報告 国立西洋美術館本館躯体保全に向けた表面含浸材の効果検証手法に 関する研究

清原 千鶴*1·今本 啓一*2·御園 麻衣子*3·福田 京*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塗布された表面含浸材の水分浸透抑制効果検証 手法について検討を行った。その結果,かぶりコンクリートの表層を評価する透気試験,表面含浸材の撥水 効果を確認する表面含水率試験,水分浸透抑制効果を確認するための表面吸水速度試験ならびにコンクリー ト内部の水分分布を確認する比抵抗試験を組み合わせることで,表面含浸材の水分浸透抑制効果を検証でき ることを示唆した。

キーワード:シラン系表面含浸材,透気係数,表面含水率,表面吸水速度,比抵抗

1. はじめに

国立西洋美術館本館(以下, 西美本館)は, 日本における ル・コルビュジエ設計の唯一の作品として知られており、2016 年において世界遺産に登録されている。そのため,美術館と しての機能を維持し、文化財としての価値を損なわず、ル・コ ルビュジエの設計理念を尊重するために、保全に力点を置 いた改修計画が行われている。西美本館躯体の保全におい ては,既往の研究 いにより中性化による鉄筋腐食が進行して いることが確認されていることから,これ以上の鉄筋腐食の 進行を抑制するため,鉄筋腐食要因の1つである水分の浸 入を抑制することを目的として、これまでの研究結果2)を基に、 2015 年 2 月に西美本館外壁部などにシラン系表面含浸材 (標準使用量:0.6l/m²,有効成分:95%以上,外観:淡黄色 透明液体)が塗布された。今後は、塗布された表面含浸材の 水分浸透抑制効果を定期的にモニタリングし効果の検証を 行うことが重要となってくる。そこで、ここでは表面含浸材塗 布後3年までの水分浸透抑制効果の検証を行った。

2. 調査概要

2.1 調査項目および調査箇所

調査項目を表-1 に,調査箇所を図-1 に示す。表面含 浸材(以下,含浸材)は,外壁および軒裏のコンクリート打放 し部全体に塗布されており,日射などの影響を比較するため に主に外壁ハチマキ部において全方位で同様の調査を行 った。

2.2 調査方法

調査箇所の外壁ハチマキ部は、平成 5 年に表面コーティ ング材による補修が施されている。そこで、今回の外壁補修 の際には、含浸材を内部にまで浸透させるため、塗布前に 中圧洗浄を行い、表面コーティング材の除去が行われてい る。洗浄後、乾燥期間を設け、静電容量式含水率計により含

*1 東京理科大学 工学部建築学科嘱託助教 博士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

*3 株式会社コンステック 修士(工学)(正会員)

*4 国立西洋美術館 専門職員

	表一1 調査項目											
	箇所 方位N		No.	色差	光沢度	透気 試験	表面含水率 試験	表面吸水 速度試験				
	外壁 ハチマキ 部	東	1	0	0	0	0	0				
		西	2	0	0 0		0	0				
		南	3	0	0	0	0	0				
		北	4	0 0		0	0	0				
	柱	南	5	I		0	_	_				
	律動 ルーバー	西	6	0	0	0	0	—				
a)東·調査箇所 c)南·調査箇所												



水率が 8%以下であることを確認後, 含浸材塗布を行い, 含 浸材の塗布前と塗布後材齢 2 か月, 2 年および 3 年におい て以下の項目の試験を行った。なお, 含浸材塗布は湿度の 低い冬期において実施されたため, 定期的なモニタリング測 定は冬期に行い, 降雨後は2日間以上乾燥期間を設けて実 施することとした。

(1)色差および光沢度

視覚的変化について検証を行うため, 色差と光沢度の計 測を行った。色差はハンディ型の色差計を用いて, L*a*b* 表色系(JIS Z 8729)に準じて, 各調査面 3~5 か所選定測定 し, 以下式(1)を用い, L₁*=0, *a*₁*=0, *b*₁*=0 に対する色 差を算出した。

 $\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$ (1) $\Box \Box \zeta, \quad \Delta L^* = L_2^* - L_1^*, \quad \Delta a^* = a_2^* - a_1^*, \quad \Delta b^* = b_2^* - b_1^*$



光沢度はJISZ8741に準拠したハンディ光沢計を用いて, 各調査面3~5箇所選定し,計測した。

(2)透気係数

ダブルチャンバー法を用いて、透気係数を算出し評価を 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、圧力の経時的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。

(3)表面含水率

表面含水率は、含浸材の撥水性を確認するための測定 項目である。1分間噴霧器にて測定面に水を噴霧し、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。

(4)表面吸水速度試験

コンクリート構造物の表面吸水試験法 SWAT³⁾ (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分間のコンクリート表層部の吸水挙動をとらえることで、非破壊にて表層の品質を評価する試験方法である。本調査では、東西南北の上部外壁において、1~2回ずつ計測した。塗布前後の測定時は目視測定を行ったため、既往の研究³⁾に従い、定数 a, n を算出し、以下、式(2)にて表面吸水速度 $p(ml/m^2/s)$ を求めた。なお、塗布後材齢2 年以降においては自動計測装置を用いて測定を行ったが、目視測定と同一手法で表面吸水速度を算出した。

 $p = at^{-n}$

(2)

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

3. 調査結果

3.1 色差·光沢度

型枠の美しい木目が残る西美本館躯体では,維持保全に

あたって極力外観を変化させないことが求められる。そのため,塗布前後における色差,光沢度の差異を検証した。色差,光沢度の結果をそれぞれ図-2,図-3に示す。色差, 光沢度とも含浸材の塗布後材齢3年においても差異は小さく,視覚的変化が生じなかったことが確認された。

律動ルーバーは、塗布直後に光沢度が若干高くなる傾向 が確認された。律動ルーバーは、塗膜を施された表層仕上 げになっているため、塗布前の光沢度の測定値も他の測定 箇所よりも高く、塗膜の影響で、含浸材が内部に浸透せず、 塗膜の上に撥水層を形成したためと考える。

3.2 透気係数

透気試験に先立ち、コンクリート表層の含水率を電気抵抗 式水分計により計測した結果を図-4に示す。いずれも3~5 箇所の平均値を示している。コンクリート表層の含水率は北 面が最も高く、南面が低い傾向であった。特に塗布前の北 面は他の方位に比較して含水率が高く、他面に比べて含浸 材が浸透しにくい環境であったことが推測される。

ダブルチャンバー法による透気係数の測定結果を図-5 に示す。いずれも 3~5 箇所の平均値を示している。全体的 に概ね塗布前に比べて塗布直後に透気係数が小さくなる傾 向が確認できた。これは、含浸材が表層部に浸透しているこ とを示していると考える。しかしながら、それは一時的であり、 塗布後の調査結果を見ると、時間の経過とともにコンクリート 内部の水分が逸散され、透気係数が大きくなる傾向が見ら れた。

西美本館の透気係数と中性化速度係数に関する既往の 研究 4から得られた透気係数-中性化検量線を用いて中性 化速度係数の推定を行った。その結果が図-6 である。北 面の中性化速度係数は南面の約 6 割と推測される。既存構 造物を対象とした調査結果においてコンクリート内部の質量 含水率がコンクリートの中性化の進行に大きく影響すること が指摘 5されており、北面において含水率が高く含浸材が浸 透しにくい環境であっても、そもそも中性化が進行しにくい環 境であると考えられる。今後は、中性化の極めて緩慢な進行 と併せて評価・検討を行いたい。



3.3 表面含水率

含浸材の撥水性効果を検証する実験として水を噴霧後の 表面含水率の推移を測定した。図-7に300秒後の表面含 水率の測定結果を、図-8に表面含水率の推移を示す。い ずれも3~5箇所の平均値を示している。いずれの測定面に おいても塗布前よりも表面含水率の値が小さく、塗布後3年 においても一定の撥水効果が認められる。特に、東面およ び西面の外壁ハチマキ部、柱ならびに律動ルーバーは、表 面含水率の値が小さく、さらに測定開始時から測定終了後ま での表面含水率の変化率が大きく、高い撥水性を保持して いる。

一方,南面および北面外壁ハチマキ部においては,ある 一定の撥水効果が認められるが,塗布後2か月から他の測 定箇所ほどの撥水効果が認められなかった。

3.4 表面吸水速度

表面吸水速度試験結果を図-9に示す。東西面では、塗 布直後から表面吸水速度が低下する傾向が見られ、塗布後 3年においても高い水分浸透抑制効果が確認できた。南北 面は、東西面と比較して、測定時期によってばらつきが大き く、含浸材の塗布前後の表面吸水速度の差異が小さくなる 結果も見られており、期待するほどの明確な水分浸透抑制 効果が得られなかった。しかしながら、全体的には塗布後に 表面吸水速度は低下しており、一定の効果は発揮されてい るものと考える。なお、本試験はコンクリートの表層の影響を 受けやすいため調査前の降雨量や日射量などの影響も考 えられ、南北面の値のばらつきについては引き続き調査を行 う必要がある。

南北面の水分浸透抑制効果が他の測定面に比べて明確

に現れない傾向は表面含水率の測定結果と同様である。特 に、南面については、図-2に示す色差の結果が他面に比 べて高いことから経年による表面のスケーリングが生じている 可能性がある。表面含水率や表面吸水速度試験はコンクリ ートの表面状態に影響を受けやすいことから図のような結果 になったことが推測される。一方で、図-4に示すように南面 の表層の含水率は他の方位よりも小さく、また図-5より透気 係数が大きいことから、含浸材はより浸透しやすい環境にあ ったと思われるため、含浸材の水分浸透抑制効果が期待で きる。これらを検証するためにはコンクリート内部の水分量を 評価できる方法について検討する必要がある。そこで、ここ では、非破壊でかつ多点で測定可能な4プローブ法による 比抵抗測定の適用に着目した。

4.4 プローブ法の適用に関する検討

4 プローブ法(wenner 法などと呼ばれる)は、図-10 に示 すように等間隔に並んだ 4 つの電極を測定対象面に押し当 て、測定対象に流した交流電流と電位差電極間の電位差の 測定値から求める方法である。4 プローブ法は測定方法が簡 便なため、多くの研究がなされており、実務においても広く 使用されている。また、測定電流が浸透した深さまでの比抵 抗が得られるため、図-10に示すように中心点Oに対して、 電極間距離を長くすることで深さ方向の比抵抗の変化も測 定可能である。4 プローブ法では、比抵抗は式(3)を用いて 算出できる。

 $\rho_{\rm FP} = 2\pi \cdot a \cdot V/I$

(3)

ここに, ρ_{FP}:比抵抗 (kΩ・cm)

a:電極間隔(cm)

V:電位差電極間の電圧(V)

I:印加電流(A)

式(3)は、一様な無限体でかつ電極への接触点が無限に 小さい場合を想定して理論的に導きだされたものであるため、 複合材料であるコンクリートに適用した場合、材料の不均一 性、対象物の形状および測定方法などの影響が含まれた見 かけの比抵抗となり、特にコンクリート内部の含水状態の影 響が大きいことが指摘されている %。また、含浸材を塗布した 供試体では、電極接地に対する抵抗が大きいため計測がで きない事例⁷⁾があることも報告されている。

4.1 室内実験による検証

(1)実験概要

測定には写真-1 に示す比抵抗計 1 を用い,周波数 100Hz の矩形波電流を印加し,その時に得られる電位差電 極間の電圧とコンクリートに流れる電流から式(3)を用いて比 抵抗を測定した。使用した比抵抗計は,電極間隔ならびに 印加する電流値を変化させることが可能であり,幅広いレン ジで比抵抗が計測できる。測定は1地点で5回行い,それら の平均値を測定値とした。使用した電極の直径は4mmであ



図-9 10分経過後の表面吸水速度



表-1 コンクリートの調合

種類	W/C	s/a		単位量	Ad	AE					
	(%)	(%)	W	С	S	G	(C×%)				
Ν	62.5	48.2	179	286	858	943	0.7	4A			
W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材											

Ad:AE 減水剤, AE:空気量調整剤

9, 電極の先端には電解質クリームを用いた。測定した電極 間隔は3,4 および5cmである。また,比較のために実務で も利用されている写真-2に示す比抵抗計2も用いて同様 な実験を行った。比抵抗計2の電極間隔は5cmである。な お,ここでは写真-1に示す比抵抗計で計測した測定値を 比抵抗 FP, 写真-2に示す比抵抗計で測定した測定値を 比抵抗 R として示す。

使用したコンクリートの調合表を表-2 に示す。コンクリー ト供試体は、材齢 28 日まで恒温恒湿室内(温度 20℃、相対 湿度 60%)にて封緘養生を行い、その後は恒温恒湿室内に て気中養生を行った。コンクリート供試体の寸法は 100×100×400mmであり、100×400mmの1面を暴露面とする ために、エポキシ樹脂にて残り5面をシールした。また、含浸 材塗布が比抵抗に及ぼす影響を検討するためそれぞれのコ ンクリートに対して、西美本館に適用したシラン系表面含浸 材を材齢 56 日において塗布した。含浸材塗布後材齢 7 日 において供試体を 40℃の乾燥炉にて 10 日間乾燥させた後、 暴露面から吸水させ乾燥状態から湿潤状態に移行させるよ うな環境条件(吸水過程)と湿潤状態から乾燥状態に移行さ せる環境条件(乾燥過程)にて比抵抗を測定した。



図-11 表面からの深さと 比抵抗および質量含水率の関係



図-12 吸水および乾燥過程による比抵抗値の推移



(2)測定結果

含浸材塗布前における供試体の表面からの距離と質量含 水率および比抵抗の関係を図-11に示す。コンクリートの質 量含水率は、暴露面から深さ方向に2~2.5cm 間隔でカットし、 JIS A 1476 に準拠して行った。なお、比抵抗値においては表 面から電極間隔と同一の深さ方向までを評価していると仮定 して示している。これによると表面に近いほど質量含水率が 小さくなっており、比抵抗 FP は表面に近いほど高い値を示 している。また同一の電極間隔であれば機種の差は見られ ない。一般に比抵抗が高いほど含水率は低い値を示すこと から比抵抗計1により表面から深さ方向における質量含水率 の推定が可能であることが示唆された。

含浸材塗布後の吸水および乾燥過程における比抵抗の 推移を図-12 に示す。図-12a)によると,吸水時間の経過 とともに,比抵抗FPが減少しており,特に無塗布供試体にお いては,急激に比抵抗 FP が減少している。これは,水中浸 漬により供試体内部の水分量が増加し,それに伴い抵抗値 が減少しているものと考えられる。また,含浸材を塗布した供 試体の比抵抗は無塗布供試体の値よりも大きくなっている。 これは,含浸材の水分浸透抑制効果により,含浸材を塗布し た供試体内部に浸透する水分量が少ないため比抵抗値が 無塗布よりも大きくなったものと考えられる。

図-12b)より乾燥直後はいずれの試験体も比抵抗値が小 さくなっているが、時間の経過とともに緩やかに値が大きくな っている。吸水過程に比べて短時間の乾燥過程における比 抵抗の変化は小さい。乾燥による水分逸散により比抵抗が 増加したものと考えられる。乾燥直後比抵抗値は,乾燥に伴 う供試体内部の水分分布の急激な変化による影響を受けて いることも考えられ,引き続き検討を行っていきたい。

これらのことから,吸水および乾燥ならびに含浸材塗布の 有無が供試体内部の水分量に及ぼす影響を比抵抗により 検証が可能であることが示唆された。

4.2 曝露供試体による検証

既往の研究⁸において作製した3種類のシラン系含浸材 を塗布した曝露供試体(1200×900×100mm)を用いて比抵抗 FP(電極間隔 30mm)ならびに質量含水率の計測を行った。 その結果を図-13および図-14に示す。表記中のS-1が 西美本館で使用した含浸材と同一のものである。これによる と、無塗布Nに対して含浸材を塗布した供試体の比抵抗は いずれも高い値を示している。なお、比抵抗Rにおいては含 浸材を塗布した供試体において測定ができなかった。比抵 抗Rの測定レンジが1000kΩ・cm以上あるいは同等 の値を示していることに符合する。質量含水率の測定結果に おいても無塗布Nに対して含浸材を塗布した供試体は値が 低くなっている。これらのことから曝露供試体においても比抵 抗を用いた表面含水率の水分浸透抑制効果を確認できるこ とが示唆された。

4.3 西洋美術館本館調査

前述の検討結果より,室内実験および曝露試験結果から 得られた比抵抗と質量含水率の関係を図-15 に示す。図 中には既存鉄筋コンクリート構造調査によって得られた比抵 抗 R の値も示している。これによると両者には相関性が見ら れることから,ここでは比抵抗 Pと比抵抗 FP の機種の違いに より近似式を求めた。含浸材による影響で抵抗が大きくなる 傾向が本実験でも見られており,今後はデータを蓄積して比 抵抗と質量含水率の関係を求めていきたい。

以上の検討結果より, 西美本館の外壁ハチマキ部におい て全方位で比抵抗の測定調査を行った。同時に本館屋内 1 階における柱においても同様な調査を行った。その結果を 図-16 に示す。比抵抗 P においてはいずれの調査箇所に おいても数値が得られなかった。屋内柱の比抵抗が最も高 い値を示している。西美本館屋内は常に温度 21℃, 相対湿 度 53%の環境下であり屋内柱のコンクリート内部の含水率も 低い値で安定していることが推測され,そのため比抵抗値も 高い値を示したものと考えられる。これまでの調査において 含浸材の水分浸透抑制効果が明確に検証できなかった南 面においてはいずれの電極間隔においても外壁ハチマキ部 の中では最も高い値を示しており、コンクリート内部の含水率 が低いことが推定される。一方,同様に明確に検証ができな かった北面においては最も低い値を示した。この原因として 北面は他面に比べて日射の影響が少ないため, 測定前日 の降雨による影響がより顕著にあらわれたものと考えられる。 しかしながら図-15の比抵抗と質量含水率の関係から北面に おいても鉄筋腐食が進行しにくいとされている質量含水率 3.5%以下 9に収まっている可能性が高い。これらのことから 外壁ハチマキ部のいずれの面においても含浸材塗布による 水分浸透抑制効果が得られていることが確認できる。

5. まとめ

本報告では, 西美本館躯体コンクリートの保存に向けて塗 布された含浸材による水分浸透抑制効果の検証を行った。

その結果, 透気係数試験, 撥水性を検証するための表面 含水率試験, 水分浸透抑制効果を検証するための表面吸 水速度試験ならびに比抵抗試験などの非破壊試験を組み 合わせることで, 含浸材の水分浸透抑制効果を検証できる 可能性を示した。

今後も定期的に測定を実施するとともに,比抵抗と質量含 水率の検量線について検討を行う予定である。

謝辞:本研究の遂行にあたり,東京理科大学工学部建築学 科4年小澤萌子さんの協力を得ました。ご協力に深く感謝い たします。



図-16 西美本館における比抵抗測定結果

参考文献

- 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
- 2) 御園麻衣子,今本啓一,永井香織,清原千鶴: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,コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1942-1947, 2014
- 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
- 田中章夫, 今本啓一:表層透気性による既存 RC 構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第691号, pp.1539-1544, 2013.9
- 5) 白石聖ほか: 旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査その 7:含水率,日本建築学会大会学術講演論文集(関東), pp.429-430, 2015
- 6) 鹿島孝之,河野広隆,渡辺博志,田中良樹:コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.895-990, 1999
- 7) 石神暁郎, 堀耕次, 大久保謙治, 竹村浩志:表面含浸材 によるコンクリートの電気抵抗率の安定化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35,No.1, pp.1655-1660, 2011
- 8)勝又洸達ほか:シラン系コンクリート用表面含浸材のコン クリート環境別特性に関する基礎的研究,2016年度日本 建築学会関東支部研究報告,pp.13-17,2017.3
- 9) 古賀一八,林典男,平田延明:高濃度塩化物イオン含有 RC建築物の含水率および鉄筋腐食調査,コンクリート工 学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.-783-788, 2008