

論文 経年劣化を考慮した仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究

平田 真佑子*1・親本 俊憲*2・今本 啓一*3・清原 千鶴*4

要旨: 近年, ポルトランドセメントを産業副産物に置き換えた低炭素型コンクリートの開発が進んでいるが, 低炭素コンクリートは中性化抵抗性に懸念がある。本研究では, コンクリートの表面に仕上塗材を施すことによる中性化抑制効果について検討を行った。促進耐候性試験により劣化させた後の仕上塗材にて, 二酸化炭素透過度試験を実施し評価するとともに, 仕上塗材の劣化を考慮した中性化深さの予測を行った。その結果, 耐久性上有効かつ中性化抑制効果の高い仕上塗材を選定することでコンクリートの中性化抵抗性を改善することができ, コンクリートの所要強度を下げられる可能性が示唆された。

キーワード: 仕上塗材, 中性化, コンクリート, 二酸化炭素透過度, 促進耐候性試験, 経年劣化

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け, ポルトランドセメントを部分的に産業副産物に置き換えた低炭素型コンクリートの開発が進んでいる。鉄筋コンクリート造建築物の耐久性に影響を及ぼす劣化要因の一つがコンクリートの中性化であるが, 低炭素型コンクリートは普通コンクリートに比べて中性化の進行が速くなる懸念がある。コンクリートの水結合材比を小さくすることでコンクリートを緻密化し, 中性化の進行を抑制することが可能となるが, コスト増や施工性の低下が懸念される。

2022 年度版の JASS5¹⁾において, 耐久性上有効な仕上塗材を塗布することで中性化を抑制できるため, 最小かぶり厚さを 10mm 減じることが可能と記載されているように, 仕上塗材を塗布することで中性化を抑制することが可能となる。また, 同文献には屋外暴露試験や促進中性化試験による仕上塗材種類ごとの中性化率が掲載されており, 仕上塗材の劣化によって中性化率 (仕上塗材のないコンクリートの中性化深さに対する仕上塗材を施したコンクリートの中性化深さの比) が大きくなることが示されている。また, 中性化率は仕上塗材の種類が同じでも製品ごとに異なる。このことから, 耐久性上有効で中性化抑制効果が高い仕上塗材を選定することは構造物の耐久性を確保する上で非常に重要となる。また, 精度よく中性化予測を行うには, 実際に使用する仕上塗材の中性化抵抗性を把握する必要がある。

本研究では, コンクリートの中性化抑制方法として, コンクリートに仕上塗材を施す方法に着目し, 各仕上塗材の中性化抑制効果の検討を行った。はじめに, 促進劣化を行う前の仕上塗材にて二酸化炭素透過度の試験を行い, 劣化前の仕上塗材の評価を行った。次に, 促進耐候性試験を行い, 耐久性上有効で中性化抑制効果の高い仕

上塗材について検討した。最後に, 実験で得られた二酸化炭素透過度の値を用いて, 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化予測を行い, 仕上塗材の中性化抑制効果に関する評価を行った。

2. 実験概要

2.1 仕上塗材の種類

使用した仕上塗材の一覧を表-1 に, 試験項目を表-2 に示す。一般の建築物で比較的使用頻度の高い外装仕上塗材である, 防水形複層塗材 E, 複層塗材 E・Si, 防水形外装薄塗材 E を選定し, 塗布量を膜厚で管理することでメーカーの仕様書どおりの塗布量を施工し (ただし, No.4

表-1 仕上塗材の一覧

No.	メーカー	種別	規格	備考
1	A	上塗り材	—	セラミックシリコン樹脂 エマルジョン
2		上塗り材	—	セラミックシリコン樹脂
3		主材	JIS A 6909	防水形複層塗材 E
4		主材	JIS A 6909	No.3 の塗布量 1/2
5		主材	JIS A 6909	複層塗材 Si
6		主材	JIS A 6909	防水形外装薄塗材 E
7		下塗り材	JIS K 5663	特殊変性カチオン樹脂
8		上塗り材+主材+下塗り材	—	No.1+3+7
9		上塗り材+主材+下塗り材	—	No.1+4+7
10		上塗り材+主材+下塗り材	—	No.2+5+7
11		主材+下塗り材	—	No.6+7
12	B	上塗り材	—	シリコン系樹脂
13		主材	JIS A 6909	防水形複層塗材 E
14		主材	JIS A 6909	複層塗材 E
15		下塗り材	JIS K 5663	カチオン樹脂
16		上塗り材+主材+下塗り材	—	No.12+13+15
17	上塗り材+主材+下塗り材	—	No.12+14+15	
18	C	上塗り材	JIS A 6909	アクリルシリコン樹脂
19		主材	JIS A 6909	防水形複層塗材 E
20		下塗り材	JIS K 5663	カチオン型水性アクリル シリコン樹脂
21		上塗り材+主材+下塗り材	—	No.18+19+20
22	—	無塗布	—	—

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所建築生産グループ副主任研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 技術研究所建築生産グループグループ長 工修 (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*4 東京理科大学 工学部建築学科客員研究員 工博 (正会員)

は除く), 各種試験を実施した。外装仕上塗材はコンクリート表面から下塗り材, 主材, 上塗り材の順で構成されている。本実験では下塗り材, 主材, 上塗り材を塗布した, 複層の仕上塗材と併せて, 各塗料単体の二酸化炭素透過度の試験を行い, 塗材ごとの二酸化炭素透過性についての評価も行った。併せて, 比較のために無塗布(ろ紙のみ)の水準も同様に測定を行った。

2.2 二酸化炭素透過度試験

仕上塗材の二酸化炭素透過性について, JIS A 6909:2021「建築用仕上塗材」附属書 A「建築用仕上塗材の二酸化炭素透過度試験方法」(旧ボックス法)を参考にし, ろ紙に仕上塗材を塗布した試験体の封かん方法を改良し, 後述の促進耐候性試験機の関係で試験片の形状を 75×150mm とした試験方法²⁾により試験を行い評価した。試験容器の概要を図-1 に示す。本研究では, 試験の簡便性と試験面以外から二酸化炭素を透過させないようにするため, アクリルシリコン材で試験体を接着し, プチルテープで封かんした(図-2)。試験容器内の水酸化カルシウムに, 試験体を透過した二酸化炭素を反応させ, 未反応の水酸化カルシウムを中和滴定により定量することで透過した二酸化炭素の量を求め, 仕上塗材の二酸化炭素透過度を算出した。試験容器を 20°C, 60%R.H., 二酸化炭素濃度 5%の促進中性化試験槽内に静置し, 式(1)により炭酸化率を, 式(2)により二酸化炭素透過量を算出した。既往の研究³⁾によると, 炭酸化率は, 50%程度までは試験時間に伴い線形に上昇することが示されている。そこで, 本試験では炭酸化率 50%以下となる範囲の測定

点 1 点と原点を結んだ直線の傾きを二酸化炭素透過度とした。

$$S(t) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\beta(t) = \frac{(C_0 - C_t) \times M}{A \times 100} \quad (2)$$

ここに, $S(t)$: t 時間後の炭酸化率[%]

C_0 : 試験前の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含量[wt%]

C_t : 各試験期間後の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の含量[wt%]

$\beta(t)$: t 時間後の二酸化炭素透過量[mol/m^2]

A : 二酸化炭素の透過面積[m^2]

M : シャーレの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の物質質量[mol]

2.3 顔料体積濃度

仕上塗材の顔料体積濃度 (Pigment Volume Concentration: 以下, PVC) は仕上塗材を乾燥固化させたものを試料として, 図-3 に示す計算手順にて算出した⁴⁾。熱重量分析 (TG) で, 水・高沸点溶剤, 樹脂, 炭酸カルシウムおよび顔料残渣の質量割合を求め, 顔料残渣についてフーリエ変換赤外分光 (FT-IR) で顔料成分を同定し, 蛍光 X 線分析 (XRF) で各成分の含有量を求めた。そして, 試料中の樹脂量および顔料成分の含有量から含有体積を求めて式(3)により算出した。なお, 本研究では上塗り材および主材において PVC を算出した。

$$\text{PVC} = \frac{A}{A+B} \times 100 \quad (3)$$

ここに, A : 仕上塗材中の顔料体積

B : 仕上塗材中の樹脂体積

表-2 試験項目

項目		方法
仕上塗材膜厚	JISK5600-1-7	マイクロメータ 1 枚につき等間隔に 6 点測定
二酸化炭素透過度	JIS A 6909 附属書 A 建築用仕上塗材の二酸化炭素透過度試験方法	封かん方法を改良し ²⁾ , 試験片の形状 75×150mm にて実施
顔料体積濃度 (PVC)	熱重量分析(TG)	測定条件: N2 雰囲気 (100mm/min)、昇温速度 20°C/min、温度範囲 室温~1200°C
	フーリエ変換赤外分光(FT-IR)	—
	蛍光 X 線分析(XRF)	—
促進耐候性試験	JIS K 5600-7-7 キセノンランプ法	放射照度: 180W/m ²

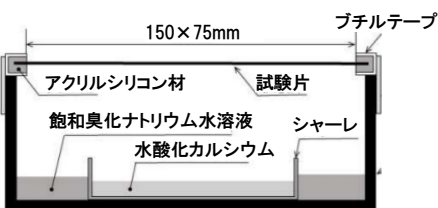


図-1 二酸化炭素透過度試験体の概要

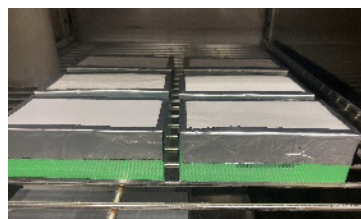


図-2 二酸化炭素透過度試験の状況

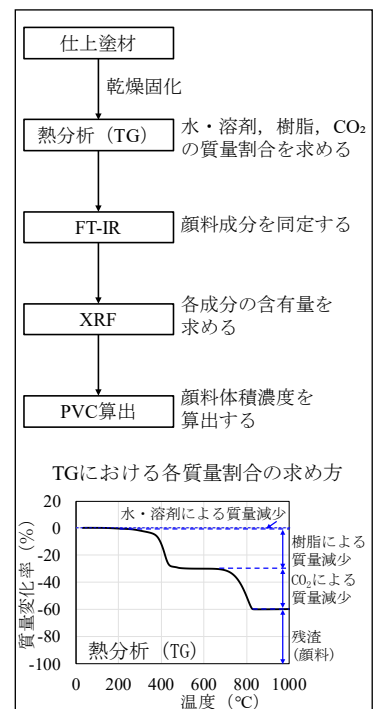


図-3 PVC の計算手順

2.4 促進耐候性試験

仕上塗材の経年劣化が中性化抑制効果に与える影響について把握するため、促進耐候性試験を実施し、劣化させた仕上塗材に対しても二酸化炭素透過度試験を行った。促進耐候性試験は、JIS K 5600-7-7 のキセノンランプ法とし、 180W/m^2 にて照射を行った。本稿では照射時間は1000, 3000, 5000時間の3水準とした。

促進時間は NEDO 全国日射関連データベース⁵⁾より、東京の水平面の日間全天日射量（年間の平均値）は 12.19MJ/m^2 であり、水平面に対する東西南北の垂直面の全天日射量の割合は、東面:0.59, 西面:0.58, 南面:0.80, 北面:0.32となる。文献⁶⁾から式(4)にて水平面の日間紫外線量を求めることができ、年間紫外線量に換算すると 296.3MJ/m^2 となる。水平面の年間紫外線日射量に、水平面に対する東西南北の垂直面の割合を乗じることで、各方角の垂直面の年間紫外線量を求められる。得られた各方面の垂直面の年間紫外線量を表-3に示す。

$$Y = 0.0645X + 25.5 \quad (4)$$

ここに、Y: 日間全天日射量 $[\text{M/m}^2]$

X: 日間紫外線量 $[\text{M/m}^2]$

放射照度 $180\text{W/m}^2(\text{J/m}^2 \cdot \text{s})$ で促進試験を1000時間実施した場合の紫外線放射量は 648MJ/m^2 となる。各方角の垂直面の年間紫外線量と促進耐候性試験の紫外線放射量から求めた暴露換算年数は表-3に示すように求められる。この中で一番条件の厳しい南面の暴露換算年数である2.7年を1000時間相当とした。7500時間が20年相当となるが、本論では暴露13.5年相当となる5000時間までの促進試験を行った結果を報告する。

3. 実験結果

3.1 促進劣化前の仕上塗材

(1) 二酸化炭素透過度

促進劣化を行う前の各仕上塗材の二酸化炭素透過度試験の結果を図-5に示す。下塗り材 (No.7, No.15およびNo.20)は無塗布と同等程度に二酸化炭素を透過した。主材では、複層塗材 Si (No.5) および複層塗材 E (No.14)の複層塗材において二酸化炭素透過度が高い結果となった。なお、文献⁷⁾において耐久性上有効な仕上塗材の目安として10~20年程度の期間において、中性化率が0.6を超えないことが目安とされている。また、JIS A 6909: 2021「建築用仕上塗材」附属書 A「建築用仕上塗材の二酸化炭素透過度試験方法」により得られる二酸化炭素透過度が $0.5[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})]$ 以下の場合に、中性化率が0.6以下となることが報告されている。各塗料単体では二酸化炭素透過度が高い塗料があったが、複層の仕上塗材 (No.8~11, 16, 17, 21)は全て二酸化炭素透過度が $0.5[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})]$ より小さい結果となり中性化抑制効果

表-3 促進耐候性試験の各方角における換算相当年数

	水平面に対する垂直面の全天日射量の割合	各方角の垂直面の年間紫外線量 $[\text{MJ/m}^2]$	促進1000時間の換算年数[年]
東面	0.59	174.6	3.7
西面	0.58	171.9	3.8
南面	0.80	237.0	2.7
北面	0.32	94.8	6.8



図-4 促進耐候性試験機

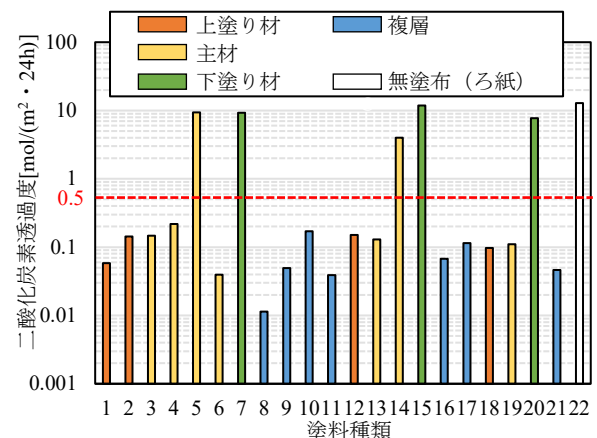


図-5 促進劣化前における仕上塗材の二酸化炭素透過度

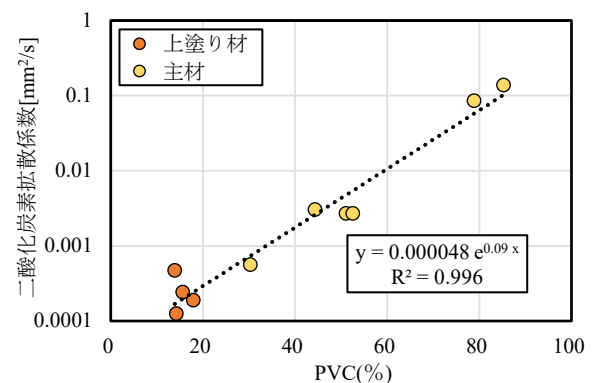


図-6 PVC と二酸化炭素透過度の関係

が確認できた。下塗り材、主材、上塗り材と複数の塗料を重ねることで、二酸化炭素透過度が小さくなることが考えられる。

(2) PVC

PVCと二酸化炭素拡散係数の関係を図-6に示す。二酸化炭素拡散係数は二酸化炭素透過度試験の結果から文献⁴⁾の方法にて求めた。同文献⁴⁾において、主材のPVCが大きいほど二酸化炭素の拡散係数が大きくなる傾向があったと報告されているが、本研究では上塗り材においても良好な相関関係がみられた。このことから、上塗り材および主材において、樹脂と顔料の体積比が二酸化炭素透過度に大きな影響を与える結果となった。なお、PVCが20%以下の4点は全て上塗り材の結果であり、上塗り材は中性化抑制効果に大きく貢献していることがわかる。

3.2 促進劣化後の仕上塗材

複層の仕上塗材における二酸化炭素透過度の試験結果を表-4および図-7に示す。1000時間照射後までは二酸化炭素透過度は全て0.5[mol/(m²・24h)]以下となったが、複層塗材はNo.10が3000時間、No.17が5000時間照射後に0.5を超える結果となった。一方で、防水形複層塗材Eおよび防水形外装薄塗材Eは0.5以下となり、5000時間でも中性化抑制効果が高い結果となった。なお、いずれの仕上塗材種類も製品間での明確な差はみられなかった。各仕上塗材単体での二酸化炭素透過度試験の結果を図-8に示すが、No.10, 17に塗布した上塗り材(No.2, 12)の二酸化炭素透過度が促進劣化前と比較して大きくなっており、また主材(No.5, 14)の二酸化炭素透過度は促進劣化前から他の主材と比較して二酸化炭素透過度が大きい。このことから、5000時間で複層塗材の二酸化炭素透過度が大きくなった要因として、促進劣化前は主材の二酸化炭素透過度が大きいものの上塗り材が二酸化炭素の透過を抑制していたのに対し、5000時間では上塗り材が十分な抑制効果を発揮できなかったことが一因として考えられる。

4. 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行の予測

4.1 予測手法

前章で得られた試験結果を用いて、仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行の予測を文献⁷⁾を参考に行った。中性化深さは式(5)~(7)にて算出した。

$$C_{(i)} = A_0 \left[\sqrt{\{(t'_{i-1} + \Delta t) + R'_{(i-1)}\}^2} - R'_{(i-1)} \right] \quad (5)$$

$$t'_{i-1} = \left(\frac{C_{i-1}}{A_0} + R'_{(i-1)} \right)^2 - R'_{(i-1)}^2 \quad (6)$$

$$R'_{(i-1)} = \frac{R_{(i-1)}}{\sqrt{\frac{C_0}{5}}} \quad (7)$$

ここに、 $C_{(i)}$: ステップ*i*での中性化深さ[mm]

A_0 : 中性化速度係数[mm/√年]

t'_{i-1} : ステップ*i-1*での見かけ材齢[年]

$R'_{(i-1)}$: ステップ*i-1*での中性化抵抗[√年]

$R_{(i-1)}$: 促進中性化試験により得られた

ステップ*i-1*での中性化抵抗[√年]

C_0 : 炭酸ガス濃度[%]

中性化抵抗 R は式(8)にて算出した。本検討では仕上塗材の経年劣化を考慮して中性化深さの予測を行うにあたり、仕上塗材の二酸化炭素拡散係数 D_f は前章にて報告した促進耐候性試験後の二酸化炭素透過度試験で得られた値を使用した。促進時間0, 1000, 3000, 5000時間をそれぞれ暴露換算年数に換算し、暴露換算年数と二酸化炭素拡散係数の結果から、式(9)に示す指数近似曲線の回帰式を作成し、得られた値を式(8)にて使用した。なお、二酸化炭素拡散係数は式(10)にて二酸化炭素透過度から求めた。

表-4 複層仕上塗材の膜厚および二酸化炭素透過度

No.	メーカー	種類	膜厚 [mm]	二酸化炭素透過度 [mol/(m ² ・24h)]			
				0	1000	3000	5000
8	A	防水形複層塗材E	1.1	0.01	0.06	0.05	0.23
10		複層塗材Si	0.7	0.17	0.47	0.59	0.74
11		防水形外装薄塗材E	0.5	0.04	0.09	0.08	0.14
16	B	防水形複層塗材E	0.9	0.07	0.15	0.24	0.30
17		複層塗材E	0.1	0.12	0.18	0.26	0.79
21	C	防水形複層塗材E	1.2	0.05	0.25	0.16	0.26

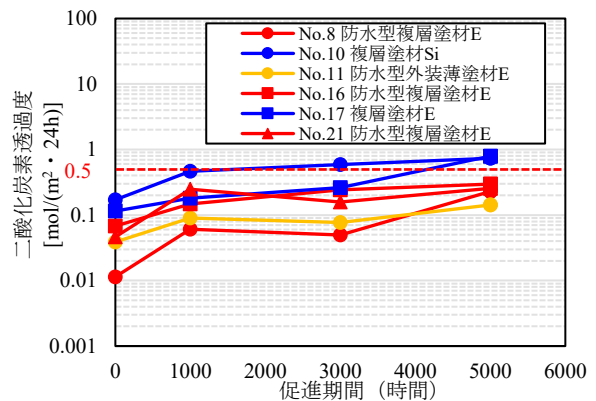


図-7 複層仕上塗材の二酸化炭素透過度試験結果

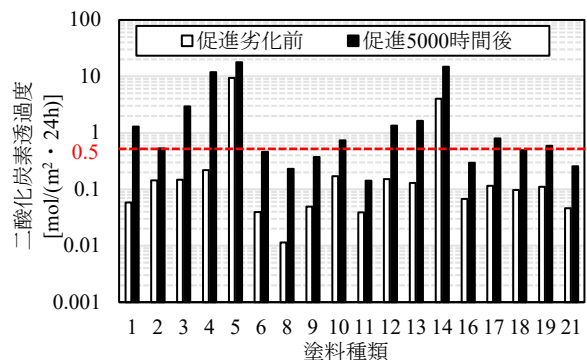


図-8 各仕上塗材単体での二酸化炭素透過度

$$R = \frac{D_c}{\left(\frac{D_f(t)}{d}\right) \cdot \frac{1}{A}} \quad (8)$$

$$D_f(t) = a \times e^{b \cdot t} \quad (9)$$

$$D_f = \frac{T_{co_2} \times d}{c_{co_2}} \quad (10)$$

ここに、 D_c : コンクリートの CO_2 拡散係数[mm^2/s]

$D_c(t)$: ある暴露年数での仕上塗材の
 CO_2 拡散係数[mm^2/s]

d : 仕上塗材の厚さ[mm]

A : コンクリートの中性化速度係数[$mm/\sqrt{\text{年}}$]

t : 暴露換算年数[年]

a, b : 変数

D_f : 仕上塗材の CO_2 拡散係数[mm^2/s]

T_{co_2} : 仕上塗材の CO_2 透過度[$mol/mm^2 \cdot s$]

c_{co_2} : 促進試験の CO_2 濃度[mol/mm^3]

No.8 の仕上塗材における二酸化炭素透過度の回帰式を図-9 に、各仕上塗材の結果を表-5 に示す。なお、5000 時間から 7500 時間 (7500 時間が暴露 20 年相当) の範囲は 5000 時間までの結果から外挿して求めた。複層の仕上塗材は促進耐候性試験後も厚さに変化が無かった為、いずれのステップにおいても初期値の膜厚を使用した。

4.2 中性化進行の予測

低炭素型コンクリートの一つである、高炉スラグを高含有したコンクリート (高炉 C 種相当) に仕上塗材を塗布した場合の中性化深さの予測を行った。なお、本検討では、全て高い中性化抑制効果が得られた No.8 の仕上塗材を使用した場合を想定して行い、一般的な屋外環境を想定して CO_2 濃度は 0.05% とした。検討条件を表-6 に示す。

はじめに、施工時から塗布した場合の中性化深さの検討を行った。高炉スラグを高含有したコンクリートの中性化速度係数は文献⁸⁾を参考に、水結合材比 (以下、W/B) が 45% の場合の中性化速度係数を使用した。仕上塗材を塗布しなかった場合と、仕上塗材を塗布して塗り替え頻度が 10 年だった場合および塗り替え頻度が 20 年だった場合の 3 水準で予測を行った結果を図-10 に示す。材齢 65 年時の中性化深さは、無塗布と比較した場合、仕上塗材を塗布したもので 20 年ごとに塗り替えを行った場合は 6 割程度、10 年ごとに塗り替えを行った場合は 3 割程度の中性化深さとなった。このことから、耐久性上有効な仕上材を塗布することにより、無塗布と比較して中性化を大幅に抑制することが可能であり、仕上塗材が劣化する前に適切な頻度で塗り替えを行うことで中性化をさらに抑制できると考えられる。

施工時では無塗布のコンクリートに対し、材齢 15 年時に仕上塗材を施工した場合の結果を図-11 に示す。施

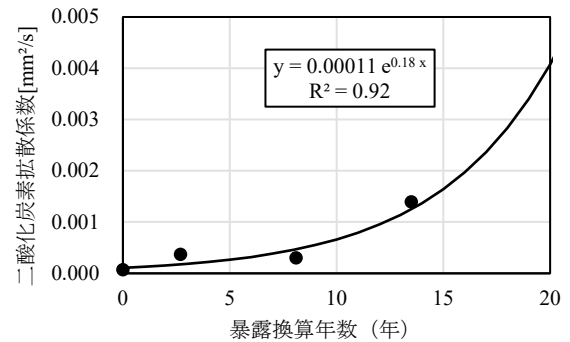


図-9 二酸化炭素拡散係数の回帰式 (No.8)

表-5 回帰分析で得られた変数

No.	メーカー	仕上塗材種類	a	b
8	A	防水形複層塗材 E	0.00011	0.18
10		複層塗材 Si	0.00097	0.09
11		防水形外装薄塗材 E	0.00010	0.09
16	B	防水形複層塗材 E	0.00045	0.10
17		複層塗材 E	0.00009	0.13
21	C	防水形複層塗材 E	0.00033	0.13

表-6 検討条件

W/B [%]	コンクリートの 中性化速度係数* [$mm/\sqrt{\text{年}}$]	塗布	塗布時期	塗り替え頻度 [年]
45	2.9	無	—	—
		有	新築時から No.8 を塗布	10
				20
		有	15 年時に No.8 を塗布	10
55	3.8	有	新築時から No.8 を塗布	10

※ CO_2 濃度 : 0.05% の場合

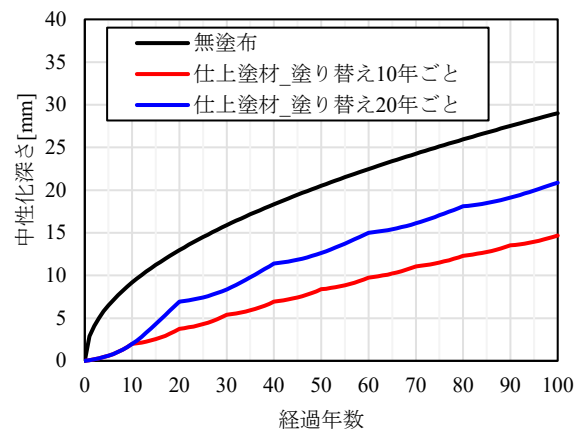


図-10 中性化深さの予測結果

工時に塗布したものほどの大きな中性化抑制効果がみられない結果となった。このことから初期の中性化を抑制する重要性が高く、施工時に最適な仕上塗材を選定することが中性化抵抗性を向上させる上で効果的であることが示唆される結果となった。

また、文献⁸⁾を参考に、同コンクリートで W/B が 55%

の場合の中性化速度係数を使用し、仕上塗材を塗布した場合と W/B が 45% のコンクリートに仕上塗材を塗布しなかった場合と比較した結果を図-12 に示す。水結合材比を 55% と大きくした場合でも仕上塗材を塗布したことにより、材齢 100 年（計画供用期間・長期相当）において、W/B が 45% のコンクリートより中性化深さを小さくすることが可能となる。このことから仕上塗材を塗布することにより、所要の強度を小さく設定でき、より経済的な耐久設計を行うことが可能となる可能性が示唆された。

5. まとめ

本論ではコンクリートの中性化抑制方法として、仕上塗材の検討を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。今後は実暴露試験体での実測値との比較を行い、本評価手法の精度向上を図る予定である。

- (1) 促進劣化を行う前の仕上塗材にて、二酸化炭素透過度の試験を行った。その結果、複層の仕上塗材は全て $0.5[\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h})]$ 以下となり中性化抑制効果が確認できた。
- (2) 促進耐候性試験を行い、劣化を考慮した仕上塗材の中性化抑制効果について検討を行った結果、防水形複層塗材 E および防水形外装薄塗材 E は 5000 時間（暴露換算年数 13.5 年）の促進耐候性試験後においても、中性化抑制効果を有していた。
- (3) 仕上塗材の劣化を考慮した中性化深さの予測結果から、施工時に適切な仕上塗材を施工した場合、無塗布と比較して中性化を大幅に抑制することが可能である結果となった。また、仕上塗材が劣化する前に適切な頻度で塗り替えを行うことにより、中性化をさらに抑制できることが示唆され、仕上塗材を塗布することにより、所要の強度を小さく設定できる可能性があることが示唆された。

参考文献

- 1) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 2022
- 2) 清原千鶴ほか: 外装仕上塗材の中性化抑制効果に関する実験的研究 その 1 外装仕上塗材の二酸化炭素透過度試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.21-22, 2024.7
- 3) 濱崎仁ほか: 建築用外装仕上材の中性化抑制効果の評価方法および評価基準に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 87 巻, 797 号, pp.600-609, 2022.7

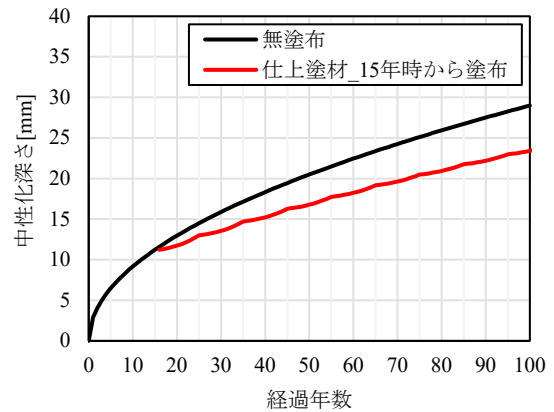


図-11 中性化深さの予測結果

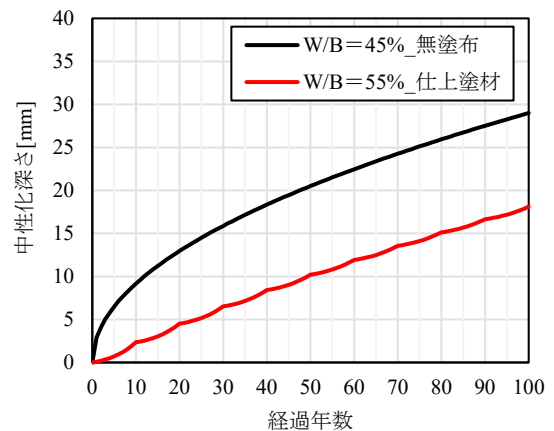


図-12 中性化深さの予測結果

- 4) 親本俊憲, 和田環, 澤田瑞恵, 藤井大輔: 顔料体積濃度を用いた塗料・仕上塗材の中性化抑制効果の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.759-760, 2019.9
- 5) 日射に関するデータベース参照: https://www.nedo.go.jp/seika_hyoka/nissharyou.html (閲覧日: 2022年11月1日)
- 6) 楡木堯, 富板 崇: 耐久性能試験方法に関する研究(その 25) 角度・方位別にみた紫外線量の月別・時間別変動, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.123-124, 1984.10
- 7) 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 日本建築学会, 2016
- 8) 金子樹, 河野政典, 高橋祐一, 古川雄太: 各種の使用率で高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの諸性状および環境配慮性, コンクリート工学, Vol. 59, No. 3, pp. 247-254, 2021.3