熱衝撃疲労試験による岩石の物性変化の評価に関する研究

酒井 昇*・伊達和博**

Assessment of Thermal Shock Fatigue Tests in Rocks

Noboru SAKAI and Kazuhiro DATE

Abstract

We assembled a thermal shock fatigue testing machine that repeats the cycles of rapid heating by furnace and rapid cooling by water bath. Using this test machine, we investigated the damages of thermal shock fatigue process, in four kinds of rocks, observing the extension of rocks by thermal shock fatigue and the change of strength and physical properties. From the experimental result, we examined the relationship between the strength and other physical properties of the rocks.

The results are;

1. The process of crack extension by thermal shock fatigue could be divided into three stages, that is crack initiation, crack coalescence and fracturing of the rocks. Let T denote the testing temperature and N the number of repetition cycles of heating and cooling, and we could approximately express the relation as follows;

$$T = A_i N^{-k}$$

where k is the gradient and A_i is the stage of the crack initiation (A_1), the crack coalescence (A_2) and the fracturing of the specimen (A_3).

By examining the constants in the above expression, we can describe the properties of the thermal shock fatigue of the rock.

2. As the repetition cycles of heating and cooling increase, the early part of the stress-strain curve began to show the non-linearity. This is caused by the initiation and the coalescence of cracks.

3. Since the non-linear part of the stress-strain curve is considered to show the damages of thermal shock fatigue, we examined the validity of $\sqrt{E'}/\rho$ with the velocity of the primary wave, where E' is the secant modulus at 100 kgf/cm², which is correspond to the slope of early part of stress-strain curve. The results show that the degree of V_p or by examining the non-linear part of the stress-strain curves.

4. Contrasting the uni-axial compressive strength (S_0) against the 50% secant modulus (E_{50}) or the velocity of primary wave (V_p) shows that the increase or decrease, respectively, but the better correspondence is seen between S_0 and E_{50} than between S_0 and V_p .

1. 緒 言

古くから岩石を破壊または弱化する方法として、加熱または加熱・冷却する方法が行われてきた¹⁾。したがって、従来から岩石の加熱による力学的挙動についての関心は高く、幾多の報告もなされている^{2)~9)}。こうした背景のなかで、Simmons らは、熱疲労によって生じた岩石のなかのき裂を閉鎖させることにより、この応力と線

形ひずみの関係から、熱疲労を定量的に計測できる方法の提案を行っている¹⁰⁾。しかし、この面での研究は数少なく、いまだ十分に明らかになっていない点が多い。

一方、最近注目を集めている地下深所に存在する高温乾燥岩体からの熱エネルギーの抽出・利用に際して、還元井を介して水を送り込み、高温の蒸気または熱水として回収する¹¹⁾ので、高温乾燥岩体ならびに還元井周辺の岩盤に加熱、冷却を与えることになる。また、放射性廃棄物質の地層処分において、放射性物質の壊変に伴うガラス固化体の発熱によって、キャニスタ周辺の岩盤は、

* 宮城工業高等専門学校材料工学科

** 宮城工業高等専門学校機械工学科

地層処分の方法によって 300°C 程度になることもある¹²⁾とされているところから、地下水の循環によって岩盤は熱疲労を受けることにもなり兼ねない。このように岩石が加熱と冷却の繰り返しを受けた場合の力学的挙動についての評価法を確立することは、今後の地下熱の利用、放射性廃棄物の地層処分などを検討する上でも有用と考えられる。

そこで、本研究では岩石試験片を炉内で一定温度に加熱した後、水中で急冷して熱衝撃*を与え、これを繰り返す型式の熱衝撃疲労試験機を製作して、加熱・冷却の繰り返しによる岩石試験片の破壊の進行過程と、それに伴う強度などの物性変化を調べた。さらにこれらの結果をもとに、破壊の進行過程と、物性変化の相互関係について検討した。

2. 岩石試料

岩石の熱衝撃疲労による破壊は、構成鉱物の種類、組み合わせ、結晶の大きさなどが微妙に影響すると考えられ、また、試験結果の評価を行うために、まず、物性などのバラツキの少ない岩石が好ましいと思われる。こうした点を考慮して予備的検討を行い、比較的強度などの物性のバラツキが少ない岩石を選び、非晶質岩の荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩、結晶質岩の秋吉大理石、稲田花崗岩の4岩種について試験を行うことにした。まず、試験に先立ちこれら4岩種の顕微鏡写真を写真-1 a~d に示し、その岩石の特徴について述べる。

(a) 荻野凝灰岩 (福島県耶麻郡高郷村産)

主として、径 0.01 mm 以下の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Y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。

(b) 江持熔結凝灰岩 (福島県須賀川市産)

レンズ状組織を呈し、径 0.1~2 mm 程度の斜長石、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、これに晶子が含まれている。

(c) 秋吉大理石 (山口県美祢郡秋吉台地方産)

ほぼ径 0.1 mm 程度の等粒の方解石の地形糖状組織を示し、へき開、双晶が発達している。

(d) 稲田花崗岩 (茨城県笠間市産)

径 0.1~3 mm 程度 of 他形粒状組織で、主な構成鉱物

* セラミックスなどの機械的性質を調べる試験法で、このように急冷することによる、破壊挙動を調べる方法を熱衝撃試験と言う¹³⁾ので、ここでは、これに従う呼び方をした。

写真-1 a 岩石の顕微鏡写真 (荻野凝灰岩)

写真-1 b 岩石の顕微鏡写真 (江持熔結凝灰岩)

写真-1 c 岩石の顕微鏡写真 (秋吉大理石)

写真-1 d 岩石の顕微鏡写真 (稲田花崗岩)

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。

試験片の作製に当たっては、できるだけ測定結果のバラツキを抑えるために、同一岩石ブロックから圧縮方向が岩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 25 mm、高さ 50 mm の円柱状の試験片を作製した。なお、両端面の平行度は、 $\pm 2.5/100$ mm である。整形された試験片は、整形に際して使用した水などからの含水量に基づくバラツキを防止するために、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に 2 週間放置し、さらに試験に供するまで密封したデシケーターの中で保存した。

3. 試験装置および試験方法

図-1 に示す熱衝撃疲労試験装置は、加熱炉 FB の上部にドラムを取り付けた誘導電動機 M を、下部に水冷容器 B を配置して、ドラム、炉心、水冷容器が鉛直になるように固定されている。試験片の加熱・冷却の繰り返しは、誘導電動機に取り付けられたドラムの回転、反転により試験片を積み込んだケージを炉心と水冷容器の間で上下させて行った。なお、ケージの昇降の停止点はマイクロスイッチで微調整され、加熱炉の温度制御はスラ

イダックとレギュレータを用い、炉心に設定した熱電対の指示に従って作動して行った。また、試験片を積み込んだケージの上昇、下降に要する時間は約 20 秒であり、所定の温度に加熱した試験片を水で急冷し、熱衝撃を与えることが出来るようにしてある。

試験片の加熱温度は、水の沸点および石英の相転移点を越えたそれぞれ 150°C、600°C とし、この中間の 300°C でも試験を実施した。なお、稲田花崗岩および秋吉大理石は 600°C で試験開始後、間もなく崩壊するので、450°C でも試験を行った。加熱時間および冷却時間は、全岩種の試験片中心部が所定温度となる、それぞれ 30 分および 11 分 20 秒とした。このような条件で、試験片に熱衝撃疲労を与えた場合の試験片中心部の温度変化の例を図-2 に示す。また、それぞれ各岩石試験片の中心温度が水温とほぼ等しくなる時間を測定した結果を表-1 に示す。ただし、ここでは最高と最低の試験温度（加熱温度）の場合についてのみ測定した。なお、試験片の中心温度を測定するためには、実際の試験片と同じ直径を有する長さ 60 mm の円柱試験片を各岩石について作成し、中心に $\phi 2.5 \times 35$ mm の孔をあけ、これにクロメル・アルメル熱電対を差し込み、外気に曝さぬよう同種岩粉を詰め最低 50 mm 以上はこれを水没させて測定した。ただし、熱電対を差し込んだ孔の部分は水没せぬようにした。したがって、実際の試験片よりも水に浸っている面積が僅かながら小さいことになり、実際の試験片では

図-1 熱衝撃疲労試験装置

図-2 試験片中心部の温度変化

表-1 岩石試験片中心部が水温に等しくなるまでの所要時間

温 度 (°C)	荻 野 花 崗 岩	江 持 安 山 岩	秋 吉 大 理 石	稲 田 花 崗 岩
1 5 0	7 ' 4 0 "	4 ' 3 0 "	4 ' 4 0 "	3 ' 4 0 "
4 5 0			7 ' 5 0 "	5 ' 5 0 "
6 0 0	1 1 ' 2 0 "	5 ' 5 0 "		

表-1 に示した時間よりも、より短かい時間で試験片中心部が水温と等しくなる。

測定した岩石の物性は、一軸圧縮強度、縦波速度（以後、縦波を P 波と呼ぶ）、見掛け密度および 50% 割線ヤング率である。 P 波速度の測定は精密級ウルトラソニックスコープ（マルイ製作所製）を用い、50 kHz 超音波パルス伝播法によって行った。 $X-Y$ レコーダによって荷重-変位線図を描き、これから応力-ひずみ線図、一軸圧縮強度ならびに 50% 割線ヤング率を求めた。見掛け密度は試験片の直径と高さから体積を算出したが、測定に際しては岩片の脱落したものは除いた。

試験手順としては、2 週間以上デシケータ中に保持した試験片の重量、 P 波速度、体積の初期値を測定し、一つの試験温度に対して、それぞれ、5、25、125、625 回（5" 回となるようにした。）の加熱・冷却の繰り返し回数を与えた後、試験を中断し、試験片のき裂の状態を観察するとともに、それぞれの物性を測定した。ただし、稲田花崗岩、秋吉大理石で急激に破壊が進む場合、すなわち、稲田花崗岩においては 600°C 、秋吉大理石においては 450°C では、繰り返し回数 2 回で測定を行った。なお、1 つの試験条件では 3 個の試験片を用い、625 回以前に崩壊した場合は、その崩壊に至るまでの繰り返し回数を記録した。

熱衝撃疲労試験は、予め昇温した炉内に、試験片を入れたケージを上昇させて開始し、所定回数の水冷の後、炉内で 30 分以上乾燥させてから室温まで徐冷した。

なお、試験に先立って測定したそれぞれの岩石の圧縮

強度 S_{c0} 、ヤング率 E_0 、 P 波速度 V_{p0} の初期値の平均値とバラツキの範囲を表-2 に示す。

4. 試験結果および考察

4.1 熱衝撃疲労破壊線図について

各岩石の熱衝撃疲労に基づく破壊は、き裂の形状、発生の態様に多少の差異が見られるが、いずれの岩石も同様に試験片の各部分でき裂が発生し、それが進展して合体し、試験片全体に至るような大きなき裂となり、さらに進行して試験片が破壊するという過程をたどった。ここでは、熱衝撃疲労による岩石の破壊進行過程の特徴を表すために、破壊に至るまでの過程をき裂の発生、合体、破壊と 3 つの過程は分類して検討した。

以下、各岩石試験片に見られた破壊の進行過程の特徴について述べ、併せて、き裂の発生、合体、破壊の定義、それに基づいて分類した熱衝撃疲労破壊と繰り返し回数、試験温度の関係について述べる。

写真-2 a 荻野凝灰岩のき裂の進展過程（発生）

写真-2 b 荻野凝灰岩のき裂の進展過程（合体）

表-2 末試験岩石試験片のヤング率 E_0 、圧縮強度 S_{c0} 、および P 波速度 V_{p0}

岩 種	E_0 (kg f / cm ²)		
	平 均	最 小	最 大
荻 野	0.8595	0.7605	0.9608
江 持	0.7555	0.7445	0.7696
秋 吉	5.127	5.034	5.256 ¹
稲 田	4.8757	4.728	5.014
S_{c0} (kg f / cm ²)			
岩 種	平 均	最 小	最 大
荻 野	662.3	612.9	750.3
江 持	684.6	656.1	671.1
秋 吉	1288	1201	1380
稲 田	2024	1976	2056
V_{p0} (km / sec)			
岩 種	平 均	最 小	最 大
荻 野	3.066	3.039	3.099
江 持	3.117	3.045	3.183
秋 吉	6.643	6.600	6.667
稲 田	4.879	4.601	5.319

写真-2 c 萩野凝灰岩のき裂の進展過程 (破壊)

写真-2 a~c は萩野凝灰岩の試験片において観察されたき裂の発生, 合体, 破壊の典型を示す。とくに, 写真-2 a は円柱試験片の上端を見たもので, 加熱, 冷却による半径方向の非定常熱応力により発生した小き裂が認められる。また, 円周側面には軸方向に伸びる小き裂の発生が認められた。ここでは, このようなき裂を有する試験片を発生過程にあるものとして定義した。写真-2 b は端面に連鎖していた小き裂は連続して合体し, 一部分が開口している。また, 円周側面の小き裂は, 大きく伸展して両端面に至るものもある。しかし, その形状は単純で, せいぜい枝分かれき裂の形状を示している。このような状態を合体と定義した。写真-2 c は半径方向のき裂は中心を通して大きく開口している。円周側面の枝分かれしたき裂は隣接したき裂と合体して複雑な網目模様を呈し試験片内部へ深く刻侵し, 一部表面が剝離, 開口している。この時期を破壊と定義した。

図-3 a は, 本試験で使用した萩野凝灰岩の試験片を, 試験後, そのき裂の状態を観察することにより, それぞれ, 上述の定義にしたがって分類し, 試験温度と繰り返し回数の両対数関係に対してプロットしたものである。

図-3 a 熱衝撃疲労破壊線図 (萩野凝灰岩)

図-3 b 熱衝撃疲労破壊線図 (江持熔結凝灰岩)

図-3 c 熱衝撃疲労破壊線図 (稲田花崗岩)

図-3 d 熱衝撃疲労破壊線図 (秋吉大理石)

写真-3 a 江持熔結凝灰岩のき裂の進展過程 (発生)

写真-3 b 江持熔結凝灰岩のき裂の進展過程（合体と破壊）

ここでは、この発生、合体、破壊過程の温度と加熱冷却の繰り返し回数の関係を他の岩種と比較検討するためにそれぞれ 3 本の平行な直線で、発生、合体、破壊に対応する点を近似的に結んでみた。これが図中に示した 3 本の発生、合体、破壊に対応する直線である。ここでは、この線図を熱衝撃疲労破壊線図と呼ぶ。なお、同一の条件での試験は、各 3 個の試験片で試験しているので、ここでは、それら個々の試験結果をそのまま記入してある。

この図からわかるように試験温度が上昇するに従ってき裂の発生、合体、破壊の過程がより少ない繰り返し回数で生ずるような傾向になっていることがわかる。

写真-3 a, b は、前述の定義に従って分類した江持熔結凝灰岩のき裂の発生、合体、破壊の典型例を示す。写真-3 a は試験片の端面に放射状の細かいき裂が発生し、円周側面にも軸と直交する微細き裂の発生が認められる例で、これを発生とした。写真-3 b は、き裂の合体と破壊の模様で、中央の試験片が合体、両側が破壊したものである。

図-3 b は江持熔結凝灰岩の熱衝撃疲労破壊線図である。写真-4 は、秋吉大理石の合体破壊過程を示したものであり、写真-5 は稲田花崗岩についての例を示す。また、図-3 c および d はそれぞれ稲田花崗岩および秋吉大理石についての熱衝撃疲労破壊線図である。以上述

写真-4 秋吉大理石のき裂の進展過程（合体）

写真-5 a 稲田花崗岩のき裂の進展過程（合体）

写真-5 b 稲田花崗岩のき裂の進展過程（破壊）

表-3 き裂の発生の場所、形状、方向、進展態様

岩 石	発生場所	発 生	合 体	破 壊	進 行
荻野凝灰岩	端面 円周側面	同心円状き裂 放射状き裂 軸に平行き裂	主副別にき裂の発達 軸平行き裂	玉葱状	発生は早く 進行は緩慢
江持熔結凝灰岩	端面 円周側面	放射状き裂 軸直交き裂	開口刻痕	塊状	発生後急速
秋吉大理石	端面側面	虫食孔状	破断分離	粉粒塊状	進行急速
稲田花崗岩	端面 円周側面	長石石英の粒界 ついて粒内に網状き裂	破断分離 放射状き裂	粉粒状 塊状	進行急速

べた各岩石に見られたき裂について方向、形態を破壊過程との関連でまとめて表-3で示す。

4.2 熱衝撃疲労破壊線図による岩石の熱衝撃疲労特性の評価

図-3 a~d の熱衝撃疲労破壊線図で示した各岩石のき裂の発生、合体、ならびに破壊を示した直線は次の式で表すことができる。

$$T = A_i \cdot N^{-k} \quad (1)$$

但し、 N ：加熱冷却の繰返し回数

T ：加熱温度

A_i ：定数 ($i=1, 2, 3$ で数字は、それぞれ、図-3 のき裂の発生、合体、破壊に対応する直線の定数を示す。)

k ：定数

一方、(1) 式を N について書き直すと、(2) 式を得る。

$$N = C_i \cdot T^{i/(1/k)} \quad (2)$$

但し、 $C_i = A_i^{(1/k)}$

なお、断わるまでもないが、熱衝撃疲労破壊線図から求めた (1) 式は当然に回帰式である。しかし岩石の熱衝撃疲労の破壊過程に関する力学的特徴を説明するには大変に有効なので今しばらくこれを用いて説明する。

ここで、(1) 式の定数 k は、図-3 に示す温度と繰返し回数との関係を表す直線の傾きであり、傾きが大きいことは試験温度を変えた場合のき裂の発生、合体、破壊過程の依存性が比較的穏やかであることを意味し、逆に k の値が小さいことは温度依存性が大きいことを示している。(1) 式の定数 A_i は式の上から1回の繰返し数でき裂の発生、あるいは合体、破壊に達する温度である。各岩石でこれらの温度に差異が生じるのは、それぞれの状態に達するまでの非定常熱応力の大きさが異なるためと考えられる。また、 A_i は k の値と関連してき裂の発生、合体が生じる温度の高低の目安となる。(2) 式の係数の比、 C_2/C_1 、 C_3/C_2 は、発生、合体、破壊に対応する直線の横の間隔を示すものであるから熱衝撃疲労によるき裂の進展、すなわち、き裂の発生から合体、合体から破壊までの加熱冷却の繰返し回数の大小を表し、熱衝撃疲労によるき裂進展速度の目安になるものである。表-4 はこれらの値をそれぞれの岩石について求めたものを示す。

表-4 岩石の熱衝撃疲労破壊線図の係数

岩	荻野 凝灰岩	江 持 熔結凝灰岩	秋 吉 大理石	稲 田 花崗岩
k	0.249	0.211	0.214	0.120
A_1 (C)	450	830	420	530
A_2 (C)	900	1180	600	660
A_3 (C)	2000	1800	800	800
C_1	4.34×10^{10}	7.08×10^{13}	1.84×10^{12}	$5.04 \times 10^{12.2}$
C_2	7.04×10^{11}	3.76×10^{14}	9.74×10^{12}	$3.13 \times 10^{13.3}$
C_3	1.73×10^{13}	2.78×10^{15}	3.69×10^{13}	$1.56 \times 10^{14.4}$
C_2/C_1	16.22	5.31	5.29	6.21
C_3/C_2	24.57	7.36	3.78	4.98

これらの表から、それぞれの岩石について、熱衝撃疲労によるき裂の特性を述べる。 k の値を見ると、荻野凝灰岩、江持熔結凝灰岩、秋吉大理石はおおよそ $k=0.2$ であるのに対して、稲田花崗岩は $k=0.12$ と他の岩石の約半分の値となっており、傾きが小さい。これは稲田花崗岩がある温度範囲で特性が急激に変化することを示しており、本試験の範囲内の場合には、 $300^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ の範囲の A_1 に対応し、それ以下ならば熱衝撃疲労を加えても何の変化もなく、それ以上であるならば、直ちに破壊するという急激な変化であった。これは図-3 d

で示すように発生、合体、破壊の 3 本の直線の縦の間隔の狭いことから、このような特性があることわかる。

発生に関連する A_1 で見ると、江持熔結凝灰岩が最も高いことは、それら 3 種の岩石の中ではき裂が最も入り難いことを示している。

ついで、荻野凝灰岩は A_1 の値が小さいにもかかわらず、 A_3 の値が大きく、また、 C_2/C_1 、 C_3/C_2 の値が他の岩石に比べて大きいことから、試験温度の低い段階で試験片にき裂の発生が見られるが、これが合体し、さらに破壊することは緩慢で、熱衝撃疲労破壊が容易に進行しないことを示す。これに対して、 k および A_1 の値が荻野凝灰岩とほぼ同じで、 C_2/C_1 および C_3/C_2 の値が荻野凝灰岩より小さい秋吉大理石は、比較的低温でき裂が発生し、しかも発生から合体、合体から破壊への進行が比較的速いことを示している。この現象は本試験において、しばしば認められており、たとえば、荻野凝灰岩において、き裂が試験片の本体に深く刻侵しても、なかなか破壊しないことと一致している。

また、江持熔結凝灰岩と秋吉大理石とを比較すると、 k の値や C_2/C_1 の値がほとんど同じであることから、秋吉大理石の直線を平行に上に移動したものが江持熔結凝灰岩になっていることがわかる。 A_1 の値で比較すると、約 2 倍の差があることから江持熔結凝灰岩は秋吉大理石に比べて温度特性が約 2 倍高いことがわかる。すなわち、一定の繰返し回数を考えた場合、き裂の発生、合体、破壊の温度が、秋吉大理石に比べて江持熔結凝灰岩ではそれぞれ約 2 倍高いことを示している。

以上を、まとめると非晶質岩である荻野凝灰岩は比較的早い繰返し回数でき裂が発生するものの試験温度が上昇し、加熱冷却の繰返し回数が増加してもかなり強靱に持ちこたえるのに対して、江持熔結凝灰岩ではき裂の発生は比較的遅く試験温度は高く繰返し回数が多くなってから開始されるが、き裂発生後は合体、破壊への進行は急速である。一方、秋吉大理石は江持熔結凝灰岩の約半分の温度で同じ破壊過程が生じることがわかった。また、稲田花崗岩ではある温度を過ぎると、き裂が急激に発達して破壊に至ることがわかった。

このように、所定の試験温度で、一定の加熱冷却の熱衝撃疲労を受けた試験片のき裂の状態を観察し、それを発生、合体、破壊に分類して、それぞれの試験温度と加熱冷却の繰返し回数との関係を検討することにより、定性的ではあるが、それぞれの岩石の熱衝撃疲労破壊の特性を明らかにすることができた。

さらに、これら岩石の熱衝撃疲労をき裂発生面から考察検討してみたい。熱衝撃疲労を受けた試験片に生じ

るき裂の原因として考えられることは、1) 急熱、急冷によって試験片内に温度差を生じ、これによって発生する多軸応力状態の非定常熱応力が試験片全体に作用する効果、2) 組織鉱物間の線膨張係数の差異や同一鉱物における結晶軸の異方性によって生ずる微視的な熱応力が影響する効果、3) 粘土鉱物ならびに沸石の脱水、石英の相転移などの岩石の微視構造変化が与える効果、4) 構成成分の水などに溶解することによって生ずる効果¹⁴⁾、5) これらの繰返し、重合が及ぼす効果などがあり、これらが複雑に絡み合って進行すると考えられている^{15), 16)}。

まず、非晶質岩である荻野凝灰岩および江持熔結凝灰岩は顕微鏡観察から推測しうのように、基質は微細なガラス片またはそれから変化した粘土鉱物などの膠結からなり、空隙率が高いため緩衝帯の役を果たし 2) が直接作用することは少なく、き裂の発生は主として 1)、4) ならびに 5) によるものが多いと考えられる。たとえば、荻野凝灰岩試験片の両端面に発生する同心円状または放射状の小さき裂、円周側面に発生する中心軸に平行な小さき裂、また江持熔結凝灰岩の両端面に発生する放射状の小さき裂および円周側面に中心軸に直交する小さき裂は主として 1) に起因すると考えられる。一方、基質を構成するガラス質粒子ならびにこれから変質した粘土鉱物は、温度の上昇または繰返しによる焼成時間の累積により、膠結力が強まり強度が増加するとともに、き裂が発生し難くなることが確認されている¹⁵⁾。したがって試験温度の上昇または加熱冷却の繰返し回数の増加による膠結力の上昇を非定常熱応力が凌ぐ迄は破壊が進まぬと考えられる。

なお、き裂が合体、破壊と進行するにつれて荻野凝灰岩に玉葱状剥離や軸方向に開口した割れが発達するのに対して、江持熔結凝灰岩では中心軸を通るき裂と、これに直交する面を持つき裂が発達し、塊状に割れが進行していくのは、江持熔結凝灰岩に存在するガラス質レンズが軸方向に垂直な面にあるためと考えられる。

ついで、秋吉大理石または稲田花崗岩は顕微鏡写真から明らかなように結晶質構造であるため、熱衝撃疲労によるき裂は 2) により発生する場合が多く、その組織構造から 1)、5) によるものも少なからず、さらに高温においては 3) によるものも考えられる。なお、秋吉大理石が比較的低温からき裂が発生するのに、稲田花崗岩が低温でき裂が発生し難いのは、秋吉大理石を構成する方解石の a 軸と c 軸の線膨張係数の比が、約 $1:5^{17)}$ であるのに対して、石英ならびに長石の線膨張係数の比はそれぞれ約 $1:2^{17)}$ 、約 $1:1.5^{18)}$ であり、前者が後者

写真-6 a 秋吉大理石のき裂の進行 (初期状態)

写真-6 b 秋吉大理石のき裂の進行 (300°C, 5 回の状態)

写真-7 a 稲田花崗岩のき裂の進行 (初期状態)

写真-7 b 稲田花崗岩のき裂の進行 (300°C, 5 回の状態)

に比べて余程大きいことに原因があると考えられる。

なお、これらの経過過程を熱衝撃疲労を受けない試験片と 300°C において加熱冷却の繰り返しを 5 回受けた試験片の反射顕微鏡写真を秋吉大理石及び稲田花崗岩についてそれぞれ 写真-6 a, b および 写真-7 a, b に示す。このような経過を経て膠結力が弱まると、始めて 1) による半径、または中心を通るき裂が両端面に見られるようになる。したがって破壊は 1) による塊状のもの、または 2) による粉状、粒状のものが多い。

4.3 物性値の変化

図-4 及び 図-5 は本実験で得られた見掛け密度 (ρ) と P 波速度 (V_p) の変化を初期値の比で示したものである。これらの値は試料 2~3 個から得た平均値であり試験片が崩落して 1 個のみの場合もある。

見掛け密度 (ρ) は荻野凝灰岩のみに低下がみられ、他の岩石は 600°C までの試験では、ほとんど変化しない。荻野凝灰岩の場合、試験温度とともに低下率が大きくなり、600°C で約 1 割の低下をきたすが、加熱冷却の繰り返し回数に対しては大部分の低下は 5 回以内におこり、その後の変化は小さい。

P 波速度 (V_p) は、試験温度 150°C においては、荻

図-4 熱衝撃疲労試験過程における見掛け密度 ρ の変化 図-5 熱衝撃疲労試験過程における P 波速度 V_p の変化

野凝灰岩や江持熔結凝灰岩には殆ど変化は見られない。しかし、秋吉大理石や稲田花崗岩ではかなり低下している。加熱温度 300°C 以上になると、荻野凝灰岩や江持熔結凝灰岩を含めて、いずれの岩石もかなり低下している。また、加熱冷却の繰り返し回数に関しては、各岩石とも 5 回以内の低下率が大きく、それ以上の加熱冷却の繰り返し回数では低下率が小さくなっている。

図-6 a~d は本試験で得た各試験片の応力-ひずみ線図の代表的な例である。

応力-ひずみ線図は一般に試験温度が高く、加熱冷却の繰り返し回数が多いほど、応力-ひずみ線図の立ち上

がり部分、いわゆる、非線形部分が増加し、圧縮強度が低下する傾向がある。立ち上がり付近の非線形部分から荷重の増加とともに線形へ移行するが、この線形部分では試験温度が低く、加熱冷却の繰り返し回数が少ないほ

図-6 a 熱衝撃疲労試験の回数による圧縮応力-ひずみ線図における変化 (荻野凝灰岩)
但し、図中の 0, 1, 2, 3 は熱衝撃疲労回数 5^n の n を示し、0 は試験前のデータを示す。

図-6 b 熱衝撃疲労試験の回数による圧縮応力-ひずみ線図における変化 (江持熔結凝灰岩)
但し、図中の 0, 1, 2, 3 は熱衝撃疲労回数 5^n の n を示し、0 は試験前のデータを示す。

図-6 c 熱衝撃疲労試験の回数による圧縮応力-ひずみ線図における変化 (秋吉大理石)
但し、図中の 0, 1, 2, 3 は熱衝撃疲労回数 5^n の n を示し、0 は試験前のデータを示す。

図-6 d 熱衝撃疲労試験の回数による圧縮応力-ひずみ線図における変化 (稲田花崗岩)
但し、図中の 0, 1, 2, 3 は熱衝撃疲労回数 5^n の n を示し、0 は試験前のデータを示す。

ど、熱衝撃疲労を受けない試験片の応力-ひずみ線図と傾きが平行であり、試験温度が高く、加熱冷却の繰り返し回数が多くなるほど、平行には到達できず緩くなっている。しかしながら、江持熔結凝灰岩は、試験温度 150°C において、かえって、非線形部分が認められず、傾斜は急で圧縮強度も増加している。

江持熔結凝灰岩においては、試験温度の上昇とともに圧縮強度が増加していることは、基質を構成する粘土鉱物の脱水、焼成による膠結力の増加によることは前述した。したがって試験温度 150°C においては、冷却温度との差が小さく、加熱冷却の繰り返し回数による熱衝撃疲労が加ってもその劣化効果は小さく、かえって加熱による膠結力の上昇のための圧縮強度が増加していると考えられる。試験温度が大きくなり、熱衝撃疲労の劣化効果が增大すると、膠結力の上昇より劣下が上まわり、圧縮強度の低下が顕化すると考えられる。

図-7、図-8 は、図-6 で示したような応力-ひずみ線図の最大荷重から求めた圧縮強度 S_c の変化と、50% 割線ヤング率 E の変化を示す。ここでも、それらの値は、3 個の平均値であり、初期値 S_{c0} 、 E_0 との比でとってある。

圧縮強度 S_c は、岩石によってかなりの差異がみられ

図-7 圧縮強度 S_c の変化

図-8 50% 割線ヤング率 E の変化

る。荻野凝灰岩の 150°C では S_c はほとんど一定である。江持熔結凝灰岩では 150°C で繰り返し 5 回で一旦低下して以後上昇し、300°C、600°C では繰り返し 5 回で一旦上昇して以後低下している。秋吉大理石も 150°C、繰り返し 5 回で一旦低下し、以後上昇しており、稲田花崗石でも一旦低下するが、以後上昇している。

各岩石に与える試験温度や加熱冷却の繰り返し回数と 50% 割線ヤング率 E との関係については、秋吉大理石だけが、試験温度や加熱冷却の繰り返し回数の増加とともに低下する傾向を示している。江持熔結凝灰岩では各試験温度において全般的に上昇傾向を示すが、600°C、繰り返し 125 回において大きく低下している。荻野凝灰岩は試験温度 150°C における 5 回以上の繰り返しにおいてやや上昇の傾向を示すが、他の試験温度において減

図-9 圧縮強度 S_c と 50% 割線ヤング率 E との関係

図-10 圧縮強度 S_c と P 波速度 V_p との関係

少している。稲田花崗岩は試験温度全般に低下しているにも拘らず試験温度 150°C において繰り返し5回で一旦低下した後増加している。

図-9 は E/E_0 と S_0/S_{00} の関係、図-10 は V_p/V_{p0} と S_0/S_{00} との関係を示す。これより S_0 の低下とともに E も低下しており、 S_0 と E とがほぼ対応しているようにも見られる。これに対して V_p/V_{p0} と S_0/S_{00} の関係では、江持熔結凝灰岩を除くと S_0 の低下とともに V_p も、ほぼ同様に低下する傾向が見られるが、江持熔結凝灰岩は熱衝撃を加えると強度が増加しており、それに対して V_p の変化には必ずしも対応していないようであった。

4.4 応力ひずみ線図と P 波速度の相互関係について

それぞれ岩石の物性に対する試験温度と繰り返し回数の変化は以上の通りであるが、ここでは、まず、応力-ひずみ線と P 波速度の相互関係について検討してみた。本試験で得られた応力-ひずみ線図の熱疲労による変化は、一般的に、応力-ひずみ線図の立ち上がり部分が、直線から非直線になり最初の立ち上がりの傾きが、小さくなることは図-6 で示した。このように応力-ひずみ線図の立ち上がり部分に非線形部分が生じるのは、熱衝撃疲労により、岩石の内部にき裂が発生し、空隙を生じ、さらに、それが図-3 で示したようにき裂の発生、合体へと進行して行くためと考えられる。また、P 波速度の変化は空隙率の変化に対応するものと考えられているものの、連続体力学を用いた弾性論では材料のヤング率 E と密度 ρ の関係 $\sqrt{E/\rho}$ に比例する（正確には、この式の棒状物体にのみ適用され、縦波横波のような超音波ではヤング率、剛性率、ポアソン比を含んだ式となる）ことがわかっている¹⁹⁾。図-6 a~d に示すような非線形部分を有する応力-ひずみ線図のヤング率 E を超音波との関連では、どのように規定するかについては明確ではないが、ここでは、P 波が引張り、圧縮の応力波

であり、その応力レベルは極めて小さいこと、応力-ひずみ線図を測定した応力が軸方向と同一であること、使用した超音波の周波数が 50 kHz で波長に換算すると 60 mm~120 mm ($V_p=3000\sim6000$ m/s として) であり、岩石の結晶粒が最大数 mm のオーダーでそれに比べて非常に小さいことから、上述の連続体力学の理論を適用できると考えた。そこで、一つの試みとして、応力-ひずみ線図の非線形部分の立ち上がり付近を代表する意味で、100 kgm/cm² における割線ヤング率 E' （ここでは、便宜的にこのように呼ぶ）を求め、これと ρ の値から $\sqrt{E'/\rho}$ を計算し、 V_p との対応関係を調べてみた。これを図-11 に示す。なお、ここでも、初期の $\sqrt{E_0/\rho}$ で無次元化してある。これからわかるように、 V_p と $\sqrt{E'/\rho}$ の関係は、ほぼ直線関係にあり、P 波速度が、応力-ひずみ線図の勾配に対応するヤング率に依存していることがわかった。さらに、本試験で得られた V_p の値を図-3 に示したき裂の発生、合体と発生以前に分けたものを図 12 に示す。これからもわかるように試験片中にき裂が発生し、それが進行して合体して行くに従って V_p の値が低下して行くことがわかる。

応力-ひずみ線図は立ち上がり部分の非線形部分を過ぎると、直線的に上昇し最大荷重を示した後破壊する。ここでは、次に、この直線部分の傾きを調べた。これを

図-11 100 kgf/cm² における割線ヤング率 E' と見掛け密度 ρ の比の平方根と P 波速度と関係

図-12 き裂の発生、合体、における P 波速度 V_p

図-13 熱衝撃疲労試験の繰り返し回数による圧縮応力-ひずみ線図の線形部分の傾き

図-13 に示す。これからわかるように、非線形部分を過ぎた後の直線部分の傾きは、熱衝撃疲労による繰返し回数にはほとんど依存せず、一定値を示していることがわかる。これは、圧縮試験において熱衝撃疲労により発生した空隙、き裂が非線形部分では押し潰されてゆき、それがすべて閉じてしまった後は、応力-ひずみ線図が直線的に立ち上がってゆくと考えられる。従って空隙やき裂がほとんど閉じてしまった後の応力とひずみの関係は熱衝撃疲労の繰返し回数に、ほとんど依存しなかったものと思われる。

このように、岩石が熱衝撃を受けて疲労していく過程は、き裂の発生、合体の過程であり、それが圧縮応力-ひずみ線図の立ち上がり部分が非線形になる形で現われることと、それが P 波速度の変化としてとらえられることがわかった。

4.5 熱衝撃疲労過程と圧縮強度 (S_0)、ヤング率 (E) ならびに P 波速度 (V_p) との関係

熱衝撃疲労過程を発生、合体、破壊と分類することにより、岩石の力学的特性を定性的ではあるがかなり良く説明することができた。そこで、実測した岩石物性値、たとえば、圧縮強度 (S_0)、ヤング率 (E)、ならびに P 波速度 (V_p) について、き裂の発生直前、き裂発生、合体、破壊のそれぞれの対応点における測定値について比較検討することにした。もともと発生、合体、破壊は熱衝撃疲労破壊過程における試験片の破壊の進展度合、き裂の態様から分類したものであり、それぞれの対応点は明らかに試験温度、繰返し回数を異にする。これらの検討結果について S_0 ならびに E に関しては、図-14 a, b に示す。なお、 V_p に関しては 図-12 を参照されたい。

これらによれば、試験温度、熱衝撃疲労の繰返し回数が異なるにも拘らず対応する測定点においては比較的近い値または同一の値を示し、熱衝撃疲労破壊過程の進展に伴って低下し、それぞれの差巾を狭める様相を示している。たとえば、圧縮強度 (S_0) について、荻野凝灰岩は発生においてややばらついた値を示すが、合体においてはそのばらつきは著しく狭まる。他の三岩種はき裂の発生直前、き裂の発生、合体ともにそれぞれの値が同一もしくは著しく近い値を示している。 P 波速度 (V_p) については、荻野凝灰岩は発生から比較的近い値を示し、合体においては同一の値となっている。他の三岩種はそれぞれ発生、合体において近い値を示している。また、50% 割線ヤング率 (E) に関しては荻野凝灰岩および秋吉大理石は発生においてはばらつきのある値を示すが、合体においてはかなり接近した値となり、江持熔結

図-14 a 熱衝撃疲労破壊過程のき裂の発生、合体、破壊と S_0/S_{0i} の関係

図-14 b 熱衝撃疲労破壊過程のき裂の発生、合体、破壊と E/E_i の関係

凝灰岩および稲田花崗岩においては発生直前、発生、合体ともに同一の値もしくは著しく近い値を示している。

以上のように、熱衝撃による試験片の破壊進展、態様から分類した発生、合体、破壊における力学的特性値が、それぞれ試験温度、熱衝撃疲労の繰返し回数が相異なるにも拘らず、かなり近い値もしくは同一の値を示すことは、本分類の妥当性を示すものと考えられる。

5.5 結 言

岩石試験片を加熱炉内で急熱した後、水に入れて急冷することを繰り返す熱衝撃疲労試験機を製作して、熱衝撃疲労破壊の過程と岩石の強度などの物性が、どのように変化するかを調べた。その結果から、岩石の熱衝撃疲労がどのように進行するか、また、それと強度などの物性値がどのような関係になっているかについて検討した。得られた知見は以下のとおりである。

1) 各岩石の熱衝撃疲労に基づく破壊は、き裂の形態に多少の差異は見られるが、いずれの岩石も同様にき裂の発生、合体、破壊の過程をたどる。この試験温度を T 、加熱冷却の繰返し回数を N と表すと、これらの間を $T = A_i \cdot N^{-k}$ (ただし、 k は勾配) の関係で近似することができた。ただし、 A_i ($i=1, 2, 3$) は、 A_1 が発

生, A_2 が合体, A_3 が破壊に対応する。

2) この式の定数を検討することにより岩石の熱衝撃疲労の特性を表すことができた。すなわち, 非晶質岩である荻野凝灰岩は比較的早い繰り返し回数でき裂が発生するものの試験温度が上昇し, 加熱冷却の繰り返し回数が増加してもかなり強靱に持ちこたえるのに対して, 江持熔結凝灰岩ではき裂の発生は比較的遅く試験温度は高く繰り返し回数が多くなってから開始されるが, き裂発生後は合体, 破壊への進行は急速であることがわかった。一方, 秋吉大理石は江持熔結凝灰岩の約半分の温度で同じ破壊過程が生じること, また, 稲田花崗岩ではある温度を過ぎると, き裂が急激に発達して破壊に至ることがわかった。

3) 熱衝撃疲労の繰り返し回数が多くなるに従って, 応力-ひずみ線図の立ち上がり部分にき裂の発生, 合体に起因する非線形部分が出てくる。

4) 一軸圧縮強度 S_0 と 50% 割線ヤング率 E , または P 波速度 V_p とを対比することによって, S_0 の増加, 減少につれて V_p および E も同様に増減することがわかったが, その対応関係は 50% 割線ヤング率を用いた方が良いことがわかった。

5) 応力-ひずみ線図の非線形部分は熱衝撃疲労の履歴を示すと考えられるところから 100 kgf/cm^2 における割線ヤング率 E' を求めて, V_p と $\sqrt{E'/\rho}$ との関係を検討した。この結果, かなりよく対応するところから, 熱衝撃疲労の過程によるき裂の進行程度は, V_p によるか, 応力-ひずみ線図の非線形部分を調べることによって知ることができる。

6) 試験片の破壊態様から分類した発生, 合体, 破壊における力学的特性値が, それぞれ試験温度, 熱衝撃疲労の繰り返し回数が相異なるにも拘らず, かなり近い値もしくは同一の値を示していた。

さいごに, 本研究における試験は, 東北大学工学部資源工学科旧小林研究室ならびに宮城高専金属工学科で行ったもので, ここに, 故小林良二博士の在りし日の御厚誼に対して深甚なる感謝を捧げるとともに改めて御冥福を祈りたい。この他, 実験に際して御協力, 御助言を頂いた旧小林研究室の東北大学工学部講師松木浩二博士を始め関係各位に対しても深甚なる感謝を申し上げたい。

今回の解析に際しては東北大学工学部教授高橋秀明博士から破壊力学的立場の有益な御助言を頂いた。ここに記載して深甚なる感謝を表したい。

なお, 本試験に使用した試験機の製作にご協力賜った

宮城高専の機械工場の技官の各位に対しても深甚なる感謝を捧げたい。

参 考 文 献

- 1) L. B. Geller (1970): A New Look at Thermal Rock Fracturing, Trans. Inst. Mining & Metallurgy, Vol. 79, No. 767, Section A, pp. A 133-A 170
- 2) 外尾善次郎, 大村照士 (1969): 高温および氷点温度における岩石の強度について, 日本鉱業会誌, Vol. 85, No. 980, pp. 967-972
- 3) 山口梅太郎, 宮崎道雄 (1970): 熱による岩石の強度変化あるいは破壊について, 日本鉱業会誌, Vol. 86, No. 986, pp. 346-350
- 4) 緒方義広, 藤本 薫, 高多 明 (1978): 高温岩体の力学的特性の研究, 探鉱と保安, Vol. 24, No. 1, pp. 6-11
- 5) S. Serdenti and G. D. Booser (1961): The Effect of Strain Rate and Temperature on the Behavior of Rocks Subjected to Triaxial Comprossio, Fourth Symposium on Rock Mechanics, March 30, 31, April 1, pp. 81-97
- 6) D. Griggs, F. J. Turner and H. C. Hard (1960): Deformation Rocks at 500°C to 800°C , Rock Deformation, pp. 39-104, Geological Society of America, New York
- 7) H. C. Heard (1960): Transition from Brittle to Ductile Flow in Solenhofen Limestone as a Function of Temperature, Confining Pressure, and Interstitial Fluid Pressure, Rock Deformation, pp. 193-22
- 8) E. H. Rutter (1974): The Influence of Temperature, Strain Rate and Interstitial Water in the Experimental Deformation of Calcite Rocks, Tectonophysics, Vol. 22, pp. 311-334
- 9) S. J. Bauer and J. Handin (1983), (1960): Thermal Expansion and Crack of Three Confined, Water-Saturated Igneous Rocks to 800°C , Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 16, pp. 181-198 6, Geological Society of America, New York
- 10) G. Simmons and H. W. Cooper (1978): The Thermal Cycling Crack in Three Igneous Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 15, No. 41, pp. 145-148
- 11) 高島 勲 (1979): 高温岩体の開発の現状, 資源, 将来, 地熱エネルギー, Vol. 4, No. 2, pp. 92-95
- 12) 小島圭二 (1984): 放射性廃棄物の地層処分に関する研究, 昭和 59 年全国地下資源関係学会合同秋季大会資料, T 5, pp. 17-20
- 13) 中山 淳 (1973): セラミック材料の熱衝撃抵抗, セラミックス, Vol. 8, No. 5, p. 343
- 14) 小島 隆 他 (1984): 花崗岩の高温高压水中における応力腐食割れ挙動 第 6 回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 397-402

-
- 15) 小林良二, 酒井 昇, 松木浩二 (1983): 岩石の熱疲労に関する実験的研究, 日本鉱業会誌, Vol. 99, No. 1140, pp. 81-86
- 16) 酒井 昇 (1987): 一軸圧縮下における加熱岩石の力学的挙動, 日本応用地質学会誌, Vol. 28, No. 1, pp. 19-24
- 17) 東京天文台編 (1986): 理科年表, 丸善, p. 464
- 18) 日本窯業協会編 (1986): 窯業ハンドブック, 技報堂, p. 29
- 19) 日本学術振興会製鋼第 19 委員会編 (1979): 超音波探傷法, 日刊工業新聞社, pp. 12-13
(昭和 61 年 9 月 16 日受付, 昭和 62 年 6 月 9 日受理)