

論文 仕上材による中性化抑制効果およびその持続性に関する実験的研究

植松 俊幸*1・小林 利充*2・神代 泰道*3

要旨：促進耐候性試験と促進中性化試験を組み合わせ、仕上材による中性化抑制効果および仕上材の劣化を考慮したその効果の持続性について実験的に検討した。仕上材にはクリヤ塗料を選定し、その劣化を考慮しない場合、促進材齢 13 週の中性化率は 0.12~0.29 の範囲であり高い中性化抵抗性を有すること、その効果は銘柄や塗布量によって差があることを確認した。さらに、促進耐候性試験により、光沢度の推移、塗膜の付着性の推移、拡大鏡観察、中性化抵抗性の推移を確認した結果、促進時間 3000 時間まで塗膜の明確な劣化は認められず、中性化抑制効果の持続性を確認した。

キーワード：仕上材, 中性化抑制効果, 持続性, 耐候性試験, 中性化試験

1. はじめに

RC 構造物, 特に建築構造物の躯体表面には, 耐久性向上や美観性向上の観点から仕上材が施される場合が多い。仕上材による保護効果は, 新設構造物の長寿命化に限らず, 既にコンクリートの中性化が進行している既設構造物の場合でも, 建物の長寿命化が期待できる。鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説¹⁾には, 性能検証型一般設計法として中性化に対する性能の検証方法が解説されており, 構造体に仕上材を施す場合は, 仕上材による中性化抑制効果およびその持続性を検討し, 中性化深さの算定に取り入れることとしている。RC 構造物の耐久設計や維持管理計画を行う上で, 仕上材の保護効果を定量的に評価することは重要である。

一般に, コンクリートの中性化抵抗性を短期間で評価するには促進中性化試験を行うが, 中性化抑制効果のある仕上材を施した場合でも, 同様の試験を行っている。しかし, 仕上材は, 太陽光の紫外線や降雨などにより, 時間の経過に伴い中性化の抑制効果が低下する可能性が考えられる。既往の文献^{2), 3), 4)}でも仕上材の経年劣化を考慮した中性化抵抗性の検討が行われているが, そ

の研究事例は少ない。

そこで, 促進耐候性試験 (以下, 耐候性試験と略す) と促進中性化試験を組み合わせ, 仕上材の中性化抵抗性および仕上材の劣化を考慮した中性化抵抗性の持続性の評価を行った。ここでは, モルタル基板を用いた試験体を作製して耐候性試験を行い, 仕上材の劣化が中性化抵抗性に及ぼす影響を実験的に確認した。

2. 実験概要

2.1 実験の概略工程

実験の概略工程を図-1 に示す。モルタル基板に仕上材を施したものを試験体とし, 耐候性試験および促進中性化試験を行う。促進中性化試験は, 事前に耐候性試験を行う場合と行わない場合の 2 ケースとし, 仕上材の劣化が中性化抑制効果に及ぼす影響を確認する。耐候性試験は, JIS B 7753 : 2007 (サンシャインカーボンアーク灯式の耐光性試験機及び耐候性試験機) の規格を満足するサンシャインウェザーメーター (写真-1) を使用した。促進時間は, 1500 時間と 3000 時間の 2 水準とした。それぞれの試験時間は, 既往の文献²⁾を参考にし, 屋外暴

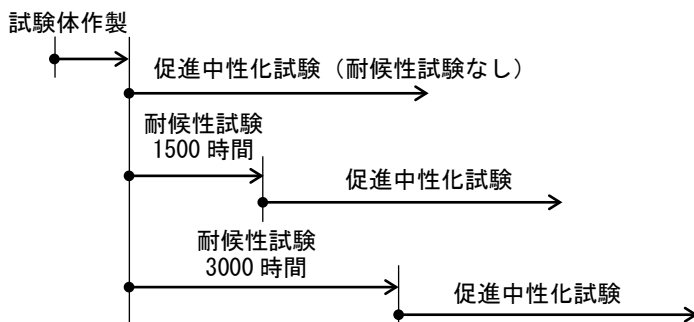


図-1 実験の概略工程



写真-1 サンシャインウェザーメーター

*1 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 (正会員)

*2 株式会社大林組 技術本部 研究開発管理部 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 博士 (工学) (正会員)

露の6年間と12年間に相当するものとした。

2.2 モルタルの製造

モルタルの使用材料と調査を表-1、表-2に示す。モルタルは普通ポルトランドセメントを使用し、化学混和剤はAE剤を使用して空気量を調整した。調査はW/C=65%とし、セメントと表面乾燥飽水状態とした細骨材の質量比は、ブリーディングを考慮して1:3.5とした。

モルタルの練混ぜは、JIS R 5201 : 2015 (セメントの物理試験方法) の11.5.2練混ぜ方法に準じて行った。練混ぜ直後にフレッシュ性状試験を行い、その後、型枠に打ち込んだ。フレッシュ性状は、フロー、空気量、モルタル温度を測定した。硬化性状は、圧縮強度試験を行った。圧縮強度試験用の供試体は、材齢3日まで封かん養生とし、その後、材齢28日まで標準養生としたものと、材齢3日まで封かん養生、その後、材齢7日まで標準養生、さらに、材齢35日まで20℃、60%RHの恒温恒湿室にて気中養生とした2ケースの養生条件とした。

2.3 モルタル基板の作製

仕上材を施すモルタル基板の概要を図-2に示す。基板は、耐候性試験機への設置を考慮し、厚さ20mmの平板とした。なお、耐候性試験機の光源から試験体を設置する試験片ホルダ中央までの距離は440mmである。

試験体の製作工程を図-3に示す。モルタルはL150×H70×W20mmの型枠に打ち込んだ。型枠脱型は材齢3日目とし、材齢7日まで標準養生を行った。その後、材齢35日まで20℃、60%RHの恒温恒湿室にて気中養生を行った。気中養生期間の内、材齢21日から暴露面に仕上材を3日間で施し、材齢28日から材齢35日の期間に残り5面にエポキシ樹脂でシールを施して試験体を作製した。材齢35日から促進中性化試験または耐候性試験を開始した。なお、標準養生の終了翌日には、仕上材を施す面にW/C=65%のセメントペーストを擦り込み、モルタル基板表面の気泡埋め処理を行った。

2.4 仕上材の塗布

仕上材としてクリヤ塗料を選定した。クリヤ塗料は既往の研究⁵⁾でも中性化に対する保護効果が確認されている材料である。クリヤ塗料の材料構成と塗布量を表-3に示す。いずれの銘柄も水系のクリヤ塗料であり、艶消し仕様である。A社製の中塗り材は、顔料入りと顔料なしの2種類がある。B社製は顔料入り、C社製は顔料なしの仕様である。なお、JIS K 5500 : 2000 (塗料用語)によると、クリヤ塗料は透明な膜を作る塗料であり、顔料を含まないとしているが、一般に、少量の顔料を添加して半透明とした製品が市販されている。主成分は銘柄によって異なり、下塗り材は、A社製がエポキシ系、B社製がシラン系、C社製がシリコン系であり、中塗り材および上塗り材は、A社製とB社製がアクリルをベース

表-1 モルタルの使用材料

分類	概要	
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	陸砂:表乾密度 2.60/cm ³ 吸水率 2.18%、粗粒率 2.51、実積率 67.2%
化学混和剤	AE	AE 剤

表-2 モルタルの調査

セメントの種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			AE (C×%)
		W	C	S	
N	65	268	412	1443	0.005

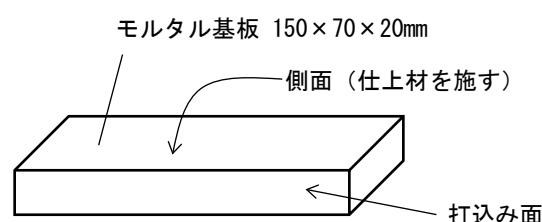


図-2 モルタル基板

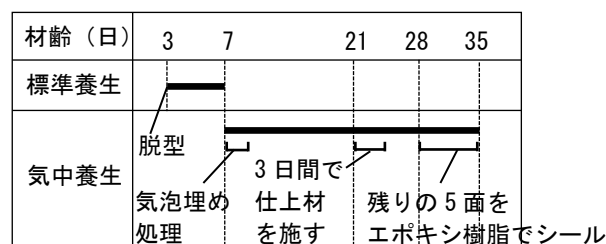


図-3 試験体の製作工程

表-3 クリヤ塗料の材料構成と塗布量

試験体 No.	材料構成と塗布量 (g/m ²)			備考
	下塗り	中塗り	上塗り	
1, 1a, 1b	—	—	—	プレーン
2	100	180 (顔料入り)	—	A社製
3	100	130 (顔料入り)	130	
4	100	180 (顔料入り)	180	
5	100	130 (顔料なし)	130	B社製
6	200	150 (顔料入り)	150	
7	120	125 (顔料なし)	100	C社製

[注] 網掛は標準塗布量を示す。上塗りはいずれも顔料なし。

表-4 耐候性試験の試験条件

項目	試験条件
ブラックパネル温度	(63±3)℃
相対湿度	(50±5)℃
噴霧サイクル	噴霧時間 (18±0.5)分間 噴霧停止時間 (102±0.5)分間

とした樹脂，C社製がフッ素樹脂である。

A社製のクリヤ塗料については，塗布量の違いおよび中塗り材の顔料の有無により4水準の試験体を作製し，B社製およびC社製は，標準塗布量を塗布して顔料の有無はその銘柄の仕様通りとした。なお，クリヤ塗料は塗布面を水平にして塗布を行った。

クリヤ塗料の塗布直前のモルタル基板の含水率を高周波容量方式の水分計を用いて測定した結果，平均5.5%であり，クリヤ塗料の付着性能を阻害しない8%以下であることを確認した。

仕上げのない試験体(プレーン)は，試験体 No.1, No.1a, No.1b の3種類とした。試験体 No.1 は耐候性試験を行わないものとし，試験体 No.1a と No.1b は耐候性試験を行うものとした。試験体 No.1b は，試験中の水の噴霧が暴露面にかからないように，耐候性試験中はアルミ袋で封かんして試験を行った。耐候性試験が終了し，促進中性化試験を行う際には，アルミ袋を取り外して試験を行った。試験体 No.1a は，封かんをせず耐候性試験を行った。

2.5 耐候性試験および促進中性化試験

耐候性試験は，JIS K 7350-4 : 2008 (プラスチック試験室光源による暴露試験方法-第4部：オープンフレームカーボンアークランプ) および JIS A 1415 : 2013 (高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法) に準拠した。噴霧条件は表-4 に示すように，JIS K 7350-4 の6.3 噴霧条件の「噴霧サイクル1」とした。

耐候性試験時には，光沢度の測定と拡大鏡観察を行った。光沢度の試験方法は，JIS Z 8741 : 1997 (鏡面光沢度-測定方法) に準拠し，入射角60度の鏡面光沢度を促進時間250時間ごとに測定した。拡大鏡観察は，塗膜の変色やひび割れの有無を確認した。

促進中性化試験は，JIS A 1153 : 2012 (コンクリートの促進中性化試験方法) に準拠して試験体の中性化深さを測定した。

また，促進中性化試験後の試験片を用いて，仕上材の耐はく離性を評価するために付着性試験を行った。試験方法は，JIS K 5400 : 1990 (塗料一般試験方法) の8.5.3 Xカットテープ法に準じた。試験の概要は，試験片上の塗膜を貫通して，素地面に達するX状の切傷(Xカット)をカッターナイフで付け，その上にセロハン粘着テープを貼り付けて引き剥がし，素地または塗膜間との付着性の優劣を評価するものである。評価基準を表-5 に示す。

3. 実験結果

3.1 モルタルのフレッシュ性状および圧縮強度

モルタルのフレッシュ性状の試験結果を表-6 に示す。空気量は目標値の4.5±1.5%を満足した。また，モルタルの圧縮強度の試験結果を表-7 に示す。

表-5 Xカットテープ法の評価基準

評価点数	Xカット部の状態	現象
10	はがれが全くない。	
8	交点にはがれがなく，Xカット部にわずかにはがれがある。	
6	Xカット部の交点からいずれかの方向に，1.5mm以内のはがれがある。	
4	Xカット部の交点からいずれかの方向に，3.0mm以内のはがれがある。	
2	テープを貼ったXカット部の大部分にはがれがある。	
0	Xカット部よりも大きくはがれる。	

表-6 モルタルのフレッシュ性状

0打フロー (mm)	15打フロー (mm)	空気量 (%)	モルタル温度 (°C)	室温 (°C)
121	212	5.5	21	20

表-7 モルタルの圧縮強度

養生条件	試験材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
標準養生	28	26.9	2,171
標準養生7日 + 気中養生28日	35	22.6	2,065

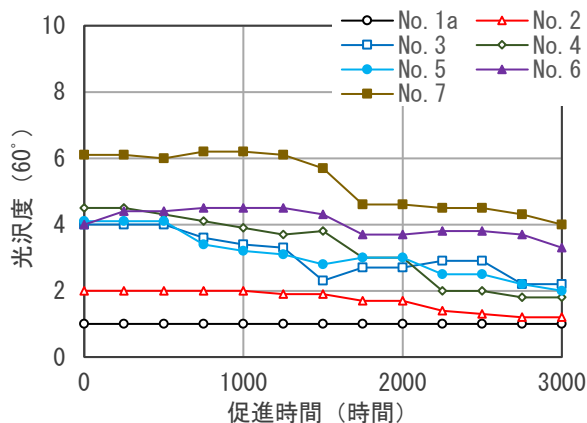


図-4 光沢度の推移

表-8 塗膜の付着性 (評価点数)

試験体 No.	耐候性試験の促進時間		
	0時間	1500時間	3000時間
2	4	4	4
3	4	4	4
4	評価基準外	評価基準外	4
5	4	4	4
6	2	2	2
7	0	0	0

[注] No.4の0時間，1500時間はXカットに沿って交点から3角形に10mm程度はがれたため評価基準外とした。

表-9 拡大鏡写真の一例（試験体 No. 1a および No. 5）

拡大鏡倍率	試験体 No.1a		試験体 No.5	
	0 時間	3000 時間	0 時間	3000 時間
×25				
×175				

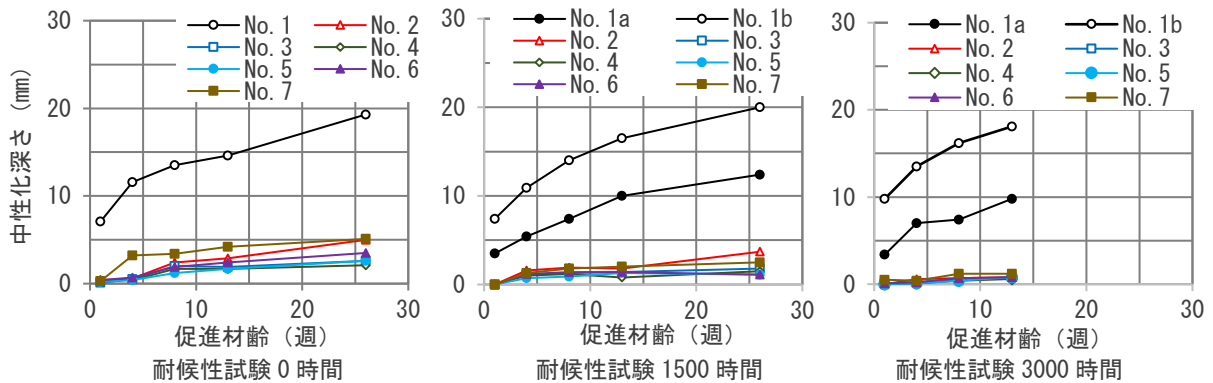


図-5 中性化深さ

3.2 耐候性試験

(1) 光沢度

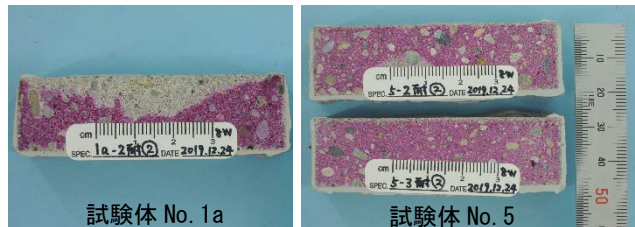
光沢度の推移を図-4 に示す。いずれのクリヤ塗料も艶消し仕様であるため、光沢度は 10 未満であり全体的に小さかった。促進時間 1500 時間以降、試験体 No.2～No.7 の光沢度が低下する傾向が認められたが、初期値から 3000 時間までの低下は 3 未満と小さかった。なお、試験体 No.1b の光沢度は No.1a と同じく、初期値の 1.0 から変化はなかった。

(2) 塗膜の付着性

塗膜の付着性試験として、表-5 による評価の結果を表-8 に示す。試験体 No.2, No.3, No.5, No.6 は、耐候性試験による付着性の変化はなかった。試験体 No.7 は、耐候性試験を行わない場合でも評価点数 0 であり、付着性は低かった。

(3) 拡大鏡観察

拡大鏡写真の一例を表-9 に示す。拡大鏡の倍率は 25 倍と 175 倍とした。いずれの試験体も促進時間 3000 時間まで、塗膜の黄変などの変色やひび割れは生じておらず、劣化の兆候は認められなかった。なお、仕上げのない試験体 No.1a および No.1b の基材モルタルにも、ひび割れなどの変状は確認されなかった。



(耐候性試験 3000 時間, 促進材齢 8 週)
写真-2 中性化深さ測定の一例

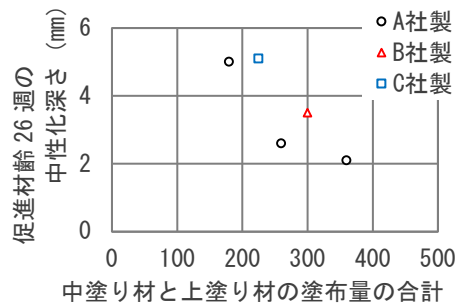


図-6 クリヤ塗料の塗布量, 銘柄と中性化深さの関係

3.3 促進中性化試験

(1) 中性化深さ

試験体の中性化深さの測定結果を図-5 に、一例を写真-2 に示す。耐候性試験を行った試験体 No.1a と No.1b を比較すると、No.1b の方が中性化深さは大きかった。

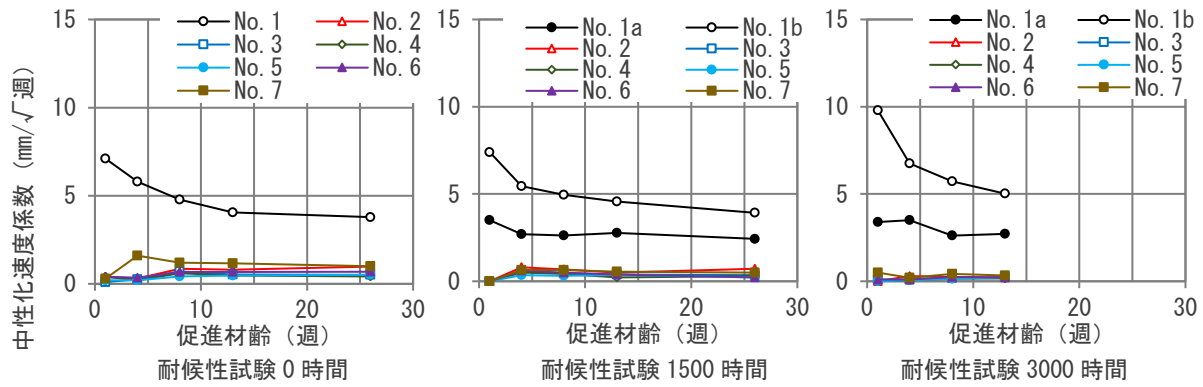


図-7 中性化速度係数

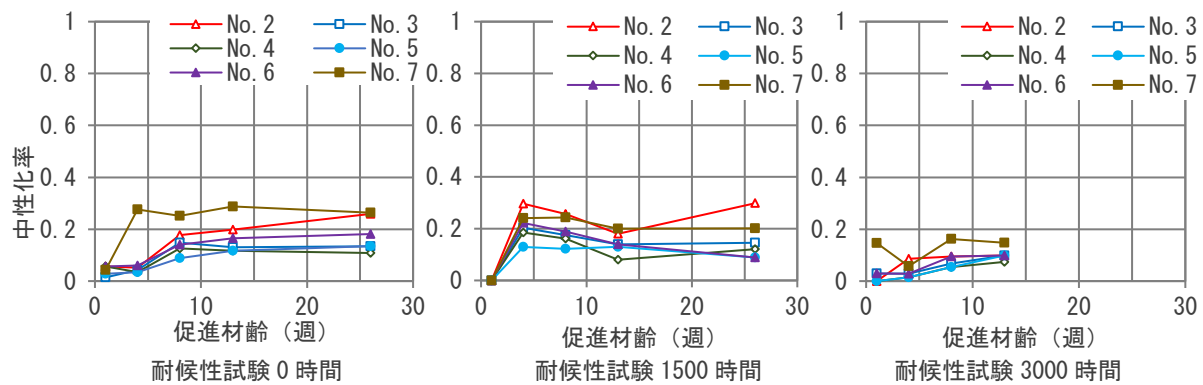


図-8 中性化率

これは、既往の文献⁹⁾でも考察しているように、封かんでいない試験体 No.1a は、試験中の噴霧によりモルタルが吸水して表層の含水率が高くなり、また、その影響で多少なりとも水和反応が進行し、中性化の進行が遅くなったためと推察する。

耐候性試験を行わなかった場合、試験体 No.1 の中性化深さは促進材齢の経過に伴い、26 週まで増加した。なお、促進材齢 26 週の試験体 No.1 の中性化深さは、一部が 20mm 超であったため参考値とした。一方、クリヤ塗料を塗布した試験体 No.2~No.7 はその増加は小さく、中性化の抑制効果が確認された。

試験体 No.2~No.7 について、耐候性試験を 1500 時間および 3000 時間行った場合でも、耐候性試験を行わなかった試験体と同様の傾向が確認された。

また、耐候性試験を行わなかった試験体について、クリヤ塗料の塗布量、銘柄と中性化深さとの関係を図-6 に示す。塗布量が多いほど中性化深さは小さい傾向である。また、A 社製 180g/m² と C 社製 225g/m² の中性化深さは 5mm 程度、A 社製 260g/m² と B 社製 300g/m² の中性化深さは、それぞれ 2.6mm、3.5mm であった。これらことから銘柄による中性化抑制効果の差も確認された。

(2) 中性化速度係数

中性化速度係数を図-7 に示す。耐候性試験を行わなかった場合、試験体 No.1 の中性化速度係数は促進材齢 13 週以降 4mm/√週程度であり、試験体 No.2~No.7 は、

1mm/√週未満であった。耐候性試験を 1500 時間および 3000 時間行った場合、試験体 No.1a の中性化速度係数は促進材齢 13 週で 3mm/√週程度、試験体 No.2~No.7 は、促進材齢 4 週以降 1mm/√週未満であった。これらのことから、耐候性試験 3000 時間まで、塗膜の劣化による中性化速度係数の変化は確認されなかった。

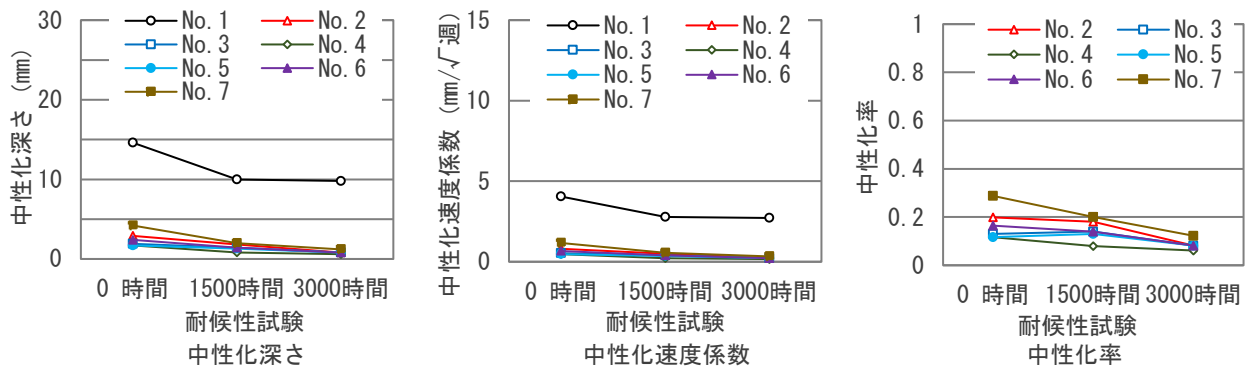
(3) 中性化率

中性化率を図-8 に示す。中性化率は、仕上材を施した試験体の中性化深さを、仕上げのない試験体 No.1 または耐候性試験中に封かんなかった試験体 No.1a の中性化深さで除して求めた。耐候性試験を行わなかった場合、促進材齢 13 週での中性化率は、0.12~0.29 の範囲にあり、最も小さいのは、A 社製の塗布量が多い試験体 No.4 および標準塗布量の試験体 No.5 (顔料なし) の 0.12、次いで A 社製の標準塗布量の試験体 No.3 (顔料入り) の 0.13 であった。B 社製の試験体 No.6 は 0.16 であった。最も大きいのは C 社製の試験体 No.7 の 0.29 であった。

また、このような中性化率の違いは、耐候性試験を 1500 時間および 3000 時間行った試験体についても同様の傾向があった。これらのことより、クリヤ塗料による中性化抑制効果は、その塗布量や銘柄によって差があることが確認された。

(4) 中性化深さ、中性化速度係数、中性化率の推移

耐候性試験の促進時間の経過に伴う中性化深さ、中性化速度係数および中性化率の推移を図-9 に示す。図中



(※試験体 No. 1 について、耐候性試験を行ったものは試験体 No. 1a のデータを表示した)

図-9 耐候性試験による中性化深さ、中性化速度係数、中性化率の推移（促進材齢 13 週）

の試験体 No.1 について、耐候性試験を行ったものは、試験体 No.1a のデータを表示した。いずれの試験体も、促進時間 3000 時間まで耐候性試験による中性化抵抗性の低下はなかった。このことは、光沢度の低下が小さかったことや、塗膜の付着性に变化がなかったこと、拡大鏡による観察で塗膜の変状が認められなかった結果と矛盾していない。

また、仕上げのない試験体 No.1a の中性化深さは、耐候性試験を行った方が小さくなる傾向が確認され、仕上材を施した試験体 No.2~No.7 も耐候性試験 3000 時間までは促進時間が長くなるほど、中性化深さが小さくなる傾向が確認された。これは、既往の文献⁹⁾でも指摘しているように、試験体 No.1a は耐候性試験中の噴霧により吸水し、モルタルの含水率が高くなったため、また、試験体 No.2~No.7 は仕上材により長期間にわたってモルタルの高い含水状態が保持されたためと考える。

これらのことから、今回選定したクリヤ塗料について、促進時間 3000 時間まで中性化抑制効果の持続性が確認できた。今後、促進時間 5000 時間までの耐候性試験を行う計画である。

今回の実験条件では、仕上げのない試験体と仕上材を施した試験体のモルタルの含水状態の経時変化は異なる可能性がある。より精度の高い中性化抵抗性の促進試験による評価を実現するために、自然環境に曝される実構造物でも、このような含水状態の違いが生じているかを定量的に把握することが、今後の課題であると考えられる。

4. まとめ

耐候性試験と促進中性化試験を組み合わせ、仕上材による中性化抑制効果および仕上材の劣化を考慮した中性化抑制効果の持続性を実験的に検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 今回の実験で使用したクリヤ塗料は、その劣化を考慮しない場合、促進中性化試験の促進材齢 13 週において、中性化率は 0.12~0.29 の範囲にあり中性化抑

制効果が確認された。また、その効果には塗布量や銘柄によって差があることを確認した。

- (2) サンシャインウェザーメーターを用いて促進時間 3000 時間（屋外暴露の 12 年間に相当）まで耐候性試験を行った結果、クリヤ塗料の塗膜は、光沢度の低下が小さく、付着性の变化もなく、拡大鏡観察でも変色やひび割れなどは確認されなかった。これらのことから、塗膜の明確な劣化の兆候は認められなかった。
- (3) 耐候性試験による中性化抵抗性の推移を確認した結果、いずれのクリヤ塗料も促進時間 3000 時間まで中性化抑制効果の持続性が確認された。今後、促進時間 5000 時間までの耐候性試験を行う計画である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，pp.98-126，2016
- 2) 河野政典，榊田佳寛，落合亮太，唐沢智之：仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 584 号，pp.15-21，2004.10
- 3) 兼松 学，李 佑眞，鶴木圭一，長井宏憲ほか：紫外線照射による高分子系仕上材の中性化抑制効果の変化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1063-1064，2009.8
- 4) 堀 一夫，深井 公，杉山 雅：住宅基礎コンクリートの耐久性向上に関する基礎的研究（その 16），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.249-250，2018.9
- 5) 小林利充，植松俊幸，神代泰道：クリヤ系材料によるコンクリートの保護効果に関する研究（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.711-712，2019.9
- 6) 長谷川拓哉，千歩 修，大久保孝昭，古賀純子：建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 609 号，pp.23-30，2006.11