

煉瓦の吸水放湿特性にみる塩の影響及び保存修復材料の検討

An Analytical Study of the Salt Influence on Bricks and of Their Conservation Materials Considering Water Absorption and Desorption Properties

相川 悠
AIKAWA Yu

1. 序論

(1) 研究背景・研究目的

日本の近代化遺産の一つとして、煉瓦造建造物が挙げられる。煉瓦造建造物の多くは、明治時代から大正時代の限られた期間に建てられた貴重な歴史的建造物である。平成 25 年 12 月現在、国指定の国宝・重要文化財として登録されている煉瓦造建造物は 79 件あり、近代以降の建造物総件数 308 件ある内のわずか 25.65% である^{注1}。そして、明治 20 年以前の煉瓦は独特な手法で作られており、松の薪を燃料として 700℃から 800℃と比較的低い焼成温度で焼かれ、色はオレンジ色の特徴を持っており、現代の煉瓦とは異なったこの時代特有の建築材料として希少価値が高い¹。さらに、近年ではこれらの煉瓦造建造物は観光資源やまちづくりとして社会的関心を集めている。すなわち、これら煉瓦造建造物の希少価値や歴史的価値、技術的価値を残しながら活用をしていくことが求められる。

しかし、現存する煉瓦造建造物の多くは建造後 100 年以上が経過し、経年や環境の変化によって様々な劣化問題に直面している。特に、塩類風化は煉瓦表面上における塩類の析出やそれに伴う煉瓦表面の粉状化や剥離、亀裂、破碎などを起こすことで、煉瓦造建造物の外観と内包される美術的・歴史的価値を著しく損なう(図 1)。そして、塩類風化は塩類の種類によって季節性はあるが、年間を通して見られる現象であり、様々な要因が混在する複雑な劣化現象である。しかし、煉瓦の塩類風化予防方法や抑制方法、除去方法については効果的な対策が確立されていない。

したがって、本研究では煉瓦の吸水放湿特性に着目することで塩類風化が煉瓦造建造物に与える影響を把握し、次に、煉瓦が本来持つ吸水放湿性を損なわない塩類風化に対する保存修復剤及び対策方法を検討することを目的とする。



図 1 群馬県碓氷峠鉄道 碓氷トンネルの壁面における塩類風化

(2) 研究方法

煉瓦における塩類の移動には水による毛管現象と拡散運動が重要な働きをする。つまり、煉瓦や岩石などの多孔質素材における塩類風化のメカニズムを考える上で水分の移動を把握することが重要である。そのため、本研究では煉瓦の吸水放湿試験を行うことで、屋外環境における煉瓦造建造物が、降雨や地下から毛管現象で吸水した水が放湿される過程を想定し(図 2)、煉瓦に塩類が析出した状態における吸水放湿特性への影響を把握する。また、文化財に保存材料を付与する場合にはそれらが本来持つ物性(吸放湿性など)を損なわないこと、あるいはそれを再現する素材であることが求められる²ため、塩類風化における崩落防止剤と充填整形材(擬煉瓦)の評価方法として吸水放湿試験を行う。

さらに、明治20年以前の煉瓦で構成される煉瓦造建造物の保存を考える上で、群馬県旧富岡製糸場を例として取り上げる。そして、旧富岡製糸場の繰糸工場における温湿度・煉瓦の水分率・粉状化煉瓦の崩落量の計測及び崩落防止剤の試験を行う。

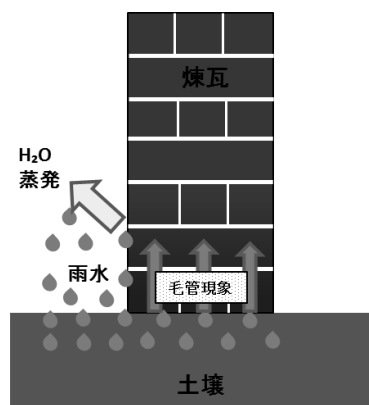


図 2 屋外における煉瓦造建造物の毛管現象

(3) 試験材料

(i) 煉瓦

試験で用いた煉瓦は、旧富岡製糸場の煉瓦を模したものをを使用した。明治 20 年以前に製造された煉瓦は、明治 20 年以降や現代において市販されている煉瓦よりも低い焼成温度で焼かれており、透水性が高く、強

度が低いため、劣化を受けやすいことから歴史的煉瓦造建造物の煉瓦の特性を把握するために選択した。

(ii) 塩

試験で用いた塩は和光純薬工業株式会社製の硫酸マグネシウム ($MgSO_4$) の無水である。実際に硫酸マグネシウムを実験で用いる際には、 $25^\circ C$ のとき 7 水和物の硫酸マグネシウム飽和水溶液を 50% に希釈 ($25^\circ C$ のとき水 100g に対して $MgSO_4=18.15g$) したものを使用した。硫酸マグネシウムを試験で用いた理由は、群馬県旧富岡製糸場の煉瓦造建造物の礎石や神奈川県鎌倉やぐらなどにおいて硫酸マグネシウム ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$: epsomite) が多数報告されているためである。また、硫酸マグネシウム塩は水和して体積が 2 倍以上膨張する³ ことから、煉瓦に甚大な被害を与える破壊力の大きい塩として認識されている。

2. 塩による煉瓦の吸水放湿特性への影響

煉瓦内部において塩が含有された状態において吸水放湿試験を行うことで、塩による水分特性への影響を把握することを目的とした。吸水放湿試験は、屋外環境における煉瓦建造物が降雨や地下から毛管現象で吸水した水が放湿される過程を想定した (図 3)。



図 3 試験模式図

図 4 より塩は吸水過程では煉瓦の中間部において剥離現象が起き、放湿過程では主に煉瓦上部においておきている。この試験結果から、煉瓦の吸水過程及び放湿過程では劣化する箇所が変化しており、放湿過程において煉瓦の剥離が著しく助長されることが分かった。

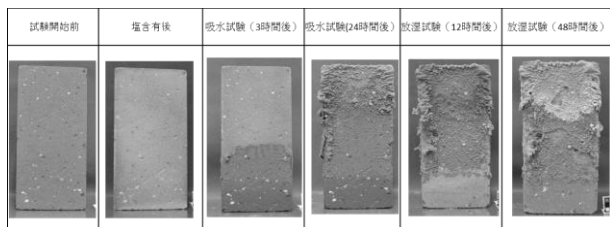


図 4 吸水放湿試験の経過写真

図 5 の吸水過程の結果から煉瓦内部の空隙に硫酸マグネシウムが含有されることで、硫酸マグネシウム含有前よりも煉瓦の含水比が減ることが分かった。これは、煉瓦内部に含有された硫酸マグネシウムが水と反応して 1

水和物を生成することで煉瓦の空隙が減ったためである。また、硫酸マグネシウム含有前と後の水分特性の差 (Δy) が約 200 分において最大となり、煉瓦の吸水スピードが緩やかになる。これは硫酸マグネシウムが水和物を生成し、且つ硫酸マグネシウムが溶けるのに水が使われているために煉瓦内部の水の移動が遅くなり、水が

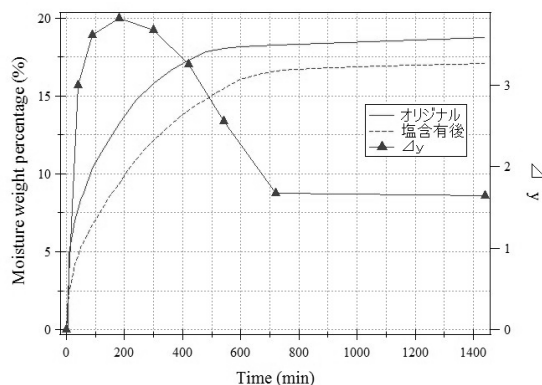


図 5 吸水過程曲線及び水分特性の差

拡散されにくいことを示す。

図 6 の放湿過程の結果からは、硫酸マグネシウムが煉瓦内部の空隙に含有されることで煉瓦内部に水が保持され続けることが分かった。これは、硫酸マグネシウムは恒温恒湿器の $25^\circ C$ の環境下では硫酸マグネシウム 7 水和物を形成するため、水和反応によって保持された水であると考えられる。そして、煉瓦に含有された硫酸マグネシウムの量から 7 水和物の量を算出すると、放湿過程で保持された水の量と一致した。つまり、煉瓦内部において硫酸マグネシウムが水和物を形成することで、煉瓦外部へと水が拡散することを妨げていることが分かる。先行研究において、塩を含んだ岩石の乾燥期間が長い場合には岩石内部において塩が析出しやすいことが分かっている⁴。このことから、水が煉瓦内に保持され続けることで煉瓦の乾燥期間が長くなることで、煉瓦内部で塩の析出が引き起こされ、より

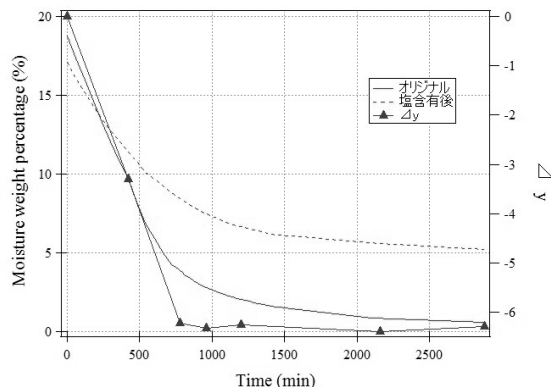


図 6 放湿過程曲線及び水分特性の差

多くの煉瓦表面が剥離する危険性がある。

これらの結果から、煉瓦壁面において一部の煉瓦で塩類風化が起きたことを想定した場合、塩が析出して

いる煉瓦に水分が与えられても、煉瓦内における水の拡散が遅いため、周囲の健全な煉瓦に塩類風化の被害が拡大するには時間を要すると考えられる。そのため、早急に対処をすることで、塩類風化の被害を軽減または将来的拡大を防ぐことが可能なことを示した。

3. 塩類風化における透湿性コーティング剤の検討

(1) 吸水放湿試験

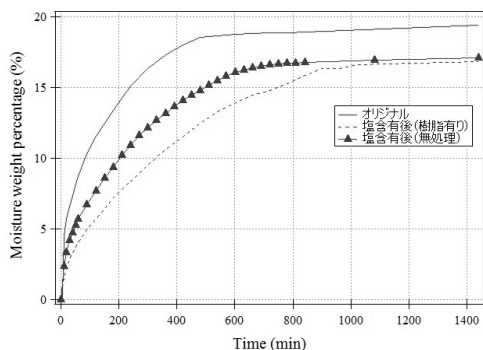
透湿性コーティング剤は水に強く、石材や煉瓦の粉状化及び崩壊を抑える修復材料として非常に高い効果が確認されている。そこで、透湿性コーティング剤の塩類風化における効果について検討を行った。そして、透湿性コーティング剤を塗布した煉瓦の吸水放湿試験を行ったところ、透湿性コーティング剤によって煉瓦の吸水放湿特性が大きく損なわれないことが確認された。

透湿性コーティング剤の塩に対する効果を検証する際には、透湿性コーティング剤を塗布するタイミングを(i)塩含有前と(ii)塩含有後の2つのパターンで行った。

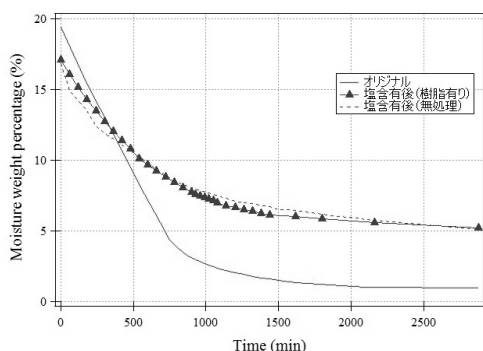
(i) 透湿性コーティング剤を塩含有前に塗布

透湿性コーティング剤を塩含有前に塗布した場合には崩落量が無処理のもの約9分の1以下に抑えることができた。

図7の吸水放湿過程の結果から、透湿性コーティング剤を硫酸マグネシウム含有前に塗布した場合には、オリジナルの煉瓦に硫酸マグネシウムを含有させた際の吸水放湿性と類似した結果が得られ、樹脂の有無によって吸水放湿特性は妨げられないことが分かった。



(1) 吸水過程曲線



(2) 放湿過程曲線

これは樹脂が煉瓦の吸水放湿性を阻害することで煉瓦と樹脂の境界面に塩を蓄積させていないことを示している。しかし、実際には図8に示すように、塩の析出を抑えてはいるが、煉瓦内部において塩が析出して煉瓦表面が水膨れになっていることが確認された。これは、水が少なかったことによって、塩が内部析出してしまったためと考えられる。つまり、煉瓦の塩類析出による劣化の予防はできるが、水分が少ない環境での使用は注意が必要である。

(ii) 透湿性コーティング剤を塩含有後に塗布

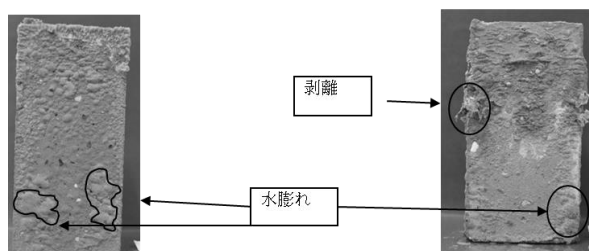


図8 煉瓦の劣化写真

透湿性コーティング剤を硫酸マグネシウム含有後に塗布した場合には、崩落量は約4分の1以下に抑えられた。そして、塩含有後に塗布した場合には、煉瓦の吸水量はコーティング剤を塩含有前に塗布したときよりも吸水量が約0.6g減少するが、吸水放湿過程の結果は類似した結果となった。吸水量の減少は硫酸マグネシウムの上から透湿性コーティング剤を塗布したことで透湿性コーティング剤の塗膜が水の吸水を妨げたと考えられる。そして、透湿性コーティング剤が硫酸マグネシウムと煉瓦を接着したことで、図8のように煉瓦の剥離を生じさせている。つまり、この結果から塩の存在を確認せずに煉瓦に塩を用いることの危険性を示しており、塩が析出している箇所を用いる際には塩を除去する必要性を示している。

以上の結果から、透湿性コーティング剤を崩落防止として煉瓦に用いる際には塩の有無を確認し、塩の存在が確認された場合には取り除かなければ、劣化を促進する可能性があることが考えられる。また、煉瓦内部に塩を析出させてしまう結果となったが、崩落量を抑えることや吸水放湿性を妨げていないことが確認されたため、水の量を調節することで塩を煉瓦内部に析出させないことが課題となる。

(2) 脱塩試験

塩は透湿性コーティング剤の内部において塩を析出してしまうため、水分の量を増やすことでコーティング剤の外側に塩を析出させる脱塩を試みた。

透湿性コーティング剤を塗布した煉瓦と無処理の煉瓦に塩を含有させ、煉瓦の底部から水を供給し続けた。透湿性コーティング剤を塗布した煉瓦と無処理の煉瓦両方の煉瓦表面に塩結晶が形成されているのが確

認められた。そして、透湿性コーティング剤を塗布した煉瓦表面に透湿性コーティング剤の膜が煉瓦表面から塩結晶に押し上げられて浮き上がっており（図9）、簡単に剥がすことができた。剥がした膜の上には、塩結晶が析出しているのが確認され（図10）、透湿性コーティング剤による脱塩の可能性を示した。また、塗膜を剥がした後の煉瓦には塩結晶の析出が少なく、煉瓦表面の剥離も少なく、形状を良好に保っているのが確認された（図11）。一方、無処理の方は塩の析出に伴って、煉瓦の高さが1.16倍に膨張しており、白い塩結晶に覆われ、凝集力も弱く、簡単に崩れた。

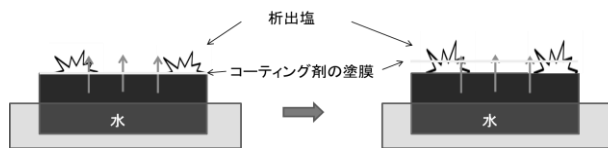


図9 コーティング剤が押し上げられている模式図

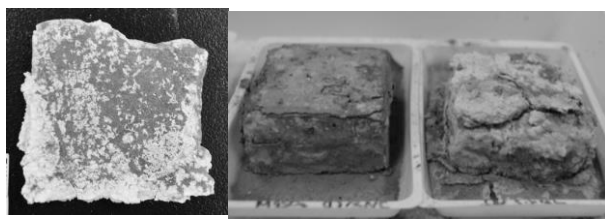


図10

図11 脱塩試験後の煉瓦

コーティング剤塗膜

左：コーティング剤塗布 右：無処理

以上の結果から、透湿性コーティング剤の脱塩の効果を示し、さらに塩類風化による崩壊を防ぐことも可能なことから、塩類風化の対策として有効なことがいえる。この脱塩方法は、水の影響を切ることが困難なモヘンジョダロのような地域においても用いることができる。

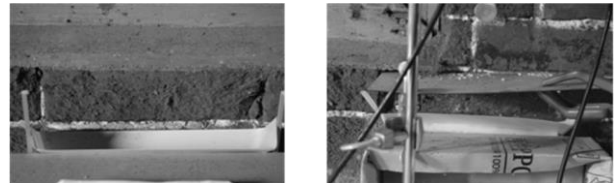
4. 旧富岡製糸場における実践的研究

群馬県旧富岡製糸場では、木骨煉瓦造を構成する煉瓦材料の粉状化が確認されている。今回調査を行ったのは、繰糸工場内の南側の通路（図12）であり、煉瓦壁面における粉状化が確認されている。この粉状化は、



図12 繰糸工場南側通路の写真

主に煉瓦壁面の礎石付近や窓枠の下など水が溜まりやすいところに集中している。煉瓦が粉状化や剥離などの劣化を起こす際には、水の影響や温湿度の影響が挙げられる。そこで、温湿度データ及び水分計データ及び月ごとの崩落量による煉瓦の劣化原因の把握を行う。また、繰糸場では崩落煉瓦に透湿性コーティング剤の試験を行っており（図13）、その効果を検証することが目的である。



西崩落煉瓦（コーティング剤塗布）

西崩落煉瓦（無処理）

図13 崩落煉瓦の写真

(1) 煉瓦の崩落量と透湿性コーティング剤の効果

煉瓦の崩落量は主に3月～6月の春から梅雨にかけて最も多く、崩落には季節性があることが判明した。そして、透湿性コーティング剤によって、崩落量の多い時期で約10分の1以下に崩落量を抑えることが確認された。

煉瓦の粉状化には温湿度環境や煉瓦内の水分移動が粉状化に大きく影響を与えていることが分かり、平均温度が最も低い1月から平均温度が上昇する過程において崩落量が増える傾向にある（図14）。そして、旧富岡製糸場では氷点下を記録していることから、1月から3月の崩落量が多い時期には凍結破碎の影響についても注意が必要である。また、富岡では、一時的に相対湿度90%以上を記録することがあり、煉瓦表面において結露が起こっていることが推測され、煉瓦が水分を吸って重くなることで乾燥する際により多くの煉瓦部分を吸着して崩落することが考えられる。そして、湿度の変動が大きい時期に崩落量が増えることが分かった。

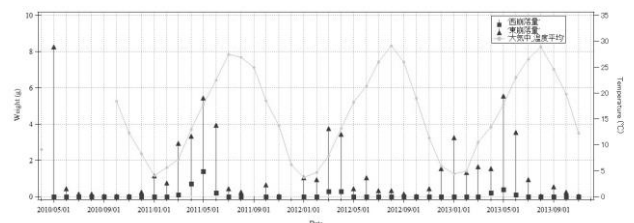


図14 平均温度及び煉瓦の崩落量

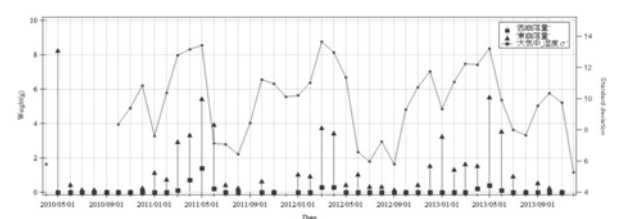


図15 相対湿度標準偏差及び煉瓦の崩落量

(2) 水分挙動と温湿度の影響について

繰糸場の煉瓦壁面の水分率を計測している通路は、屋内であるため雨水が直接供給される環境ではない。しかし、図 16 から煉瓦の含水率は変動しており、煉瓦内における水分の移動が確認できる。そして、粉状化した煉瓦は健全な煉瓦よりも含水率が高いことを示している。これは、煉瓦壁面の窓枠など水が溜まり易いところの煉瓦が劣化していることから、水が煉瓦の劣化に影響を与えていることを示しており、旧富岡製糸場における煉瓦の粉状化の原因は、乾湿風化であると考えられる。煉瓦の水分挙動は、季節的に増加と減少を繰り返しており、周辺の温湿度環境によって水のやり取りがあると考えられる。そして、平均湿度と比較すると、水分挙動と連動して動いており、湿度に大きく影響されている。

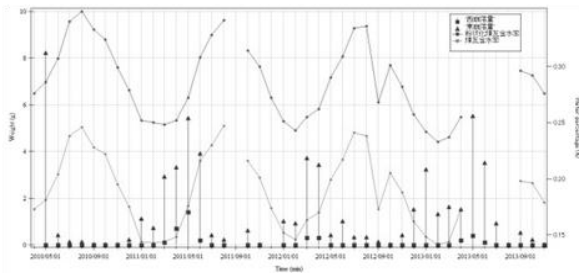


図 16 煉瓦の水分率と煉瓦の崩落量

以上の結果から、旧富岡製糸場における煉瓦の粉状化は温湿度や水が影響しており、乾湿風化が主な原因であると考えられる。旧富岡製糸場の煉瓦は現代の煉瓦よりも透水性が高いことがわかっているため、劣化を受けやすいことが懸念される。特に、水分が蓄積しやすい窓枠や礎石付近の劣化における劣化の促進には注意が必要であり、透湿性コーティング剤を塗布するなどの対処が求められる。

5. 擬煉瓦の検討

煉瓦造建造物では、煉瓦の一部が劣化した際には新しい煉瓦に交換されることが一般的であり、材料としての煉瓦の保存対策が検討される場合は少なく、欠失部の充填を行った例はほとんどない。そこで、本研究では煉瓦材料の修復の発展を目的とし、樹脂による擬煉瓦^{注2}を用いた風化損傷部の修復方法を提案し、また塩類風化における効果について検討を行う。擬煉瓦にはエポキシ樹脂及び透湿性コーティング剤の2種類を用い、それぞれ樹脂濃度が5%になるように配合した。

(1) エポキシ樹脂を用いた擬煉瓦 (図 18)

エポキシ樹脂の擬煉瓦は毛管現象による透水性を持たないことがわかり (図 17)、擬煉瓦層から上部は塩類風化が起きないことが得られた。擬煉瓦層が撥水効

果を持つことから、外部からの塩類や水の影響を遮断するため、塩に侵されていない煉瓦を保護する際には有効である。

また、塩が煉瓦内部に存在した場合における擬煉瓦の効果を検証したところ、擬煉瓦層とオリジナル煉瓦の境界面に塩の析出が見られ、塩類がすでに析出している箇所には用いた場合には、オリジナル煉瓦と擬煉瓦の境界面で塩が析出する恐れがある。故に、擬煉瓦層は塩溶液も通さず、擬煉瓦及び擬煉瓦より上部にある煉瓦には劣化を起ささないことがわかった。つまり、エポキシ樹脂を用いた擬煉瓦は煉瓦の欠損部を充填又は外から供給される塩に対する保護剤としては有効だ

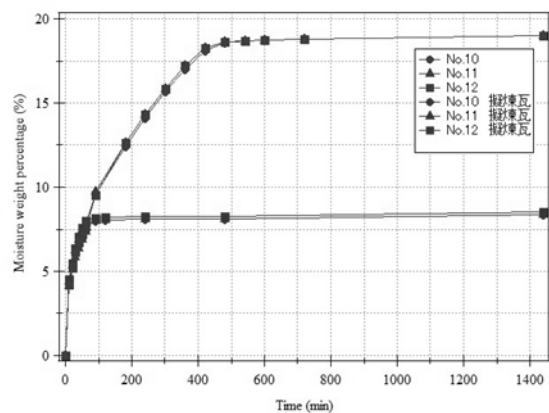


図 17 エポキシ樹脂を用いた擬煉瓦の吸水過程

と考えられる。

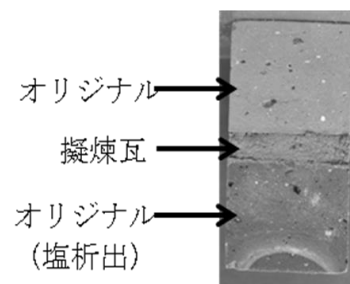
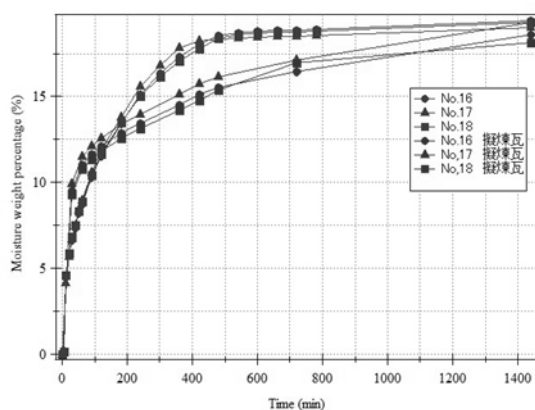


図 18 エポキシ樹脂を用いた擬煉瓦

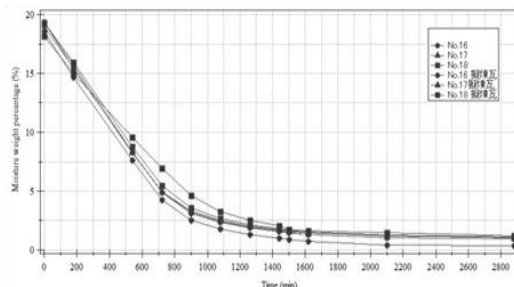
(2) 透湿性コーティング剤 (図 20)

エポキシ樹脂を用いた擬煉瓦は毛管現象による透水性が無いいため、透湿性コーティング剤を用いることで、毛管現象による透水性を持った擬煉瓦を試みた。すると、図 19 に示すように、オリジナル煉瓦の元の吸水放湿特性を表しており、赤は擬煉瓦を挟んだ後である。オリジナル煉瓦と似た特性となっており、擬煉瓦はオリジナル煉瓦の吸水放湿特性を大きく損なわないことがいえる。擬煉瓦層で吸水を遮らないということは、擬煉瓦層とオリジナル煉瓦の境界で塩が蓄積されないため、オリジナル煉瓦と擬煉瓦の吸水放湿性をと合わせることができる。

擬煉瓦層及びオリジナル煉瓦において塩が析出していることは、オリジナル煉瓦と材質が似ていることを意味し、煉瓦上部の剥離及び塩の析出が軽減されている。これは、擬煉瓦層が塩を吸収したことで上部の煉瓦を保護したと考えられる。また、塩溶液を通すということは、擬煉瓦層に塩を析出させることが可能であり、塩類が析出している煉瓦表面に使用することで、塩類をオリジナル面から移動させることが期待できる。つまり、擬煉瓦を張り付けることでオリジナル面を塩類風化から保護することが可能となる。さらに、内部からの水の影響にも対応できることが期待できる。



(1) 透湿性コーティング剤を用いた擬煉瓦の吸水過程



(2) 透湿性コーティング剤を用いた擬煉瓦の放湿過程

図 19 透湿性コーティング剤を用いた擬煉瓦の吸水放湿特性

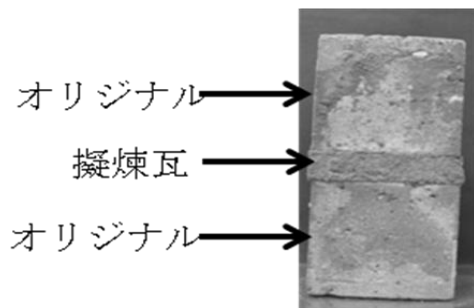


図 20 エチレン酢酸ビニール系樹脂を用いた擬煉瓦

以上の結果から、擬煉瓦や擬石材は欠損部分の充填剤として用いられることがほとんどであるが、用いる合成樹脂の種類やその劣化状況に応じてその使い分けが可能であることが分かった。これは、現場の状況やニーズに合わせて調整することができ、特に環境や劣

化状況が多様な塩類風化には最適である。また、透湿性コーティング剤を用いた擬煉瓦では透水性がオリジナル煉瓦と変わらないことから、擬煉瓦を煉瓦表面に張付けることで塩を擬煉瓦に移して、オリジナル面を保護する脱塩剤としての利用方法も効果が期待できる。塩類風化における脱塩は、湿布材や粘土を用いて行われることが多いが、脱塩剤の取り付けと取り外しなど手間がかかる。しかし、擬煉瓦は充填剤と脱塩剤を兼ねて用いることで、時間はかかるが煉瓦の外観を損なうことなく脱塩を行うことが可能だと考えられる。

6. 結論

煉瓦・石造文化財の保存工法の1つは劣化要因の水に対する防御であるとし、補修剤のありかたについて、水を断ち、煉瓦・石造物に水が及ばないようにすることが基本とされる⁴⁾。しかし、本研究の結果から水の影響から切り離せない環境でも透湿性コーティング剤は煉瓦の崩落防止剤や脱塩剤として効果が期待できることを示した。

塩が煉瓦内部に存在することで水の拡散は健全な煉瓦よりも少ないことがわかり、煉瓦壁面において塩類風化の範囲が急激に進行する恐れは少ないと考えられる。そのため、塩類風化の対処には定期的なモニタリング観察を行い、塩類の存在が確認された場合には、塩類を取り除く脱塩処理や煉瓦表面の崩落防止剤による保護を行うことが効果的である。

今後、近代化遺産の注目がさらに高まり、活用方法が広がることで、様々な環境変化に煉瓦造建造物は直面することが予測される。そのため、定期的なモニタリングを実施することで塩類風化による煉瓦の劣化を初期段階で抑え、状況に応じた処置方法をとることが必要である。

注

- 1) 文化庁 文化財データベースより筆者が算出
- 2) 擬煉瓦：樹脂と煉瓦の粉を混ぜて煉瓦に似せた補填材料のことであり、強度や質感など目的に合わせて調査することができる。

参考文献

- 1) 水野信太郎：「日本煉瓦史の研究」、文化財保存修復研究協議会記録[第28回]平成10年度 レンガ造文化財の保存修復、1-15、1999年
- 2) 沢田 正昭：「1 遺跡保護・活用のための評価・保存整備技術」、『文化資源の保存、活用及び創造を支える科学技術の振興』科学技術・学術審議会・資源調査分科会報告書、2009年
- 3) Goudie, A.S. and Viles, H.: 「Salt Weathering Hazards」、John Wiley & Sons, Chichester, 241、1997
- 4) Huinink, H. Pel, L. and Kopinga, K.: 「Simulating the growth of tafoni.」、Earth Surface Processes and Landforms 29 (10) 、1225-1233、2004