

歴史的煉瓦造建築物の目地材料の熱影響に関する研究

—水セメント比の違いによる影響—

日大生産工(院) ○黒澤 陽介
日大生産工 永井 香織

1. はじめに

歴史的建造物の人的災害の主な原因是、戦災や火災等である。第二次世界大戦においては、東京大空襲などの空襲で日本国内の都市部にあった多くの歴史的建造物が消失した¹⁾。

戦火を受けた建物は、高温により構造性能が低下する可能性がある。構造種別により被害状況は異なり、木造建築は延焼により倒壊する例が多く、戦火後に残ることは少ない。一方で、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、煉瓦造は、火災を受けても転倒する可能性がある。一方で、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、煉瓦造は、火災を受けても転倒する可能性がある。一方で、鉄筋コンクリート造は火災によりコンクリートに亀裂が生じ、鉄骨造は高温で急激に強度を失う²⁾。また、煉瓦造の場合は、煉瓦そのものは耐火性を持つが、火災後の急冷や熱衝撃によりモルタル目地の劣化や壁体の剥離が起こることが報告されている³⁾。

戦災を受けた歴史的建造物の保存修復は課題であり、火災の規模を推定し、どの程度の被害を受けたのかを把握する必要がある。

近年、100年を超える煉瓦造が歴史的価値を有する構造物として評価されており、煉瓦造の耐震性に関する研究は多く行われている。

煉瓦造の耐震性は、目地材料によって決まるとしており、煉瓦造の目地は、重要な役割を担っている⁴⁾。明治期に建設された煉瓦造では、目地材料に石灰モルタルや石灰を混合したセメントモルタルが用いられている⁵⁾。これらの材料は、セメントモルタルと比べて化学的性質や組織構造が異なり、環境作用や熱作用に対する耐久性も一様ではなく、石灰を含む目地モルタルの耐火性能や熱的劣化挙動については十分に明らかにされていない。石灰を含んだ目地の耐火性を調査することは、歴史的煉瓦造の補修・補強方法の検討を行う上で重要である。

本研究は、歴史的煉瓦造に用いられた目地材料の耐火性を調査することを目的とする。

本報告は、明治期に用いられた目地モルタルに着目し、水セメント比の違いが熱影響下での劣化に与える影響を把握することを目的とし、加熱試験を行った結果について述べる。

2. 供試体概要

2.1 供試体条件

供試体概要を表1に示す。煉瓦造に使用されている目地材料は主に石灰モルタル、セメント入石灰モルタル、石灰入セメントモルタル、セメントモルタルに分類される。

表1 供試体概要

供試体	容積比			水セメント比 W/C(%)	圧縮強度 (N/mm ²)	備考
	セメント C	石灰 L	砂 S			
a-1	-	1	1.5	-	-	セメントなし
b-1	1	2	5	100	-	明治期の目地モルタルの調合比は、それぞれの材料の容積比によるものとされていましたため、水セメント比を10%ずつ変化させた
b-2				110	-	
b-3				120	-	
b-4				130	-	
b-5				140	6.21	
b-6				150	5.50	
b-7				160	5.36	
b-8				170	4.84	
b-9				180	3.79	
b-10				190	3.40	
b-11				200	3.14	
c-1	1	-	3	60	19.63	石灰なし

Research on the Thermal Effects of Jointing Materials in Historic Brick Buildings
— Effects of Different Water-Cement Ratios —

Yosuke KUROSAWA, Kaori NAGAI

明治期の目地モルタルの調合比は、各材料の容積比によるものとされており、石灰モルタルの調合は、石灰 4 : 砂 6、石灰入セメントモルタルについては、セメント 1 : 石灰 2 : 砂 5、セメントモルタルではセメント 1 : 砂 3 という調合が広く用いられていた⁵⁾。

本試験では、石灰モルタル a-1、石灰入セメントモルタルは、容積比セメント 1 : 石灰 2 : 砂 5 を基準とし、水セメント比を 100~200%まで 10%ずつ変化させた b-1~b-11、セメントモルタル c-1 の計 13 条件とした。

2.2 供試体作成

使用材料を表 2 に示す。供試体は、各材料を計測後、手練りで練り混ぜ、Φ50×100mm の型枠に流し込み、温度 20°C、湿度 60% の環境下で 28 日間気中養生を行った。供試体形状は、電気炉内の寸法を考慮し、Φ50×100mm の円柱供試体を粉碎させたものを用いた。

3. 試験概要

3.1 加熱試験

電気炉概要を表 3、試験条件を表 4、火災出火元からの距離と温度の関係を図 1、電気炉を写真 1 に示す。建物の火災時における温度は約 1100°Cまで上昇する⁶⁾。本試験は、出火元および近隣の建物が火害の影響をどの程度受けるか調査するため、電気炉（N 社製 NHK-170AF）を用いて、加熱試験を行った。

試験条件は、加熱温度を 500°C、750°C、1000°C の 3 水準に設定した。加熱時間は、20 分、40 分、60 分の 3 水準を設けた。加熱後、電気炉内から試験体を取り出し、室温 20°C、湿度 60% の環境で自然徐熱を行った。

3.2 評価項目

3.2.1 質量変化率

質量測定の様子を写真 2 に示す。質量変化率は、加熱による質量変化を調査するため、電子天秤（A 社製 HT-120）を用いて、質量変化率を（1）式より算出した。

$$M = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \cdots (1) \text{ 式}$$

M : 質量変化率 (%)

m₁ : 加熱前の質量 (g)

m₂ : 加熱後の質量 (g)

3.2.2 表面観察

表面観察は、加熱後の供試体に生じるひび割れや変色などの経時的变化を調査するため、目視により経過時間に伴う変化を観察した。

表 2 使用材料

使用材料	記号	適用
セメント	C	普通ポルトランドセメント
石灰	L	消石灰
砂	S	珪砂6号

表 3 電気炉概要

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

表 4 試験条件

加熱温度 (°C)	加熱時間 (min)	n数
500	20	
750	40	3
1000	60	

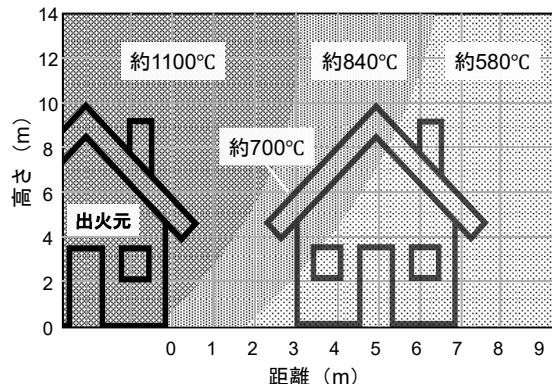


図 1 火災出火元からの距離と温度⁶⁾



写真 1 電気炉



写真 2 質量測定

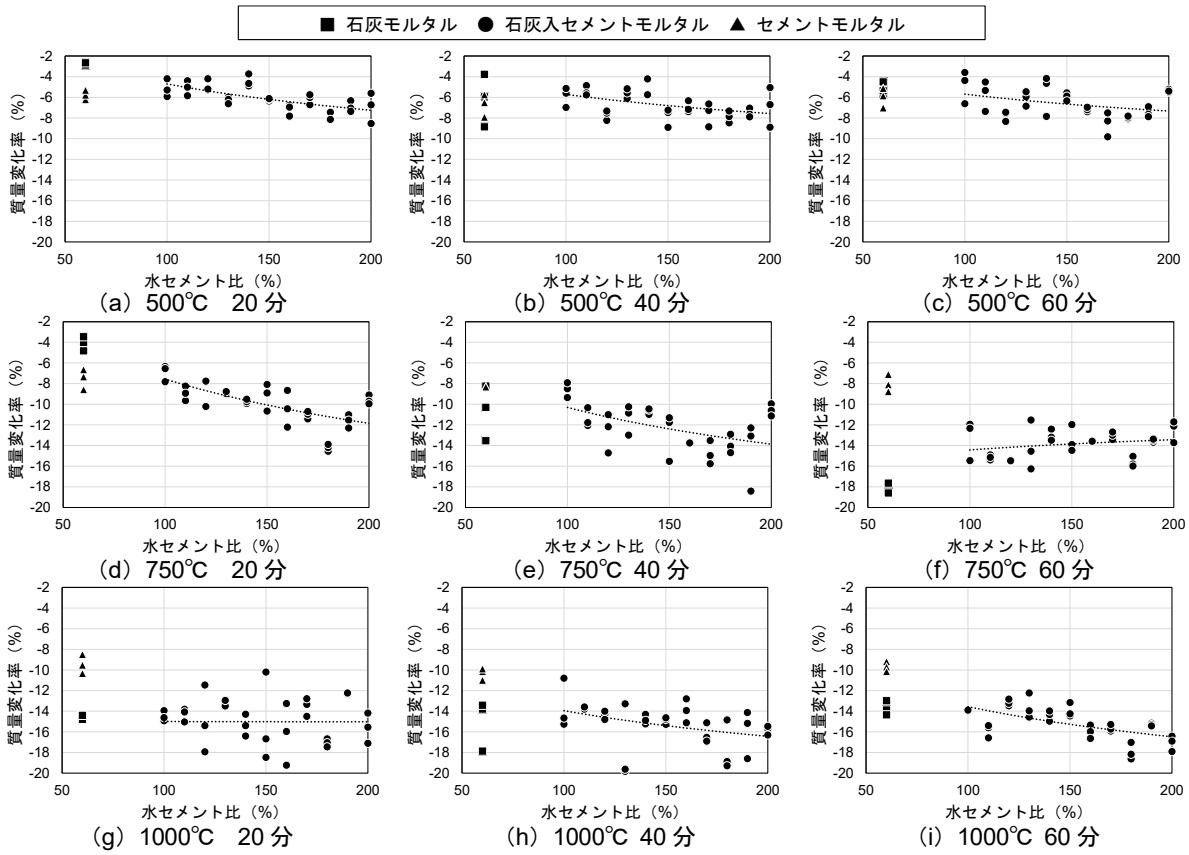


図2 水セメント比と質量変化率の相関

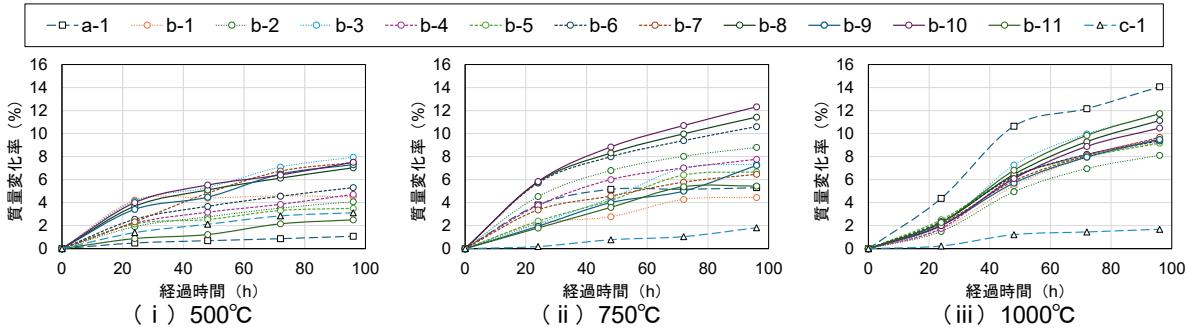


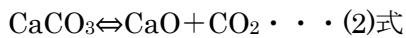
図3 加熱後の質量変化率（加熱時間40分）

4. 結果および考察

4.1 質量変化率

水セメント比と質量変化率の相関を図2、加熱後の質量変化率を図3に示す。

石灰モルタルは750°C、60分加熱することにより、質量変化率が急激に増加することが確認された。Ca(OH)₂は約500°Cで分解し、CaCO₃は約800°C付近で脱炭酸反応を示す⁷⁾。そのため、これらの反応が進行する温度域である750°C、60分において、質量減少が顕著となつたと考えられる。



全ての供試体において、1000°Cで加熱後は、供試体の質量減少が増加した。これは、炭酸カルシウムの脱炭酸反応が加わる温度環境下であるため、質量減少率が増加したと考えられる。

加熱時間ごとに比較すると、加熱時間を20分から60分まで延長しても、質量変化率の増加はわずかであり、主要な熱分解反応は初期20分でほぼ完了していることが確認された。一方、水セメント比に着目すると、水セメント比が大きい供試体ほど質量減少率が大きくなる傾向が確認された。これは、水セメント比の違いによる細孔構造の緻密さの差が水分逸散速度に影響したため⁸⁾と考えられる。水セメント比の小さい供試体は組織が緻密であり、自由水の逸散が抑制されることで質量減少が比較的少なくなり、水セメント比が大きい供試体では細孔が粗く、内部水分が容易に蒸発するため、質量減少率が大きくなつたと考えられる。

以上の結果より、火災出火元である約1000°Cの環境下では、石灰モルタルおよび石灰セ

メントモルタルは加熱後20分程度で密度が低下し、出火元の近隣である3~6mの距離（750°C程度）では、石灰モルタルにおいて60分以上加熱することにより密度低下が顕著になり、出火元から6m以上離れた環境下（500°C程度）では、60分経過しても一定の質量減少に留まることが確認された。

図3より、加熱後の供試体において質量増加が確認された。加熱し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）となつたため質量が増加したと考えられる。

表5 加熱後の崩壊過程

供試体	750°C				1000°C			
	経過時間 (h)				経過時間 (h)			
	0	24	72	120	0	24	72	120
a-1								
b-1								
b-3								
b-5								
b-7								
b-9								
b-11								
c-1								

4.2表面観察

加熱後の供試体の様子を表5に示す。500°Cで加熱後は、水セメント比が130%以下の石灰入セメントモルタル（b-1～b-4）は脆く、強度が低下していることが確認された。一方、石灰モルタル（a-1）および水セメント比が140%以上の石灰入セメントモルタル（b-5～b-11），セメントモルタル（c-1）は加熱後も崩壊することはなく、形状を保持していた。

750°Cで加熱後は、石灰モルタル（a-1），石灰入セメントモルタル（b-1～b-11）は脆くなり、表面にひび割れと粉化が進行した。一方、セメントモルタル（c-1）は崩壊には至らず、部分的な変色と微細な亀裂の発生に留まった。

1000°Cで加熱後は、水セメント比が少ない石灰入セメントモルタル（b-1～b-4）は、加熱直後に崩壊が確認され、石灰モルタル（a-1），水セメント比が140%以上の石灰入セメントモルタル（b-5～b-11）は経過時間の増加に伴い徐々に崩壊が進行した。一方、セメントモルタル（c-1）は1000°Cで60分加熱した時点で脆

化していることが確認されたが、短時間では完全な崩壊には至らなかった。

以上の結果より、火災出火元から6m以内の環境下（750～1000°C程度）では、石灰モルタルおよび石灰セメントモルタルは脆弱になり、セメントモルタルは微細な亀裂が生じることが確認された。また、出火元から6m以上離れた環境下（500°C程度）では、水セメント比が130%以下の石灰セメントモルタルは脆弱性が増すことが確認された。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 火災出火元である約1000°Cの環境下では、石灰モルタルおよび石灰セメントモルタルは加熱後20分程度で密度が低下し、脆弱になることが確認された。
- (2) 出火元から3～6mの距離（750°C程度）では、石灰モルタルにおいて60分以上加熱することにより密度低下が顕著になることが確認された。
- (3) 出火元から6m以上離れた環境下（500°C程度）では、60分経過しても一定の質量減少に留まることが確認された。一方、水セメント比が130%以下の石灰セメントモルタルは脆弱性が増すことが確認された。
- (4) 石灰セメントモルタルの劣化は、石灰モルタルとセメントモルタルの中間的な挙動を示し、石灰を含有することで脆弱性が増すことが確認された。

参考文献

- 1) 文化財保護委員会：戦災等による消失文化財，1966年
- 2) 原田有ら：火災における鉄筋コンクリート造および鉄骨構造の熱応力に関する研究，日本建築学会論文報告集，1971年5月，pp.15-23
- 3) 近藤 清治：煉瓦、タイル及セメント製品の耐火性に就て、大日本窯業協会雑誌、1928年、pp.528-536
- 4) 野澤裕和ら：築100年のレンガ造建築物の目地強度の特性について、日本建築学会大会学術講演梗概集、2011年、pp.963-964
- 5) 宮谷慶一：明治期組積造建築の目地モルタルにおける石灰の使用について、日本建築学会計画系論文集、2004年、pp.169-176
- 6) 日本火災学会編：火災便覧 第4版、2018年
- 7) 栗原哲彦ら：モルタル内のCa(OH)₂およびCaCO₃含有率と加熱後の強度回復との関係、セメント・コンクリート論文集、2014年、pp.148-155
- 8) 高正遠ら：笠井過熱感強化におけるコンクリート中の熱・水分移動および爆裂に関する研究、日本建築学会構造系論文集、2006年、pp.23-30