

各種石材の熱影響に関する研究

日大生産工(院) ○今関 幹
日大生産工 永井香織

1. はじめに

近年レーザー技術が様々な分野に応用され始めており、現在では機械や医療分野などその用途は多岐にわたる。建設分野では計測¹⁾やクリーニング²⁾などに使用され始めており、レーザーの特徴である指向性や集光性を利用した精密加工が可能であることや低騒音、低振動といった環境負荷の低減などの利点から研究が進められている。

コンクリート構造物の普及に伴い、コンクリート構造物を対象としたレーザー技術の研究も進められている中、レーザーによって高温に加熱された場合の熱影響に関するデータの蓄積が必要である。石材をコンクリートの骨材として使用する場合、その種類によって加熱されたコンクリートの強度や耐火性が低下することなどが報告されている³⁾が、加熱温度が600℃前後の研究がほとんどである。

そこで本研究はレーザーによる無機材料の加工を目的に各種材料の熱影響や劣化現象について調査している。

本報告では代表的な石材5種類に対して電気炉を使用し、加熱温度および加熱時間を変化させた場合の熱影響について述べる。

2 実験概要

2.1 試験体

使用した試験体を写真1に、石材の物性を表1に示す。実験に使用した石材はコンクリートにコンクリートの骨材や内外装材料に使用される花崗岩、安山岩、砂岩、石灰岩および大理石の5種類とした。それぞれの試験体は20×100×200(mm)のブロックから20×20×20(mm)に成形した。

2.2 実験方法

実験条件を表2、電気炉概要を表3に示す。本実験において加熱温度は750℃から250℃ごとに1250℃までとし、設定温度の保持時間は20、40、60分とした。電気炉内の温度をあらかじめ設定した温度まで加熱し、設定温度に達した後、耐熱板に設置した各種石



写真1 試験体
(花崗岩, 安山岩, 石灰岩, 砂岩, 大理石)

表2 電気炉概要

商品名	小型電気炉
規格	NHK-170AF
使用電源	AC100V 50/60HZ
定格消費電力	1.3kW
制御方式	全自動プログラム制御
寸法	340×310×405mm
炉内寸法	170×170×150mm
質量	14kg
最高温度	1300度
使用最高温度	1250度
発熱体	鉄クロム線
炉材	アミナスファイバー

表1 各種石材の物性

種類	原産地	見かけ比重 (g/cm ³)	吸水率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
花崗岩	中国	2.61	0.20	120.9	13.4
安山岩	中国	2.63	0.27	166.9	12.2
石灰岩	ポルトガル	2.38	2.90	69.7	7.80
砂岩	中国	2.35	2.70	107.6	9.60
大理石	ドイツ	2.60	0.69	148.5	17.8

表3 実験条件

使用石材	加熱温度 (°C)	加熱時間 (min)	n数	試験体数 (個)
花崗岩	750	20	3	135
安山岩				
砂岩				
石灰岩				
大理石				

Research on thermal effects of various stone materials

Motoki IMAZEKI and Kaori NAGAI

花崗岩									
安山岩									
砂岩									
石灰岩									
大理石									
加熱温度(°C)	750			1000			1250		
加熱時間(min)	20	40	60	20	40	60	20	40	60

写真2 加熱後の試験体

材を電気炉内に入れ急熱を行った。加熱時間経過後、電気炉内から試験体を取り出し、試験体温度が室内温度と同程度になるまで室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度60%の部屋で自然徐熱を行った。

2.3 評価方法

評価方法は、表面観察と質量変化率で行った。電気炉で加熱前の試験体の質量を各種石材で計量しておき、自然冷却を行った後に再度質量を計量した。計量した実験前後の質量から(1)式を用いて質量変化率を算出した。

表面観察は目視観察およびデジタルマイクロスコープ(K社製 VHX-5000)を用いて、試験体のひび割れや変色、ガラス化の有無や加熱した後に経過時間に伴う変化を観察した。

$$M = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100 \quad \dots (1)$$

M：質量変化率(%)

m1：実験前の質量(g)

m2：実験後の質量(g)

3 実験結果および考察

3.1 表面観察

加熱後の試験体を写真2に示す。花崗岩は 750°C および 1000°C までは特に変化がなくひび割れも見られなかった。 1250°C の加熱温度では加熱時間40分から表面に光沢が出始め、60分では40分よりも加熱面に光沢が確認された。これは花崗岩に含まれる石英が関係してい

ると考える。石英の主成分であるシリカ(SiO_2)はレーザ照射などの高温の加熱を受けると溶解し、ガラスを形成することは報告されている⁴⁾。したがって今回の花崗岩に含まれる石英も電気炉による高温加熱によって表面が溶解し、ガラス化した結果、光沢が確認されたと考える。

安山岩も花崗岩と同様に 1000°C までは見た目に変化は生じなかった。 1250°C では20分までは変化がなかったが、40分から試験体が溶解し始め、60分には形を保たず、完全に溶解する結果となった。これより、安山岩は 1250°C から溶解し、より長時間加熱されるほど表面だけでなく内部まで溶解することが分かった。

砂岩は 750°C から 1250°C まで大きな変化は確認できなかったが、 1250°C の40分から変色を生じた。さらに、一部ガラス化している部分が確認されたがこれは花崗岩と同様に、砂岩にも含まれる石英が溶解したためと考える。

石灰岩は 750°C から 1250°C いずれの加熱温度においても、加熱直後は表面に変化はなく、ひび割れも見られなかった。しかし、24時間経過後にはひび割れが 750°C から各温度で発生し、その後さらに経過時間に伴い表層のひび割れから浮きが生じ崩壊が確認された。また、石灰岩は本実験において加熱時間がより短いほど経過時間に伴い崩壊しやすくなる傾向を示した。これは石灰岩が熱を受けた際に吸熱分解反応が起こる⁵⁾ことが報告されており、

750℃以上で加熱された場合に(2)式のような熱分解が起こり、分解された部分が崩壊しやすくなると考える。また、これにより生成された炭酸ガスが内部から抜けることも崩壊現象を引き起こす要因の1つであると考えられる。

さらに、この崩壊現象は大理石においてより顕著に確認された。大理石は石灰岩とは異なり、1000℃以上で加熱された直後にひび割れが生じていたが、そのひび割れが経過時間に伴い周囲に広がり、微細なひび割れが生じることで崩壊に至る結果となった。この崩壊現象は本実験では石灰岩と大理石にのみ生じたことから、石灰岩と大理石に含まれる炭酸カルシウム(CaCO₃)が熱分解したことで起こる現象だと考える。



3.2 加熱直後の質量変化率

各種石材の質量変化率を図1に示す。花崗岩および砂岩に関しては750℃から1250℃まで加熱時間に関係なくあまり変化しない結果となった。

安山岩は加熱温度750℃および1000℃においては質量が減少する結果となり、加熱温度が1250℃になると、加熱時間が長くなるにつれて質量は増加傾向にあった。これは安山岩に含まれる鉄が、高温加熱されることで空気中の酸素と反応し、酸化鉄に変化したためだと考える。

石灰岩は加熱温度が750℃では質量減少はあまり生じなかったが、1000℃以上の加熱においては質量減少率が20%から50%と高い結果を示し、加熱温度が高く、かつ長時間加熱されるほど質量は減少する傾向にあった。

大理石は石灰岩と同様に、加熱温度750℃から1250℃まですべての温度で質量の減少が見られた。750℃では変化率は5%に満たないが、1000℃以上では20%以上低下する結果となった。これは先に述べた熱分解によって質量減少が生じたと考えられる。

3.3 経過時間に伴う変化

石灰岩の経過日数と質量変化率の関係を図2に、石灰岩の崩壊過程を写真3に示す。また、大理石の経過日数と質量変化率の関係を図3に、大理石の崩壊過程を写真4に示す。

花崗岩、安山岩および砂岩は750℃から1250℃まで加熱した後も、劣化現象などの変化は見られず、質量もほとんど変化することはなかった。しかし、石灰岩と大理石においては経過時間に伴い質量が増加する傾向にあった。

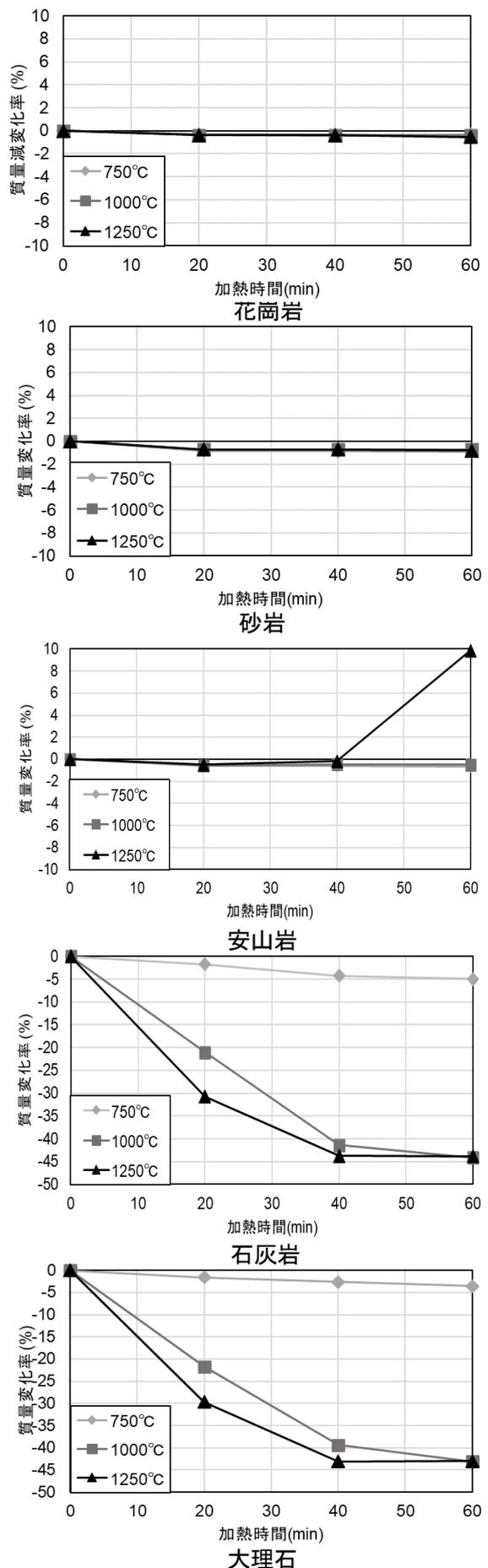


図1 各種石材の質量変化率

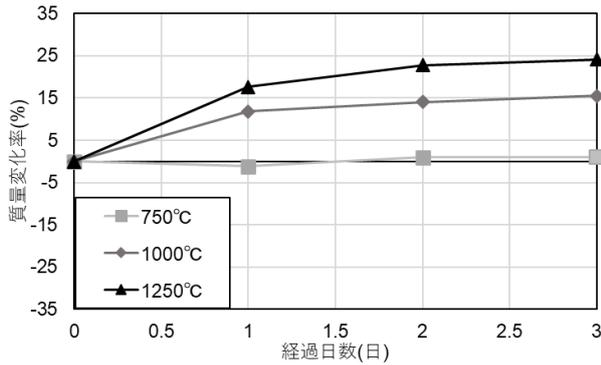


図2 石灰岩の経過日数と質量変化率の関係

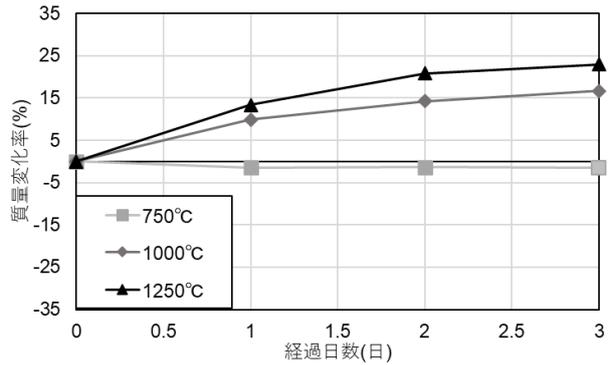
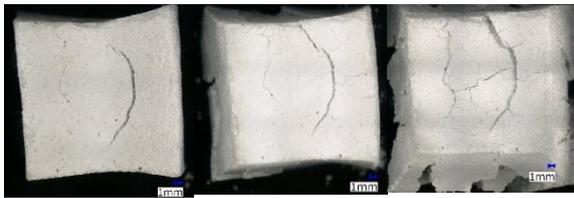


図3 大理石の経過日数と質量変化率の関係



1日後 2日後 3日後

写真3 石灰岩の崩壊過程



1日後 2日後 3日後

写真4 大理石の崩壊過程

石灰岩は図2に示すように低い温度で加熱した場合、一時質量は減少するが、その後質量の増加が確認された。大理石に関しては低い温度で加熱すると質量は減少傾向にあった。また、この2つの石材は加熱温度が高く、かつ長時間加熱されると経過時間に伴いより質量が増加する結果となった。質量の増加の要因としては、加熱された際に熱分解され生成した酸化カルシウム(CaO)が空気中の二酸化炭素と再度反応し、炭酸カルシウム(CaCO₃)に戻ったためと考える。さらに、高温で加熱した場合に質量の増加率は大きかったことから、内部まで熱分解された方がその後の質量増加につながると思われる。また、高温で加熱された場合、石灰岩と大理石の試験体は崩壊したことから空気と接する面が増えるため、より質量が増加しやすくなると思われる。

4 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 花崗岩は750°Cから1250°Cまで、加熱温度によって質量に変化は見られなかった。しかし、1250°Cで40分以上加熱すると表面全体が熔融しガラス化を生じた。
- (2) 安山岩は加熱温度1000°Cまで質量、見た目に変化は見られなかった。加熱温度1250°C、加熱時間40分から熔融し始め、60分になると内部まで完全に熔融する。

- (3) 砂岩も安山岩と同様に加熱温度1000°Cまで質量、劣化現象は見られなかったが、加熱温度1250°Cで40分以上加熱すると表面が変色する。
- (4) 石灰岩は加熱直後に劣化現象などは見られなかったが、加熱後1日からひび割れが生じ、経過時間に伴い表層が剥離し、崩壊に至る。
- (5) 大理石は石灰石と異なり、1250°Cにおいては加熱した直後にひび割れが生じ、石灰石よりも大理石の方が崩壊しやすい。

参考文献

- 1) 藤井堅、北根安雄、中野正：鋼材表面の素地調整としてのレーザーケレンの適用性、橋梁と基礎 52, 2018, pp.31-34
- 2) 小林昭：レーザー加工, 精密機械 47巻 12号, 1981, pp.96-100
- 3) 松沢晃一、橘高義典：高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に及ぼす粗骨材種類の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.727, pp.1383-1390, 2016.9
- 4) 永井香織、市原英樹、ウィグナラージャ シバクマラン：レーザー照射によるゼオライトモルタル表面のガラス化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第547号, pp.17-21, 2001.9
- 5) 田川博章、須藤文明：力焼時の石灰石内部の温度変化, 電気化学, 第26巻, pp.458-461, 1958