデシケーターの中で2週間放置し、さらに、実験に供するまで密封したデシケーターの中に保存した。

3. 試験装置ならびに試験方法

(1) 試験装置

本研究において試作して熱間試験機の概念図を図-1に示す。

A 上盤	B 支柱
C 電気炉上蓋	D 上部載荷棒
E 電気炉	F エンドピース
G 試験片	H 下部載荷棒
I ステンレスパイプ	J 受圧器
K 下盤	L ブーリー
M ワイヤ	N 重錘
O カンチレバーゲージ	P 球座

図-1 高温一軸圧縮試験装置

この試験機について多少説明を加えると、電気炉Eは上盤A、下盤Kとこれを支える支柱Bの間に組み込まれている。その形状は、外径 300mm、内径 50mm、高さ 500mm の円筒形であり、最大 1000°C まで昇温することができる。また、電気炉Eの上部は、ワイヤーMによりブリームを介して重錘Nと連結されており、これにより電気炉Eを任意の位置に停止させることができる。荷重は、油圧ポンプから、ほぼ一定の流量で油をラムに送ることによって試験片に加えた。したがって、一応ひずみ制御下における圧縮試験となっている。なお、油をラムに送るスピードは荷重の初期の立上り部分が、約 30 に gf/sec となるように合わせ、その後は、そのスピードを保って試験を行った。装置金物の過熱を防ぐため、これらの末端、すなわち、図-1 に示す a, b, c の位置において水冷し、装置全体の過熱を防止している。また、球座Pと受圧器Jを、さらに、受圧器Jと下部載荷棒Hとをいずれもネジ切りすることによって一体化し、载荷系統の安定化をはかるとともに、試験片をエンドピースFで挟んで、上下部載荷棒間にセットし、軸線を一致させた。

なお、試験片を均一的な温度で加熱するために、試験片設置付近の炉内温度分布を予めクロメル・アルメル熱電対を用いて調べ、設定温度で温度分布がほぼ一定であることを確認するとともに、同熱電対を用いて炉内温度を制御した。

(2) 試験方法

図-2 は、熱間圧縮試験装置のブロックダイアグラムである。

試験の手順について述べると、まず、試験片を上下載荷棒間にエンドピースを介して、軸線が揃うようにセットする。次に、電気炉 E を下げる際に、試験片 G と載荷棒との軸線がずれる恐れがあるので、若干の荷重を加えた状態にしてから電気炉を所定の位置に下げる。その後、冷却水を流し込み、予め加えてある荷重を抜き、電気炉 E の電源を入れ、昇温プログラマー W に設定値をセットする。所定温度に達した後、試験片全体を充分に加熱するために、同温度を 1 時間維持する。

以上のような条件を満たした後に、軸変位測定用カンチレバーゲージ O をセットし、油圧ポンプ X で荷重を加えて、その結果を X-Y レコーダー U に記録する。

なお、昇温速度については、現在のところその決定法に適当なものがなく、実験的、あるいは経験的に決められている。例えば、外尾ら⁵⁾は、昇温速度 $30^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ ~

$100^{\circ}\text{C}/10\text{min}$ で設定温度 400°C 、 600°C まで加熱し、冷却した花崗岩、安山岩、砂岩について圧縮強度および引張強度を求め、花崗岩以外の岩石の強度に昇温速度の影響はほとんどないと報告しており、山口ら⁹⁾は花崗岩について昇温速度 $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $300^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で圧縮試験を行った結果、安定した試験結果を得られるのは $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ であると述べている。しかし、昇温速度による試験結果への影響は試験片の形状・寸法により異なるので、本研究では、荻野凝灰岩の円柱状試験片について、昇温速度 $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $200^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $300^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で加熱し、常温まで自然冷却して亀裂の発生の有無を調べ、亀裂の発生が認められなかった $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ を採用した。

また、設定温度としては、岩石試料を予め乾燥して用いるので、これを加熱すると、約 100°C をこえるあたりから残存する層間水が蒸発し始め、 150°C 位から化学的脱水が始まり、さらに、 350°C 位から酸化現象が進行すると言われている¹¹⁾¹²⁾。また、 573°C において石英は α 石英から β 石英への転移に伴い体積変化を生ずる¹³⁾ ことなどが知られている。そこで、本研究では、加熱過程での岩石試料の熱変化を考慮して、 150°C 、 300°C 、 450°C 、 600°C の設定温度で試験し、常温 (20°C) の場合と比較検討した。

なお試験に際しては同一条件に対して 3 個の試験片を供して実験を行った。とくに、ばらつきが大きい場合には 2 個の試験片を追加して平均を取ることにした。

4. 試験結果

4 種類の岩石の圧縮応力-ひずみ線図は、各岩石間また各温度間で異なったパターンを示すが、同一岩石、同一温度における 3~5 個の試験体はいずれも同一パターンを示す。図-3 (a)~(d) にこれら圧縮応力-ひずみ線図の代表例を示す。これらの圧縮応力-ひずみ線図から、常温における各岩石試料の圧縮応力-ひずみ線図の勾配は、秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩の順に小さくなっているが、加熱温度の上昇とともに、その様相は大きく変わる。例えば、秋吉大理石では加熱温度の上昇とともに、その勾配は緩やかとなり、 300°C を超えると、これまでの脆性的挙動から流動的挙動を示すようになり、最大圧縮強度点を明確に示さず、さらに、 600°C では一度応力が低下した後さらに応力が高まる現象を示している。

つぎに本研究で用いた岩石試料の圧縮強度、破壊ひずみ、割線ヤング率 (圧縮強度の 50% の応力における) と加熱温度との関係を図-4 (a)~(c) に示すとともに、

図-2 試験装置系統図

(a) 秋吉大理石

(c) 萩野凝灰岩

(b) 稲田花崗岩

(d) 江持熔結凝灰岩

図-3 圧縮応力ひずみ線図

(a) 圧縮強度

(b) 破壊ひずみ

(c) 50% ヤング率

図-4 物理的特性と試験温度の関係

(a) 秋吉大理石

(b) 稲田花崗岩

(c) 萩野凝灰岩

(d) 江持熔結凝灰岩

図-5 試験温度による力学的特性の変化

各岩石試料の加熱温度におけるこれらの値と常温 (20°C) 下での値とを比較するために、その比をとり、図-5 (a)~(d) に示す。これらの図に示したデータは 3~5 個の試験体の平均値である。各試験体のばらつきは図中にバーで示した。

これらの図から、秋吉大理石では圧縮強度は温度の上昇とともに減少するが、600°C では常温の 70% 近く保持している。破壊ひずみについては、破壊ひずみは温度の上昇とともに増加の割合が小さくなるが、常温に比べて 300°C では約 9 倍、600°C では約 14 倍に増加する。割線ヤング率は加熱温度の上昇に伴って減少し、300°C、600°C でそれぞれ常温での 25%、10% 程度となる。稲田花崗岩では圧縮強度は温度の上昇とともに低下し、その割合は大きくなり、常温に比べて、450°C においては約 55% となり、破壊ひずみは温度の上昇とともにしだいに大きくなり、450°C では常温の約 2 倍となっている。従って、割線ヤング率は温度の上昇とともに急激に減少し、450°C では常温の 25% 近くまで減少している。萩野凝灰岩では圧縮強度は常温に比べて、300°C までは僅かに減少するが、その後増加する傾向を示しており、破壊ひずみは加熱温度の上昇に伴って増加し、割線ヤング率は 300°C までは僅かに減少し、その後 600°C まではほぼ一定の値を示している。江持熔結凝灰岩では圧縮強度は加熱温度の上昇に伴って増加し、その割合はしだいに大きくなり、600°C で常温の約 1.7 倍に達する。破壊ひずみは温度上昇に伴って単調に減少し、600°C では常温の約 70% 位となり、割線ヤング率は加熱温度の上昇とともに増加し、その割合は大きくなり、600°C では常温の約 2.5 倍にも達している。

5. 考 察

前述したところから明らかなように、加熱により萩野凝灰岩では 300°C までいったん圧縮強度が低下するが以後増加に転じ、江持熔結凝灰岩では温度上昇とともに圧縮強度が増加する。しかし、秋吉大理石および稲田花崗岩では温度上昇とともに圧縮強度は低下する。本試験法とは異なるが、Griggs²⁾ および外尾⁴⁾ の報告にも類似した結論があり、後者の研究においても、加熱温度の上昇とともに、花崗岩や石灰岩では圧縮強度が減少し、安山岩や凝灰岩では増加し、砂岩では強度の増減の変化はあまりないと報告している。

ところで、江持熔結凝灰岩では温度上昇に伴って圧縮強度が増加するのに対し、萩野凝灰岩では 300°C において、わずかであるが、いったん圧縮強度が低下した後

増加に転ずる現象については、前者は火成岩に類似しており、その造岩鉱物は温度上昇による二次的变化が比較的少ないのに対して、荻野凝灰岩は火山碎屑物やガラスならびに火山岩の集積膠結されたもので、造岩鉱物やガラスの粘土鉱物化や沸石化が著しく、これらに伴う吸水および層間水の脱水がおわる¹¹⁾¹²⁾ 300°C まで圧縮強度が下がるものと考えられる。とくに、江持熔結凝灰岩では温度上昇に伴い割線ヤング率が大きくなり、破壊ひずみが減少するが、これは加熱されることで焼成され、細粒ガラス質鉱物と粒子の結合がより強固になることと、体積膨張により空隙充填が進むためで、荻野凝灰岩も 300°C 以後は同様な経過をたどり強固になると考えられる。

秋吉大理石では同一鉱物の方向配置の異方性が熱膨張の異方性を生じ、それぞれ結晶粒間に応力として作用し、粒界または粒内にクラックを発生させ、また、双晶、へき開を発達させ、しかも、温度上昇とともに、この現象が著しくなるためと考えられる。稲田花崗岩では異種鉱物の配列により、熱膨張の相異が生じた熱膨張の相違が造岩鉱物間に内部応力として作用し、粒界または粒内にクラックを発生させ、さらに 573°C 以上では石英が α 石英から β 石英への変態による体積の膨張¹³⁾ が加わりこの岩石を崩壊させると考えられる。また、600°C 以下では大理石の造岩鉱物たる方解石のへき開、双晶の生成の容易さが、上述した現象に重なり、秋吉大理石は稲田花崗岩に比して破壊ひずみが大きくなると思われる。

6. 結 言

加熱下における岩石の力学的挙動を知るために熱間圧縮試験を試作し、これを用いて一軸圧縮試験を行ない、秋吉大理石、稲田花崗岩、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩の各岩石試料について加熱下における圧縮応力ひずみ線図を求めこれから、圧縮強度、破壊ひずみ、割線ヤング率についても知見を得ることができた。

以下に、本研究での結果を要約すると、つぎのとおりである。

- 1) 加熱下における岩石の力学的挙動は、岩石試料によりかなり異なり、岩石によっては相反する傾向を示すものがある。
- 2) 圧縮強度と割線ヤング率は荻野凝灰岩では 300°C あたりまでは低下するが、これを超えると増加する。江持熔結凝灰岩では温度の上昇に伴ってこれらは増加する。これに対して秋吉大理石および稲田花

崗岩では温度上昇に伴って低下する。

- 3) 破壊ひずみは、江持熔結凝灰岩では温度の上昇とともに小さくなるが、他の岩石では大きくなる傾向がある。

参 考 文 献

- 1) 小林秀男, 小杉昌幸 (1980): 地熱開発の基礎知識 (4), 採鉱と保安, Vol. 26, No. 12, pp. 20-29
- 2) D. D. GRIGGS, F. J. TURNER and H. C. HEARD (1960): Deformation of rocks at 500° to 800°C in Rock Deformation. Geol. Soc. Am. Mem. 79, pp. 39-104
- 3) D. T. GRIGGS and T. HANDIN: Observations on fracture and Hypothesis of earthquakes, in Rock Deformation, Geol. Soc. Am. Mem. 79, pp. 347-364
- 4) 外尾善治郎, 高橋啓行 (1968): 高温度における岩石の強度に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol. 84, No. 964, pp. 1071-1076
- 5) 外尾善次郎, 大村昭士, 高島啓行 (1969): 高温度および氷点下温度における岩石の強度に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol. 85, No. 980, pp. 967-972
- 6) 山口梅太郎, 宮崎道雄 (1970): 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. 346-351
- 7) E. H. RUTLER (1974): The influence of temperature, strain and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks, Tectonophysics, Vol. 22, pp. 311-334
- 8) 緒方義広, 藤本 薫, 高多 明 (1978): 高温岩石の力学的特性の研究, 採鉱と保安, Vol. 24, No. 1, pp. 6-11
- 9) S. M. SCHMID, M. S. PATERSON and J. M. BOLAND (1980): High temperature flow and dynamic recrystallization in Carrar Marble Tectonophysics, Vol. 65, pp. 245-280
- 10) Y. INADA, A. OKADA (1985): Strength and deformation characteristics of rock at high temperatures and after receiving thermal hysteresis. 愛媛大学工学部紀要, 第 10 巻, 第 4 号, pp. 215-229
- 11) 日本粘土学会編 (1967): 粘土鉱物ハンドブック, 技報堂
- 12) ゼオライトとその利用委員会 (1967): ゼオライトの利用, 技報堂
- 13) 地団研地学事典編集委員会 (1971): 地学辞典, 平凡社
- 14) 東京天文台編 (1986): 理科年表, 丸善
- 15) F. E. HEUZE (1983): High Temperature Mechanical, Physical and Thermal Properties of Granitic Rock: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geotech., Vol. 20, No. 1, pp. 3-10

(昭和 61 年 5 月 30 日受付, 昭和 61 年 12 月 7 日受理)