

論文 国立西洋美術館本館躯体の保全に向けた表面保護材の特性に関する研究

御園 麻衣子^{*1}・今本 啓一^{*2}・永井 香織^{*3}・清原 千鶴^{*4}

要旨：本研究では，国立西洋美術館本館躯体の保全に向けて，劣化予防保全に資する材料として，表面含浸材と表面コーティング材を取り上げ，それらの視覚的変化および水分浸透抑制効果について実験を行い，併せて非・微破壊試験や塗布材の試し塗りを通して効果の検証を行った。その結果，表面含浸材では視覚的変化が少なく，特にシラン系含浸材では水分の浸透抑制効果に優れていることが確認された。それに対し，表面コーティング材は複層になることで水蒸気としての水分の浸透抑制効果が高くなるが，視覚的変化が大きくなった。また，実地調査を通して塗布材の劣化に対する抑制効果の低減は透気試験や表面含水率の測定によって評価できることが確認された。

キーワード：コンクリート，表面含浸材，表面コーティング材，吸湿率，透気係数，表面含水率

1. はじめに

文化財建造物などの資産を後世に遺すために保存・修復の果たす役割が重要であることは言を俟たないが，保存・修復にあたって留意されていることの一つに，見外観を極力変化させないことが挙げられると考える。

一方，鉄筋コンクリート造（RC）建築物の歴史は約100年を迎え，この分野においても保存のための具体的な技術を整備する必要性が生じている。

しかし，建物の補修方法としての漏水や鉄筋腐食などの局所的な不具合対策の多くは，その補修跡に対する外観上の特段の配慮はなく，さらには経年による外観の変化についても不明な点が多い。

そこで，このような保存に資する劣化予防保全のための材料として，表面含浸材と表面コーティング材、(共に以下塗布材)を取り上げ，中性化および水分の浸透抑制効果について検証した結果を報告した¹⁾。

今回は実建造物への適用性を検証するため，実建造物のコアを用いて視覚的変化および湿気などの水蒸気としての水分の浸透抑制効果を検証した（実験1）。また，併せて実建造物にて現状の躯体調査および塗布材の試し塗りをを行い，水分浸透抑制効果の検証を行った（実験2）結果を報告する。

2. 調査目的および構造物概要

本研究では，東京都台東区上野に位置する「国立西洋美術館本館」（以下，西美本館）を調査対象とした。西美本館の概要を表-1に示す。

西美本館は，Le Corbusierによって設計された国内唯一

の建造物で，2007年に重要文化財（建造物）に登録されている。現在，西美本館の長期に渡っての建造物としての維持保全することが求められており，本研究では非・微破壊試験によって躯体の劣化状態を把握すると共に，その調査結果が部分的な改修計画に資することを目的とした。

表-1 国立西洋美術館本館・建物概要

所在地	東京都台東区上野公園7番7号
竣工	昭和34年(1959)3月
設計	Le Corbusier
設計補助	坂倉準三、前川國男、吉阪隆正
構造設計	横山建築構造設計事務所
工事請負	清水建設株式会社(建築工事)
建築面積	1,587m ²
延床面積	4,399m ²
軒高	11.46m(標準地盤面より屋階パラペット上端迄)
構造形式	鉄筋コンクリート造3階建地下1階

3. 【実験1】コア試験体を用いた実験

3.1 試験体概要

試験体は，平成21年（2009年）に西美本館のB1階ピット部の壁面から採取したφ75mm，長さ約100mm～150mmのコアとした。採取後は気温20℃，R.H.60%の恒温恒湿室にて保管していた。表-2に塗布材の一覧を示す。既往の研究¹⁾より，効果が予測される表面含浸材S-2（以後，S），SS-1（以後，SS）および表面コーティング材E-Fを用いた。また新たな塗布材として，湿気に対する抑制効果が高いとされる表面コーティング材AS，Aを用いて検討を行った。

塗布方法や塗布量は，各材料で標準とされている規定

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 生産工学部建築工学科 准教授 博士(工学) (非会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託補手 博士(工学) (正会員)

に則して施工した。また、各試験体とも、建造物表面となる面を塗布面とし、側面と裏面（構造物壁内部）にはアルミ箔テープを貼り、塗布面と側面の境には水分および気体の浸入を防ぐためにエポキシ樹脂でシールを施した後、後述の実験に供した。

表-2 塗布材一覧

	主成分	記号	塗布回数	総塗布量 (g)
表面含浸材	シラン・シロキサン系	SS	1回	0.73
	シラン系	S	2回	2.18
	フッ素樹脂系	E-F	3回	1.42
表面コーティング材	アクリルシリコン系 +専用骨材	AS	2回	1.81
	1～4回目:アクリル系 5回目:アクリルシリコン系	A	5回	3.27

3.2 実験概要

(1) 光沢度測定

光沢度は JIS Z 8741 に準拠した光沢計を用い、各試験体の表面を無作為に 6 か所選定し測定した。

(2) 色差測定

色差は色差計を用いて、 $L^*a^*b^*$ 表色系 (JIS Z 8729) に準じて、各試験体の表面を無作為に 3 か所選定し測定し、以下式(1)にて算出した ΔE を色差の値とした。

$$\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 L ：色の明度を示し、黒(0)< L <白(100)

a ：緑(-)< a <赤(+)

b ：青(-)< b <黄(+)

(3) 吸湿率実験

吸湿率は、試験体を 105℃にて 48 時間加熱した後、写真-1 に示すような、調湿材として底面に水を張った簡易チャンバーを用い、相対湿度 100%の環境下において吸湿量を測定した。なお、吸湿期間は 14 日とした。

また、吸湿率は、コア試験体の長さや質量などのばらつきを考慮して、式(2)による体積変化にて求めた。

$$\text{吸湿率 (\%)} = \frac{C}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 C ：試料の総吸湿量(g)

C_0 ：105℃の加熱乾燥後の試料の質量(g)

(4) 温湿度測定

外壁表層部から躯体内部の水分の挙動を把握するために、コア試験体内外部の温湿度を測定した。試験体裏面より中央に幅約 20mm、表層より深さ約 25mm になるように削孔を施し、その内部に温湿度ロガーを埋め込んだ。孔はゴム栓で蓋をし、隙間はエポキシ樹脂にてシールを施した後、水分の浸入を防ぐために裏面および側面にはアルミ箔テープを巻きつけ、現地にて約 1 カ月間暴露した。(写真-2)

(5) 透気試験

透気試験は RILEM Chembureau 法（以下、RILEM 法）を用いた。RILEM 法の概要図を図-1 に示す。RILEM 法では前処理として温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{R.H.}60 \pm 5\%$ の環境下にて試験体内部の含水率を安定させた。試験体を試験セルに格納し、試験体周囲を機密にした状態で圧力を印加して透気量からハーゲン・ポアズイユ則にしたがって透気係数 $K (\text{m}^2)$ を算出する。3 回の異なる印加圧力における透気係数の平均値をコンクリートの試験体の代表値とするものである。



写真-1 簡易チャンバー



写真-2 コア試験体写真

（左；削孔位置の詳細、
右；西美本館での暴露の様子）

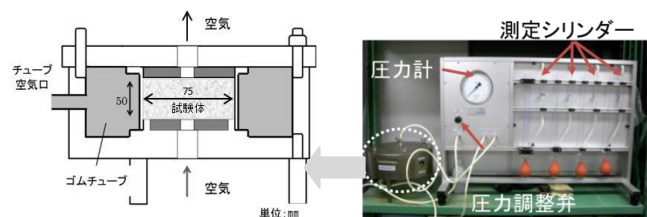


図-1 RILEM 法（左；試験セル概要図、右；試験機）

(6) 等温吸着試験

等温吸着試験は、吸着質として水蒸気を用い、定圧法にて平衡含水率を求めた後、式(3)より相対含水率を算出した。本試験では、試料を 105℃にて 48 時間乾燥させた後、相対圧を 0.05%～0.99%の範囲で 0.05s 刻みで圧力を設定し、全自動により等温吸着曲線を求めた。

$$\text{相対含水率 (\%)} = \frac{W_i}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 W_i ：ある相対圧時の試料の吸着量(g)

W_0 ：相対圧 0.99%時の試料の吸着量(g)

4. 実験結果

4.1 色差・光沢度

図-2、図-3 に色差および光沢度の結果を示す。光沢度は 0 に近い程、光沢を示さない。

E-F, A などの表面コーティング材では相対的に高い光沢度を示しているのに対し、SS, S などの表面含浸材は無塗布と比較して視覚的变化は見られず、無塗布と近い値となった。

色差については、表面含浸材および表面コーティング材の種類間で大きな差異は認められず、いずれも無塗布

と変化が見られない結果となった。

4.2 吸湿率・透気係数

図-4 に吸湿率の結果を示す。表面含浸材、表面コーティング材のいずれも水蒸気としての水分の浸入抑制効果が認められた。特にアクリル系表面コーティング材 A が最も優れている。これは、フッ素樹脂系表面コーティング材 E-F やアクリルシリコン系表面コーティング材 AS では、目視による塗膜厚さは確認できなかったのに対し、アクリル系表面コーティング材 A では、約 0.07mm の塗膜層が確認され、塗布量および塗布回数が増えることで表面の塗膜層が厚くなりより水蒸気の浸入を抑制したためと考える。

また、図-5 に吸湿率と透気係数の関係を示す。吸湿率と透気係数は概ね相関があることが分かる。これは室内等の温湿度が一定した環境において、塗布材の水蒸気の浸入抑制効果を透気係数によって評価できると考える。

4.3 温湿度測定

暴露したコア試験体は、視覚的変化が少なく、既往の研究¹⁾で高い撥水効果が認められた S, 上記 4.2 の結果より水蒸気の浸入抑制効果の高かった A および無塗布の 3 体とした。

図-6 にコア試験体内外部の温度推移を示す。無塗布試験体および試験体 S, A 共に外部温度と差異はなかった。

一方、図-7 に試験体内部の湿度の推移を示す。無塗布に対し、塗布材を用いることで内部湿度の上昇を約 20~30%程抑制していることが確認できた。また、11 月 25 日の暴風雨後、無塗布試験体は内部湿度が上昇したのに対し、試験体 S, A の内部湿度は変化がなかった。これは S, A 共に高い撥水効果が発揮されたためと考える。またシラン系表面含浸材 S は、アクリル系表面コーティング材 A と比較すると、内部湿度は約 10%低い状態を維持していた。このことからシラン系表面含浸材は、塗布による視覚的変化を与えず、本構造物に対してアクリル系表面コーティング材 A と同等の水分浸透抑制効果を有することが確認できたと考える。

4.4 相対含水率

図-8 に相対含水率と 4.3 より採取した各試験体の内部湿度の関係を示す。無塗布では相対含水率が約 25%~100%と幅があるが、降雨の影響により高い含水状態を保ち、鉄筋腐食などの躯体内部の劣化が進行していくことが予想される。

それに対し、塗布材を用いた場合の相対含水率はシラン系表面含浸材 S では約 23%前後、アクリル系表面コーティング材 A では約 27%前後と変動が小さい。既往の研

究²⁾より、鉄筋腐食の発生率および成長率が抑制されるのは相対含水率 35%~50%以下とされていることから、塗布材を施すことにより鉄筋腐食による躯体の劣化の進行を抑制できると考える。

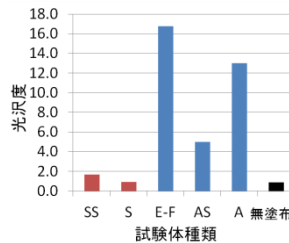


図-2 光沢度の測定値

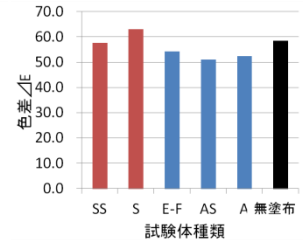


図-3 色差の測定値

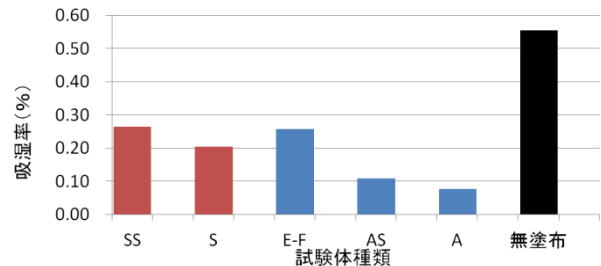


図-4 吸湿率の比較

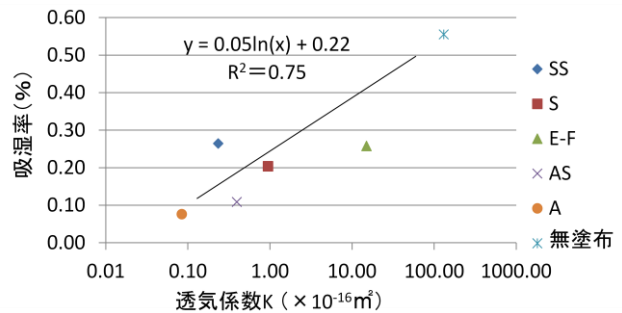


図-5 吸湿率と透気係数(RILEM 法)の関係

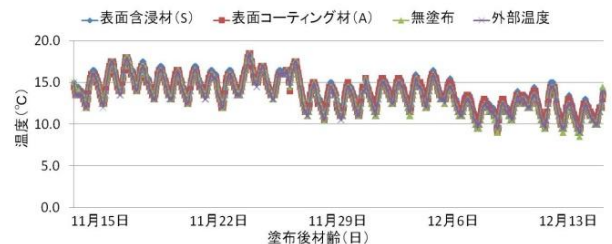


図-6 暴露試験体内部温度および外部温度の推移

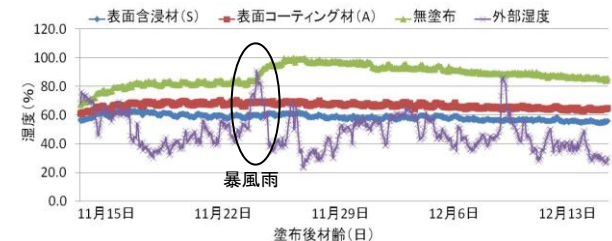


図-7 暴露試験体内部湿度および外部温度の推移

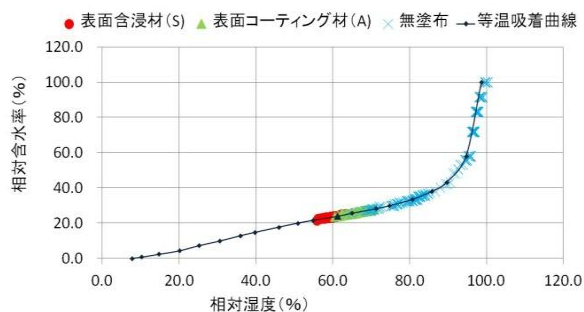


図-8 相対含水率と各試験体の内部湿度の関係

5. 【実験 2】国立西洋美術館躯体の調査

5.1 前庭階段における表面コーティング材の効果

西美本館の躯体保全、および今後の維持管理の手法の確立に向けて、現在の躯体状態を把握するため、微・非破壊調査を行った。図-9 に調査箇所を示す。平成 5 年（1993 年）にフッ素樹脂系表面コーティング材 E-F にて維持補修が行われている箇所（以下、前庭階段）を選定した。この前庭階段は、西美本館の前庭に増築されたものである。本論では主として表面含浸材を主たる対象としているが、既に表面コーティング材が適用されている本箇所について調査を行い、経年における中性化抑制効果と透気性の関係について検討を行った。

5.2 微・非破壊調査 測定項目

(1) 中性化深さ

中性化深さは、 $\phi 25\text{mm}$ のコアを採取して、JIS A 1152 に準拠してノギスを用いて測定した。

(2) 透気係数

透気係数はトレント試験機（ダブルチャンバー法）を用いて計測を行った。この方法は、チャンバー内を負圧にし、圧力が大気圧に回復するまでの圧力の経時変化を測定することで透気係数を算出するものであり、コンクリート表層の緻密性を非破壊で定量的に評価するものである。

5.3 本館躯体における表面含浸材の適用

西美本館躯体は、既往の研究³⁾により中性化による鉄筋腐食が進行していることが分かっており、維持保全の観点から、これ以上の鉄筋腐食を抑制するために、躯体内部への水分の浸入を抑制することが必要である。

そこで、各部位に応じた最適な補修材の選定とその効果を検証するため、北西上部壁面および南東正面玄関軒裏において塗布材の試し塗りをを行った。試し塗りの施工概要を表-4 に、施工箇所を図-9 に示す。塗布量は全施工の合計量である。塗布材は【実験 1】の結果より、視覚的変化が小さく、水分の浸透抑制効果がみられるシラン系表面含浸材 S を用い、後述の実験に供した。

表-4 試し塗りの施工概要

施工箇所	施工面積(m^2)	塗布量(g)	塗布回数(回)
北西・喫煙所上部壁面	0.36	190	8
南東・正面玄関軒裏	0.18	95	9

5.4 試し塗り調査 測定項目

(1) 色差・光沢度

【実験 1】と同様の手順および方法で、無塗布部およびシラン系表面含浸材 S の塗布部において、計測を行った。

(2) 透気係数

5.2 と同様に、トレント試験機を用いて、塗布前と塗布後 30 日において計測を行った。

(3) 表面吸水試験

コンクリート構造物の表面吸水試験法 S W A T（Surface Water Absorption Test）とは、構造物の表面にカップを密着させて水を供給し、10 分間でコンクリート表層部の吸水挙動をとらえ、非破壊にてコンクリート表層部の品質を評価する試験方法である。鉛直面にて行う試

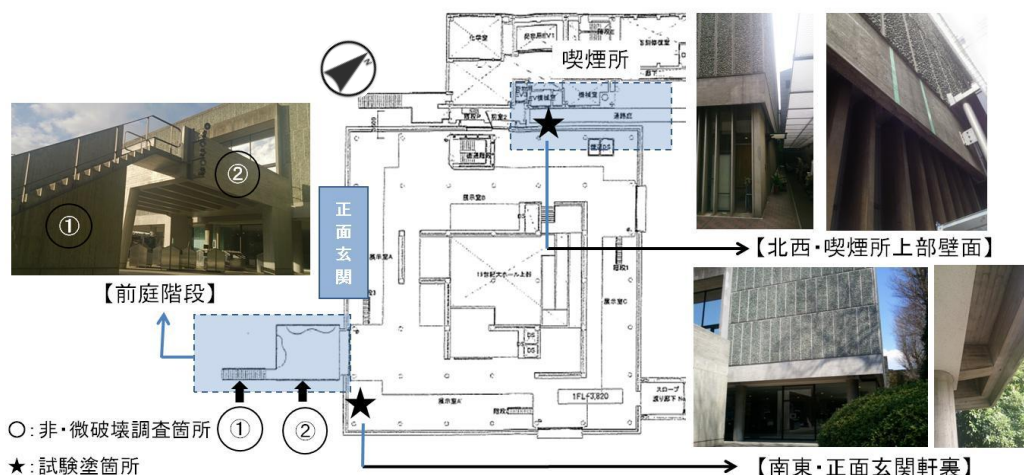


図-9 国立西洋美術館の躯体調査箇所（※平面図一部抜粋）

験方法であるため、本研究においては、北西・喫煙所の上部壁面のみにて、無塗布部、シラン系表面含浸材 S の塗布部において、各 2 回ずつ計測を行った。

また、目視測定のため、既往の研究⁴⁾に従い、定数 a、n を算出し、式(4)にて吸水速度 p (ml/m²/s) を求めた。

$$p = at^{-n} \quad (4)$$

ここに、p：表面吸水速度(ml/m²/s)

a：初期の表面吸水速度(ml/m²/s)

t：注水が完了してからの経過時間(s)

n：吸水速度の時間変化を表す係数

(4) 表面含水率

表面含水率は、1 分間噴霧器にて水を噴霧し、1 分後表面を拭き取り、電気抵抗式モルタル水分計を用いて塗布部分および無塗布部分にて、施工面積に応じて各 3 または 5 箇所ずつ測定を行った。測定は拭き取り後、0 秒、30 秒、60 秒、90 秒、2 分～5 分まで 1 分毎に計測を行った。

また、無塗布および表面含浸材 S を施した試験体を用い、同様の手順で表面含水率の測定を行った。また同時に、式(5)にて質量含水率の計測を行った。試験体は【実験 1】と同様に西美本館から採取したφ75mm、長さ約 5cm のコアとし、底面および側面にはアルミ箔テープを貼り、塗布面と側面の境には水分の浸入を防ぐためにエポキシ樹脂にてシールを施した。また、前処理として西美本館での試験と同条件となるよう、試験体の表面積に応じて噴霧時間を調整し測定を行った。

$$w = \frac{W_t - W}{W} \times 100 \quad (5)$$

ここに、w：質量含水率(%)

W：噴霧前の質量(g)

W_t：噴霧後、t 秒後における質量(g)

6. 微・非破壊調査結果

6.1 中性化及び透気係数（前庭階段）

中性化深さと透気係数の結果を図-10 に示す。透気係数と中性化深さには相関があり、透気係数が $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下であれば中性化はかなり抑制されていると考える。前庭階段においてはコーティング部が残っている箇所や経年により剥がれている箇所もあるが、今回の結果により、表面コーティング材を使用した建造物においても、経年によるコーティング材の摩耗や減失に伴う中性化抑制効果の低下傾向を、透気試験によるモニタリングにより管理できることが分かった。

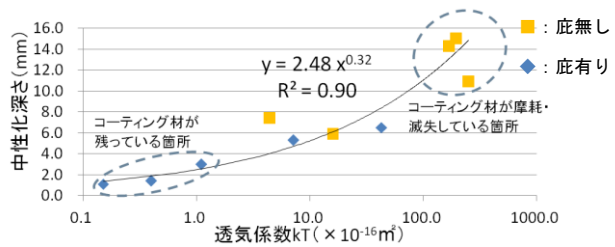


図-10 中性化深さと透気係数の関係

7. 試し塗り試験結果

7.1 色差・光沢度

色差および光沢度の結果を図-11、図-12 に示す。【実験 1】と同様に、色差、光沢度共に無塗布との差異はなく、実建造物においても、シラン系表面含浸材 S を用いた場合に視覚的变化はないことが確認された。

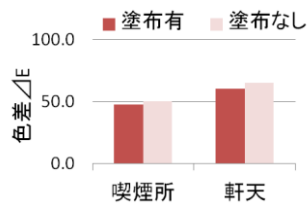


図-11 色差ΔEの測定値

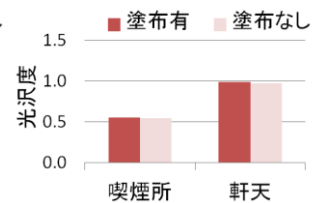


図-12 光沢度の測定値

7.2 透気係数

図-13 に透気係数の結果を示す。いずれも塗布後に透気係数は高くなった。これは、既往の研究¹⁾と同様の結果であり、含浸材はコンクリート表面に塗布することで、雨水や湿気などの水蒸気の浸入を抑制し、さらに内部の水分を外へ放出することを許容するため、無塗布と比較してコンクリート内部の水分状態が低くなったことが影響していると考えられる。これまでの検討では一般に含浸材を塗布することにより、周囲からの水分の浸透が抑制され、コンクリート内部が乾燥することにより透気係数が大きくなる傾向が見られたが、4.2 の室内実験ではこの逆の傾向を示している。これは、降雨や湿度の変化が少なくかつ比較的低い条件（恒温恒湿室：温度 20℃、相対湿度 60±5%）で試験を実施したため、コンクリート表層に膜が形成される効果が卓越したためと考えられる。この点については今後検討したい。

上記の結果は、定期的に透気係数を測定することで塗布材の効果の持続性を確認できることが示しており、6.1 の結果からも示されているように、経年による抑制効果の変化を、透気試験によりモニタリングできると考える。

7.3 表面吸水試験

図-14 に表面吸水試験の結果を示す。無塗布に比べシラン系表面含浸材 S を塗布した場合、水を噴霧した 10 分時点での表面吸水速度が大幅に低下していることが確

認められた。これは、塗布材を用いることでコンクリート表層部の吸水抵抗性が向上していることを示しており、シラン系表面含浸材の高い撥水効果が確認された。また、実建造物において、表面吸水試験などの非破壊試験によって、外壁などを傷つけることなく、表面保護材の効果の持続性を確認できると考える。

7.4 表面含水率

図-15 に表面含水率の結果を示す。両測定箇所において、シラン系表面含浸材 S 塗布部分は無塗布より低くなる傾向であった。これは、先述した 6.2 や 7.3 の結果にも見られるように、撥水効果の高いシラン系表面含浸材 S を塗布することで、コンクリート躯体内部への水分浸入を抑制できることを示している。これより、シラン系表面含浸材 S を塗布することで、鉄筋腐食など、水分の浸入などが要因となるコンクリート躯体内部の劣化の進行を抑制できると考える。

また、西美本館から別途採取したコア供試体（φ75×100mm）に対しても同様の塗布と試験を行った。図-16 にコア供試体の表面含水率の推移を示す。シラン系表面含浸材 S を塗布した試験体では無塗布と比較して、表面含水率は計測直後で約 1.5% 低く、3 分を経過すると一気に下降し、西美本館躯体と同様の傾向となった。一方、図-17 に R.H.60% における気乾状態を原点とした表面含水率の変化と質量含水率の変化の関係を示す。表面含水率と質量含水率では一定の相関が見られる結果となった。これにより実建造物において、表面含水率を測定することで、鉄筋腐食に関わるコンクリート内部の含水率を概ね評価できると考える。

8. まとめ

本検討における西美本館の保全に向けた表面保護材の特性に関する結果を以下にまとめる。

- 1) 表面コーティング材は複層塗によって表面に多層の膜を形成し、水蒸気の浸入抑制効果が発揮されるが、光沢度が高く、視覚的変化が大きい。
- 2) 表面含浸材は視覚的変化がなく、特にシラン系表面含浸材では、高い撥水効果によりコンクリート内部の湿度は低く保たれる。西美本館においては、鉄筋腐食等の劣化の進行を抑制できると考える。
- 3) 室内実験における塗布材の吸湿抵抗性は透気係数にて評価できる。
- 4) 西美本館への試し塗りにより、シラン系表面含浸材の水分浸透抑制効果を確認した。特に、西美本館躯体においては、表層部の吸水抵抗性が向上すると考える。
- 5) 透気係数、表面吸水試験および表面含水率などの非破壊試験による定期的な測定により、塗直しなどのメンテ

ナンス時期を推定できると考える。

謝辞

実建造物の試し塗り調査において、BASF ジャパン株式会社様にご協力賜りました。ここに深く感謝致します。

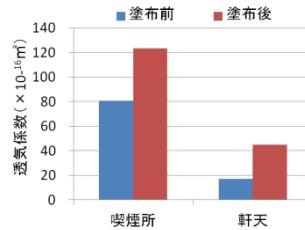


図-13 透気係数の測定値

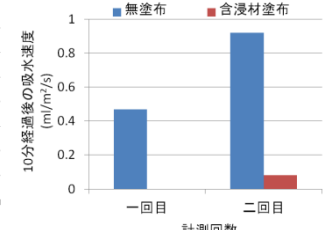


図-14 表面吸水試験の測定値

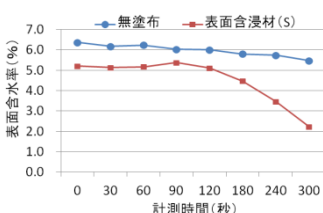
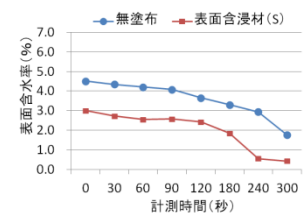


図-15 表面含水率の推移 (左；喫煙所上部、右；軒天)

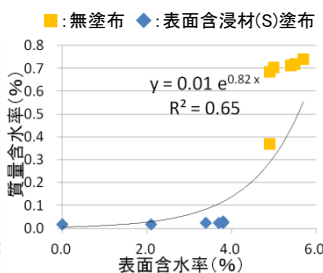
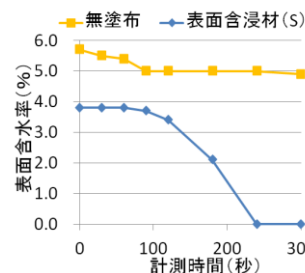


図-16 コア試験体における表面含水率の推移 図-17 表面含水率の変化と質量含水率の変化の関係

参考文献

- 1) 御園麻衣子, 今本啓一, 永井香織, 清原千鶴: 表面含浸材と表面コーティング材によるコンクリート躯体保護性能に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1693-1698, 2013
- 2) 山本佳城, 榊田佳寛, 中村成春: 塩化物を混入したコンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 568 号, pp.27-33, 2003.6
- 3) 今本啓一, 兼松学, 梅津裕二, 今川憲英, 田中章夫: 国立西洋美術館本館の躯体健全調査, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第 10 巻, pp.93-98, 2010.10
- 4) 林和彦, 細田暁, Usman AKMAL, 藤原亜希子: コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.196-203, 2012