鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物に生じる白華現象のメカニズム

—煉瓦中の含水量が白華現象に及ぼす影響—

MECHANISM OF EFFLORESCENCE ON HISTORICAL BRICK MASONRY
BUILDINGS REINFORCED WITH CONCRETE

—Influence of water content in brick on efflorescence—

松尾隆士*, 田中享二**, 石崎武志***

Takashi MATSUO, Kyoji TANAKA and Takeshi ISHIZAKI

It is indicated that the reinforcement with concrete causes efflorescence and decay of brick because of alkali salts in cement. This paper explains the mechanism of efflorescence on historical brick masonry buildings reinforced with concrete. First, accelerated test method was developed so as to reproduce efflorescence on brick masonry wall reinforced with concrete. Second, we investigated relation between water content and rate of evaporation. It is considered that water did not move in a liquid condition in the brick below the water content of 4~5Vol%. Finally, model wall specimen similar to actual historical brick masonry wall was made and accelerated test was carried out. And water content of each brick was continuously measured by TDR(Time Domain Reflectometry) method during the test. It is concluded that efflorescence did not occur 4~5Vol% water content below because movable water in liquid phase was not present in the brick.

Keywords : Brick Masonry building, Reinforced Concrete, Efflorescence, Conservation, Water content

煉瓦造建造物, 鉄筋コンクリート, 白華現象, 保存, 含水量

1. 序論

我が国では煉瓦造建造物が明治時代から大正時代までの間に数多く建設された。それらの中で建築的価値の高い建造物は全国に約500棟現存すると言われており¹⁾、その多くは保存・活用の対象となる可能性が高い。技術的な側面から歴史的建造物の保存・活用をみると、建物の歴史的な価値を保ちながら、活用計画に適する安全性を確保しなければならない。個々の建物によって保存すべき内容が異なるため、保存・活用計画に適した技術を選択できるように、保存技術に関する情報を設計者や技術者に提供しておくことが重要であると思われる。

煉瓦造建造物に関して言えば、耐震性に劣るため保存・活用する場合には多くの場合構造補強が必要になる。その構造補強には、コンクリート、鉄骨・鉄板、合成樹脂、高強度繊維など様々な材料が用いられている。鉄筋コンクリートによる補強では壁、柱、臥梁、スラブなどを新設し煉瓦壁体と一体化する方法がとられる。そして、鉄筋コンクリートは煉瓦壁体と力学的な剛性が近く、補強効果を期待できるため数多くの補強事例がある。しかし、鉄筋コンクリートによる補強を行った場合、施工後に煉瓦壁体表面に顕著な白華現象

が生じ、美観上問題や煉瓦自体の劣化を引き起こすことが指摘されている²⁾。

本研究は以上のような背景のもと、煉瓦壁体中の含水量が白華現象に与える影響に関して定量的に考察することを目的とする。そのため、具体的には白華現象を再現するための試験方法について検討し、さらに煉瓦の含水量変化を測定することで白華現象のメカニズムを明らかにすることを目的としている。

煉瓦造建造物の白華現象に関しては、欧米を中心に白華現象に関する調査報告^{3),4)}、白華現象の試験方法に関する研究^{5),6)}、白華現象に関する論評^{7),8)}、白華現象を屋外環境で再現した実験報告⁹⁾など数多くの研究がなされてきた。特に、補強材からの白華現象に関しては、Young, J.E が主にコンクリートブロック補強した煉瓦壁体に関して検討を行い、補強材の可溶塩類が白華現象の原因となることを実験的に示している¹⁰⁾。

白華現象は特に水分量と密接に関係することから、実際に鉄筋コンクリート補強するとき、その防止対策を設計の段階から講ずるには、煉瓦壁体の含水量の観点からのメカニズムの解明とその定量的な評価が必要である。この観点からの研究はまだ十分とは言えない。

* 東京工業大学大学院 大学院生・工修

** 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

*** 東京文化財研究所 保存科学部長・理博

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Director, Conservation Science Department, National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, Dr. Sc.

2. 鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物の問題点

2. 1 鉄筋コンクリート補強の種類

歴史的煉瓦造建造物を鉄筋コンクリート補強する場合、一般的に柱、梁、壁、スラブなどを新設し、それらと煉瓦壁体とをアンカーなどを用いて一体化する方法がとられる。鉄筋コンクリートによる補強方法を分類すると図 1 のようになる。煉瓦壁体の内側に鉄筋コンクリート壁を増打する方法は、古くから行われてきた補強方法であり、十分な補強効果を期待でき、さらに防災上有利となるが、内部空間の保存が困難となる。臥梁、スラブを新設する方法は煉瓦壁体を一体化する効果が高く、補強効果を期待できるが、オリジナルの屋根や床との共存が難しいという欠点がある。バットレスによる補強は内部への損傷はないが、外部意匠に影響を及ぼすため適用には注意が必要である。また、煉瓦壁体の一部を溝状に削り取り、鉄筋を設置してからモルタルを充填して一種の鉄筋コンクリート柱を形成する補強方法も行われている。

以上のように、様々な補強方法が存在するが、いずれの方法であっても煉瓦壁体との直接の接触は避けられず、白華現象の原因となることが予想される。

	内壁補強	臥梁新設	スラブ新設	バットレス補強	埋設柱補強
概念図					
補強方法の概要	壁体の内側に増打。耐震、耐火性など防災上有利であるが、内部空間の保存は困難。	壁体の頂部に臥梁を新設。壁体を一体化する効果が高いが、オリジナルの屋根の保存が困難。	スラブを新設。壁体を一体化する効果が高いが、オリジナルの床の保存が困難。	壁体の外部に設置。内部には損傷を与えないが、外部意匠に大きな影響を与える。	壁体の一部を削り取り、鉄筋を設置してからモルタルを充填し、一種のRC柱を形成。

図 1 鉄筋コンクリート補強の概要

2. 2 鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物の一例

鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物の白華現象を確認するため実際に目視による調査を行った。対象としたのは 1890 年に竣工し、1977 年に鉄筋コンクリートによる内壁補強が施された建物である。実施された補強の断面詳細図を図 2 に示す。

白華現象の状況を写真 1、写真 2 に示す。壁面全体に白華現象が見られたが、特に 1 階壁面と比較すると 2 階壁面の白華現象が顕著である傾向が見られた。これは、既往の研究報告⁸⁾に記述されているように壁体の上部の方が下部よりも濡れやすくなる傾向があることが要因であると思われる。また、2 階の既存煉瓦壁体の壁厚が 1 階のそれより薄いことも要因と思われる。しかし、2 階壁面の白華現象が顕著となる傾向については一つの建物の状況であり、他の事例を調査するなど、さらに検討を要すると考えられる。次に、部位ごとに見てみると、壁面の取り合い部分、軒下、軒蛇腹の周辺部、窓枠の下部など雨水で濡れやすいと考えられる部分の白華現象が顕著であった。壁体が濡れることで、鉄筋コンクリートと煉瓦が接触した箇所において、セメント塩類が溶解し煉瓦内部に移動するため白華現象を引き起こしたと考えられる。

したがって、含水量の観点から白華現象のメカニズムを定量的

*参考文献 11)を参考に作図

図 2 断面詳細図

写真 1 壁面の取り合い部の白華現象

写真 2 白華現象が顕著に観察された部位

に考察するためには実験室で白華現象を再現できるような試験方法が必要である。

3. 促進試験方法の検討

3. 1 試験体の製作

煉瓦壁体に生じる白華現象を実験室で再現し、観察するための促進試験方法について検討した。そのため、図 3 に示すように普通煉瓦の一面をセメントモルタルで補強した試験体を製作した。この試験体は、一面を煉瓦とした型枠にセメントモルタルを打設したものである。なお、セメントモルタルを打設する際は、煉瓦とセメントモルタルとの接着性を良くするため煉瓦に 30 分間水湿しを行った。使用したセメントモルタルの割合は、セメント：砂＝1:2.5、水セメント比 60%とした。

図 3 試験体の概要

3. 2 水分の供給方法の検討

図 3 の試験体を用いて、白華現象を観察するための促進試験に関して検討を行った。ここでは、特に白華現象と密接に関係のある水分について、その供給方法と乾燥方法を検討した。図 4 に促進試験として検討した方法の概念図とその結果を示す。

図 4 試験方法の概念図と試験結果

方法 I では試験体を水槽に煉瓦面を上にして浸漬させ、白華現象を観察した。方法 II では試験体を水中に浸漬し湿潤状態にした後、空中にて乾燥させ白華現象を観察した。方法 III では試験体上面に設置した水溜に水を入れ湿潤状態にした後、水溜の水がなくなり、観察面が乾燥してから白華現象を観察した。なお、試験はすべて 20℃ の恒温室内で行った。

方法 I では、セメントモルタルの透水性が低く、煉瓦まで水が浸透するのに長時間を要するため、試験開始から 28 日経過しても白華現象は観察されなかった。方法 II では、ほとんど白華現象を観察することができなかった。方法 III では、特に煉瓦表面の下部に白華現象が観察された。

以上の検討結果から、促進という観点からは最も短時間で白華現象を観察できた方法 III の方法により促進的に白華現象を再現できると考えられた。

4. 白華現象を再現するための促進試験

4. 1 促進試験の概要

前章の検討結果をふまえ、さらに湿潤と乾燥のサイクルを繰り返して白華現象を観察した。試験体は前章と同様の方法で製作した。試験体に使用した煉瓦の吸水特性とセメントモルタルの調合を表 1 に示す。

試験概要を図 5 に示す。試験体の観察面と上面の煉瓦面以外にエポキシ樹脂を塗布し、上面の煉瓦部分からのみ水が浸透するようにした。試験では水道水を試験体上部の水溜に注ぎ入れ、24 時間湿潤状態にした後水溜の水を抜き、72 時間乾燥させた後白華現象を観察した。試験中は水溜に蓋をして観察面からのみ水分が蒸発するようにした。これを 1 サイクルとして繰り返し 10 サイクルまで観察を行った。なお、試験は 20℃、60%RH の環境下で行った。

表 1 試験体の条件

煉瓦の吸水特性	絶乾重量(g)	2546.2
	飽和重量(g)	2713.6
	飽和体積含水率	0.133
セメントモルタルの調合	セメント：砂=1:2.5	
	水セメント比=0.6	

- 1) セメント：普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm³)
- 2) 細骨材：静岡県沢奥陸砂 (密度：2.62g/cm³、吸水率：1.27%)
- 3) 飽和重量：24 時間冷水に浸漬後の重量

図 5 促進試験の概要

4. 2 促進試験結果

試験結果と 2 値化処理した画像を写真 3 に示す。また、この 2 値化画像から煉瓦面に対する白華面積率を計算した結果を図 6 に示す。

サイクルを繰り返すごとに、白華現象が顕著となる様子が観察された。この試験結果から煉瓦の湿潤乾燥の繰り返しを行う試験方法により煉瓦表面に引き起こされる白華現象を促進化できると考えられた。

写真 3 促進試験結果と 2 値化処理画像

図 6 白華面積率の変化

4. 3 煉瓦の含水量からみた白華現象のメカニズム

試験結果からコンクリート補強された煉瓦壁体に生じる白華現象に関して以下のような基本的メカニズムが考えられる。

まず、煉瓦が湿潤状態になると煉瓦に接触したセメントモルタル中の塩類が溶け出し、煉瓦内部を移動し始める。やがて、煉瓦表面に達する。このときは煉瓦表面の含水率が高いため白華現象としては観察されにくい。その後、乾燥状態になると水分は煉瓦表面から

蒸発し始める。煉瓦表面が乾燥すると、煉瓦内部の水分がセメントモルタルとの界面から煉瓦表面に向かう方向に移動し、同時に塩類も表面に移動する。さらに乾燥が進むと、煉瓦表面に達していた塩類は結晶化・固着し白華現象として観察される。この湿潤・乾燥が繰り返されることで、より多くの塩類が表面に析出することになる。

以上のような、基本的メカニズムを考慮すると、煉瓦の含水率が高くなり、かつ含水率の変化が大きい煉瓦ほど白華現象が顕著になると予想される。なぜなら、含水率が高いほど煉瓦内部に液状水が多く存在するため、相対的に塩類の溶解量は多くなり、さらに液状水に溶解している塩類の煉瓦内部での移動が容易になるからである。

したがって、含水量が白華現象に与える影響について定量的に考察するためには、煉瓦の含水率変化を測定し、さらに煉瓦内部の水分移動形態について考察することが必要である。

5. TDR 法による煉瓦の含水率測定

5. 1 TDR 法の原理

TDR(Time Domain Reflectometry)法とは土壌や多孔質材料中に埋設されたプローブに高周波電磁パルスを与え、その伝搬速度から誘電率を求めてそれらの水分量を算出する方法である。この測定法は水の誘電率 ($\epsilon \approx 80$) が土壌の誘電率 ($\epsilon \approx 3 \sim 10$) や空気の誘電率 ($\epsilon \approx 1$) と大きく異なることを利用している。

図 7 に TDR プローブと波形の関係を示す。TDR 装置から発せられた高周波電磁パルスは、同軸ケーブルを経由し材料中に埋設されたプローブ内に入り、終端部で反射する。この間に、インピーダンスの不整合部で部分的な反射が起こり、かつ材料の伝導性のために信号の減衰が起こるためこのような波形を示す。

このとき、プローブ周辺の誘電率 ϵ は次式で求められる。

$$\epsilon = \{c \cdot t_s / (2 \cdot L_p)\}^2 \cdots (1)$$

ここに、 c : 真空中の光速(m/s)、 L_p : プローブ長(m)、 t_s : 電磁波が L_p を往復する時間(s)

誘電率が求められれば、体積含水率 θ (cm³/cm³) は一般的に Topp の経験式¹²⁾

$$\theta = (-530 + 292 \epsilon - 5.5 \epsilon^2 + 0.043 \epsilon^3) \times 10^{-4} \cdots (2)$$

により求められる。しかし、より正確に含水率を算出するためには各材料に対してキャリブレーションを行う必要がある。

図7 TDR プローブと波形との関係

5. 2 キャリブレーション方法

煉瓦の含水率を測定するために TDR プローブを製作した。プローブには直径 3mm のステンレス棒を使用し、長さ 50mm、プローブの間隔 10mm とした。

製作した TDR プローブを使用しキャリブレーションを行った。

図8に試験概要、写真4に試験状況を示す。直径 50mm、高さ 100mm

に切り出した煉瓦の上面にドリルで穿孔した後 TDR プローブを挿入し、煉瓦の誘電率を測定できるようにした。試験では飽和状態(体積含水率 0.128)にした煉瓦を 20℃、60%RH の恒温恒湿槽内に設置し、気乾状態になるまで連続的に誘電率を測定した。また、同時にはかりで煉瓦の重量変化を測定し含水率を算出した。

図8 試験概要

写真4 試験状況

5. 3 煉瓦の誘電率と含水率との関係

図9に誘電率と体積含水率の関係を示す。Topp の式(2)と近い対応を示すことがわかったが、含水率に多少のずれがあることがわかった。したがって、3次多項式の近似式(3)を求め、これを使用する煉瓦に対する較正式とした。

$$\theta = (-776 + 350 \epsilon - 5.90 \epsilon^2 + 0.0401 \epsilon^3) \times 10^{-4} \cdots (3)$$

ただし、この較正式は本研究で使用了煉瓦にのみ適応できる式であり、他の煉瓦に対しては新たに較正式を求める必要がある。また、正確には試験中の煉瓦試料内部の含水率分布は一樣とはならないため、そのことによる誤差があることを付記しておく。

図9 誘電率と体積含水率の関係

6. 含水率と煉瓦中の水分移動形態との関係

煉瓦内部において水分は液状水または水蒸気の状態で移動する。白華現象の原因となる塩類は溶質として存在するため、煉瓦内部での水分の移動形態が液状水のときに塩類が移動すると考えることができる。そこで、煉瓦内部の水分移動形態と含水率との関係に関して検討を行った。

煉瓦内部の水分移動形態は、煉瓦の蒸発量変化から理解することができる¹³⁾。つまり、含水率が高い場合、表面が乾燥しても内部の液状水が表面に移動できるため蒸発量は多い。しかし、含水率が低くなると液状水の移動はほとんど行われなくなり、水蒸気の移動

が主体となるため、蒸発量はほぼ一定となる。そこで、前章の試験結果から、蒸発量の経時変化を整理し、さらに含水率の経時変化と対応させて図 10 に示した。

試験開始直後から蒸発量は徐々に減少するが、約 5 時間後からは蒸発量はほぼ一定になることがわかる。また、含水率の経時変化と対応させると、含水率変化が不連続となる点と対応している。この蒸発量および含水率の変化は、上述のように水分の移動形態の観点から説明できると考えられる。つまり、試験開始から約 5 時間までは煉瓦表面が乾燥しても内部の液状水が移動するため蒸発量が多い。含水率が低くなるにつれて、移動できる液状水の量が減少するため蒸発量も減少する。そして、約 5 時間を経過すると水蒸気による水分移動が主体となるため、蒸発量はほぼ一定となると考えられる。したがって、含水率が 4~5Vol%以下になると水蒸気の移動が主体となるため、塩類移動はほとんど期待できなくなると考えられる。

図 10 体積含水率と水分移動形態との関係

7. モデル試験体による促進試験と煉瓦の含水率変化

7. 1 試験体の製作

これまでの実験において、白華現象を再現するための促進試験方法、煉瓦内部の含水率測定と水分移動形態について考察してきた。しかし、実際の煉瓦壁体は煉瓦と目地から構成されており、目地が白華現象に与える影響についても考慮する必要がある。そこで、図 11 に示すような鉄筋コンクリート補強した煉瓦壁体を模擬した試験体を製作した。試験体は煉瓦積みを行い、20℃、60%RH の環境下で 28 日間気乾養生した後、一面を煉瓦積みとした型枠にセメントモルタルを打設し促進試験用の試験体とした。なお、煉瓦積みには 30 分間水湿しを行ってからセメントモルタルを打設した。目地材料は戦前の日本において多く使用されていたセメント石灰モルタルとした。煉瓦の飽和体積含水率、セメントモルタルの調合、目地モルタルの調合を表 2 に示す。

図 11 モデル試験体の概要

表 2 試験体の条件および調合

セメントモルタル打設の有無	煉瓦の位置	飽和体積含水率 (cm³/cm³)	目地モルタルの調合	セメントモルタルの調合
有	上段	0.16	セメント：石灰：砂 =1:2.5 (容積比, 砂：2.5mm以下) 水/石灰+セメント=0.6 (重量比)	水セメント比=0.6, セメント：砂=1:2.5 (砂：5mm以下)
	下段	0.16		
無	上段	0.17		
	下段	0.17		

- 1) セメント、砂：表 1 に同じ
- 2) 石灰：消石灰 (密度 0.57 g/cm³)
- 3) 飽和体積含水率：24 時間冷水に浸漬後の含水率

7. 2 試験概要

図 12 に試験概要を示す。第 4 章と同様に試験体の観察面と上面の煉瓦面以外にエポキシ樹脂を塗布し、上面の煉瓦部分からのみ水が浸透するようにした。試験では、水を試験体上部の水溜に注ぎ入れ、24 時間湿潤状態にした後、水溜の水を抜き、72 時間乾燥した後白華現象を観察した。これを 1 サイクルとして繰り返し 10 サイクルまで観察を行った。乾燥中は水溜に蓋をして、観察面からのみ水分が蒸発するようにした。なお、試験は 20℃、60%RH の恒温恒湿槽内で行った。比較のため、セメントモルタルを打設しない試験体についても試験を行った。

また同時に、図 12 に示すように上段煉瓦、下段煉瓦に製作した TDR プローブを観察面から 25mm の位置に設置し、促進試験中の各煉瓦の含水率の経時変化を測定した。

図 12 促進試験の概要および TDR プローブの設置位置

7. 3 白華現象の観察結果

試験結果を写真 5 に示す。また、試験結果の写真を二値化した画像から白華面積を計算した結果を図 13 に示す。煉瓦積みの湿潤・乾燥の繰り返しにより白華現象が顕著になることがわかった。また、セメントモルタル打設無しの試験体にも白華現象が引き起こされていることがわかる。これは、セメントモルタル打設無しの白華現象は目地モルタルや煉瓦中の可溶塩類によるものと考えられる。

さらに、煉瓦の位置によって白華現象の表れ方に明瞭な違いが見

られ、白華現象が顕著であった煉瓦はセメントモルタル打設有りの上段煉瓦であった。これは、煉瓦の位置により含水率が異なるからであると考えられ、上段の煉瓦がより含水率が高くなった結果、セメントモルタルから多くの塩類が溶解し、煉瓦表面に移動したためであると考えられる。

写真5 観察結果

図13 白華面積率の変化

7. 4 煉瓦の含水率の経時変化

図14に各煉瓦の含水率の経時変化を示す。セメントモルタル打設有りとセメントモルタル打設無しの試験体の含水率変化はほぼ同様な変化を示した。つまり、上段の煉瓦の含水率は湿潤状態ではほぼ飽和状態になるのに対し、下段の煉瓦の含水率は常に1~2Vol%程度であり、低い含水率であることがわかる。また、上段の煉瓦は湿潤乾燥の繰り返しにより試験中の含水率が約6Vol%から飽和状態まで大きく変化したが、下段の煉瓦は含水率がほぼ一定の状態を維持していることがわかる。これは、使用した目地モルタルの透水性が煉瓦よりも小さいためであり、下段の煉瓦まで水分が移動しないためであると考えられる。

図14 各煉瓦の含水率の経時変化

7. 5 煉瓦の含水率と白華現象との関係

煉瓦表面の観察結果では、白華現象が最も顕著に観察された煉瓦はセメントモルタルを打設した試験体の上段煉瓦であったことから、白華現象が引き起こされる条件としては、煉瓦とコンクリートが接触していること、含水率が高くなること、含水率変化が大きいこと（湿潤・乾燥を繰り返すこと）が挙げられる。

上段煉瓦の場合、含水率が4~5Vol%以上になったため、顕著な白華現象が引き起こされたと考えられる。先述のようにその範囲では液状水の移動が可能であるため、液状水に溶解したセメント塩類もまた移動することができると考えられるからである。逆に下段煉瓦の場合、含水率が常に4~5Vol%以下の範囲であり、煉瓦内部の水分移動は水蒸気による移動が主体となり、煉瓦表面まで塩類が移動することがなく、白華現象はほとんど引き起こされなかったと

考えられる。

本研究で使用した煉瓦に関して言えば、液状水が移動できる含水率の範囲、すなわち塩類が移動できる含水率の範囲を考慮すると、白華現象が引き起こされる含水率の目安は 4～5Vol%程度であると考えられる。

8. 煉瓦壁体の含水量の観点からの白華防止対策の考え方

以上の実験結果から、歴史的煉瓦造建造物に対し鉄筋コンクリート補強を行う場合、以下のような白華防止対策が考えられる。

煉瓦壁体の含水率を低い状態を保ち、かつその変化を小さくするような処置をする、あるいは、含水率が高くなるような箇所ではコンクリートとの接触を避けるなどの対策が有効であると考えられる。

前者の場合、建造物を室内で保存する場合には考え得る。また、屋外であっても短期的には覆いを設置し雨水を遮断することも可能であると考えられる。しかし、普通建造物は屋外に保存することになるため、長期的に含水率を低く保つことは困難であると考えられる。したがって、後者のようなコンクリートとの接触を避けるという対策が現実的である。特に、雨水により濡れやすい箇所には新設する鉄筋コンクリート躯体が接触しないような設計段階での配慮が必要であると考えられる。

実際に行われている白華防止対策として、コンクリートと接触する箇所において煉瓦壁体に事前にプライマーを塗布する処置が行われる事例がある。この方法は短期的には有効であると考えられるが、長期的に効果を持続できるかどうかは検討が必要である。より水遮断性があり、しかも接着性に優れる工法の採用が望まれる。

9. 結論

鉄筋コンクリート補強された歴史的煉瓦造建造物の白華現象に関して以下の知見が得られた。

- 1) 白華現象を再現するための促進試験方法について検討し、湿潤・乾燥の繰り返し試験により促進的に白華現象を再現することができることを示した。
- 2) モデル壁体を使用した促進試験の結果、白華現象が引き起こされる条件として、煉瓦とコンクリートが接触していること、含水率が高くなること、含水率変化が大きいこと（湿潤・乾燥を繰り返すこと）が挙げられる。
- 3) 煉瓦の含水率が 4～5%以上の範囲では、煉瓦内部の水分移動の主体は液状水となり、それ以下の範囲では水蒸気となることを明らかにした。したがって、含水率が 4～5Vol%以上となる煉瓦においては、塩類が液状水とともに表面に移動することが可能になるため、顕著な白華現象が引き起こされると考えられる。
- 4) 白華現象の防止対策としては、煉瓦壁体の含水率を低い状態を保つ、あるいは含水率が高くなる箇所では、コンクリートとの接触を避けるなどの方法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 西澤英和・金多潔、「鉄骨構造の保存工学への応用—洋風煉瓦造の重要文化財建造物の耐震補強について—（その1）」、カラム 113 号、pp.71-78、1989.7
- 2) 西澤英和・金多潔、「鉄骨構造の保存工学への応用—洋風煉瓦造の重要文化財建造物の耐震補強について—（その2）」、カラム 114 号、pp.21-28、1989.10
- 3) Chin, I.R., "Spalling of Brick," Masonry: Opportunities for the 21st Century, ASTM STP 1432. D. Throop and R.E. Klingner, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, pp.97-113
- 4) Chin, I.R., and Petry, L., "Design and Testing to Reduce Efflorescence Potential in New Brick Masonry Walls," Masonry: Design and Construction, Problems and Repair, ASTM STP 1180, J.M. Melander and L.R. Lauersdorf, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp.3-21
- 5) Isberner, A.W., "A Test Method for Measuring the Efflorescence Potential of Masonry Mortars," Masonry: Research, Application, and Problems, ASTM STP 871, J.C. Grogan and J.T. Conway, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp.27-37
- 6) Harris, H.A., "A Method to Determine Efflorescence and Water Permeance of Masonry Mortars," Masonry: Research, Application, and Problems, ASTM STP 871, J.C. Grogan and J.T. Conway, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp.88-100
- 7) Tomassetti, Albert A., "Problems & Cures in Masonry," Masonry: Components to Assemblages, ASTM STP 1063, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. 1990, pp.324-338
- 8) Grimm, C.T., "Durability of Brick Masonry: A Review of Literature," Masonry: Research, Application, and Problems, ASTM STP 871, J.C. Grogan and J.T. Conway, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1985, pp.202-234
- 9) Ritchie, T., "Study of Efflorescence on Experimental Brickwork Piers," Journal of the American Ceramic Society, Columbus, Ohio, Vol.38, No.10, Oct. 1957, pp.357-361
- 10) Young, J.E., "Backup Materials as a Source of Efflorescence," Journal of the American Ceramic Society, Columbus, Ohio, Vol.40, No.7, July 1957, pp.240-243
- 11) 「レンガ造建築を鉄骨で補強 保存工学に新ボキャブラリー加わる」、日経アーキテクチュア、1982.3.15 号、pp.52-57
- 12) Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16, 1980, pp.579-582
- 13) 八幡敏雄：『土壌の物理』、東京大学出版会、1975

(2004年 6 月29日原稿受理, 2004年 9 月28日採用決定)