

論文 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検討

石神 暁郎*¹・堀 耕次*²・大久保 謙治*³・竹村 浩志*⁴

要旨: 電気防食では、防食効果の確保・維持のため、コンクリート内への通電に際してはより均一な電流分布の確保が要求される。しかし、同一回路内に大気中部、飛沫帯部、干満帯部が混在する場合など、水分の供給されやすさに差異がある場合は、コンクリートの電気抵抗率は安定せず、均一な電流分布、即ち防食効果が得られない可能性が生じる。そこで、表面含浸材を塗布したコンクリートを用いた屋外曝露試験および水中浸漬試験を行い、吸水率ならびに電気抵抗率の変化を調べた。その結果、吸水率と電気抵抗率との間には相関性がみられること、シラン系表面含浸材により電気抵抗率の安定化が図れることが分かった。

キーワード: 表面含浸材, 吸水率, 電気抵抗率, 四点電極法, 電気防食

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の塩害補修対策として、電気防食が適用される機会が増えている。電気防食は、著しい塩害環境下にある海洋構造物の大気中部、飛沫帯部での適用が可能であり、また、干満帯部における適用も可能な場合もあることなどから、最も有効な塩害補修対策の一つとして位置付けられている¹⁾。しかし、その防食効果を確保・維持するためには、コンクリート内への通電に際して、より均一な電流分布を確保することが要求される。大気中部、飛沫帯部、干満帯部が同一防食回路内に混在する場合など、コンクリートへの水分の供給されやすさに差異がある場合は、コンクリートの電気抵抗率はその吸水状態に応じて変化し、不安定化することが予想される。その結果、均一な電流分布が得られず、ひいては防食効果の確保・維持が困難になる可能性も考えられる。

さらに、電気防食の効果確認における影響も懸念される。電気防食では、一般に埋込み型照合電極が用いられ、防食基準が達成されているか否かの判断は照合電極の電位の変化量によって行われる¹⁾。鋼材腐食以外の原因でこの電位が変化することは、適正な維持管理を行う上で阻害要因となる可能性があるが、実際には、その変化量は無視できない水準にある。鋼材腐食以外の原因としては、温度の変化のほか、照合電極の周囲に存在するコンクリートや断面修復材における水分量的変化が挙げられる。水分量的変化は、コンクリートや断面修復材の電気抵抗率の変化に直接結び付き^{2), 3), 4)}、ひいては鋼材の電位の変化に影響を与える。この点からも、コンクリート内の水分量を制御し、電気抵抗率の安定化を図る利点は大きいものと考えられる。

電気防食の施工に際しては、均一な電流分布を確保するため、a) 前処理として電気抵抗率の異なる断面修復材や表面被覆材を取り除く、b) 新たに使用する断面修復材やひび割れ注入材には電気抵抗率がコンクリートと同程度の材料を用いる、といった対策を講じる¹⁾ほか、例えば、c) 水分の供給されやすい部位では被覆性の高い陽極方式を適用する、d) コンクリートの品質や水分の供給されやすさにより防食回路を分割する、といった改善策を検討することがある。しかし、こうした部位が局所的、限定的である場合は、施工性や経済性などの面から、実際に適用にまで至らせることは難しい場合が多い。

一方、表面含浸材は、近年においてその性能の改善・向上は目覚しく、現在も多種多様な材料が開発・市販化されている⁵⁾。優れた環境遮断性を有する材料も存在する一方で、施工は総じて簡便であり、品質の確保に際して作業者の技量に影響を受け難いのが特徴である。また、被膜を形成しない材料が多く、水分の浸入を抑制する一方で、電気防食のアノード反応で発生する塩素ガスや水蒸気などを逸散することを阻害しない。

そこで本研究では、最初に、電気防食の実施工時における照合電極の電位を調査し、コンクリートの電気抵抗率の安定化の必要性について考察した。次に、シラン系表面含浸材およびけい酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリートを用いた屋外曝露試験を行い、シラン系表面含浸材、けい酸塩系表面含浸材、亜硝酸塩系表面含浸材を塗布したコンクリートを用いた水中浸漬試験を行った。そして、吸水率、表面水分率および電気抵抗率の変化を調べることで、その相関性、ならびに各種表面含浸材を適用することによる電気抵抗率の安定化の可能性について考察した。

*1 ショーボンド建設(株) 近畿圏支社工事技術部 農博 (正会員)

*2 ショーボンド建設(株) 補修工学研究所大阪試験室 室長 (正会員)

*3 ショーボンド建設(株) 近畿圏支社工事技術部 主査

*4 ショーボンド建設(株) 近畿圏支社工事技術部 技術部長

2. 電気防食施工時の照合電極電位の調査

2.1 調査対象の概要および調査方法

調査対象の概要を表-1に示す。A 栈橋は、太平洋岸に位置する RC ラーメン構造の荷役栈橋である。電気防食工の施工に先立ち、断面修復工およびひび割れ注工を実施し、断面修復工のはつり作業完了時に照合電極の設置を行っている。照合電極の種別は二酸化マンガ電極 (MnO₂) であり、床版部に 2 個、梁部に 2 個の、計 4 個を設置した。設置に際しては、断面修復工が完了するまでの間の電極の乾燥を防ぐため、電極先端部分をセメント系断面修復材にて被覆した。電極設置完了後、断面修復工の型枠設置作業を行い、セメント系断面修復材による注入作業を行った。床版部における照合電極の設置状況を図-1に、梁部における設置状況を図-2に示す。

本調査では、床版部に設置した照合電極 E-1 および梁部に設置した照合電極 E-2 の計 2 箇所において、電位を計測した。計測は、直流電圧計を用いて行った。期間は、電極設置直後から仮通電試験実施直前の設置 84 日後まで、である。

2.2 調査結果および考察

照合電極の電位の計測結果を図-3に示す。いずれの電極においても、設置直後より、電極先端部分を被覆したセメント系断面修復材の水和反応による自由水の消失に伴い、電位は 200~400 mV 程度急激にプラス方向に変化した。その後、電位は安定傾向を示したが、日々の降雨や波浪の影響により断面修復材は水分の逸散・吸収を繰り返し、それに伴い電位も 20~30 mV 程度変化した。その後のセメント系断面修復材注入時には、電極周囲の水分量が急激に増加し、それに伴い電位も急激にマイナス方向に変化した。その後、断面修復材内の自由水の消失に伴い電位もプラス方向に変化した。

断面修復材内の自由水の消失に伴う電位のプラス方向への変化においては、両電極の電位は異なる傾向を示した。部材厚の小さい床版部に設置された E-1 は、断面修復材内の自由水の消失による影響のほか、日々の水分の逸散・吸収の影響 (10~20 mV 程度) を受けた。それに対し部材厚の大きい梁部に設置された E-2 は、日々の水分の逸散・吸収の影響を受けることはほとんどなく、電位は安定的な上昇傾向を示した。

このように、特に部材厚が小さい部位に設置された照合電極では、日々の温度変化に加え、水分の逸散・吸収の影響を受ける可能性が考えられる。一般に、防食基準が達成されているか否かの判断は、鋼材の電位がマイナス方向に 100 mV 以上変化しているか否かによって行われる¹⁾ため、仮に日々の変化量が 20 mV である場合、その比率は 20%にも上る。このことから、コンクリート内の水分量を制御することにより電気抵抗率の安定化を

表-1 調査対象の概要

構造物名称		A 栈橋	
構造形式		RC ラーメン構造	
電気防食工	部位	床版	梁
	防食対象面積	361 m ²	398 m ²
	照合電極数 (No.)	2 (E-1, E-3)	2 (E-2, E-4)
	調査対象電極	E-1	E-2
	照合電極種別	二酸化マンガ電極	
電気防食方式		チタンリボンメッシュ陽極方式	
主な付帯工種 (使用材料)		断面修復工 (セメント系断面修復材)	
		ひび割れ注工 (超微粒子ポリマーセメント系)	



図-1 床版部における照合電極の設置状況



図-2 梁部における照合電極の設置状況

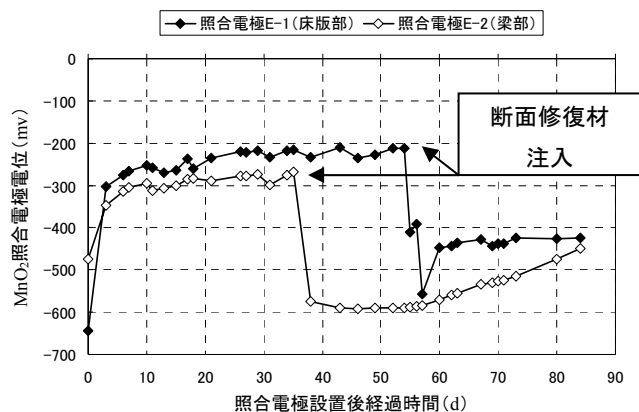


図-3 照合電極の電位の計測結果

図の利点は大きいものと判断された。

3. 表面含浸材を塗布したコンクリートの屋外曝露試験

各種表面含浸材を塗布したコンクリート試験体を用いた屋外曝露試験を行い、曝露試験開始後 28 週間の吸水率を測定した。

3.1 使用材料および試験体作製方法

使用したコンクリートの配合を表-2に、表面含浸材の種別および塗布方法を表-3に示す。化学混和剤 A の種類 (区分) は、AE 減水剤 (標準形 I 種) である。試験体の寸法は、100×100×400 mm とした。コンクリート

打設後、7日間経過後に脱型し、気中で28日間の養生を行った。養生期間経過後、試験体の表面（6面）をグラインダーにて下地処理し、全ての面に各種表面含浸材を塗布した。各材料の所定養生期間経過後、曝露試験を行った。

3.2 試験方法

屋外曝露試験状況を図-4に示す。曝露試験は、大阪市内で行った。期間は2010年6月24日から2011年1月6日までの28週間とし、吸水率の測定は約2週間に1回の頻度で行った。また、試験に際しては、比較のため、表面含浸材を塗布しない試験体（無塗布試験体）の試験を併せて行った。なお、試験体数は各2体とした。

吸水率（ W_a %）の算出では、JSCE-K 571「表面含浸材の試験方法（案）」6.4 吸水率試験の算出方法⁵⁾に準拠し、試験開始時の試験体質量（ W_{a0} g）および試験開始時から所定試験時間経過後の試験体質量（ W_{ai} g）より、式(1)により算出した。

$$W_a = (W_{ai} - W_{a0}) / W_{a0} \times 100 \quad (1)$$

3.3 試験結果および考察

吸水率の測定結果を図-5に、試験期間中の大阪市内の気象データを図-6⁶⁾に示す。気象データにおける各値は、吸水率測定日当日の日平均値である。無塗布試験体およびけい酸塩系表面含浸材を塗布した試験体では、日々の気象条件の変化に伴い、吸水率も著しく変化した。

一方、シラン系表面含浸材を塗布した試験体では、吸水率は試験開始後徐々に低下し、試験時間にして10週間目、吸水率にして-0.020%を経過した頃からは安定傾向を示した。これは、シラン系表面含浸材が有する撥水性および防水性によるものと考えられる。即ち、試験開始後初期の段階ではその撥水性により試験体内部の水分量が減少して吸水率も低下し、それ以後はその防水性により試験体外部からの水分を取り込むことなく吸水率も安定化する。これにより、シラン系表面含浸材の適用によるコンクリート内の水分量の安定化、即ち電気抵抗率の安定化が図れる可能性が示された。

4. 表面含浸材を塗布したコンクリートの水中浸漬試験

各種表面含浸材を塗布したコンクリート試験体を用いた水中浸漬試験を行い、吸水率、表面水分率および電気抵抗率の変化を調べた。

4.1 使用材料および試験体作製方法

使用したコンクリートの配合を表-4に、表面含浸材の種類および塗布方法を表-5に示す。本試験では、屋外曝露試験で使用したけい酸塩系およびシラン系の各表面含浸材に加え、保水性の向上が期待できる亜硝酸塩系表面含浸材を使用した。また、シラン系表面含浸材の種類を1種類追加して計2種類とした。

表-2 屋外曝露試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)
	W	C	S	G	A	
57.0	171	300	821	1009	3.21	4.5

表-3 屋外曝露試験の表面含浸材の種類・塗布方法

種別	塗布方法		
	塗布量 (g/m ²)	塗布方法	塗布回数 (回)
けい酸塩系	250	刷毛塗り	1
シラン系	200	刷毛塗り	1



図-4 屋外曝露試験状況

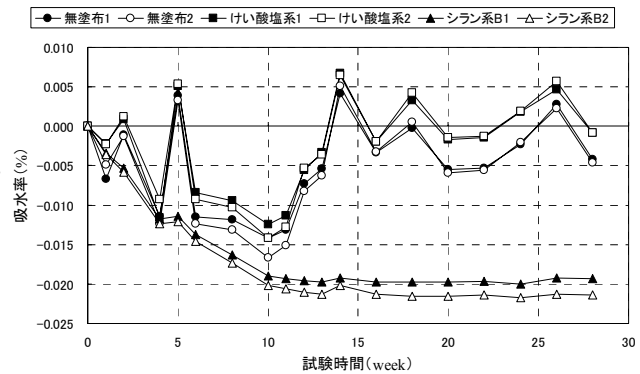


図-5 屋外曝露試験における吸水率の測定結果

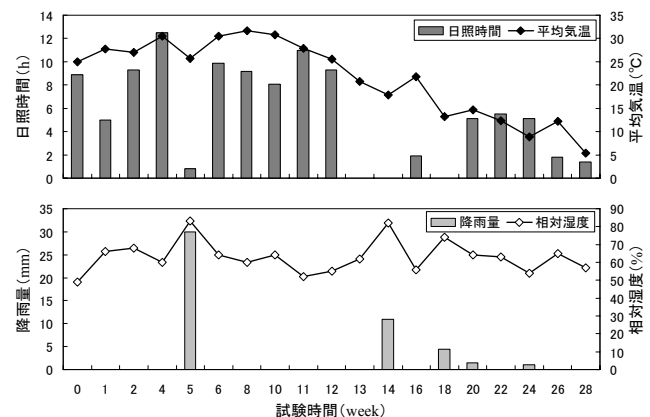


図-6 曝露試験期間中の大阪市内の気象データ⁶⁾

表-4 水中浸漬試験に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					空気量 (%)
	W	C	S	G	A	
59.0	161	273	810	1068	2.92	4.5

屋外曝露試験と同様に、試験体の寸法は 100×100×400 mm とした。コンクリート打設後、7 日間経過後に脱型し、気中で 28 日間の養生を行った。養生期間経過後、試験体の表面（6 面）を、浸漬面の凹凸の増加により短時間での水分の逸散・吸収が期待できるサンドブラストを用いて下地処理を行い、全ての面に各種表面含浸材を塗布した。気中（20 °C、65 %）で 14 日間の養生期間経過後、水中浸漬試験を行った。

4.2 試験方法

(1) 水中浸漬試験方法

水中浸漬試験方法の概念図を図-7 に示す。水中浸漬時間は、a) 3 時間、b) 6 時間、c) 12 時間の 3 パターンとし、a) 3 時間の場合では、浸漬終了気中放置直後、放置 3 時間後、放置 6 時間後、放置 21 時間後に、b) 6 時間の場合では、浸漬終了気中放置直後、放置 3 時間後、放置 6 時間後、放置 18 時間後に、c) 12 時間の場合では、浸漬終了気中放置直後、放置 3 時間後、放置 6 時間後、放置 12 時間後に、各項目について測定を行った。

試験は、a) ~c) の浸漬時間毎に 3 サイクル連続して行った。水中浸漬および浸漬終了後の気中放置は、20 °C・65 % の恒温室内で行った。また、屋外曝露試験と同様に、表面含浸材を塗布しない無塗布試験体の試験を併せて行った。なお、試験体数は表面含浸材の種別毎に各 1 体とし、同じ試験体を用いて、a) ~c) の 3 パターンの試験を連続して行った。

(2) 吸水率測定方法

吸水率 (W_a %) の算出では、屋外曝露試験時と同様に、試験開始時の試験体質量 (W_{a0} g) および試験開始時から所定試験時間経過後の試験体質量 (W_{ai} g) より、式(1)により算出した。

(3) 表面水分率測定方法

表面水分率は、高周波容量式表面水分計（ケット科学研究所社製 HI-520 型）を用いて測定した。

(4) 電気抵抗率測定方法

電気抵抗率は、四点電極法（Wenner 法）^{2), 7)}によるコンクリート電気抵抗計測器（日本防蝕工業社製 TR-01 型）を用いて測定した。測定に際しては、電極の先端に湿潤させたフェルト材を取り付けた。測定状況を図-8 に、測定条件を表-6 に示す。

4.3 試験結果および考察

(1) 吸水率、表面水分率、電気抵抗率の測定結果

水中浸漬時間 a) 3 時間および c) 12 時間のパターンにおける試験時間と吸水率との関係を図-9 および図-10 に、試験時間と表面水分率との関係を図-11 および図-12 に、試験時間と電気抵抗率との関係を図-13 および図-14 に示す。図中の灰色部は、水中浸漬中を表す。

吸水率および表面水分率は、気中放置後経過時間の増

表-5 水中浸漬試験の表面含浸材の種別・塗布方法

種別	塗布方法		
	塗布量 (g/m ²)	塗布方法	塗布回数 (回)
シラン系 A	600	刷毛塗り	3
シラン系 B	200	刷毛塗り	1
けい酸塩系	250	刷毛塗り	1
亜硝酸塩系	200	刷毛塗り	1



図-7 水中浸漬試験の概念図

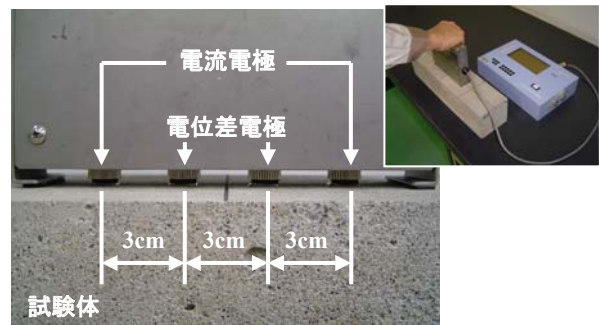


図-8 電気抵抗率測定状況

表-6 四点電極法による電気抵抗率測定の条件

項目	条件
電流電極間の距離	9 cm
電位差電極間の距離	3 cm
印加交流電圧	12 V
周波数	72 Hz

加とともに、低下する傾向を示した。シラン系表面含浸材 2 種類およびけい酸塩系表面含浸材を塗布した試験体では吸水は抑制され、亜硝酸塩系表面含浸材を塗布した試験体では吸水は若干促進される傾向がみられた。

シラン系表面含浸材を塗布した試験体では、吸水率は放置 3 時間後にほぼ 0 % に戻った。これは、吸水した水分のほとんどが表面近傍に留まったためと考えられる。シラン系表面含浸材とけい酸塩系表面含浸材との比較では、シラン系表面含浸材の吸水抑制効果の方が大きいことが分かった。

電気抵抗率は、無塗布試験体、けい酸塩系表面含浸材および亜硝酸塩系表面含浸材を塗布した試験体では、基本的に、気中放置後経過時間の増加とともに上昇する傾向を示した。水中浸漬により試験体内部の水分量が増加し、それに伴い電気抵抗率も一時的に低下するものの、気中放置による試験体内部の水分量の減少とともに、電

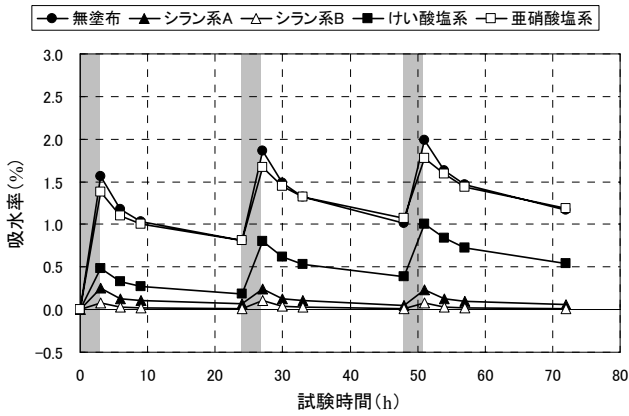


図-9 試験時間と吸水率との関係（浸漬 3 時間）

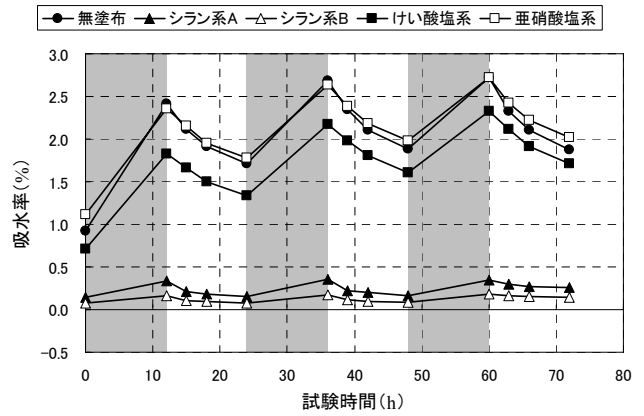


図-10 試験時間と吸水率との関係（浸漬 12 時間）

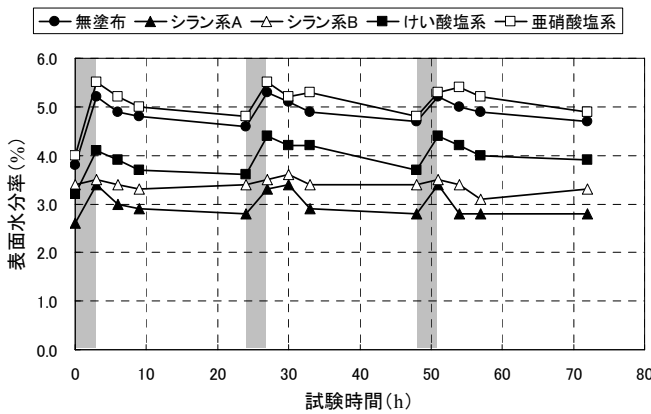


図-11 試験時間と表面水分率との関係（浸漬 3 時間）

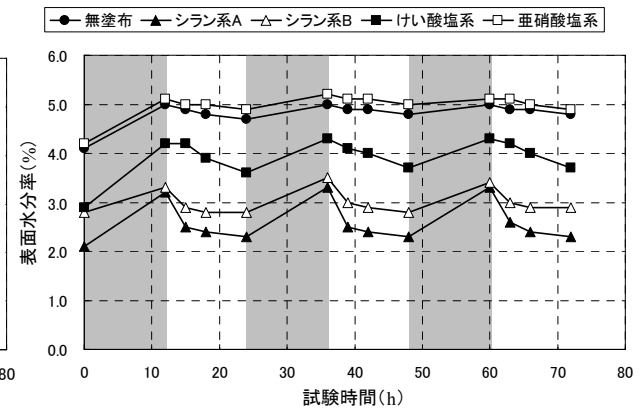


図-12 試験時間と表面水分率との関係（浸漬 12 時間）

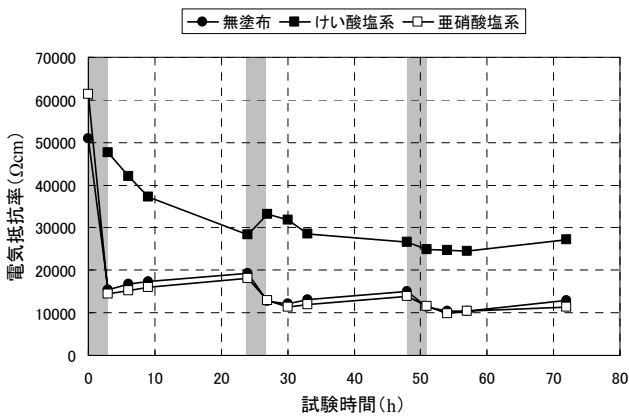


図-13 試験時間と電気抵抗率との関係（浸漬 3 時間）

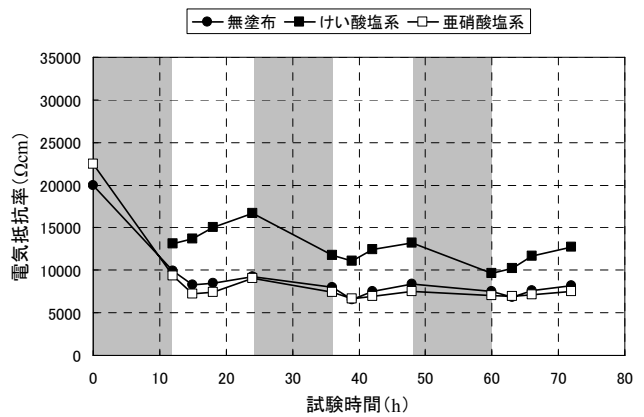


図-14 試験時間と電気抵抗率との関係（浸漬 12 時間）

気抵抗率も上昇したものと考えられる。

一方、シラン系表面含浸材を塗布した試験体では、電気抵抗率を測定することはできなかった。これは、シラン系表面含浸材塗布面における電極接地に際する抵抗が著しく大きいためと考えられる。そこで、水中浸漬時間 c) 12 時間のパターンの 3 サイクル目の水中浸漬終了後に、シラン系表面含浸材 B を塗布した試験体において、含浸材塗布面の内 1 面をグラインダーにて削り取り、露出したコンクリート面において電気抵抗率を測定した。含浸材の含浸深さ約 2 mm に対し、表面より約 4 mm を削り取った。気中放置後経過時間と電気抵抗率との関係

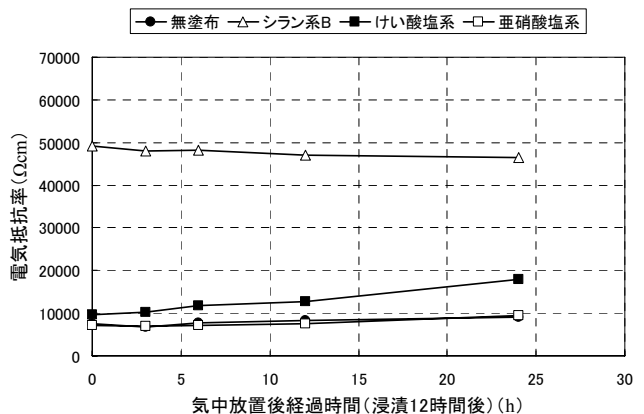


図-15 シラン系表面含浸材塗布試験体の電気抵抗率

を図-15に示す。前述のように、その他の表面含浸材を塗布した試験体では、電気抵抗率は時間の経過とともに上昇したが、シラン系表面含浸材を塗布した試験体では、電気抵抗率は時間の経過によらず安定傾向を示し、その値は水中浸漬試験開始前の無塗布試験体の値とほぼ同じであった。

(2) 吸水率と表面水分率との関係

水中浸漬時間 a) 3 時間, b) 6 時間, c) 12 時間の全てのパターンにおける吸水率と表面水分率との関係を図-16に示す。表面含浸材の種別により若干異なる傾向を示すものの、総じてその相関性は高かった。吸水率の上昇に伴い、表面水分率も上昇することが確認された。

(3) 吸水率と電気抵抗率との関係

シラン系表面含浸材を塗布した試験体の結果を除く全てのパターンにおける吸水率と電気抵抗率との関係を図-17に示す。これも同様に、表面含浸材の種別により若干異なる傾向を示すものの、総じてその相関性は高かった。吸水率の上昇に伴い、電気抵抗率は低下することが確認された。

(4) 各種表面含浸材が電気抵抗率に与える影響

本試験においては、シラン系表面含浸材の吸水抑制効果が顕著であり、コンクリートの電気抵抗率の安定化対策としては最も有効であることが分かった。

一方、亜硝酸塩系表面含浸材には若干ではあるものの吸水を促進する効果がみられ、電気抵抗率を低下させる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究の結果から、以下の結論を得た。

- (1) 電気防食施工時の調査結果から、照合電極の電位は、電極の周囲に存在する材料の水分の逸散・吸収の影響を受ける可能性が高く、その変化量は無視できない水準にあることが分かった。このため、コンクリート内の水分量を制御し、電気抵抗率の安定化を図る利点は大きいものと判断された。
- (2) 水中浸漬試験結果から、コンクリートの吸水率と表面水分率、ならびに吸水率と電気抵抗率との間には、高い相関性がみられることが分かった。吸水率の上昇に伴い、表面水分率は上昇し、電気抵抗率は低下することが確認された。
- (3) 屋外曝露試験および水中浸漬試験結果から、シラン系表面含浸材の吸水抑制効果は顕著であることが分かり、コンクリートの電気抵抗率の安定化対策としては最も有効であることが分かった。また、亜硝酸塩系表面含浸材において電気抵抗率を低下させる可能性が示唆された。

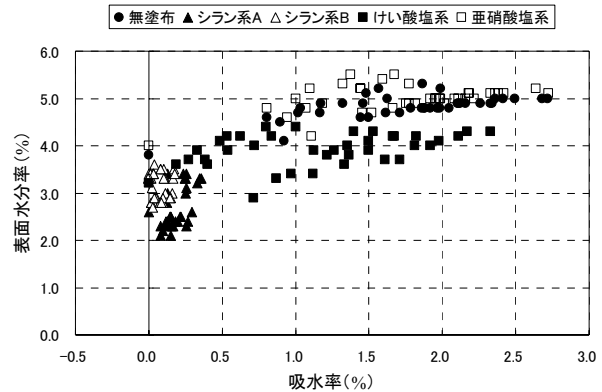


図-16 吸水率と表面水分率との関係

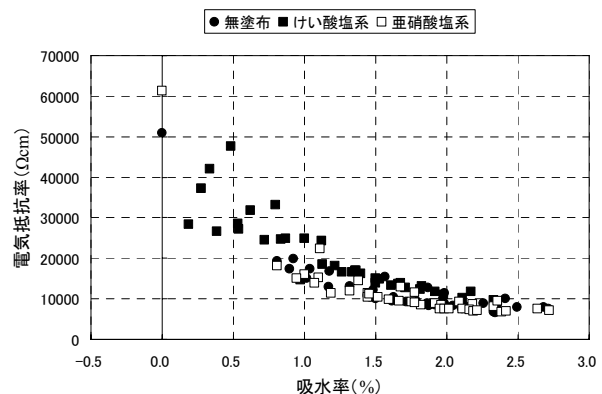


図-17 吸水率と電気抵抗率との関係

謝辞

高周波容量式表面水分計による表面水分率の測定については(株)ケット科学研究所の結城英恭氏に、四点電極法(Wenner法)による電気抵抗率の測定については日本防蝕工業(株)の山本悟氏に、御協力を受けました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法 設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー107，pp.14-116，2001.11
- 2) 西林新蔵，小柳洽，渡邊史夫，宮川豊章編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，pp.502-503，2009.10
- 3) 笠井芳夫編：コンクリート総覧，技術書院，pp.460-462，1998.6
- 4) 内藤英晴，守屋進，川俣孝治，皆川浩：各種セメント系断面修復材の電気抵抗率に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.595-600，2008.7
- 5) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針(案)，コンクリートライブラリー119，pp.55-67，pp.203-251，[工種別マニュアル編] pp.143-187，2005.4
- 6) 気象庁 HP：<http://www.jma.go.jp/>
- 7) 市野瀬比路実，石川光男，玉利昭一：コンクリートの抵抗率測定，腐食防食講演集，pp.97-100，1988.5