

明治期の煉瓦造の文化財にみられる特性と保存方法に関する研究

A Study on the Characteristic and Conservation Methods of Brick Cultural Properties of the Meiji Period

深見 利佐子
FUKAMI Risako

1. はじめに

近年、近代化遺産として煉瓦造の文化財が注目を浴びている。近代化遺産は日本の近代化の歴史や文化を理解する上で重要な文化財であり、高い歴史的価値や学術的価値を有している。そのため、今後さらに多くの煉瓦造の建造物等が指定文化財として登録され、それに伴い活用の増加や多様化が予想される。しかし煉瓦造の文化財は屋外にさらされている場合が多く、周辺環境の影響により塩類風化などの劣化が日本国内各地で報告されている。加えて今後さらに文化財が活用されることで煉瓦の劣化リスクや劣化速度の上昇につながる可能性も考えられる。これらの課題に対し、煉瓦の保存処理方法を検討するためにはまず明治期に製造された煉瓦の物性を把握する必要がある。そして遺跡での現況調査を行うことで劣化状況を詳しく把握し、その要因を明確にすることが不可欠である。また煉瓦造の文化財は劣化の進行だけでなく、煉瓦造の文化財に関する専門家不足や、保存を行うための予算不足などの課題をも抱えている。そのため、煉瓦造の文化財に対する保存方法として、より簡易的に行うことができ、かつ低予算で効果的な方法が求められている。

本研究では日本国内で煉瓦の規格化が行われる1925年以前の煉瓦を「歴史的煉瓦」と位置づけ、研究目的として次の3点を設けた。第一に文化財保存科学の視点から歴史的煉瓦の特性を明確にすること、第二に実際の遺跡における歴史的煉瓦の劣化状況及びその挙動と要因を明らかにすること、そして第三に劣化を抑制させる対策方法の一つとして電気化学的脱塩工法を用いた脱塩方法の提案と開発を行うことである。

論文は5章で構成され、第2章では自然科学的手法を用いた歴史的煉瓦の特性を明らかにした。また煉瓦の特性に見られる差と煉瓦の劣化に関係性が見られるのか検討を行った。第3章では、歴史的煉瓦の一つである東洋組煉瓦が用いられている猿島砲台

跡にて長期的な現況調査を行い、煉瓦構造物内環境の挙動や劣化状況を詳しく把握し、劣化要因の解明をおこなった。第4章では塩類風化による劣化を抑制させる方法として電気化学的脱塩法を用いた脱塩モデルの作成を行い、脱塩効果の検討を行った。そして最後にこれまでの調査及び試験結果から総合的に考察を行い、第5章にて本研究の結論を述べ、得られた知見と今後の課題の抽出を行った。

2. 歴史的煉瓦のキャラクターゼーション

(1) 吸水率及び圧縮強度試験

(i) 試験体と試験方法

歴史的煉瓦の特性を把握するために明治期に国内製造された歴史的煉瓦である東洋組煉瓦、小菅集治監製煉瓦、牛久シャトーで使用された煉瓦、昭和期に製造されたとされる添川瓦工場窯跡出土の煉瓦に対して吸水率試験及び圧縮強度試験を実施した。試験体は内径 $\phi 33$ mm の円柱試験体を単体試料 一点あたり 3~8 点作成し、吸水率試験に用いた。その後同じ試験体を十分に乾燥させ圧縮強度試験に用いた。吸水率試験は JIS A 1509-3:2008 に基づいて実施した。圧縮強度試験はオートグラフ (AG-250kN/島津製作所社製) を用いて最大荷重を測定した。速度は 85.5N/sec ($0.1\text{N/mm}^2/\text{sec}$) とした。得られた最大荷重から式1を用いて圧縮強度を算出した。

$$\sigma_c = P_{\max} / A \quad (\text{式1})$$

ここで、 σ_c :圧縮強度 [N/mm^2]、 $P_{\max}$:最大荷重 [N]、 A :断面積 [mm^2] である。

(ii) 結果と考察

東洋組煉瓦の吸水率は $17.0 \pm 1.6\%$ 、圧縮強度は $9.5 \pm 3.8\text{N/mm}^2$ 、小菅集治監製煉瓦は吸水率が $8.4 \pm 1.5\%$ 、圧縮強度は $44.7 \pm 11.2\text{N/mm}^2$ という結果であった。小菅集治監製煉瓦を除いた、東洋組煉瓦、牛久シャトーで使用されていた煉瓦は現代の煉瓦の規格を吸水率、圧縮強度共に満たしておらず、ばらつきがある

①歴史的煉瓦の中でも明治期の煉瓦は製造地域や種類によって物性にばらつきが見られ、吸水率は約8%～30%の範囲に圧縮強度は3N/mm²～53N/mm²の範囲に分布し（図1）、特に吸水率は大正期や昭和期の煉瓦と比較すると広範囲に分布することがわかった。このように同時代に製造された煉瓦や同じ種類の煉瓦においても物性に大きな差が生じる場合があるため、煉瓦に対する保存処置を施す場合はこの点に留意する必要がある。

②大正期に突入すると、煉瓦の吸水率の分布範囲は狭まり、圧縮強度は90N/mm²を超過する煉瓦が確認されたことから、この時代になると煉瓦の製造技術が向上し良質な煉瓦が製造可能になったことが考えられる。

● 現代の普通煉瓦（岡本煉瓦株式会社製赤煉瓦）

● 物性試験結果及び報告書から抽出した吸水率と圧縮強度それぞれの値

このように歴史的煉瓦の物性値にはばらつきが見られ、それらが建築資材として当時使用されていたことから、煉瓦が規格化される以前は品質には特に留意することなく煉瓦が製造され建築資材として使用されていた可能性が高いことが示唆された。煉瓦の特性に差が生じた要因として、1881年に制定された軍事施設に関する仕様書である『砲臺建築仕法通則』に見られるような建設に関わる規則の有無が影響を与えていた可能性

目視観察の結果、特性の異なる東洋組煉瓦と小菅煉瓦は劣化状況と煉瓦にみられる崩壊の種類が異なることを把握した。前者は煉瓦表面の崩落、剥離そして後退が進行しており、後者は煉瓦よりも目地の後退や劣化が顕著にみられた。このことから、煉瓦の特性と劣化状況には関係性があることが示唆された。

3. 長期的調査による劣化の現状把握と要因の特定

(1) 猿島砲台跡

明治期に製造された歴史的煉瓦は煉瓦の種類によって特性は異なり、特に吸水率が高く圧縮強度も低い煉瓦は表面崩壊が起こりやすい可能性があることが分かった。このことを踏まえ、塩類風化等による劣化に対する保存処理方法を検討するためにはまず現況調査を通して遺跡における劣化状況を詳しく把握し、劣化要因を明確にすることが不可欠である。歴史的煉瓦である東洋組煉瓦が使用されている猿島砲台跡(神奈川県横須賀市)において約3年間に及ぶ長期的な現地調査を行った。猿島砲台は1881(明治14)年に起工し、1884(明治17)年に竣工した明治初期の沿岸砲台であり、2015年に国指定史跡に登録されている¹。砲台が建設された猿島は現在無人島であり、横須賀新港から沖へ向かって約1.7km 地点に位置する。猿島砲台跡は東京湾要塞の一つとして日本で最も早く建設された沿岸砲台であり、史跡内に見られる煉瓦造構造物は現在においても築城当初の姿を良好にとどめていることから猿島砲台跡は日本における近代の政治、土木技術を理解する上で重要な遺跡の一つである。

(2) 劣化の現状と要因

(i) 調査箇所と調査方法

現況調査では東洋組煉瓦に見られる劣化状況の把握を行うために目視による煉瓦表面の観察、劣化要因を特定するために煉瓦造構造物内における温湿度測定、煉瓦壁面からの煉瓦の崩落量測定を2017年6月から2020年3月にかけて実施した。さらに煉瓦崩落物内に含まれている物質を特定するために粉末X線回折(XRD)による定性分析を行った。

これらの調査は遺跡内に現存する構造物の中でも特に煉瓦の劣化が著しかった南側弾薬元庫北建屋2階(f1-2)で実施した。この構造物は2階天井面が地表から約6m下に位置し、壁面には東洋組煉瓦が使用されている。f1-2内部の面積は4.28m×13.56mの規模であり、床面から天井までの高さは3.67mでヴォールト構造となっている(図2)。f1-2内部には窓がないが、入口付近に屋外に通じる窓が1つ存在し、f1-2の入口には扉がないため、この窓とトンネルからf1-2内部への通路を通じて外気が流入している可能性が考えられる。f1-2内部は現在一般公開されていないため、調査時以外に人の出入りはない。

(ii) 結果と考察

煉瓦造構造物内の温湿度は屋外の温湿度挙動と連

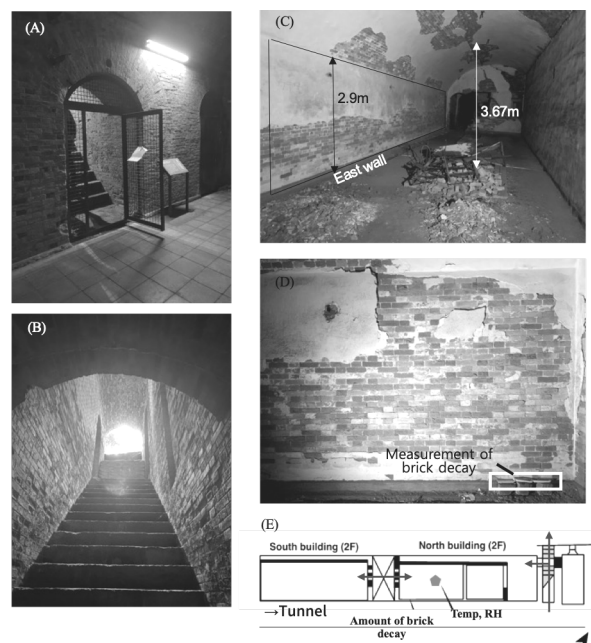


図2 (A) 隧道から f1-2 への入口, (B) f1-2 入口付近の窓, (C) f1-2 内部の様子, (D) 東側壁面, (E) f1-2 の平面図 (著者作成。)

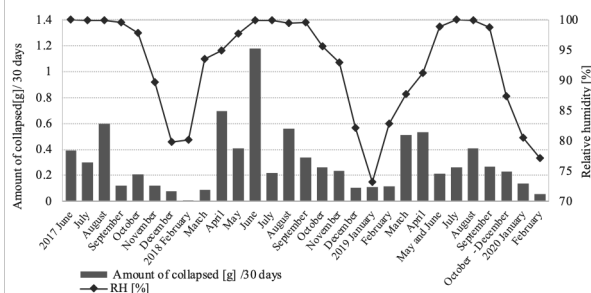


図3 f1-2 内の崩落量と相対湿度の推移

動して変化するが、屋外に比べてやや低温で高湿な環境になることがわかった。これはf1-2入口付近の開口部から外気が流入した影響によるものであることが考えられる。また崩落量測定の結果からは4月と6月～8月にかけて煉瓦の崩落量が増加することが分かった(図3)。そしてこの時期は構造物内の相対湿度が上昇する時期と約100%RHと非常に高湿になる時期であることが判明した。崩落物からは異なる数種類の塩類が検出され、特に崩落量が増加した時期に危険性及び破壊力が高いと考えられているthenardite (Na_2SO_4)などが検出された。これらのことから猿島砲台跡の東洋組煉瓦に見られる劣化の要因は構造物内の温湿度環境と煉瓦内に存在する塩類であることがわかった。

(3) 東洋組煉瓦に含まれる塩類の起源

煉瓦の崩壊を誘発する要因の一つとして東洋組煉

瓦内に存在する塩類が挙げられたが、塩類が外部から供給されたものであるのか、または煉瓦が製造された時点から本来煉瓦内に存在していたものであるのかその起源については不明である。そこで塩類の起源を解明すべく遺跡内で確認された漏水の水質調査及び東洋組煉瓦内部の硫酸イオン (SO_4^{2-}) 濃度を調査した。

(i) 漏水の陰イオン分析

塩の成分である SO_4^{2-} などの陰イオンが外部から供給されたものであると仮定した場合、f1-2 外壁面を滴る漏水が塩類の起源である可能性が考えられる。そこでイオンクロマトグラフ (IC) を用いて隧道内の漏水の水質を確認した。2018 年 5 月に隧道内の漏水が見られた地点より 45ml の漏水試料を 2 点採取した。採取した漏水試料は実験室内にて約 5ml を穴径 $0.45 \mu\text{m}$ の濾過フィルター (sartorius 社製 Minisart RC4) に通した後に IC に直接注入して測定を行なった。分析装置には 883 Basic IC plus (Metrohm 社製) を用いた。

(ii) 東洋組煉瓦内部の SO_4^{2-} 濃度分布調査

次に猿島砲台跡 f1-2 内で採取された完形の東洋組煉瓦を外側から煉瓦内部 (中心部) に向けて 2.5cm ずつ切断し煉瓦の外側から内側に向けての SO_4^{2-} の濃度変化から塩類の起源を検討した SO_4^{2-} の濃度変化は IC 分析を用いて評価を行った。分析試料となる完形の東洋組煉瓦は短辺 110mm 、長辺 230mm 、厚さが 55mm であった。また二面ある長手面のうち片方の長手面には漆喰が塗られた形跡が見られたことから、この面が外側であり、この長手面に対向するもう一つの長手面が壁面内側にあったと考えた。このことを踏まえて、完形の煉瓦を外側の長手面から内側に向けて 2.5cm ずつ裁断したものと、2 小口面から煉瓦中心部に向けて 2.5cm ずつ裁断したもののそれぞれの裁断面から煉瓦粉末を採取し瑪瑙製乳鉢と乳棒で粉碎後、抽出液を作成した。作成した抽出液は穴径 $0.45 \mu\text{m}$ の濾過フィルター (sartorius 社製 Minisart RC4) を用いて濾過させた後に、陰イオン分析を行った。

(iii) 結果と考察

隧道内の漏水からは塩化物イオン (Cl^-) と SO_4^{2-} が検出されたがいずれも低濃度であり、塩類風化を引き起こす濃度ではないと判断した。

一方で東洋組煉瓦内の SO_4^{2-} 濃度は外側から煉瓦中心部にかけて大きな SO_4^{2-} 濃度変化は見られず、煉瓦内にほとんど均一の状態で SO_4^{2-} が存在している可能

性が考えられる。煉瓦の性質に関する研究において、素木によると建築用煉瓦は水溶性の塩を多少含有していることが報告されており、また煉瓦内に硫酸塩が生成される要因として煉瓦の原料に本来から含まれていた場合や、煉瓦を焼成した際の燃料に含まれていた硫黄が考えられると述べられている²⁾。以上のことから、猿島砲台跡の東洋組煉瓦に含まれていた塩類は煉瓦が製造された工程上にある可能性が示唆された。

(4) 煉瓦壁面の水分率変動が劣化に与える影響

(i) 測定方法

東洋組煉瓦内に塩類が存在することから、劣化が進行する要因の一つとして煉瓦内の水分状況も考慮する必要がある。そこで現況調査のうち崩落量測定を行った f1-2 内の東壁の一部で水分率測定を行なった。測定した壁面範囲は高さ 104.5cm 、幅 245cm 、であり、床面からの高さは約 40cm であった。測定範囲内の煉瓦総数は 215 個であり、煉瓦個々の水分率測定にはコンクリート・モルタル水分計 HI-520 (Kett 社製) を用いた。測定は 2018 年 8 月～2019 年 12 月にかけて合計 10 回実施した。

(ii) 結果と考察

壁面に使用されている煉瓦の水分率推移には季節性が見られ、これは外気の影響によるものである事が考えられる。また水分率が変動した箇所を詳しく追跡した結果、煉瓦の水分率が a) 大きく変動し上昇と低下を短期間で繰り返すもの、b) 徐々にゆっくりと変動していくもの、そして c) 水分率はほとんど変化しないものの 3 パターンあることが分かった。特にパターン a をもつ煉瓦すなわち水分率挙動が上昇と低下を短期間で繰り返す煉瓦は劣化の進行が速い傾向にあることを見出した。また本調査における水分率測定の結果から、図 4 に示されるような測定例の提案が考えられ、長期的調査の一つとして水分率調査を行う際の参考となるだろう。

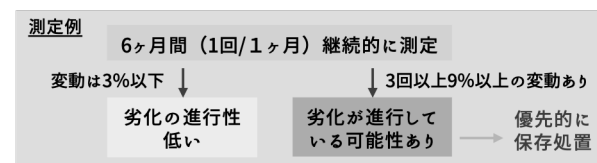


図 4 提案される水分率測定の測定例

4. 電気化学的脱塩工法を用いた煉瓦の脱塩

(1) 電気化学的脱塩工法 (ED)

長期的な現地調査で得られた知見から、煉瓦の劣

化を抑制させる対策として煉瓦が置かれている環境の制御や煉瓦自体に手を加え内質的な改質を行うことが挙げられる。しかし史跡が置かれている立地条件によっては構造物内や周辺環境の制御は困難である場合がある。そこで本研究では煉瓦の内質的な改質、特に煉瓦の場所を問わず実施可能な局所的な脱塩方法の開発を行った。脱塩方法として電気化学的脱塩 (ED) を採用した。ED とは外部から電気を流すことで対象の試供体中に存在する塩化物イオン (Cl^-) や硫酸イオン (SO_4^{2-}) などのイオンを電気泳動によって移動させ、除去または低減させる方法である。この手法は本来コンクリート構造物の脱塩工法として確立、実際の構造物に適用され、その効果が確認されている³⁾。

(2) ED 試験

(i) 試験体の作成と ED モデル

試験体として用いた煉瓦は、明治 20 年以前(1870 年代)に国内生産された富岡製糸場で用いられた煉瓦の物性を模して作成された煉瓦を使用した。この煉瓦を縦 5 cm、横 5 cm、高さ 11 cm に切断し、各試験体を 35.5 g/L (0.25 M) の濃度に調整した Na_2SO_4 水溶液に 5 日間浸漬させ、その後乾燥させたものを試験体として用いた。試験に用いた ED モデルを図 5 に示す。電極には粉末セルローズ (Holland Gwabo 社製 Arbocel BC1000) と銅板(幅 15 mm、長さ 45 mm、純度 99.96%)または炭素棒(直径 10mm、長さ 4.5cm Keenso 社製)を使用した。アーボセルは親水性で水に不溶性の性質を持つ⁴⁾。そのため電極設置時に煉瓦表面を傷つけることなくかつ水分を必要な量だけ含有させることができる。電極部の作成にあたり、まず乾燥したアーボセルに、超純水を、試験体乾燥重量に対して 20%の量を加え混合した。水分量は試験体の乾燥を防ぐことができる重量に設定した。湿潤させたアーボセルは試験体の側面 2 面と下面に貼り付け、さらに側面に貼り付けたアーボセル中に銅板または炭素棒を挿入した。試験は煉瓦の小口面(縦

したアーボセルに加水した。通電終了後は試験体を切断し、採取した粉末から抽出液を作成し IC による SO_4^{2-} 濃度の定量評価と通電後の試験体表面の目視観察を行った。

(iii) 結果と考察

銅板を電極とし、通電条件 5V、0.5A または 1A の下 8 日間通電を行うと最大 73%の SO_4^{2-} が煉瓦内から除去されることがわかった。一方で電極に炭素棒を使用し通電条件が 5V、0.5A の場合、 SO_4^{2-} は陰極側にほとんど残留しないことが分かった。しかし移動した SO_4^{2-} は陽極側の煉瓦内に滞留してしまうことが示唆された。また SO_4^{2-} の除去率は $39.6 \pm 6\%$ と銅板と比べて低い結果であった。しかし通電後の目視観察の結果、通電を行なった試験体は通電しなかったものと比較して塩の析出を大幅に減少させることができていたことから塩の析出を抑制させるためには十分な除去率であると言える。

(3) ED 試験後の試験体曝露試験

(i) 試験体と試験方法

次に ED 処理を施した試験体を一定環境下で暴露させることで、煉瓦表面状態に変化があるのか、塩類の析出の有無などの確認及び ED による脱塩効果の継続性を確認することを目的に ED 後の曝露試験を行った。試験体は歴史的煉瓦の物性を模した煉瓦を縦 5 cm、横 4 cm、高さ 5cm に裁断し、35.5 g/L (0.25 M) の濃度に調整した Na_2SO_4 水溶液に 5 日間浸漬させ、その後乾燥させたものを用いた。試験体作成後、(2) の ED 試験と同様の手順で通電後、温度 25℃、60%RH の環境下に 7 日間試験体を暴露させその後煉瓦表面状態の目視観察を行った。通電条件は全て 5V、0.5A とし、通電期間は 8 日間とした。また通電 4 日目に加水したものと通電期間中は水を与えなかったものを用意した。また電極には銅板と炭素棒の 2 種類をそれぞれ用いた。

(ii) 結果と考察

まず電極に銅板を用いて通電中に加水した場合、試験体の陽極側に黒色部分が形成され、この部分からは Cu_2O が検出された。このことから、通電しながら加水した場合、電極素材が溶出し試験体内へ流入した可能性が考えられる。しかし陰極側から黒色部分にかけての範囲は塩の析出は見られず、表面状態は良好であった。炭素棒の場合においても、銅板電極と同様に試験体の一部に変色が見られたことから、通電によって電極素材が溶出し、試験体内に流入してしまうことが判明した。しかし、炭素棒電極の場

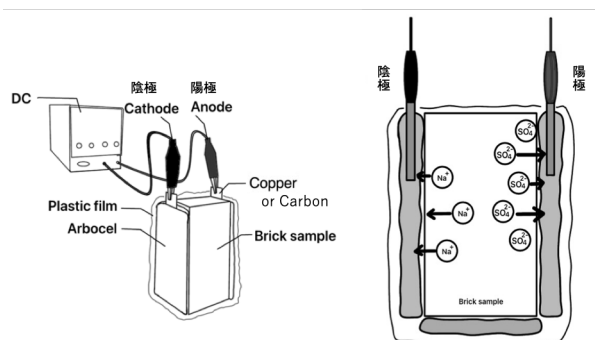


図5 EDモデル(著者作成)

合は通電によって炭素素材が流入した箇所は曝露後も塩の析出は見られず、表面からの崩落等は確認されず表面状態は良好であった。以上のことから、いずれの電極素材を用いた場合でも通電を行うことで、通電後縁の析出は大幅に抑制され、表面崩壊も起きないことから、ED による脱塩効果とその持続性があることを確認した。

(4) ED 処理後における水の吸い上げ試験

(i) 試験体と試験方法

ED 処理後の煉瓦に水が供給された場合の脱塩効果を確認すべく水の吸い上げ試験を行った。試験体は歴史的煉瓦の物性を模した煉瓦を縦 5 cm、横 4 cm、高さ 5cm に裁断したものを 4 点用意した。4 点中 3 点を 35.5 g/L の濃度に調整した Na_2SO_4 水溶液に 5 日間浸漬させ、その後乾燥させた。塩を含有させた試験体 3 点のうち 1 点は脱塩処理を施さず、残る 2 点は炭素棒と銅板をそれぞれ用いて ED 処理を施した。通電条件はいずれも 5V、0.5A とし、8 日間通電を行った。また通電 4 日目には試験体に加水した。その後各試験体をプラスチック製コンテナ(縦 8cm、横 7cm、高さ 4cm)内に入れ、純水を約 30g~35g 投入した。純水の量は試験体の容積含水率から体積の約 30%の量に設定した。その後投入した水が完全に吸い上げられることを待ち、その後 4 日間室内で乾燥させた。そして 4 日経過後に目視観察による煉瓦表面状態の確認を行った。

(ii) 結果

脱塩処理を施さなかった試験体は吸水後、蒸発面で多量の塩が析出していた。一方で通電を行った試験体は 2 点とも塩の析出が大幅に抑制されており、蒸発面の一部では塩の析出が全く見られず、表面状態も良好であった。このことから ED 処理を行ったものは脱塩処理後に水が侵入した場合でも ED によって SO_4^{2-} が除去された箇所では脱塩の効果が継続することがわかった。

5. まとめ

国内に現存する煉瓦造の文化財は明治期から大正期にかけての限られた 70 年間に建設されたものであり、当時の技術や政治を知るための情報や高い歴史的価値、学術的価値を有している。そしてこれらの文化財は今後様々な形態で活用されていくことが予想され、構造物や建造物としての保存に留まらず、煉瓦表面の美しさや意匠性など煉瓦個々も長期的に

保存していく方法を検討すべき段階であると言える。

本研究では自然科学的手法によって明治期に製造された歴史的煉瓦は特性にばらつきがあり、大正期に突入するにつれてそのばらつきは小さくなり、煉瓦の品質が向上することを明らかにした。また煉瓦の特性と劣化には関係性があることが示唆された。長期的な現地調査では猿島砲台跡を事例に、煉瓦の崩壊は構造物内の温湿度環境と煉瓦内の塩類、そして煉瓦内の水分挙動によってもたらされていることを特定した。また劣化要因の一つである塩類の起源は煉瓦本来に由来するものである事が示唆された。

煉瓦造の文化財を取り巻く環境を理解した上で、歴史的煉瓦に適した保存処置方法の一つとして ED による処置が塩類風化による劣化を抑制させる効果があることを見出した。また本研究で開発した ED モデルは煉瓦表面が脆くなっている歴史的煉瓦に対してアーボセルを用いたことで煉瓦を傷つけることなくまた水分調節もし易いため、歴史的煉瓦の脱塩モデルとして適していることが期待される。現段階では室内での試験段階であるが本研究で得られた知見は実践的試験に移行するための重要なデータになることが期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、ご指導ご鞭撻を賜りました松井敏也教授、鉾井修一教授、上北恭史教授、下田一太准教授には心から感謝の意を表します。横須賀市教育委員会様、牛久市文化芸術課様、京都文化博物館様、飯豊町教育委員会様には貴重な歴史的煉瓦試料の提供にご協力して頂きましたこと、厚くお礼申し上げます。長期的な現地調査にご同行・ご協力して頂きました横須賀市教育委員会・川本様、物性調査にご協力していただきました株式会社鴻池組技術研究所・高松様、成島様、水分吸脱着試験を実施してください北海道大学大学院工学研究院長野教授及び環境システム工学研究室の皆様には心から感謝いたします。皆様のご協力、多大なご助言のもと本研究を無事に遂行することができました。この場を借りて深謝の意を表し、謝辞いたします。

参考文献

- 1) 横須賀市教育委員会：「横須賀市文化財調査報告書 第 51 集 東京湾要塞跡 猿島砲台跡 千代ヶ崎砲台跡」、2014
- 2) 素木洋一：「セラミック外論 (40)」、窯業協会誌、71(813)、p.C470-C476、1963、Doi : https://doi.org/10.2109/JCERSJ1950.71.813_C470
- 3) 徳光卓、芦田公伸、古賀裕久：「電気化学的脱塩工法による塩害補修の留意点」、コンクリート工学、vol. 48、no.5、pp. 115-118、2010、doi: 10.3151/COJ.48.5_115.
- 4) IN SITU Museum and Archive Services：「ARBOCEL BC1000 powderd cellulose」、https://www.insituconservation.com/en/products/resin_additive/s/arbocel_bc1000、(Reading date: 2022/04/11)