

令和 5 年度 修士論文

# コンクリート構造物の二酸化炭素 固定量に及ぼす塗装の影響に 関する研究

2024 年 2 月 9 日

広島大学大学院先進理工系科学研究科  
先進理工系科学専攻

建築耐震工学研究室

M223507

島田 修弥



# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 実験フロー .....	3
1.3 本論文の構成 .....	4
1.4 参考文献 .....	5
第2章 既往の研究 .....	6
2.1 はじめに .....	6
2.2 中性化に関する指標を用いた CO <sub>2</sub> 固定量の推定手法 .....	6
2.3 塗装を有する中性化進行予測に関する既往研究 .....	7
2.3.1 非破壊透気試験を用いた中性化進行予測 .....	9
2.3.2 塗膜の劣化を考慮した中性化進行予測 .....	18
2.4 塗膜の劣化手法に関する検討 .....	21
2.5 参考文献 .....	27
第3章 塗膜の促進劣化手法の提案 .....	29
3.1 はじめに .....	29
3.2 劣化した塗装を施したコンクリートの透気係数の評価に向けた事前検討 .....	29
3.3 実験概要 .....	31
3.4 光沢度試験結果 .....	33
3.5 参考文献 .....	35
第4章 塗装及びその劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響 .....	36
4.1 はじめに .....	36
4.2 透気試験概要 .....	36
4.3 コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響に関する検討 .....	37
4.3.1 実験概要 .....	37
4.3.2 実験結果 .....	38
4.4 塗装及び塗膜の劣化が透気係数に及ぼす影響 .....	38
4.4.1 実験概要 .....	38
4.4.2 塗装がコンクリートの透気係数に及ぼす影響 .....	39
4.4.3 塗装の劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響 .....	41
4.4.4 各塗装, 劣化因子における劣化進行に関する考察 .....	44
4.5 参考文献 .....	48
第5章 透気係数を用いた塗装を有するコンクリートの中性化進行予測 .....	49
5.1 はじめに .....	49

5.2	みかけの透気係数を用いた塗膜の透気係数の推定	49
5.2.1	測定深さに関する実験概要	51
5.2.2	測定深さに関する実験結果	52
5.2.3	塗膜単体の透気係数の推定に関する実験	55
5.3	中性化促進試験	57
5.3.1	実験概要	57
5.3.2	実験結果及び考察	58
5.4	塗装を有するコンクリートの中性化進行予測式の提案	60
5.5	塗装を有するコンクリートの中性化進行と透気係数の関係	62
5.6	CO <sub>2</sub> 固定量の推定	64
5.7	参考文献	68
第6章	結論	69
	参考文献	71
付録		72
	塗装の選定理由	72
	吸水試験	74
	参考文献	74
	謝辞	76

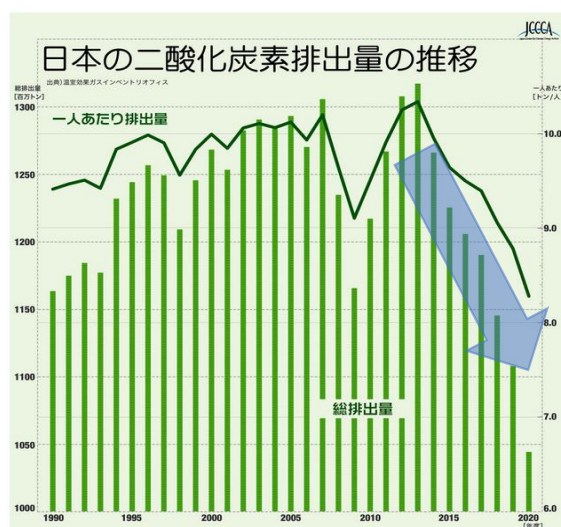
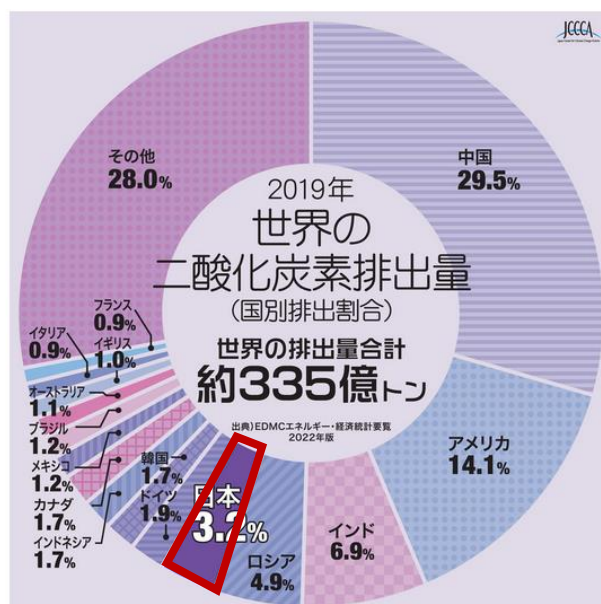
# 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

今日、図 1-1<sup>1)</sup>に示すように、日本の二酸化炭素排出量は年々減少傾向にある。しかし、図 1-2<sup>2)</sup>に示すように、世界規模で見ると日本は世界で 5 番目の排出量を記録しており、日本では、今もなお CO<sub>2</sub> 排出量削減に取り組んでいる。地球温暖化問題に対する具体的な取り組みとして、大気中の CO<sub>2</sub> の固定化に関する検討が行われている。コンクリート構造物においては、炭酸化反応によって CO<sub>2</sub> 固定量が一定量見込まれることが報告されており<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>、従来、中性化速度係数として評価されていたコンクリートの特性値が CO<sub>2</sub> 固定量の予測指標の一つになりうると考えられている<sup>5)</sup>。

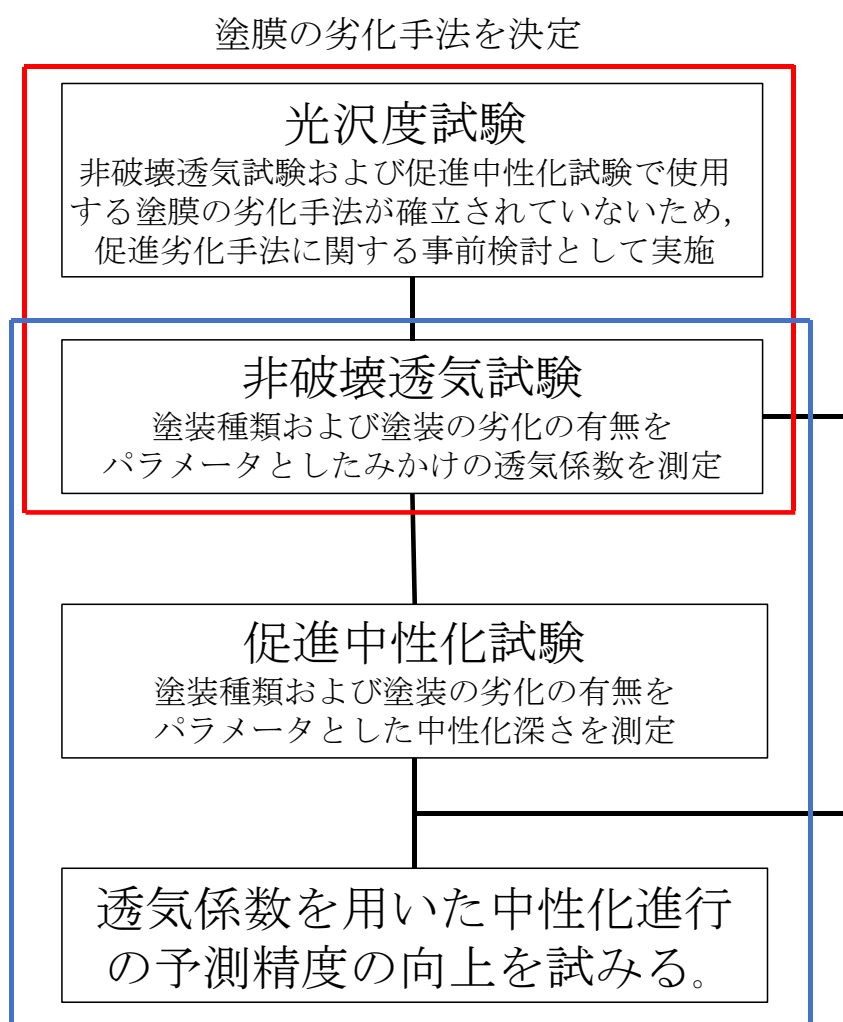
近年、非破壊透気試験を用いて中性化速度係数を評価する方法が報告されており<sup>6-9)</sup>、コンクリートの表層の透気係数を測定することによって CO<sub>2</sub> 固定量の推定精度の向上が期待できる。しかし、一般建築の多くは塗装などの仕上げが施されているにもかかわらず、中性化深さと CO<sub>2</sub> 固定量の関係、それに及ぼす塗装種類や、塗装の経年劣化の影響についての知見はほとんどない。

よって、本研究では塗装の種類、塗装の劣化の有無をパラメータとした促進中性化試験を行うことにより、塗装を有するコンクリートにおける中性化深さを実験的に取得するとともに、透気試験を実施することでコンクリートの中性化と深くかかわる二酸化炭素及び水分の移動と高い相関がある透気係数を用いた中性化進行予測の精度向上を試みた。

図 1-1 日本の二酸化炭素排出量の推移<sup>1)</sup>図 1-2 世界の二酸化炭素排出量<sup>2)</sup>

## 1.2 実験フロー

本研究における実験フローを図 1-3 に示す。本研究では、促進中性化試験を行うことで中性化深さを測定し、非破壊透気試験を行うことで測定する透気係数を用いることで塗装を有するコンクリートの中性化進行の予測精度を向上させることを考えているが、中性化進行の予測精度を向上させるにあたって実構造物では塗装中の塗膜が経年劣化を引き起こすため、塗膜の経年劣化について考慮する必要がある。しかし、塗装を劣化させる方法として一般的に用いられる紫外線を一定時間照射させる方法では、試験体数の著しい減少や試験体に紫外線を均一に当てることの難しさから、紫外線を用いない塗装の促進劣化手法が必要である。しかし、それらについてほとんど知見がないため、紫外線を用いずに促進劣化する方法についても光沢度試験および透気試験によって別途検討を行った。



塗装を有するコンクリートの中性化進行の予測精度の向上

図 1-3 実験フロー

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は全章から構成されており，第 2 章からの概要を説明する。

第 2 章 塗膜の促進劣化手法，中性化進行予測の方法に関する既往研究についてまとめる。

第 3 章 塗膜の促進劣化手法について提案し，提案した根拠についてまとめる。

第 4 章 塗装の種類およびその劣化をパラメータとして透気試験を行った結果及び考察についてまとめる。

第 5 章 中性化促進試験の実験結果及び考察をまとめ，第 4 章の結果などを用いて中性化進行予測の精度向上を試みた。

第 6 章 各章で示した内容や結果を整理し，本研究における総括的な結論を示した。



## 1.4 参考文献

- 1) <https://www.jccca.org/download/65455>
- 2) <https://www.jccca.org/global-warming/knowledge04>
- 3) 黒田泰弘, 菊池俊文: 解体コンクリートによる二酸化炭素の固定, コンクリート工学論文  
文集, Vol20, No.1, 2009.1
- 4) Danish Technological Institute: Guidelines-Uptake of carbon dioxide in the life cycle inventory  
of concrete, 2005.10
- 5) Lagerblad, B.: Carbon dioxide uptake during concrete lifecycle - State of the art, CBI Report 2,  
pp. 9-11, 2005
- 6) 庭野究, 今本啓一, 陣内浩, 清原千鶴: 非破壊透気試験を用いた仕上げ材を有するコン  
クリートの中性化速度の評価方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81,  
No.722, pp.655-663, 2016.4
- 7) 加藤猛, 今本啓一, 清原千鶴, 山崎順二: 透気試験複合法による仕上材付きコンクリー  
トの中性化速度の評価手法に関する実験的検討, 日本コンクリート工学年次論文集,  
Vol.40, No.1, 2018
- 8) 唐沢智之, 古賀一八, 浦川和也, 河野政典: 仕上塗材の中性化抑制効果と透気性に関す  
る考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 9) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性の評価, 日本  
建築学会構造系論文集, Vol.80, No.711, pp.727-734, 2015.5

## 第 2 章 既往の研究

### 2.1 はじめに

1 章でも述べたように，大気中の  $\text{CO}_2$  の固定化に関する検討が行われており，コンクリート構造物においては，炭酸化反応によって  $\text{CO}_2$  固定量が一定量見込まれることが報告されている。近年，非破壊透気試験を用いて中性化速度係数を評価する方法が報告されているが，本章ではその報告例について具体的にまとめる。また，これら进行评估するにあたって塗装及び塗装の劣化手法进行评估する必要があるが，塗装の選定及び劣化手法の選定において参考にした既往研究についても並行して本章でまとめる。

### 2.2 中性化に関する指標を用いた $\text{CO}_2$ 固定量の推定手法

兵頭ら<sup>1)</sup>はコンクリート中の  $\text{CO}_2$  固定量を式(2-1)，式(2-2)及び式(2-3)に示すように，中性化したコンクリートの体積と中性化した領域が固定した  $\text{CO}_2$  量の積で表されるものとした。また，中性化した領域の体積は，コンクリートの表面積と中性化深さの積によって表されており，体積当たりの  $\text{CO}_2$  固定量  $m_{SL}$  は単位セメント量にセメント中の  $\text{CaO}$  量をかけることで体積当たりの  $\text{CaO}$  量を算出し，体積当たりの  $\text{CaO}$  量に中性化度をかけることで炭酸化した  $\text{CaO}$  量を算出し，炭酸化した  $\text{CaO}$  量に  $\text{CO}_2$  と  $\text{CaO}$  の分子量比をかけることによって求めている。

$$M_{SL} = V_{SL} \times m_{SL} \quad (2-1)$$

$$V_{SL} = A \times d / 1000 \quad (2-2)$$

$$m_{SL} = D_c \times C \times \frac{C_{aO}}{100} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2-3)$$

ここで， $M_{SL}$ ：供用中に吸収した  $\text{CO}_2$  量 (t)， $V_{SL}$ ：中性化したコンクリートの体積 ( $\text{m}^3$ )， $m_{SL}$ ：コンクリートの単位体積当たりの  $\text{CO}_2$  吸収量 ( $\text{t}/\text{m}^3$ )， $A$ ：供用中のコンクリートの表面積 ( $\text{m}^2$ )， $d$ ：中性化深さ (mm)， $D_c$ ：中性化度， $C$ ：単位セメント量 (t)， $C_{aO}$ ：セメント中の  $\text{CaO}$  量 (%)， $M_{CO_2}$ ， $M_{CaO}$ ： $\text{CO}_2$  (44.0) 及び  $\text{CaO}$  (56.1) の分子量

Lagerblad ら<sup>2)</sup>は式(2-4), 式(2-5)により, コンクリート中の CO<sub>2</sub> 固定量を推定しており, 兵頭ら<sup>1)</sup>が推定した式と似通っている箇所があるものの, Lagerblad ら<sup>2)</sup>はセメント中の CaO 量を中性化速度係数とコンクリートの表面積と経過時間の平方根の積によって表している。また, 一般的な中性化促進試験に用いられるフェノールフタレインを噴霧する方法で定義される炭酸化したコンクリートでは CaO の 75wt%が炭酸化によって消費されるものとして, CO<sub>2</sub> 固定量 $a$ は 0.75 をかけることで算出している。

$$a = 0.75 \times C \times C_{aO} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} \quad (2-4)$$

$$C_{aO} = k \times s \times \sqrt{t} \quad (2-5)$$

ここで,  $a$ : 供用中に吸収した CO<sub>2</sub> 量 (t),  $C$ : 単位セメント量 (t),  $C_{aO}$ : セメント中の CaO 量 (%),  $M_{CO_2}$ ,  $M_{CaO}$ : CO<sub>2</sub> (44.0) 及び CaO (56.1) の分子量,  $k$ : 中性化速度係数,  $s$ : コンクリートの表面積 (m<sup>2</sup>),  $t$ : 経過時間 (年)

### 2.3 塗装を有する中性化進行予測に関する既往研究

塗装が施されたコンクリートの中性化進行について, 馬場ら<sup>3)</sup>は, セメント系の仕上げ材以外の仕上げ材を施したコンクリートの中性化進行の予測式(2-6)を提案している。

$$D = A \left[ \sqrt{(T + R^2)} - R \right] \quad (2-6)$$

ここで,  $A$ : 中性化速度係数 (mm/day<sup>1/2</sup>),  $T$ : 期間 (day),  $R$ : 中性化抵抗 (day<sup>1/2</sup>) である。

また, 河野ら<sup>4)</sup>の研究では, CO<sub>2</sub> が塗装及びコンクリート中をフィックの第一法則に従って拡散していくと仮定し, 図 2-1 に示す炭酸化進行モデルに従うことで, 時間あたりに塗膜を拡散してコンクリート表層部に達する CO<sub>2</sub> 量, 中性化したコンクリート中を拡散してコンクリート深さ  $x$  まで達する CO<sub>2</sub> 量及び拡散してきた CO<sub>2</sub> が厚さ  $\Delta x$  の境界に存在する Ca(OH)<sub>2</sub> と反応して CaCO<sub>3</sub> になるときに消費される CO<sub>2</sub> 量をそれぞれ式(2-7), (2-8), (2-9)によって表し, 式(2-10)を示すことによって, 中性化抵抗  $R$  を用いた式(2-6)の妥当性が検討されている。

$$\Delta CO_2(1) = D_f \cdot \frac{C_0 - C'}{d} \cdot S \cdot \Delta t \quad (2-7)$$

$$\Delta CO_2(2) = D_c \cdot \frac{C'}{x} \cdot S \cdot \Delta t \quad (2-8)$$

$$\Delta CO_2(3) = \Delta x \cdot S \cdot H \quad (2-9)$$

$$R = \frac{D_c}{\left(\frac{D_f}{d}\right)} \cdot \frac{1}{A} \quad (2-10)$$

ここで、 $\Delta CO_2(1)$ ：時間あたりに塗膜を拡散してコンクリート表層部に達する  $CO_2$  量， $\Delta CO_2(2)$ ：中性化したコンクリート中を拡散してコンクリート深さ  $x$  まで達する  $CO_2$  量， $\Delta CO_2(3)$ ：拡散してきた  $CO_2$  が厚さ  $\Delta x$  の境界に存在する  $Ca(OH)_2$  と反応して  $CaCO_3$  になるときに消費される  $CO_2$  量， $C_0$ ：塗膜表面の  $CO_2$  濃度， $C'$ ：コンクリート表面の  $CO_2$  濃度， $D_f$ ：塗膜の  $CO_2$  拡散係数， $D_c$ ：コンクリートの  $CO_2$  拡散係数， $d$ ：塗膜厚さ， $x$ ：中性化深さ， $t$ ：時間， $S$ ：表面積， $H$ ：コンクリートの単位体積当たりの  $Ca(OH)_2$  量， $\Delta x$ ：境界領域の厚さ， $\Delta t$ ：微小時間， $R$ ：中性化抵抗， $A$ ：コンクリートの中性化速度係数

式(2-6)では塗装などの仕上げによる炭酸化速度の抑制を中性化抵抗 $R$ として表現しており，既往研究では主に中性化抵抗 $R$ の表現方法について検討が行われている。

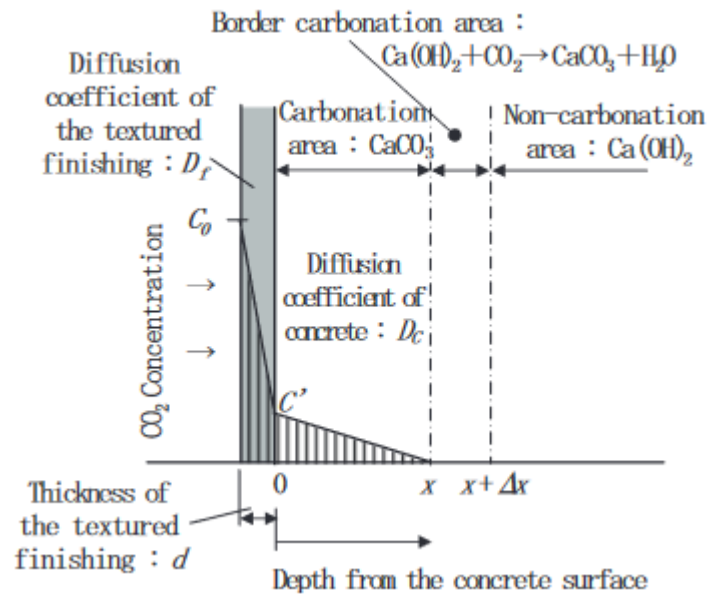


図 2-1 炭酸化進行のモデル図

### 2.3.1 非破壊透気試験を用いた中性化進行予測

非破壊透気試験は一般的にダブルチャンバー法（以下、DC 法）によって行われており、透気試験によって得られる透気係数はコンクリートの中性化と深くかかわる二酸化炭素及び水分の移動と高い相関があると報告されており、図 2-2, 3, 4, 5, 6, 727<sup>5)-10)</sup>に示すように、コンクリートの透気係数及び塗装を施したコンクリートのみかけの透気係数と中性化速度係数及び中性化抵抗にも相関があると報告されている。

庭野ら<sup>5)</sup>は、DC 法によって測定されたみかけの透気係数の逆数が中性化進行に対する抵抗性であると定義しそれを中性化抵抗 $R$ とした。それを式(2-11)のように実験から得られた中性化速度係数などから得られた重み付け係数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ を組み込むことによって、中性化抵抗 $R$ を算定した。

$$R = \alpha \log(1/Kt_c) + \beta \log(d^\gamma/Kt_f) \quad (2-11)$$

ここで、 $R$ ：中性化抵抗、 $Kt_c$ ：コンクリートの透気係数、 $Kt_f$ ：塗膜表面の透気係数、 $d$ ：塗膜厚さ、 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ：重み付け係数

算出した中性化抵抗 $R$ と実験から得られた中性化速度係数の関係を図 2-8 に示す。その結果透気抵抗が増加するにつれて中性化速度係数が減少する傾向が得られている。

また、庭野ら<sup>5)</sup>は、既存の鉄筋コンクリート構造物への適応性についても検討行っており、調査を行った対象物のみかけの透気係数と中性化速度係数及び中性化抵抗 $R$ と中性化速度係数の関係を図 2-9 図 2-10 に示す。この結果から、みかけの透気係数のみの評価では、ばらつきが多く、塗装が施されたコンクリートの中性化進行の予測は困難である可能性が示された。一方で、提案している中性化抵抗 $R$ を用いると中性化抵抗 $R$ が増加するにつれて中性化の進行が抑制される傾向を示し、中性化抵抗 $R$ が 3.0 以上の範囲においては中性化がほぼ進行しないことが確認されるとともに、中性化速度係数とある程度の相関関係を示すことが確認された。

ここで、DC 法の概要図を図 2-11 に示す。試験機は測定部となる内部チャンバーと圧力調整用の外部チャンバーによって構成されており、透気係数はチャンバー内を減圧して、減圧終了後から既定の圧力に達するまでの時間によって式(2-12)によって求められる。また、同様の手法によって測定の評価範囲となっている測定深さが式(2-13)によって算出される。なお、DC 法によって取得される透気係数はコンクリートが塗装を有する場合、塗装を含めたコンクリートの透気係数であると考えられる。

$$K_t = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left[ \frac{\ln\left(\frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}\right)}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad (2-12)$$

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot K_t \cdot P_a \cdot t_f}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (2-13)$$

ここで、 $K_t$ ：透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )、 $V_c$ ：内部チャンバー体積 ( $\text{m}^3$ )、 $A$ ：内部チャンバー断面積 ( $\text{m}^2$ )、 $\mu$ ：空気の粘性 ( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )、 $\varepsilon$ ：コンクリートの空隙率 ( $=0.15$ )、 $P_a$ ：大気圧 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )、 $\Delta P$ ： $P_f - P_0$   $\Delta P > 20 \text{mber}$  で試験終了、 $P_f$ ：試験終了時の圧力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )、 $P_0$ ：測定開始時点の圧力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )、 $t_f$ ：測定終了時間 (s)、 $t_0$ ：測定開始時間 (s)、 $L$ ：測定深さ (mm)

一方で、DC 法での測定は本来コンクリート表面で行うものであり、塗装表面で行うものではない。そこで、庭野ら<sup>5)</sup>は透気試験の方法として使用している DC 法による試験を塗装を有するコンクリートに対して行った場合、どのような挙動を示すのかについて検証を行った。実験の方法として図 2-12 に示すように、複数のコンクリート中に埋め込んだ真鍮管に圧力センサを繋ぐことによって、コンクリートの内部圧力を測定した。その結果を図 2-13、図 2-14 に示す。その結果、打放しのコンクリートの場合表面から 10mm の深さでは減圧しているものの、塗膜を含むと深さ 10mm であっても減圧挙動を示さないことが確認された。このことから、DC 法による測定は塗膜の評価が主となっていると考察を行った。

唐沢ら<sup>6)</sup>は塗膜の拡散係数と透気係数の関係性について検討を行い、実験によって測定したみかけの透気係数から拡散係数及び中性化抵抗 $R$ を算出することで中性化の進行予測を行った。唐沢ら<sup>6)</sup>は中性化抵抗 $R$ として河野ら<sup>4)</sup>が提案した式(2-10)によって算出している。また、塗装が施されたコンクリートの透気係数を DC 法によって測定した場合、塗膜内部及びコンクリート内部の圧力が定常状態で変化すると仮定したときの塗膜内部及びコンクリート内部の圧力変化の推移と透気係数の関係を模式的に表した図を図 2-15 に示す。

図 2-15 に示すように、塗装部分とコンクリート部分の界面の圧力を  $P'$  とすると塗装部分とコンクリート部分の透気量が等しくなることから式(2-14)が成り立つ。式(2-14)を変換することで塗膜の透気係数 $K_f$ を式(2-15)となり、式(2-15)を用いて塗膜の透気係数を算定している。

$$K \frac{P_a - P_s}{L_{c+f}} = K_c \frac{P_a - P'}{l_c} = K_f \frac{P' - P_s}{d_f} \quad (2-14)$$

$$K_f = \frac{K \cdot K_c \cdot d_f}{K_c \cdot L_{c+f} - K(L_{c+f} - d_f)} \quad (2-15)$$

ここで、 $K$ ：塗装を施した試験体のみかけの透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )、 $P_a$ ：大気圧 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $P_s$ ：内部セルの圧力の初期値 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $L_{c+f}$ ：塗装を施した試験体のコンクリート部分の測定深さ (m)、 $K_c$ ：塗装前の試験体の透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )、 $P'$ ：塗装とコンクリートの界面の圧力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $l_c$ ：コンクリート部分の厚さ (m)、 $K_f$ ：塗膜の透気係数 ( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )、 $d_f$ ：

塗装の厚さ (m) である。

ここで、式(2-15)で求めた塗膜の透気係数と式(2-10)で求めた塗膜の拡散係数の関係を図 2-16 に示す。その結果、透気係数が増加するにつれて拡散係数も大きくなる傾向を示し、その関係を 1 次関数で表せることが確認された。

また、唐沢らの算定により求められた中性化抵抗 $R$ の算定値と実験データから最小二乗法を用いて求められた中性化抵抗 $R$ の実験値の比較を表した図を図 2-17 に示す。その結果、一部のデータを除いて算定値と実験値がおおむね一致していることが確認された。この検討では算定に使用する塗膜厚さについて総塗膜厚さを用いる場合と、樹脂塗膜厚さを用いる場合に分けて比較を行っており、樹脂塗膜厚さを用いて算定を行った方が実験値に近い値を示すことが確認された。算定した中性化抵抗 $R$ から求めた中性化深さの予測値と実験値の比較を図 2-18 図 2-19 に示す。その結果から材齢を伴う中性化進行の予測値においても実験値とおおむね一致することが確認された。また、材齢を伴う場合においても総塗膜厚さを用いるよりも樹脂塗膜厚さを用いて算定を行った方が実験値に近い値を示すことが確認された。

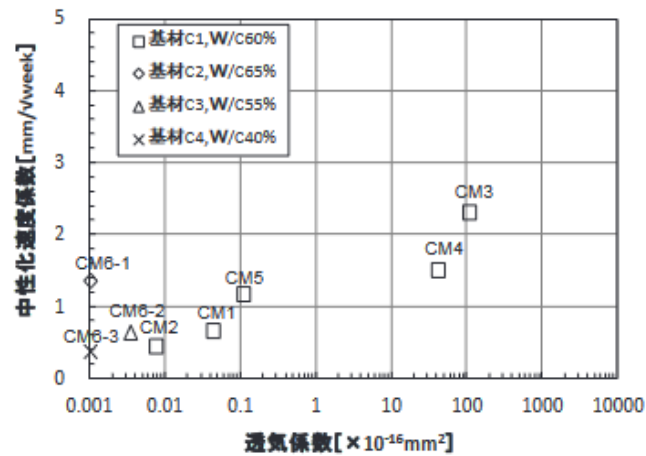
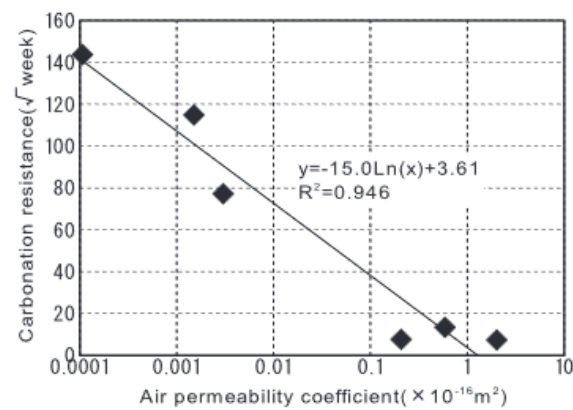
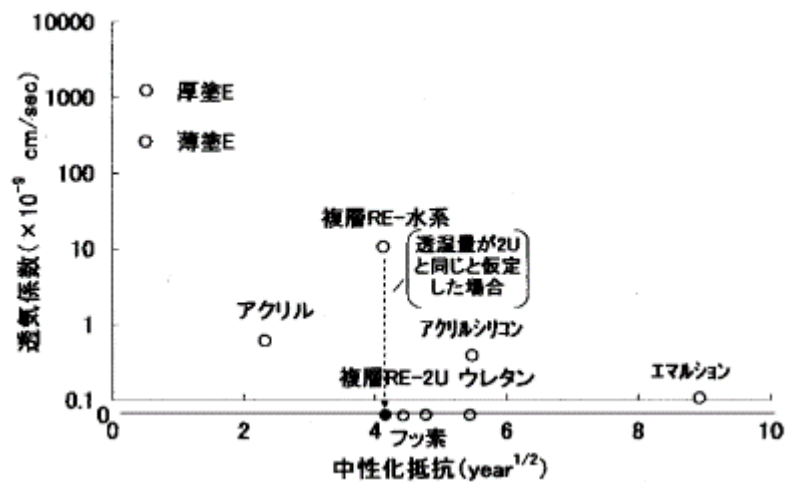
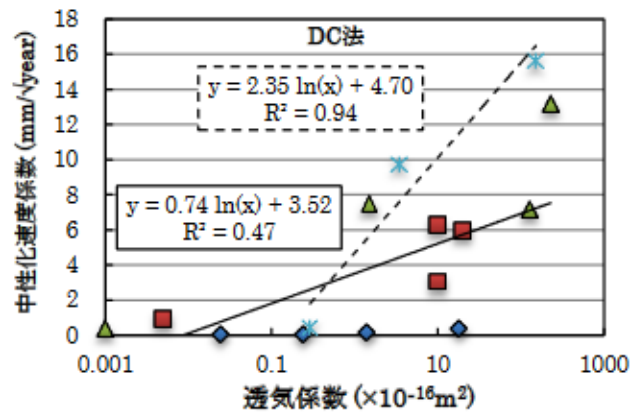
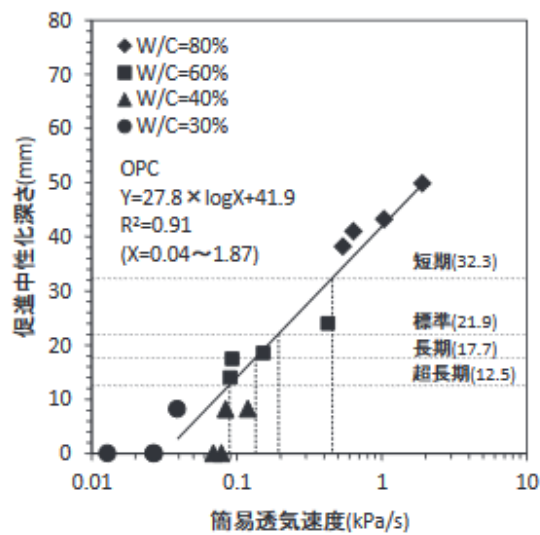
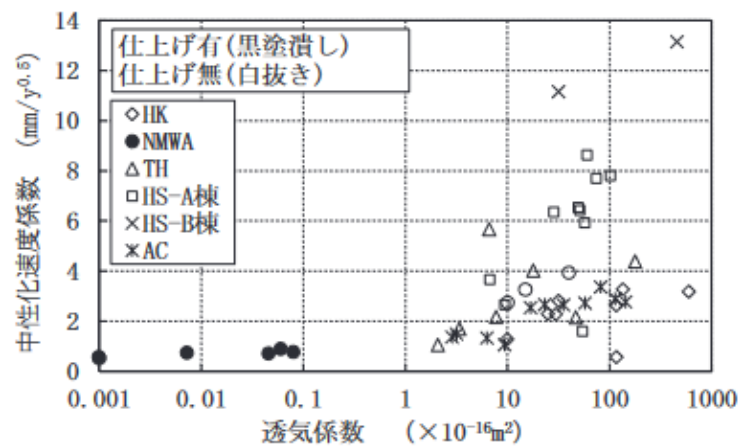
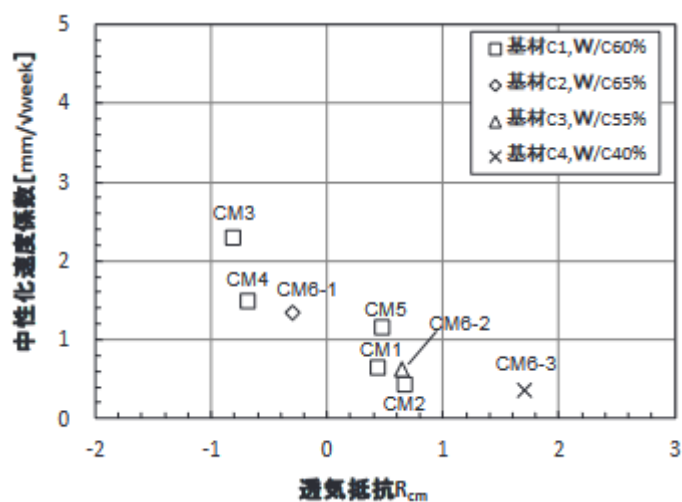
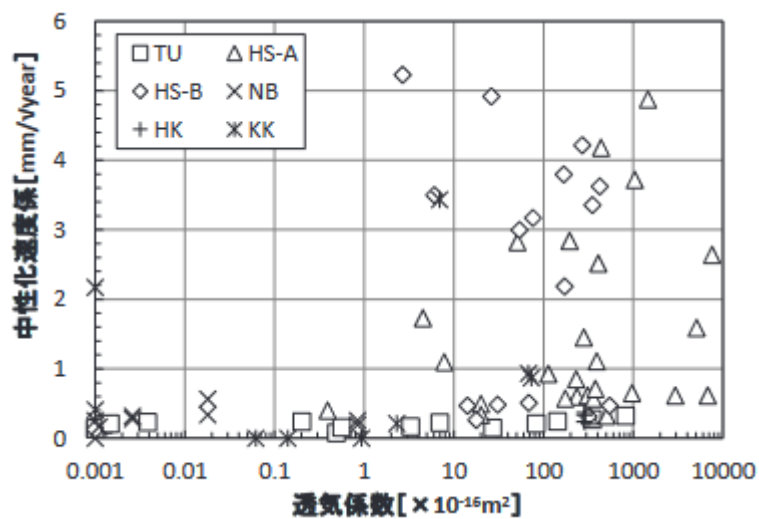
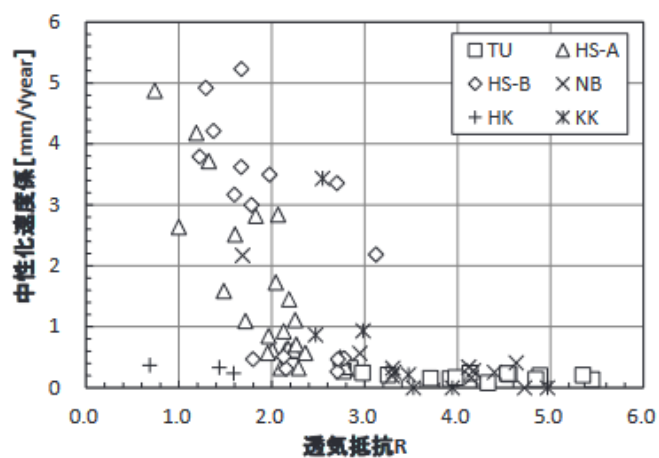
図 2-2 みかけの透気係数と中性化速度係数の関係<sup>5)</sup>

Fig. 6 Relation between carbonation resistance and air permeability coefficient

図 2-3 みかけの透気係数と中性化抵抗の関係<sup>6)</sup>図 2-4 みかけの透気係数と中性化抵抗の関係<sup>7)</sup>



図 2-5 みかけの透気係数と中性化速度係数の関係<sup>7)</sup>図 2-6 透気速度と中性化速度係数の関係<sup>9)</sup>図 2-7 みかけの透気係数と中性化速度係数の関係<sup>10)</sup>

図 2-8 透気抵抗と中性化速度係数の関係<sup>5)</sup>図 2-9 対象物のみかけの透気係数と中性化速度係数の関係<sup>5)</sup>図 2-10 対象物の透気抵抗と中性化速度係数の関係<sup>5)</sup>

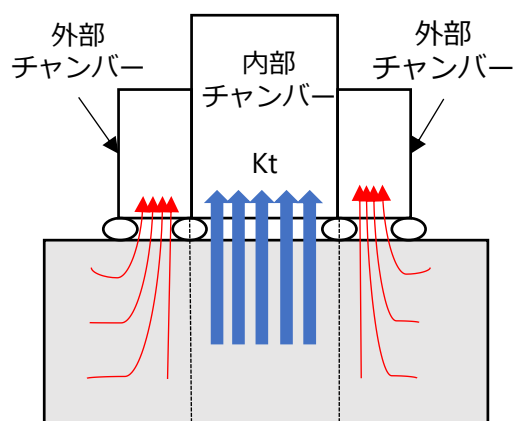
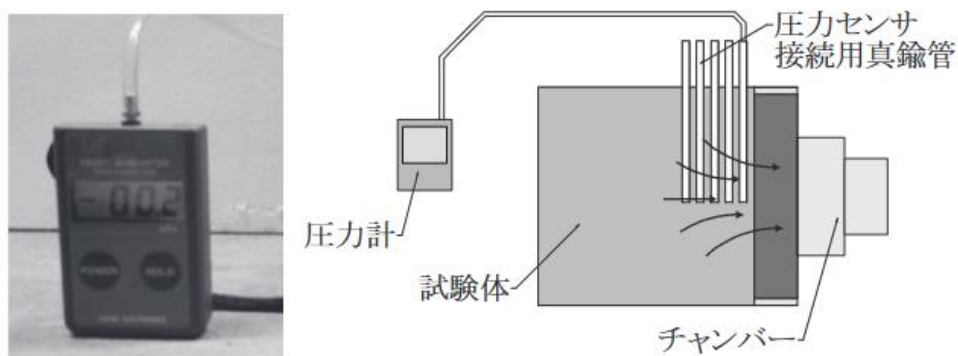
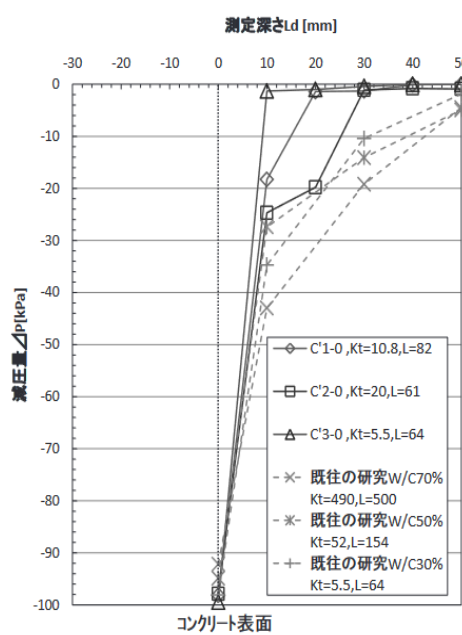
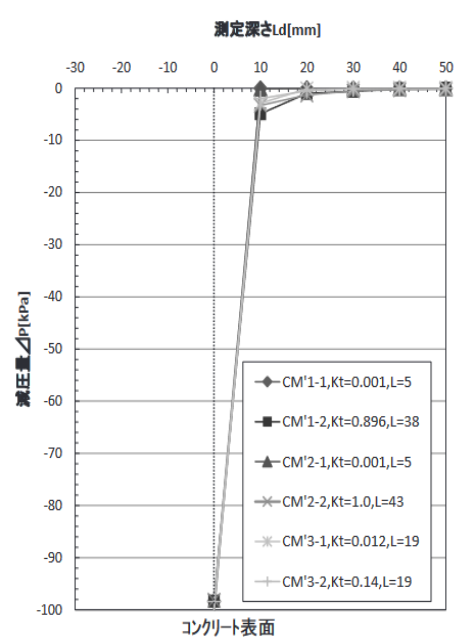
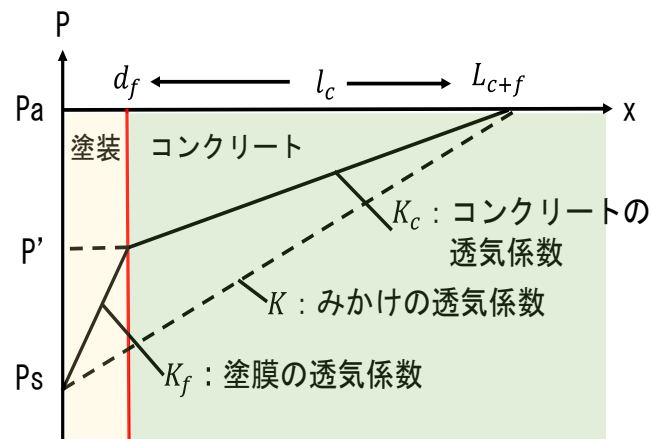
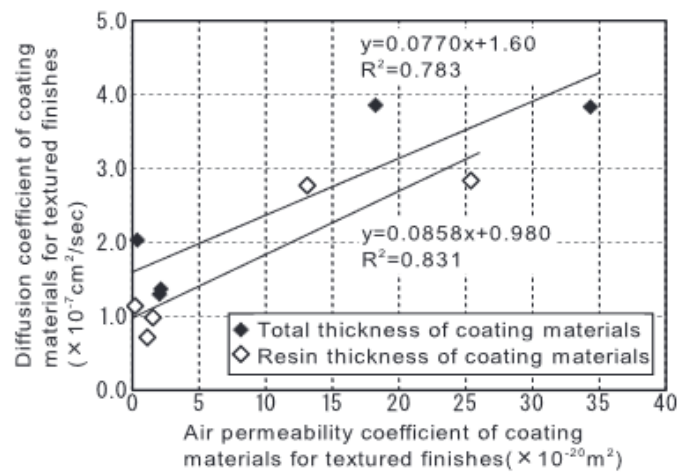
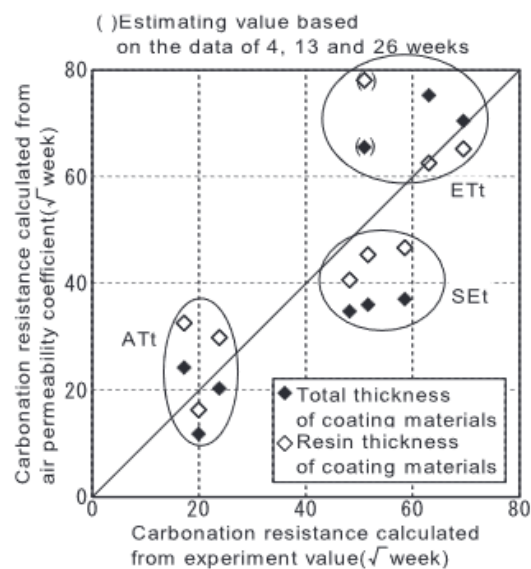


図 2-11 透気試験機概要図 (DC 法)

図 2-12 内部圧力測定概要図<sup>5)</sup>図 2-13 減圧状況 (打放し)<sup>5)</sup>図 2-14 減圧状況 (塗装有)<sup>5)</sup>

図 2-15 塗装内部及びコンクリート内部の圧力変化の推移と透気係数の関係<sup>6)</sup>図 2-16 塗膜の透気係数と塗膜の拡散係数の関係<sup>6)</sup>図 2-17 中性化抵抗の実験値と算定値の比較<sup>6)</sup>

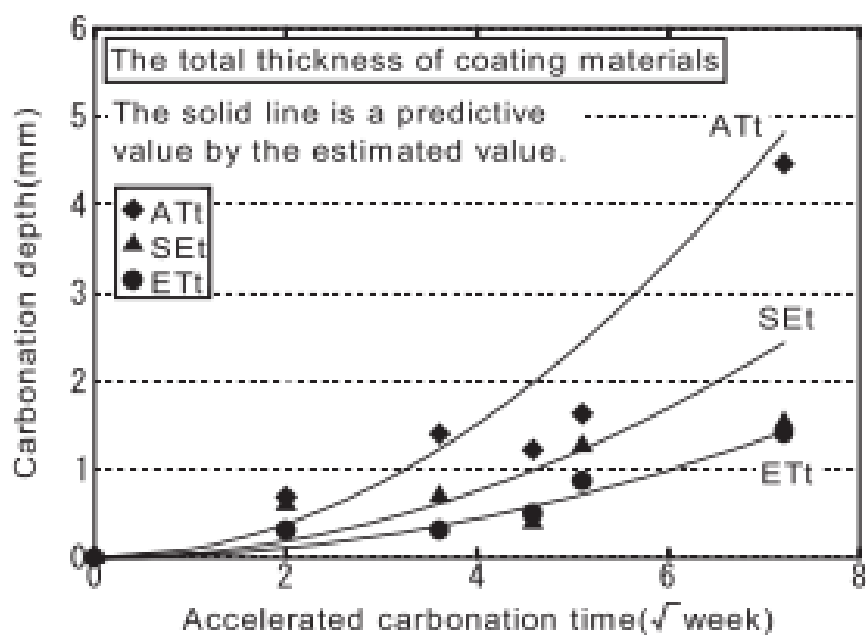


図 2-18  $d_f$ を総塗膜厚さとしたときの中性化深さの予測値と実験値<sup>6)</sup>

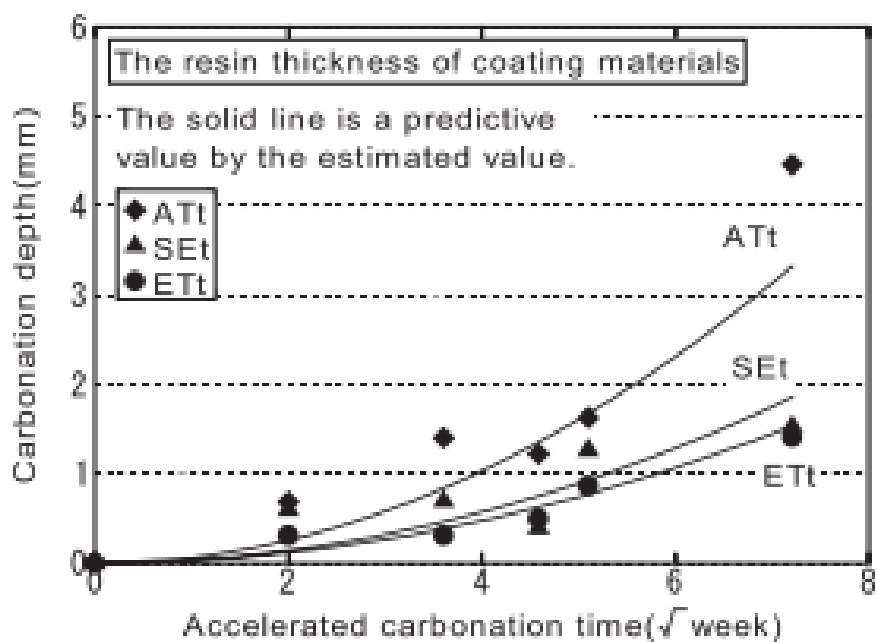


図 2-19  $d_f$ を樹脂塗膜厚さとしたときの中性化深さの予測値と実験値<sup>6)</sup>

### 2.3.2 塗膜の劣化を考慮した中性化進行予測

河野ら<sup>11)</sup>は塗膜の経年劣化を考慮した中性化進行予測についての検討するために物理的な劣化(油圧式サーボパルスにより引張)、化学的な劣化(サンシャインウェザーメーター)及び複合劣化(物理+化学)の3種類の劣化手法を用いて検討している。なお、この文献では、塗膜厚さに対して揮発分を考慮した理論塗厚さを用いて考察を行っている。

劣化していない試験体の中性化深さの経時変化を図 2-20 に示す。また、これらの劣化を施した試験体の中性化深さの経時変化を図 2-21 に示す。その結果、物理的劣化では劣化していない試験体の経時変化とあまり差はないものの、化学的劣化及び複合劣化を施すと中性化の進行が促進される傾向が得られた。これにより、塗膜の劣化は化学的劣化が支配的であることが示された。

また、化学的劣化で使用したサンシャインウェザーメーターの紫外線照射時間から塗膜の劣化年数を推定し、劣化の経過時間と絡めて考察を行っている。ここで、樹脂塗膜厚さと中性化抵抗の関係を図 2-22 に示す。その結果、中性化抵抗は樹脂塗膜厚さに対してほぼ比例関係となっており、劣化年数に応じてそれぞれ相関があると考えられる。また、劣化年数と樹脂塗膜厚さに対する中性化抵抗の関係を図 2-23 に示す。その結果、劣化初期に著しく小さくなり、年数の経過に伴って中性化抵抗の減少傾向は緩やかになると考察されている。図 2-23 を用いて中性化抵抗 $R$ を式(2-16)、(2-17)で表している。

$$R = T_r(-0.0098t + 0.088) \quad [t \leq 6] \quad (2-16)$$

$$R = T_r(-0.0018t + 0.041) \quad [6 < t \leq 12] \quad (2-17)$$

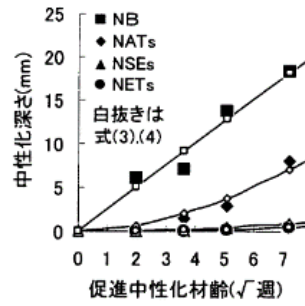
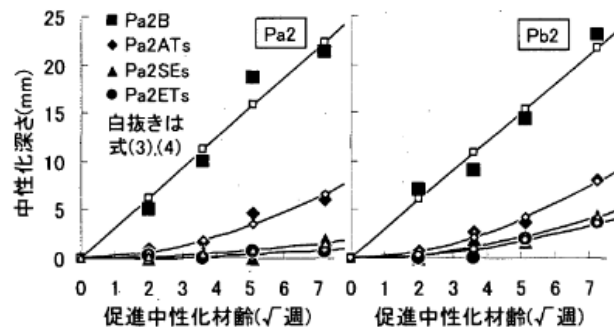
ここで、 $R$ : 中性化抵抗 ( $\sqrt{\text{week}}$ ),  $T_r$ : 樹脂塗膜厚さ ( $\mu\text{m}$ ),  $t$ : 劣化年数 (年)

濱崎ら<sup>12)</sup>は促進中性化試験を行うとともに、二酸化炭素透過試験を行うことにより、中性化進行の評価を行った。さらに、促進耐候性試験を行うことにより塗膜の経年劣化を考慮した評価を行った。

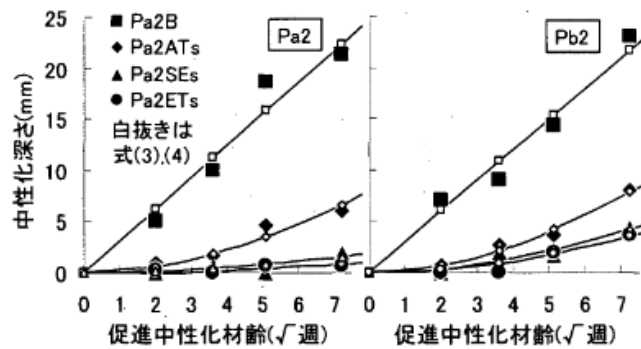
二酸化炭素透過度の測定試験については、JIS P 3801 に規定する 5 種 A ろ紙に塗装を施して、約 118mm 角に切り取った試験体を使用し、図 2-24 に示す機構を用いて所定の手法により行った。

$\text{CO}_2$  透過度と中性化率の関係を図 2-25 に示す。その結果、 $\text{CO}_2$  透過度と中性化率の間に強い正の相関を示しており、式(2-18)が実験により算出されている。また、促進耐候性試験後の  $\text{CO}_2$  透過度と中性化率の関係を図 2-26 に示す。なお、図中の点線は式(2-18)を示している。この図からは、促進劣化による  $\text{CO}_2$  透過度の大きな変化は確認されず、促進劣化を行った場合でも、式(2-18)と同様の関係であることが確認された。

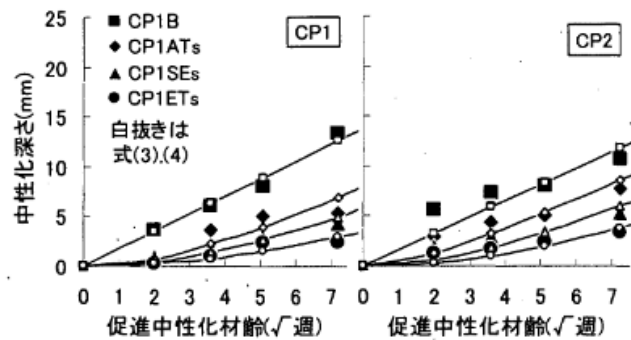
また、陣内ら<sup>13)</sup>、曾我ら<sup>14)</sup>が行った屋外暴露試験の結果を踏まえて、塗膜の劣化を考慮した中性化抑制効果の評価基準を検討した結果、基準として  $\text{CO}_2$  透過度  $0.5(\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot 24\text{h}))$  を採用することを提案した。

図 2-20 劣化していない試験体の中性化深さの経時変化<sup>11)</sup>

a) 物理的劣化

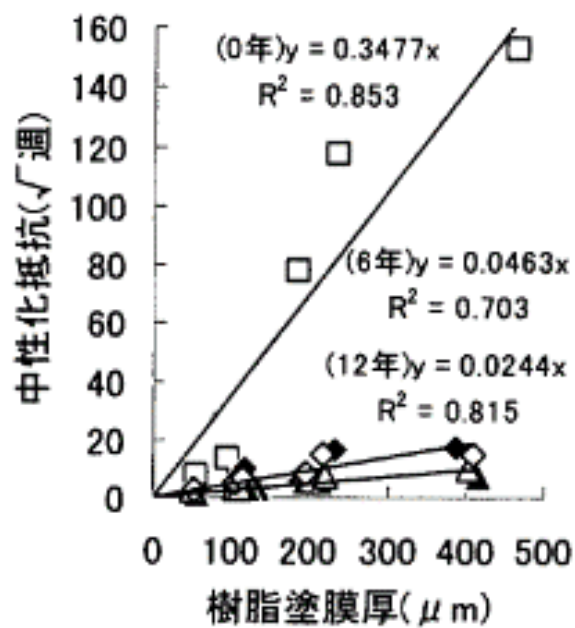
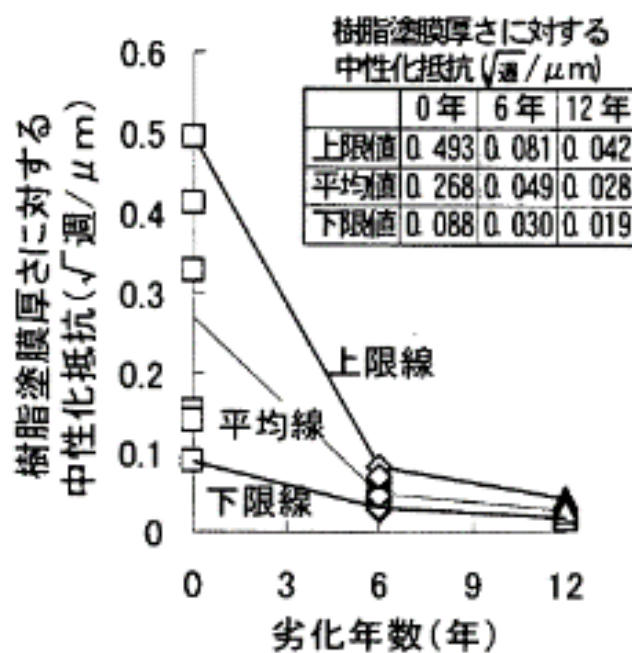


b) 化学的劣化

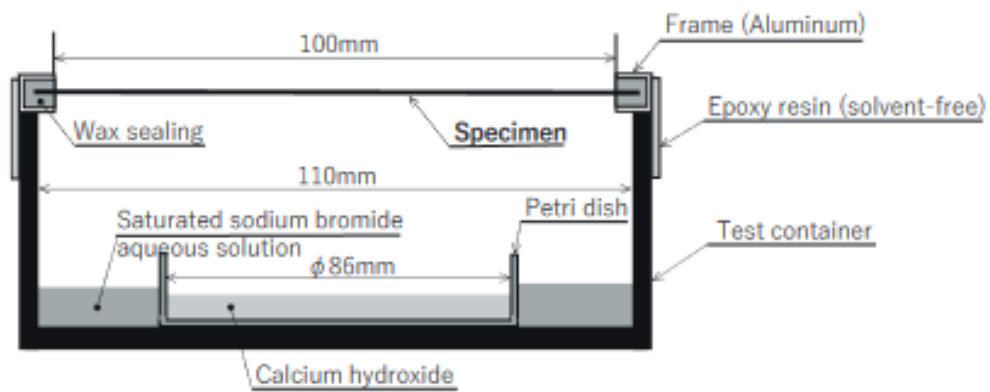
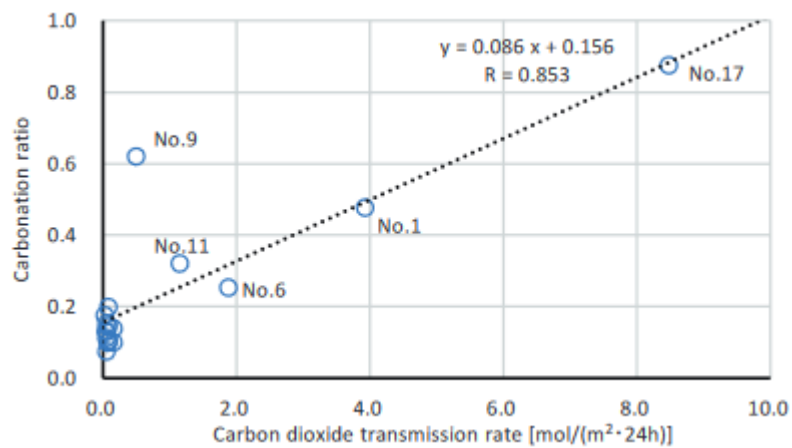
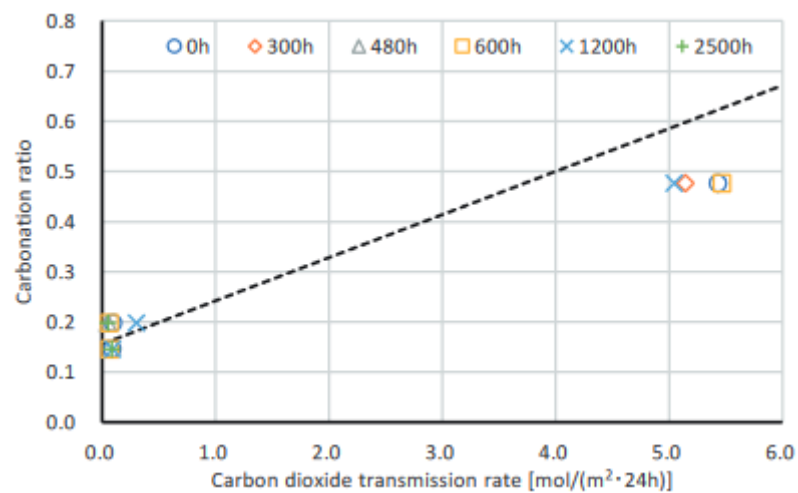


c) 複合劣化

図 2-21 劣化した試験体の中性化深さの経時変化<sup>11)</sup>

図 2-22 樹脂塗膜厚さと中性化抵抗の関係<sup>11)</sup>図 2-23 劣化年数と樹脂塗膜厚さに対する中性化抵抗の関係<sup>11)</sup>



図 2-24 二酸化炭素透過度の試験概要図<sup>12)</sup>図 2-25 CO<sub>2</sub>透過度と中性化率の関係<sup>12)</sup>図 2-26 促進耐候性試験後の CO<sub>2</sub>透過度と中性化率の関係<sup>12)</sup>

## 2.4 塗膜の劣化手法に関する検討

1 章でも述べたように、一般的に用いられている紫外線を用いた塗膜の劣化手法では試験体の大きさから試験体数の著しい減少や試験体に紫外線を均一に当てることの難しいため、比較的試験体全体に均一に劣化をさせやすい薬品を用いた劣化手法についての既往研究をまとめた。

まず、一般的な試験方法として紫外線を照射する方法があり、キセノンウェザーやサンシャインウェザーメーターを用いる方法がある。また、塗膜の劣化を確認する方法として光沢度試験や色差試験などがあげられている。ここで、一例として河野ら<sup>14)</sup>が行ったサンシャインウェザーを用いて塗膜の劣化を行った際の光沢度試験の結果及び色差試験の結果を図 2-27 図 2-28 に示す。なお、横軸の照射時間とはサンシャインウェザーによる紫外線の照射時間を表している。その結果、照射時間の経過に伴う光沢度の減少及び色差の増加が確認されたことから、塗膜が劣化していることがうかがえる。

また、高分子の分野においても塗膜の促進劣化手法の検討が行われており、舘<sup>15)</sup>は紫外線光源としてキセノンランプを採用しその中に過酸化水素水が入ったスプレーノズルを取り付けて紫外線照射を行う図 2-29 のような試験機を開発しそれを用いて試験を行った。その試験機を用いて 176 時間促進耐候性試験を行った結果と舘<sup>15)</sup>が屋外暴露試験を行った結果の比較を図 2-30 図 2-31 に示す。その結果、屋外暴露試験 2 年後の光沢保持率及び色差と実験時間 176 時間後の光沢保持率及び色差に相関関係があったことから、舘<sup>15)</sup>が開発した試験機によって試験を行うと屋外暴露試験で 2 年を要する塗膜の耐候性評価を 1 週間で行ったことになる。これは従来のキセノンウェザー及びサンシャインウェザーメーターの 10 数倍の速度になる。

森ら<sup>16)</sup>は促進劣化を高速化できる劣化処理方法について検討するため、酸化剤水溶液中で 50 時間紫外線の照射を行った。酸化剤水溶液は 3.0wt%過酸化水素水、5.0wt%次亜塩素酸ナトリウム及び 1.0wt%ペルキオソ炭酸ナトリウム水溶液を採用した。過酸化水素水を用いた場合の光沢保持率の推移を図 2-32、次亜塩素酸ナトリウム及びペルキオソ炭酸ナトリウム水溶液を図 2-33 に示す。この結果から、3 種類いずれを用いても程度に差はあるものの、光沢度が低下したことが確認された。特に次亜塩素酸ナトリウムを用いた場合、短期間で大きく光沢度が低下していることが確認された。

山田ら<sup>17)</sup>は紫外線による劣化と物理的劣化（加熱及び冷却）を組み合わせることによって塗膜に劣化促進に関する検討を行った。山田ら<sup>17)</sup>は劣化手法として①から④を 1 サイクルとし、合計 10 サイクル実施した。

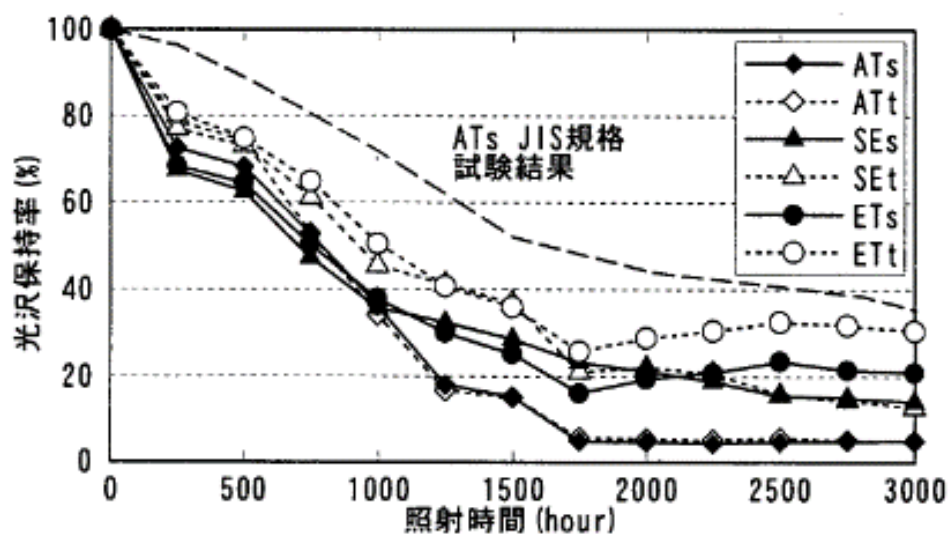
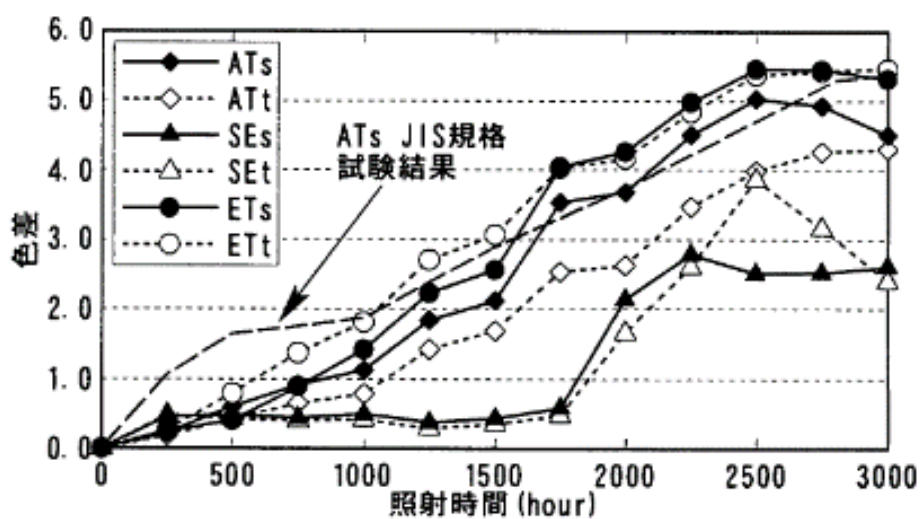
- ①キセノンランプによる促進耐候性試験 72 時間
- ②水中に 18 時間浸漬
- ③-20℃で 3 時間静置
- ④50℃で 3 時間静置

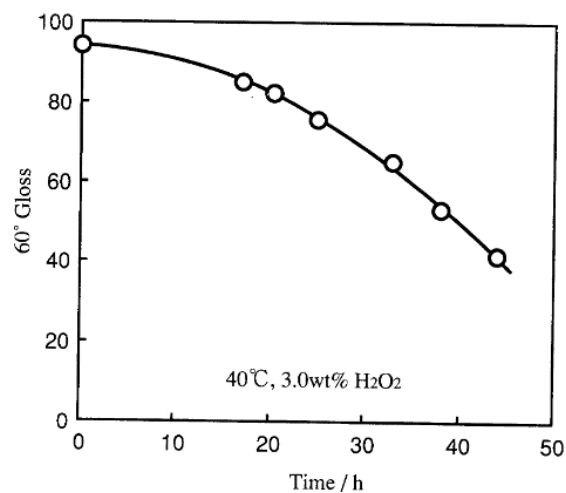
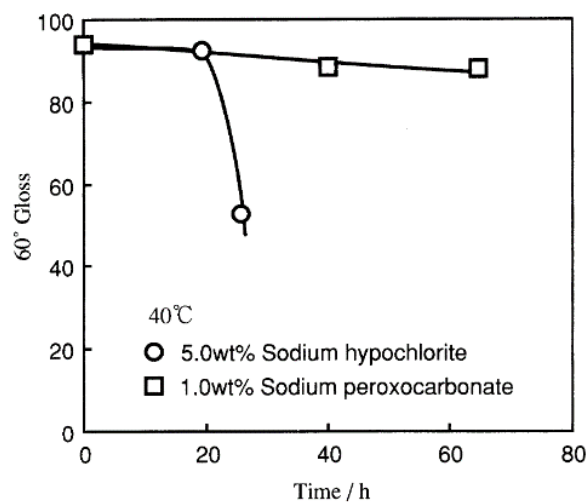
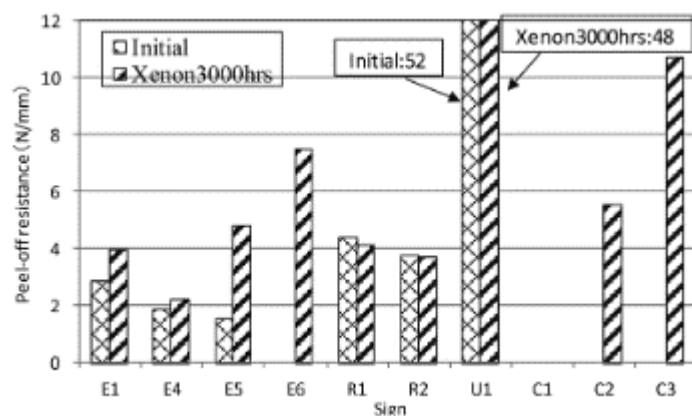
ここで、初期の試験体と上記のサイクルを行った試験体の塗膜の剥離現象を考慮したみ

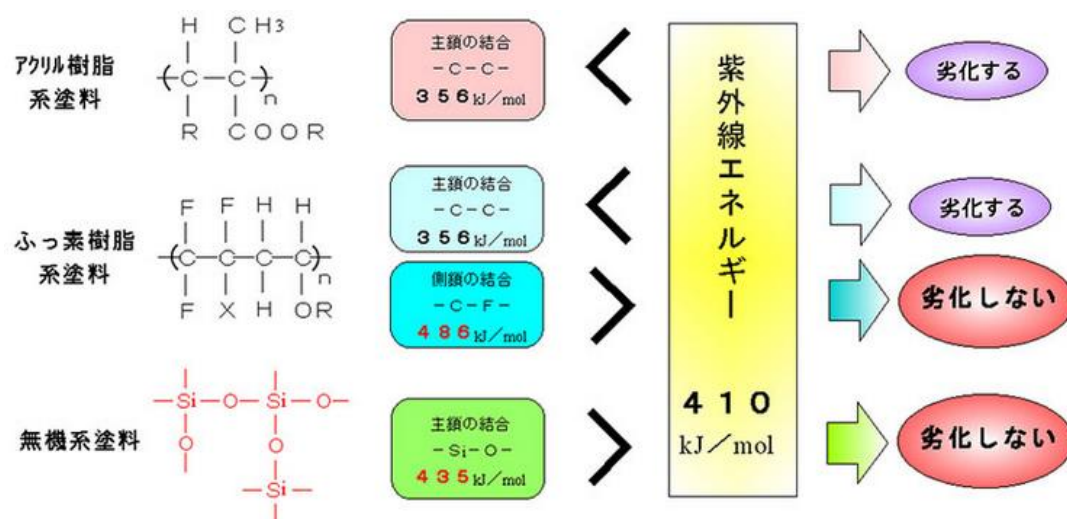
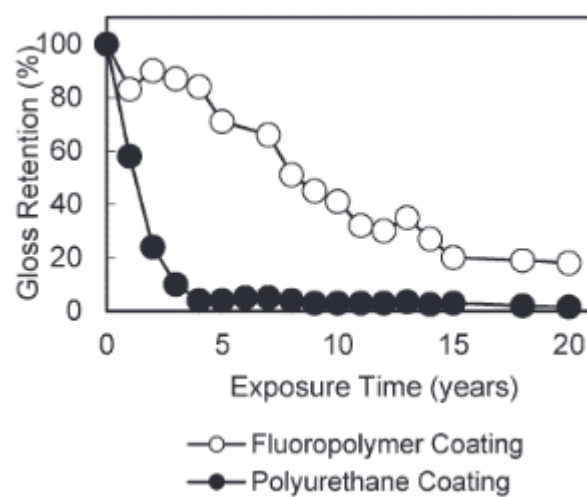
かけの剥離抵抗性の比較を図 2-34 に示す。その結果、紫外線照射と加熱及び冷却を組み合わせることで、一部塗膜に劣化が生じたことが確認された。

上記では紫外線劣化を用いて塗膜の促進劣化を行っている既往研究について紹介してきた。ここで、紫外線によって塗膜が劣化するメカニズムについて紹介する。紫外線劣化が生じる理由は塗膜の樹脂の炭素結合が紫外線エネルギーによって破壊されてしまうことがある。塗装の中にも紫外線劣化が生じるとされているものと生じないとされているものがあり、図 2-35<sup>18)</sup>に示すように、紫外線エネルギーの大きさである 410kJ/mol より小さい炭素結合をもつアルカリ樹脂系の塗装は紫外線によって劣化が生じる。一方で、フッ素系樹脂の塗装を用いると紫外線エネルギーよりも結合エネルギーが大きいため塗膜に劣化が生じないとされている。なお、上記の既往研究<sup>11)-17)</sup>で用いられている塗料はほとんどがアクリル樹脂系の塗装を採用しているため、劣化が生じているとも考えられる。また、図 2-36<sup>19)</sup>に示すように、フッ素系の塗膜は年数が経過しても他の塗装に比べて劣化生じにくいことが確認されている。

ここで、塗膜の紫外線劣化は炭素結合の破壊によって生じるため炭素結合の破壊に着目して調査を行った。高橋ら<sup>20)</sup>はイソブチル基の持つ  $\beta$ -水素によって炭素結合によって結合されていた一つの物質がイソブチル錯体と  $\beta$ -水素脱離反応によって生成する Lu-H 錯体及びイソブテンとの間の平衡混合物になることを示している。その結果から、塗膜の炭素結合においてもイソブチル基がはいっている溶液を用いれば、塗膜の劣化を引き起こせると推察した。

図 2-27 光沢保持率の推移<sup>11)</sup>図 2-28 色差の推移<sup>11)</sup>

図 2-32 過酸化水素水を用いた際の光沢保持率の推移<sup>16)</sup>図 2-33 次亜塩素酸ナトリウム及びペルキオソ炭酸ナトリウムを用いた際の光沢保持率の推移<sup>16)</sup>図 2-34 初期の試験体とサイクルを行った試験体みかけの剥離抵抗性の比較<sup>17)</sup>

図 2-35 紫外線による塗膜の劣化のメカニズム<sup>18)</sup>図 2-36 ポリウレタン系樹脂とフッ素系樹脂の塗装の光沢保持率の推移<sup>19)</sup>

## 2.5 参考文献

- 1) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: ライフサイクルを通じたコンクリートの CO<sub>2</sub> 固定量算定に関する研究, *Cement Science Concrete Technology*, Vol.74, pp.333-340
- 2) Lagerblad, B.: Carbon dioxide uptake during concrete lifecycle - State of the art, CBI Report 2, pp. 9-11, 2005
- 3) 馬場明生, 千歩修: 各種の表面層を持つコンクリートの中性化深さ推定方法に関する考察, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 4) 河野政典, 梶田佳寛, 起橋考徳, 中村祐介: 仕上塗材の経年劣化を考慮した拡散理論に基づく中性化進行予測に関する研究, *セメント・コンクリート論文集*, No.62, pp.318-325
- 5) 庭野究, 今本啓一, 陣内浩, 清原千鶴: 非破壊透気試験を用いた仕上げ材を有するコンクリートの中性化速度の評価方法に関する研究, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.81, No.722, pp.655-663, 2016.4
- 6) 唐沢智之, 河野政典, 梶田佳寛, 李榮蘭: ダブルチャンバー法による仕上塗材の透気係数と中性化進行予測に関する研究, *セメント・コンクリート論文集*, No.63, 2009
- 7) 建築用仕上塗材の中性化抑制効果に関する研究 長谷川 拓哉, 千歩 修, 大久保 孝昭, 古賀 純子 *日本建築学会構造系論文集* Vol.609, pp.23-30, 2006.11
- 8) 加藤猛, 今本啓一, 清原千鶴, 山崎順二: 透気試験複合法による仕上材付きコンクリートの中性化速度の評価手法に関する実験的検討, *日本コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.1, 2018
- 9) 野中英, 湯浅昇: 簡易透気試験による構造体コンクリートの中性化抵抗性の評価, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.80, No.711, pp.727-734, 2015.5
- 10) 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*, Vol.78, No.691, pp.1539-1544, 2013.9
- 11) 河野政典, 梶田佳寛, 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
- 12) 濱崎仁, 本橋健司, 越中谷光太郎, 則竹慎也, 松沢晃一, 土屋直子: 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*, Vol.87, No.797, pp. 600-609, 2022.7
- 13) 陣内浩, 梶田佳寛, 棚野博之, 濱崎仁, 今本啓一, 小林利充, 松下哲郎, 吉田泰: 仕上材によるコンクリートの中性化抑制効果に関する基礎的検討 その 2 促進中性化試験, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, A-1, 材料施工, pp.543-544, 2011.8
- 14) 曾我裕希, 濱崎仁, 井出朋孝, 鹿毛忠継, 松沢晃一, 中田清史: 各種仕上材を施したコンクリートの 10 年間の暴露試験結果, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, pp.151-152, 2020.9
- 15) 舘和幸: 過酸化水素水を用いた塗膜の耐候性試験技術, *色材協会誌*, Vol.77, No.5, pp.213-

220, 2004

- 16) 森寛爾, 岡本一夫, 舘和幸 : 酸化剤水溶液中での紫外線照射による酸化チタン含有塗膜の劣化, 色材協会誌, Vol.75, No.5, pp.209-213, 2002
- 17) 山田卓司, 佃洋一, 山本貴士, 国枝稔, 宮川豊章 : 表面被覆工法の付着劣化試験の適用に関する研究, 日本材料学会, Vol.62, No.8, pp.524-530, 2013.8
- 18) <https://www.kanemaru-tosou.jp/deterioration/choking-mechanism/> チョーキングのメカニズム | 金丸塗装
- 19) Matsumoto, T. , Miyashita, T. , Tanabe, H. : Environ-mentally friendly protective coating system using water-borne fluoropolymer topcoat, NACE EAP Conference, 2016
- 20) 高橋保, 菅野研一郎 : 遷移元素を用いた炭素-炭素結合切断とその応用, 有機合成化学協会誌, Vol.61, No.10, pp.938-948, 2003



## 第 3 章 塗膜の促進劣化手法の提案

### 3.1 はじめに

本章では、透気試験を用いて中性化の進行を予測するにあたって、塗装が透気試験の結果に及ぼす影響についての検討を行うとともに、1 章でも述べたように一般的な塗装の劣化手法では試験体及び光源の大きさから塗装に紫外線を均一に当てることが困難であることから塗装の劣化手法についても事前に検討を行った。本章では、これらの検討の結果及び考察をまとめる。

### 3.2 劣化した塗装を施したコンクリートの透気係数の評価に向けた事前検討

塗装を劣化させる方法として、一般的に塗材の耐候性試験で用いられる図 3-1 の示すようなキセノンウェザーメーター<sup>2)</sup>やサンシャインウェザーメーター<sup>3)</sup>など紫外線を一定時間照射させる方法が用いられている。しかし、これらの試験機のなかにコンクリートの試験体を設置しようとした場合、試験体数が限定されてしまう。また、試験体の大きさ及び光源の大きさからコンクリートに塗布された塗膜全体に紫外線を均一に当てることも困難である。そのため、本研究の実施にあたり、紫外線を用いない塗装の促進劣化手法が必要とされたが、ほとんど知見がないため、紫外線を用いずに塗膜を劣化させる方法についても別途検討する必要がある。

そこで本研究ではまず、スレート板に施した塗材に対して紫外線を用いずに促進劣化について、塗装種類及び劣化因子をパラメータとした図 3-2 のような試験体を作製し、光沢度試験によって各種塗装の劣化を評価した。

塗装の劣化手法に関しては既往研究から得られた試験結果及びメカニズムより紫外線を用いずに塗装が劣化すると考えられる劣化因子を 4 種類選定し、塗装は表 3-1 に示す 6 種類を用いた。劣化因子には薬品による劣化方法として、5.0wt%次亜塩素酸ナトリウム水溶液、3.0wt%過酸化水素水、フタル酸ジイソブチルを用い、物理的な劣化方法として、70℃定常での加熱する方法を用いた。なお、フタル酸ジイソブチルは炭素結合の破壊による劣化が起きるとされていること<sup>20)</sup>から 2 章で述べた紫外線による劣化のメカニズムと似ていると考え、また、次亜塩素酸ナトリウム、過酸化水素水は酸化剤として塗装を劣化させる役割を

果たすとされていること<sup>16), 15)</sup>, 加熱による劣化に関しては山田ら<sup>17)</sup>の実験によって加熱＋紫外線の組み合わせた場合において光沢度の低下がみられたことから, それぞれ選定している。



<https://www.sugatest.co.jp/wordpress/wpcontent/uploads/2019/02/X75.jpg>

a) キセノンウェザーメーター



<https://www.sugatest.co.jp/productlist/s80-3/>

b) サンシャインウェザーメーター

図 3-1 一般的に用いられている劣化手法の例



図 3-2 光沢度試験 試験体

### 3.3 実験概要

150\*70mm のスレート板に表 3-2 に示す 6 種類の塗装を施し、塗材の乾燥後に上述の 4 種類の促進劣化方法を与えた。また、使用した製品を表 3-2 に示す。促進劣化の各サイクルにおいて、JIS Z 8741 に準拠して光沢度試験を行った。光沢度試験は図 3-3 に示す Gloss Meter VG2000 を用いて行い、入射角は 85 度としている。劣化手法は薬品による劣化と物理的劣化を採用し、前節で提案した 5.0wt% 次亜塩素酸ナトリウム水溶液、3.0wt% 過酸化水素水、フタル酸ジイソブチルによる薬品の塗布と 70℃ 定常での加熱する方法を採用した。また、薬品の塗布に関して、濃度や塗布量に応じて促進劣化の効果が異なる可能性が考えられるが、本研究では試行的に、刷毛を用いて 95g/m<sup>2</sup> 塗布する手法を採用した。薬品の塗布は 4 サイクル行い、薬品塗布後、約 1 日間乾燥させた後、光沢度の測定を行った。なお、薬品の塗布による光沢度の測定は 1, 3, 7, 28 日に行い、測定日から次の測定日までを 1 サイクルとする。



<https://aucfree.com/items/g327387795>

図 3-3 光沢度試験機

表 3-1 本研究において使用した塗材

記号	塗装種類	所要量 (kg/m <sup>2</sup> )			
		下塗材	主材 1	主材 2	上塗材
A	防水性薄塗材 E	0.12	0.83	0.67	-
B	複層塗材 E	0.08	0.93	0.83	0.29
C	防水形複層塗材 E	0.05	2.98	1.05	0.19
D	マスチック A	0.07	1.66	-	-
E	つや有り合成樹脂エマルション ペイント	0.14	-	-	0.27
F	可とう系改修塗材 E	0.05	1.03	-	0.30

表 3-2 本研究において使用した塗材

記号	塗装種類	製品名	
A	防水性薄塗材 E	下塗材	ダイヤワイドシーラー
		主材	ダイヤニューデポール R
B	複層塗材 E	下塗材	水性カチオンシーラー透明
		主材	タイルラック EMA-S ベース 100K
		上塗材	水性トップつや一番
C	防水形複層塗材 E	下塗材	水性ミラクシーラーエコクリヤー
		主材	レナエクセレント主材
		上塗材	SK 水性 EL コート
D	マスチック A	下塗材	キクスイプライマースーパーE
		主材	キクスイマスチック A
E	つや有り合成樹脂エマルション ペイント	下塗材	サミブラ
		上塗材	AEP クリーン 70G
F	可とう系改修塗材 E	下塗材	水性ミラクシーラーエコクリヤー
		主材	レナエクセレント A ローラー用主材
		上塗材	SK 水性 EL コート

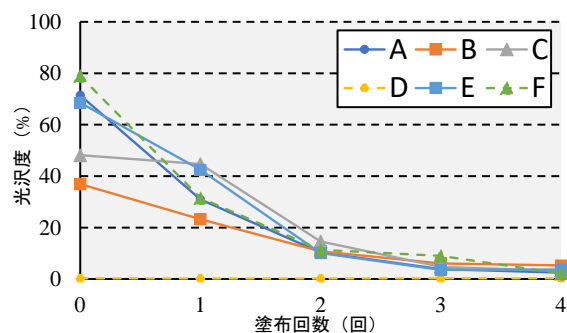
### 3.4 光沢度試験結果

各種促進劣化を施した試験体の光沢度試験の結果を図 3-4 に示す。なお、加熱による劣化に関しては加熱を開始してからの経過日数と光沢度の関係をプロットしている。

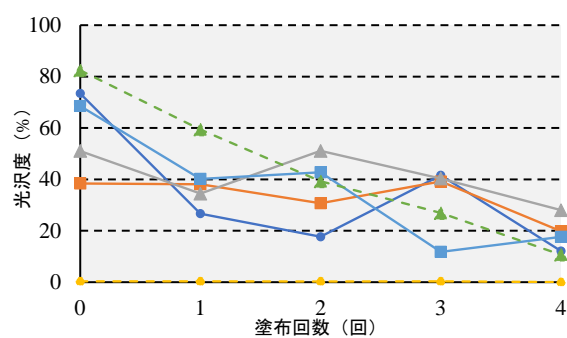
図 3-4 (d) より、加熱を行うだけでは、塗装の光沢度にほとんど変化が生じないことが分かる。また、薬品による劣化に関しては、5.0wt%次亜塩素酸ナトリウムを塗布した場合、すべての塗装においてサイクルを重ねるたびに光沢度が低下していることが分かる。一方、3.0wt%過酸化水素水は、塗装 E（つや有り合成樹脂エマルジョンペイント）、F（可とう系改修塗材 E）のように光沢度が低下している塗装はあるものの、ほとんど光沢度に変化が生じていない塗装もある。理由として、次亜塩素酸ナトリウムは酸化剤としての役割だけでなく、実際に、Y シャツの袖や襟に塩素系漂白剤を用いると襟や袖が黄変する現象が起きるように、塗装に含まれている樹脂と塩素の反応することで黄変したことによって、塗膜表面の光沢度が低下した可能性が考えられる。また、過酸化水素水には樹脂を黄変させる効果があると考えられている塩素は含まれていないため、酸化剤同士においても光沢度の変化量にこのような差が生じた可能性が考えられる。

また、塗装 B（複層塗材 E）にフタル酸ジイソブチルを塗布する際に生じた塗布によって光沢度が上昇する現象については、フタル酸ジイソブチルの可塑剤としての効果を示したときに生じる艶によって発生したためと推察される。

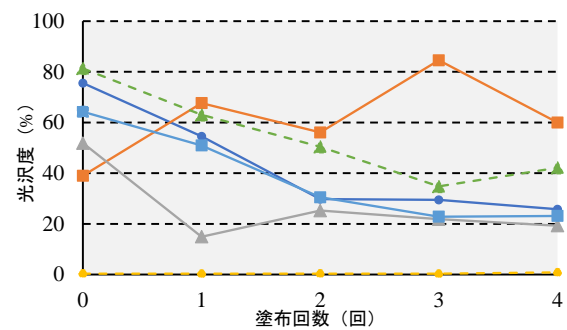
これらの結果から、加熱による劣化は塗装の劣化に大きく影響しないと考え、後述する透気係数の測定を実施する際には、この実験で使用した薬品 3 種類を劣化因子として用いることとした。



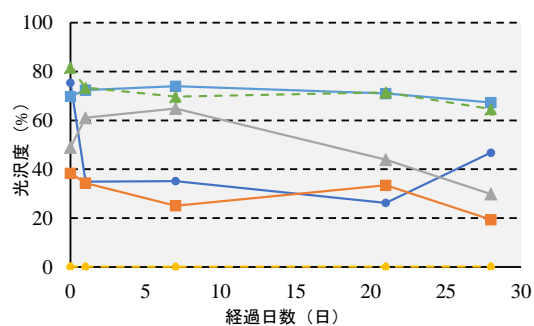
a) 次亜塩素酸ナトリウム



b) 過酸化水素水



c) フタル酸ジイソブチル



d) 加熱 70°C定常

図 3-4 劣化因子ごとの塗布回数と光沢度の関係

### 3.5 参考文献

- 1) 庭野究, 今本啓一, 陣内浩, 清原千鶴: 非破壊透気試験を用いた仕上げ材を有するコンクリートの中性化速度の評価方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.722, pp.655-663, 2016.4
- 2) 奥田章子, 斎藤俊, 後藤善光: フッ素樹脂系粉体塗装の実用化に関する研究, 日本建築技術報告集, Vol.27, No.65, pp.42-47, 2021.2
- 3) 植松俊幸, 小林利充, 神代泰道: 仕上げ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, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 2020
- 4) 高橋保, 菅野研一郎: 遷移元素を用いた炭素-炭素結合切断とその応用, 有機合成化学協会誌, Vol.61, No.10, pp.938-948, 2003
- 5) 森寛爾, 岡本一夫, 舘和幸: 酸化剤水溶液中での紫外線照射による酸化チタン含有塗膜の劣化, 色材協会誌, Vol.75, No.5, pp.209-213, 2002
- 6) 舘和幸: 過酸化水素水を用いた塗膜の耐候性試験技術, 色材協会誌, Vol.77, No.5, pp.213-220, 2004
- 7) 山田卓司, 佃洋一, 山本貴士, 国枝稔, 宮川豊章: 表面被覆工法の付着劣化試験の適用に関する研究, 日本材料学会, Vol.62, No.8, pp.524-530, 2013.8

## 第4章 塗装及びその劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

### 4.1 はじめに

本章では、コンクリートの透気係数に及ぼす塗装の種類及び塗装の劣化の影響について検討するため、塗装前、塗装の各工程後、塗装完了後、塗装の劣化処理後にそれぞれ透気試験を行うことによって各段階におけるみかけの透気係数を取得した。

### 4.2 透気試験概要

本研究では、透気試験の方法として、ダブルチャンバー法（以降、DC法と称す。）を用いた。2章でも同様のことを述べたが、DC法の概要を図4-1に示す。測定器の機構は測定部である内部チャンバーと圧力の調整用である外部チャンバーから成り立っており、透気係数 $K_t$ はチャンバー内の圧力を小さくし、減圧終了後から規定の圧力に達するまでにかかる時間を用いて算出される。同様の手法を用いて、測定の評価範囲の指標となっている測定深さ $L$ が算出される。なお、DC法によって得られる透気係数は、コンクリートが塗装を有する場合、塗装を含めた透気係数であると考えられている<sup>1)</sup>。

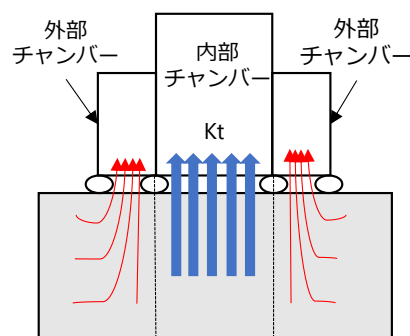


図 4-1 DC 法概要図



### 4.3 コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響に関する検討

コンクリートの含水率が大きいと透気係数は小さくなり、塗装がはがれやすくなるなどの透気係数を測定するにあたっての不備が生じる可能性が考えられる。よって、塗装を施す日程を決定するため、コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響に関する検討を行った。

#### 4.3.1 実験概要

打設の3日後に脱型を行い、脱型後に20℃・RH60%で養生を行った。乾燥材齢3, 7, 14, 21, 28日に質量及び透気係数の測定を行うことによって、コンクリートの乾燥状態が透気係数に及ぼす影響について検討した。なお、試験体は150\*150\*150\*mmの角柱のコンクリートとし、比較的表面が平滑で、透気試験を行いやすい底面を試験面とした。使用材料を表4-1、調合条件を表4-2に示す。

表 4-1 使用材料

材料名	種類及び物性値
セメント	C:普通ポルトランドセメント (密度=3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S1:広島県福山市鋼管町産スラグ骨材 (密度=2.76g/cm <sup>3</sup> )
	S2:広島県東広島市黒瀬産砕砂 (密度=2.57g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	G1:広島県呉市広町産碎石 (密度=2.65g/cm <sup>3</sup> )
	G2:広島県呉市広町産碎石 (密度=2.65g/cm <sup>3</sup> )
	G3:大分県津久見産石灰石碎石 (密度=2.71g/cm <sup>3</sup> )
混和剤	AE 減水材 (リグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系化合物)

表 4-2 調合条件

単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
水	セメント	細骨材		粗骨材			混和剤
W	C	S1	S2	G1	G2	G3	A
191	360	348	483	313	132	455	3.60

### 4.3.2 実験結果

測定した各試験体の材齢と質量変化量及び透気係数の関係を図 4-2 に示す。その結果、3 つの試験体において乾燥に伴い、質量が減少しているとともに、透気係数が増大していることが分かった。また、試験体③の透気係数が試験体①，②に対して大きくなっていることが確認できるが、試験体③に目立った外傷などの差異は確認することが出来なかったため、内部空隙量が他の試験体よりも多くなっている可能性が考えられる。

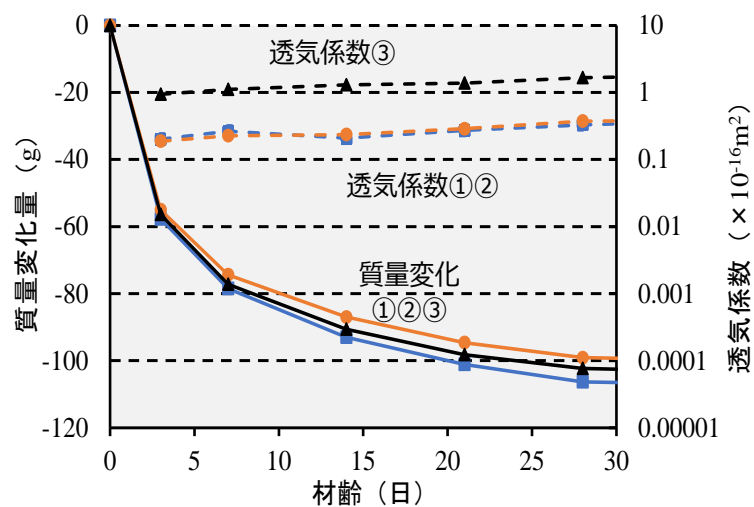


図 4-2 材齢と質量変化量及び透気係数の関係

## 4.4 塗装及び塗膜の劣化が透気係数に及ぼす影響

### 4.4.1 実験概要

本研究で使用した塗材は表 3-1 と同様である。また、コンクリートの調合条件及び使用材料においても表 4-21，表 4-12 と同様である。標準養生材齢 28 日における圧縮強度は  $27.8 \text{N/mm}^2$ ，現場封緘養生材齢 28 日における圧縮強度は  $23.1 \text{N/mm}^2$  であった。

試験体は  $150 \times 150 \times 150 \text{mm}$  の角柱コンクリートとし、前節と同様に、底面を試験面とした。コンクリートの養生は打設後 3 日で脱型し、脱型後の 28 日間を  $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{RH}$  の気中養生とし、その後、各種塗装を施した。

#### 4.4.2 塗装がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

一般的に塗装は一つの層のみで構成されているわけではなく、何層もの膜によって構成されており、それが一層ずつ劣化していくことによって塗装全体の劣化が進行すると考えたため、塗装の各工程での透気係数も取得した。

本実験では塗装ごとに 10 体の試験体の透気係数を取得し、考察では 10 体の透気係数の平均値を用いている。本実験の 10 体の間の透気係数のばらつきを図 4-3 の箱ひげ図で示す。この結果から、塗装が施されていない状態であっても透気係数にばらつきが生じており、見かけの透気係数においてもコンクリートの状態に左右されている可能性が考えられる。

塗装種類、塗装工程ごとの透気係数の推移を図 4-4 に示す。その結果、すべての試験体において下塗りの段階では透気係数の変化が示されなかった。また、主塗りの段階に入ると大きく透気係数が減少する傾向が得られた。理由として、下塗り材には水性のシーラーが使われており、コンクリートに一部浸透しているうえ、塗布量も非常に少なくコンクリートの空隙をふさぐほどの量ではないため透気係数にほとんど影響がなかったと考えられる。また、主塗り以降に用いられる塗材は下塗り材に比べて塗布量が多く、膜厚も大きいため、透気試験を行ってもコンクリートにほぼ圧力変化が生じることがなく、塗膜のみの透気係数を測定している状態と近くなっている可能性が考えられる。

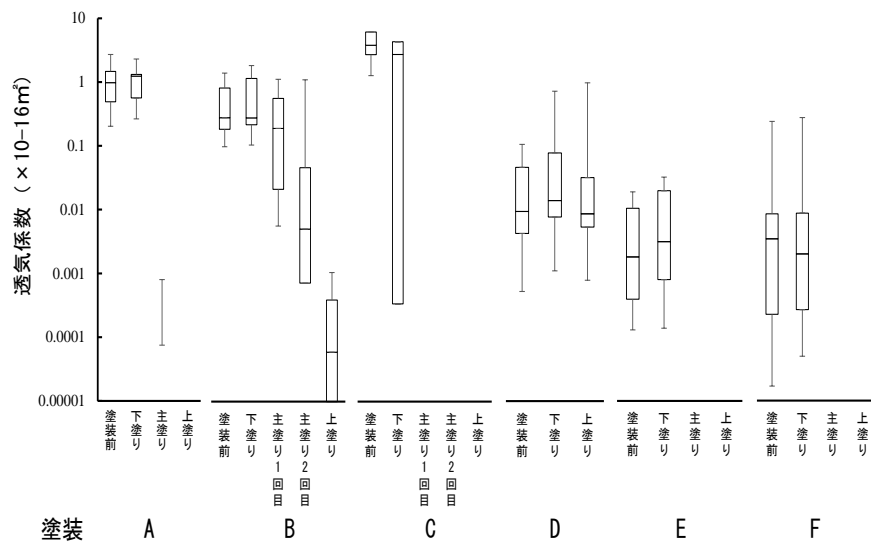


図 4-3 塗装種類及び工程ごとの箱ひげ図

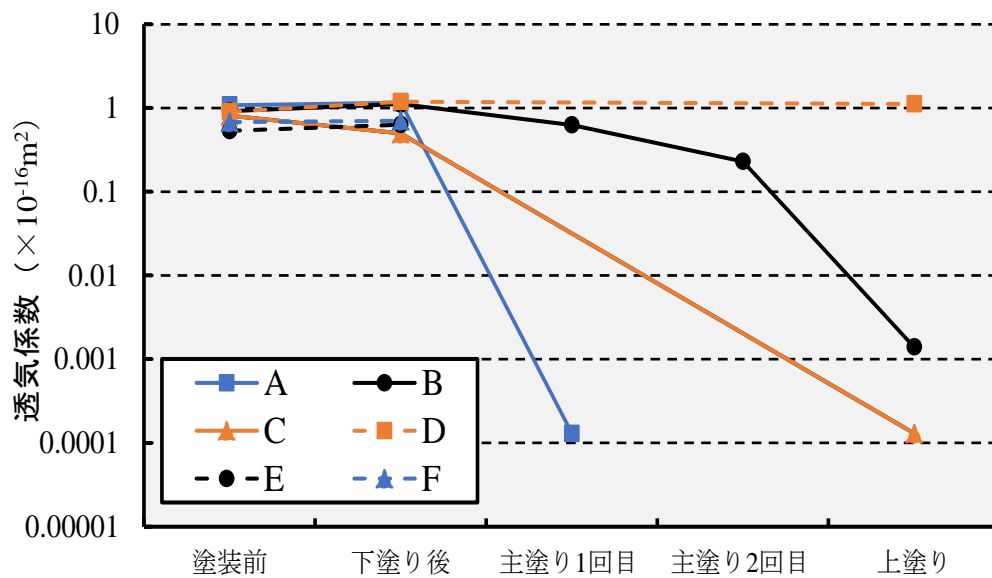


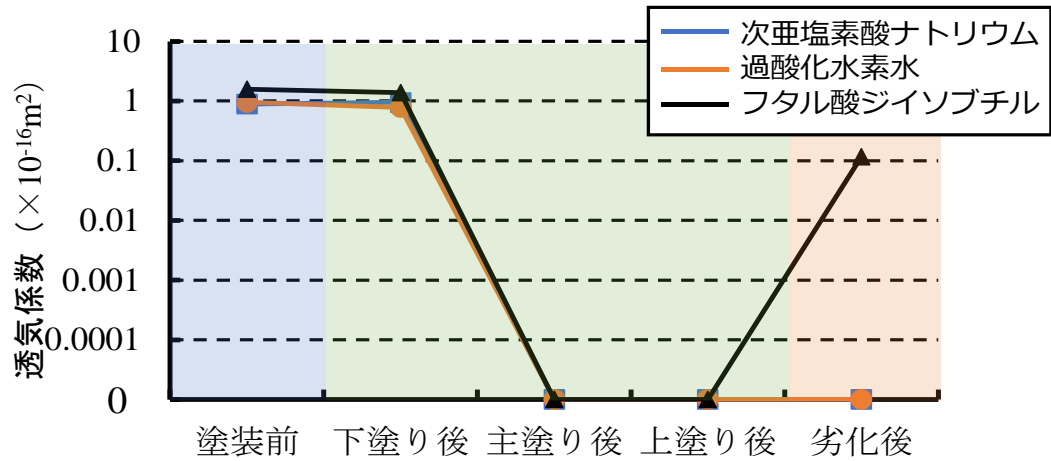
図 4-4 塗装種類及び工程ごとの透気係数

#### 4.4.3 塗装の劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

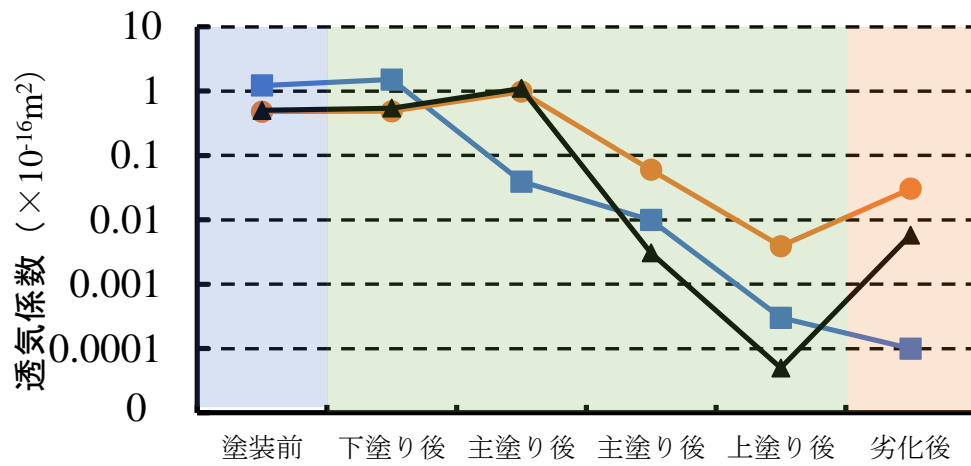
3.4 節の光沢度試験の結果から、加熱による劣化は塗装の劣化に影響を及ぼさないと考え、光沢度試験で使用した薬品 3 種類を透気試験に使用する劣化因子として用いた。また、測定は塗材が十分に乾燥した後に行い、薬品による劣化については刷毛を用いて行うものとし、塗布量は光沢度試験において試行的に行った数量を採用し、すべての薬品において  $95\text{g/m}^2$  とした。

塗装及び劣化因子に同様のものが使用されているコンクリート試験体 2 体にそれぞれ透気試験を行い、劣化前後の透気係数をそれぞれ平均化することで考察を行った。塗装ごとの塗装前、塗装の各工程後、塗装完了後、塗装の劣化処理後の透気係数の推移を図 4-5 に示す。なお、塗装 E（つや有り合成樹脂エマルションペイント）及び塗装 F（可とう系改修塗材 E）にフタル酸ジイソブチルを塗布した試験体で透気係数の測定を行ったところ、2 体のうち 1 体が試験中に透気試験機のチャンバーによる圧力によって塗膜が破れ急激に圧力が上昇し、測定不能となったため、劣化後の試験体に関する考察において、図には残りの試験体から得られた値のみを記載している。

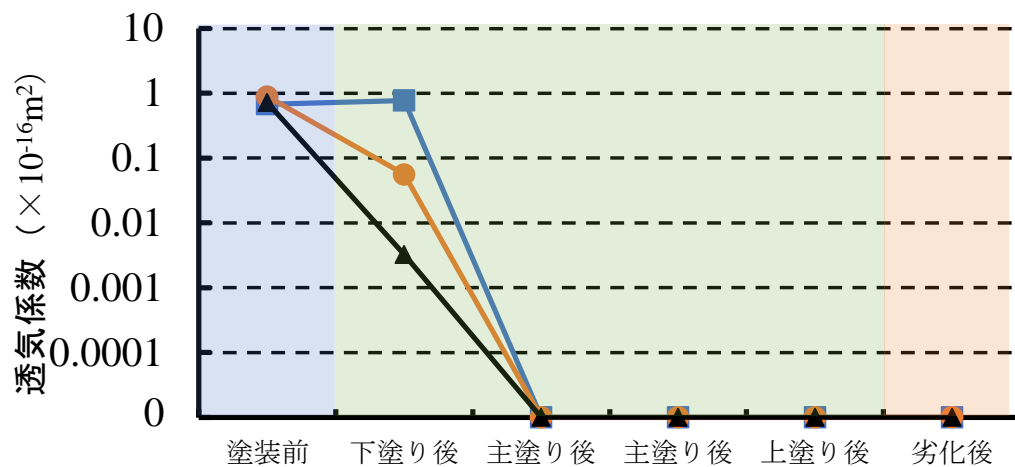
図 4-5 (d) より、塗装 D（マスチック A）においては塗装前と塗装後の透気係数にあまり変化がなかった。また、劣化させた場合においても透気係数の上昇を確認することが出来なかった。理由として、塗装の密度が影響している可能性または、塗装 D（マスチック A）が浸透性の高い塗材であるために、前節で述べた下塗り材のみを塗布した場合に透気係数が減少しなかった理由と同様に近い可能性も考えられる。塗装 C（防水形複層塗材 E）においては、どの劣化因子を用いても透気係数の上昇を確認できなかった。これは、表 3-1 から分かるように他の塗装に比べて塗布量が多くなっていることから、膜厚が大きくなっており、膜厚方向に劣化が行き届かず、塗装下部のコンクリートまで透気試験による圧力変化が及ばなかった可能性が考えられる。その他の塗装においては、特にフタル酸ジイソブチルを劣化因子として用いたものにおいて劣化後の透気係数の上昇を確認することが出来た。理由として、フタル酸ジイソブチルには塗膜を構成している炭素結合を破壊する役割がある<sup>20)</sup>ものの、次亜塩素酸ナトリウム及び過酸化水素水は紫外線を用いた劣化を行う際の酸化剤としての役割<sup>16), 15)</sup>を担っており、それ単体では膜厚方向の劣化には大きく寄与しなかった可能性が考えられる。



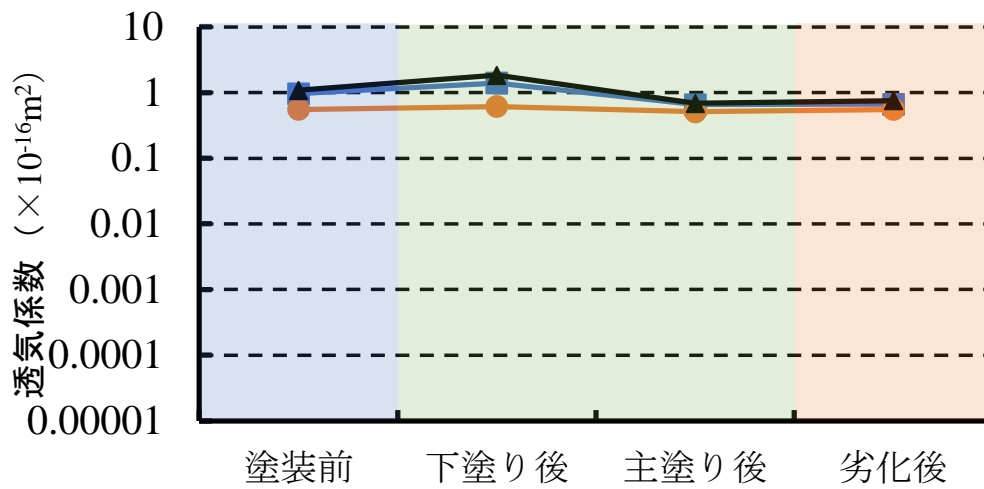
a) 塗装 A (防水形薄塗材 E)



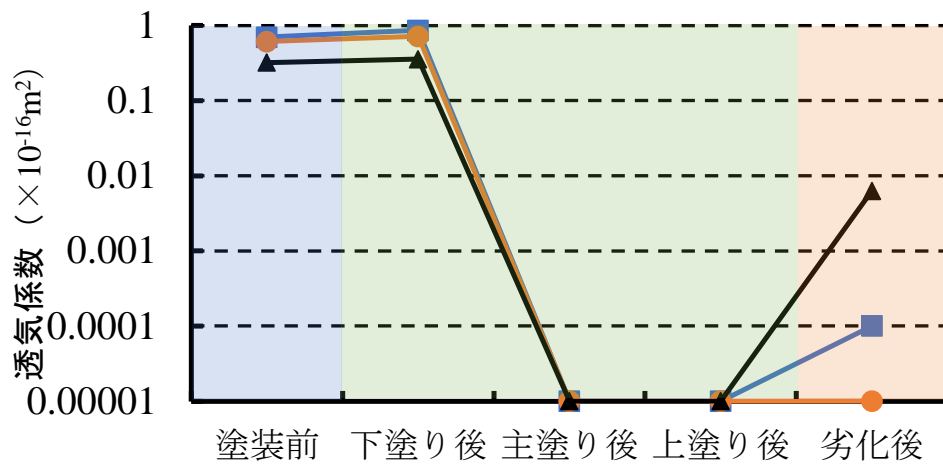
b) 塗装 B (複層塗材 E)



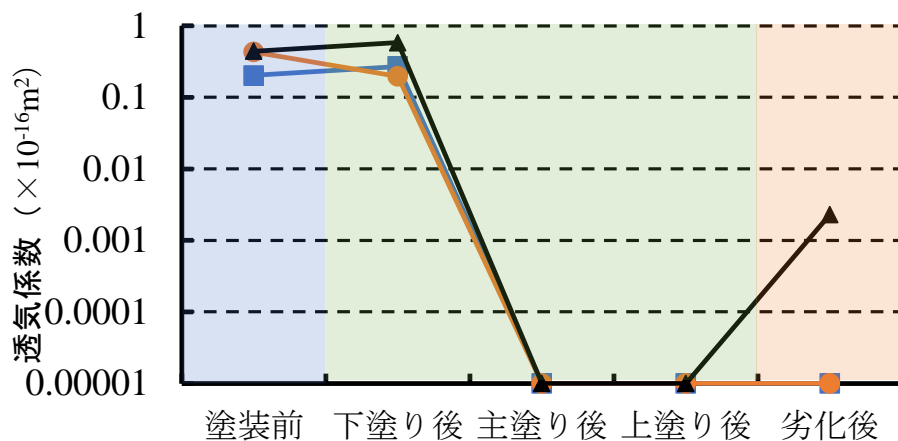
c) 塗装 C (防水形複層塗材 E)



d) 塗装 D (マスチック A)



e) 塗装 E (つやあり合成樹脂エマルジョンペイント)



f) 塗装 F (可とう系改修塗材 E)

図 4-5 各塗装工程及び塗膜の劣化処理後の透気係数の推移

#### 4.4.4 各塗装、劣化因子における劣化進行に関する考察

3 章で行った光沢度試験と透気試験の塗装劣化後の結果を比較することで表層部の劣化及び膜厚方向の劣化に関する考察を行った。光沢度の変化量と透気係数の変化量の関係を表す図を図 4-6 に示す。図 4-6 から光沢度の低下量と透気係数の増加量には高い相関性は確認されなかった。このことは、塗装の種類によって、表層部の劣化と膜厚方向の劣化の進行に時間的な差異があることを示している。

また、塗装の劣化後の様子をマイクロスコープによって 175 倍の縮尺で撮影したもの図 4-7 に示す。なお、今回は A 及び C の塗装を施してフタル酸ジイソブチルを塗布したものを代表して示す。この図から、透気試験において劣化現象が生じた塗装 A (防水形薄塗材 E) が塗られている試験体にのみ部分的に膜がホール状に破れている箇所が見受けられた。図 4-7 から、本研究で使用した薬品による劣化を行うと、塗装が完全に劣化して塗装が剥がれることに近い状態ではなく、塗装の一部が劣化し、塗装の保護の役割が薬品塗布前に比べて損なわれている状態である可能性が考えられる。また、舘<sup>15)</sup>の研究においても図 4-8 に示すように、塗膜が劣化した際の形状は塗膜全体が平均的に劣化しており、塗装が剥がれるような劣化ではないことが確認されている。

さらに、光沢度試験の結果からは塗布回数を増やすほど光沢度が減少する傾向を得られたことから、本研究で行った非破壊透気試験においても、塗布回数を増やすようなサイクルを設けることで塗層の膜厚方向への劣化がより進行すると考え、複数回劣化因子の塗布を行ったうえで透気試験を行った。なお、劣化因子は前節の結果から代表してフタル酸ジイソブチルを用いている。本実験では 2 回目までフタル酸ジイソブチルを塗布することとし、塗装前、塗装後、劣化 1 回目及び劣化 2 回目の透気係数の推移を図 4-9 に示す。

その結果、一部透気係数の上昇は確認されたものの、全体としては透気係数の大きな上昇は見られなかった。この結果から薬品のみを用いて劣化サイクルを組むことは塗装の膜厚方向の劣化にはあまり影響がない可能性が考えられる。

なお、これらの結果は次章の中性化促進試験に用いる劣化因子の種類及び手法の選定の参考として用いる。



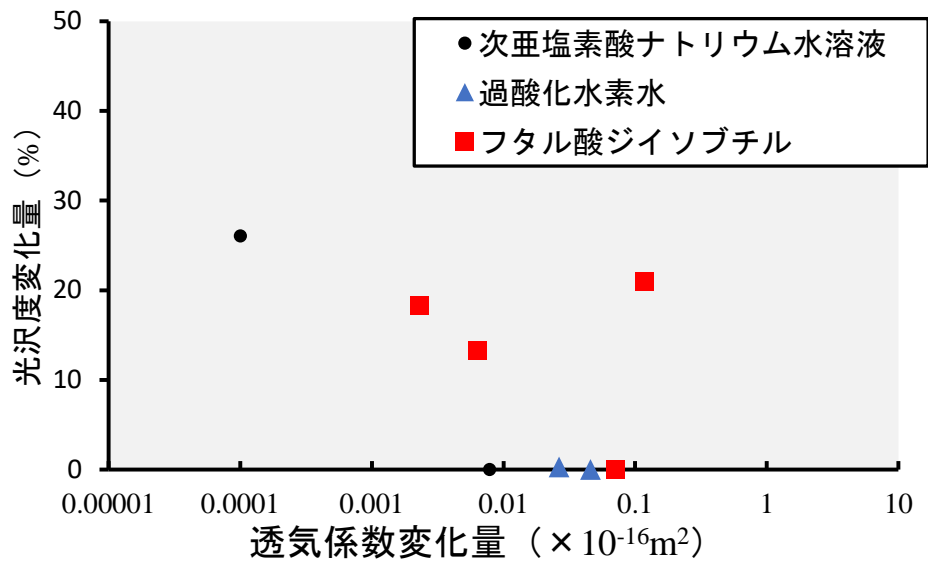
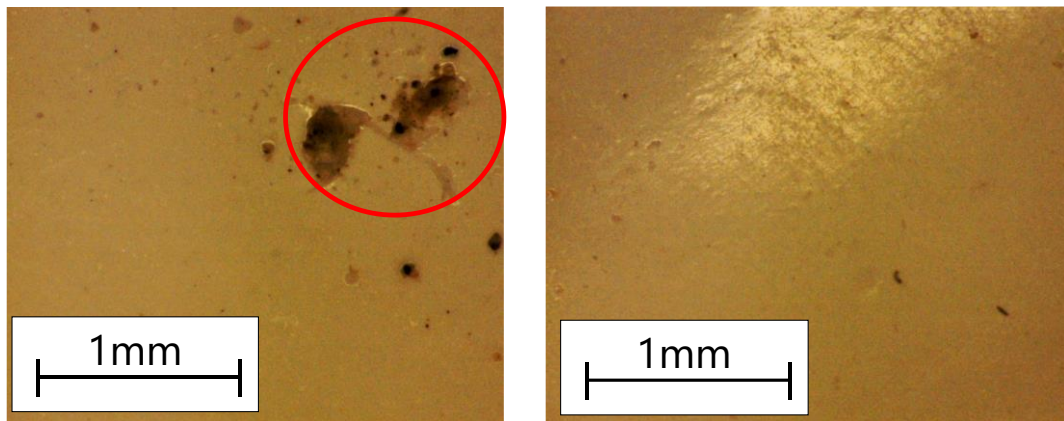


図 4-6 塗装の劣化による光沢度の変化量と透気係数の変化量の関係性



A) A-防水形薄塗材 E

B) B-防水形複層塗材 E

図 4-7 劣化後の塗装の様子（フタル酸ジイソブチル）（175 倍）

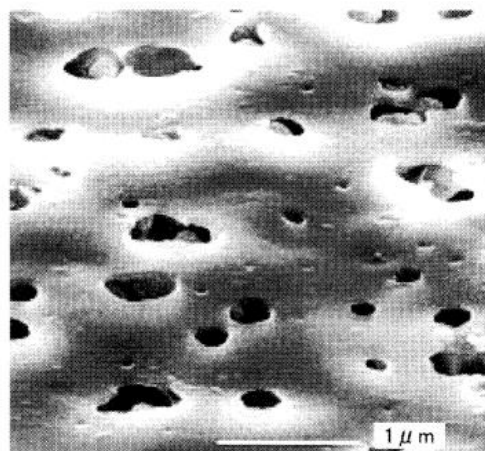
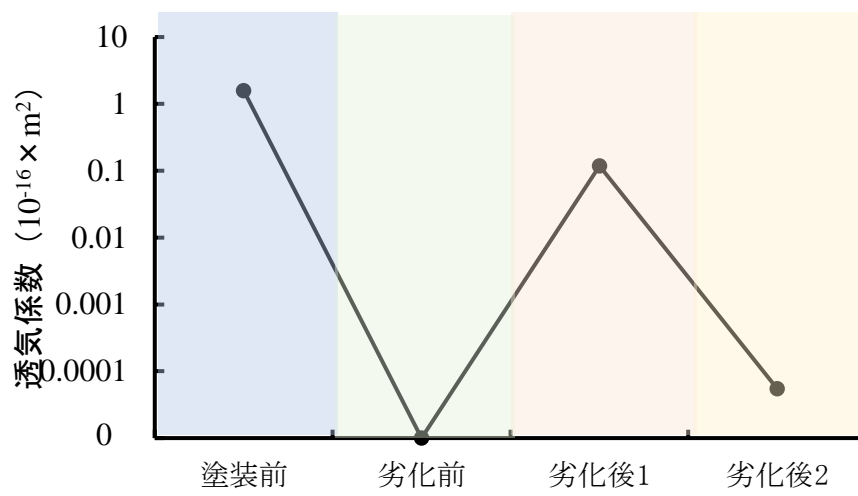
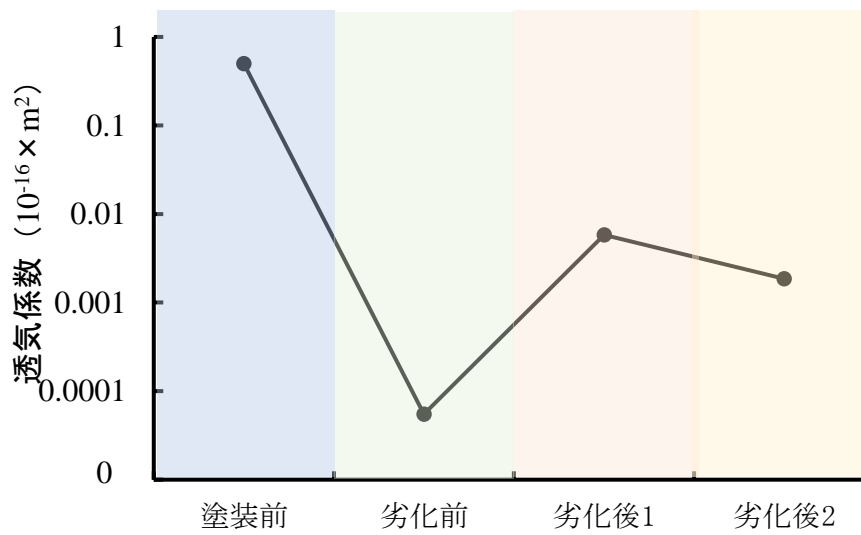


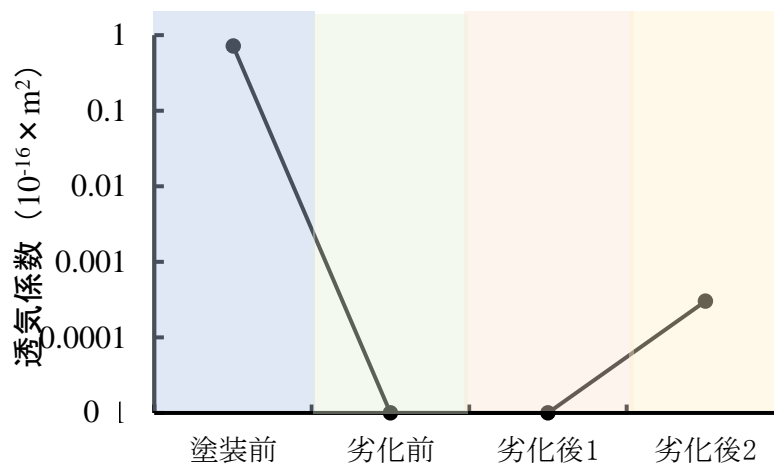
図 4-8 舘<sup>15)</sup>の研究による塗膜に劣化が生じた際の画像



a) 塗装 A (防水形薄塗材 E)



b) 塗装 B (複層塗材 E)



c) 塗装 C (防水形複層塗材 E)

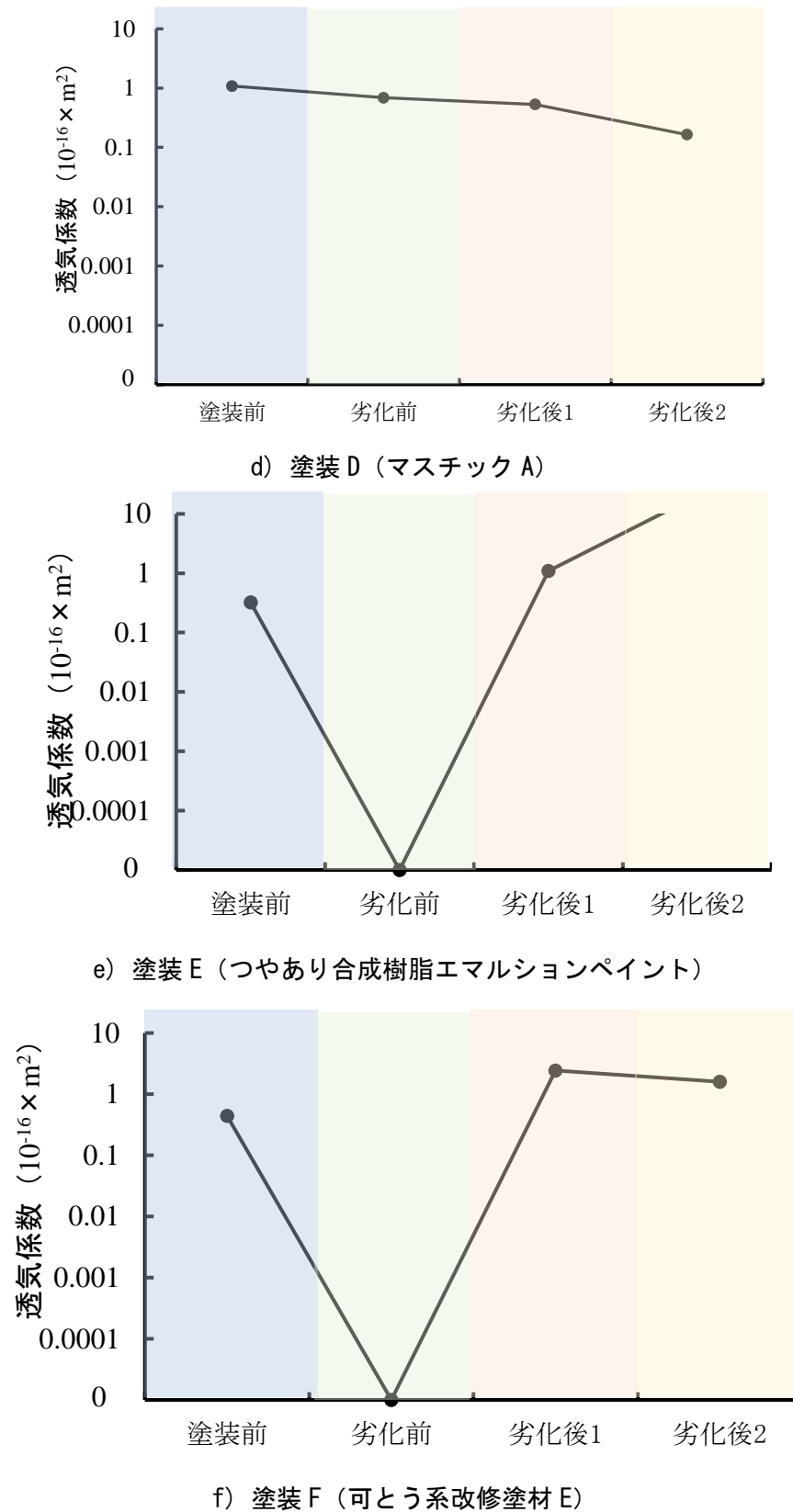


図 4-9 2 回目までフタル酸ジイソブチルを塗布したときの透気係数の推移

#### 4.5 参考文献

- 1) 高橋保, 菅野研一郎: 遷移元素を用いた炭素-炭素結合切断とその応用, 有機合成化学協会誌, Vol.61, No.10, pp.938-948, 2003
- 2) 森寛爾, 岡本一夫, 舘和幸: 酸化剤水溶液中での紫外線照射による酸化チタン含有塗膜の劣化, 色材協会誌, Vol.75, No.5, pp.209-213, 2002
- 3) 舘和幸: 過酸化水素水を用いた塗膜の耐候性試験技術, 色材協会誌, Vol.77, No.5, pp.213-220, 2004

## 第 5 章 透気係数を用いた塗装を有するコンクリートの中性化進行予測

### 5.1 はじめに

前章までで塗装及び塗装の劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響について確認した。よって、本章では、前章までの試験から参考にしたパラメータを用いて中性化促進試験を実施し、実験で得られた中性化促進試験及び透気試験の結果から、透気係数を用いた塗装及び塗装の劣化の影響について考慮した中性化進行の予測に関する検討を行った。

### 5.2 みかけの透気係数を用いた塗膜の透気係数の推定

唐沢ら<sup>1)</sup>は、塗装を有するコンクリートを対象にダブルチャンバー法（DC 法）によって得られたみかけの透気係数から塗膜単体の透気係数の推定を行っている。この推定を行うことで中性化進行予測の推定精度が向上していることから、本研究においても塗装の透気係数の算出を試みた。

2 章でも述べたが、塗装が施されたコンクリートの透気係数を DC 法によって測定した場合、塗膜内部及びコンクリート内部の圧力が定常状態で変化すると仮定したときの塗膜内部及びコンクリート内部の圧力変化の推移と透気係数の関係を模式的に表した図を図 5-1 に示す<sup>1)</sup>。

図 5-1 に示すように、塗装部分とコンクリート部分の界面の圧力を  $P'$  とすると塗装部分とコンクリート部分の透気量が等しくなることから式(2-14)が成り立つ。式(2-14)を変換すると塗膜の透気係数  $K_f$  は式(2-15)で表される。

$$K \frac{P_a - P_s}{L_{c+f}} = K_c \frac{P_a - P'}{l_c} = K_f \frac{P' - P_s}{d_f} \quad (2-14)$$

$$K_f = \frac{K \cdot K_c \cdot d_f}{K_c \cdot L_{c+f} - K(L_{c+f} - d_f)} \quad (2-15)$$

ここで、 $K$ ：塗装を施した試験体のみかけの透気係数（ $\times 10^{-16} \text{m}^2$ ）， $P_a$ ：大気圧（ $\text{N/mm}^2$ ），

$P_s$  : 内部セルの圧力の初期値 (N/mm<sup>2</sup>),  $L_{c+f}$  : 塗装を施した試験体のコンクリート部分の測定深さ (m),  $K_c$  : 塗装前の試験体の透気係数 ( $\times 10^{-16}$ m<sup>2</sup>),  $P'$  : 塗装とコンクリートの界面の圧力 (N/mm<sup>2</sup>),  $l_c$  : コンクリート部分の厚さ (m),  $K_f$  : 塗膜の透気係数 ( $\times 10^{-16}$ m<sup>2</sup>),  $d_f$  : 塗装の厚さ (m) である。

上記の変数のうち  $K$ ,  $P_s$ ,  $K_c$  は DC 法により取得が可能であり, 本研究においては塗装の厚さ  $d_f$  は平均的な値として塗料の密度と塗布量から求めた。 $L_{c+f}$  に関して唐沢らは DC 法から得られる測定深さ  $L$  を採用しているが, 塗装を有するコンクリートにおいて DC 法の測定範囲が  $L$  で適切に評価できているかは情報が少ないため, 本研究ではまず, 塗装を有するコンクリートにおいて, 測定深さ  $L$  の妥当性を検証し, 式(2-14), (2-15)の  $L_{c+f}$  を  $L$  で代用可能かどうかを確認した。

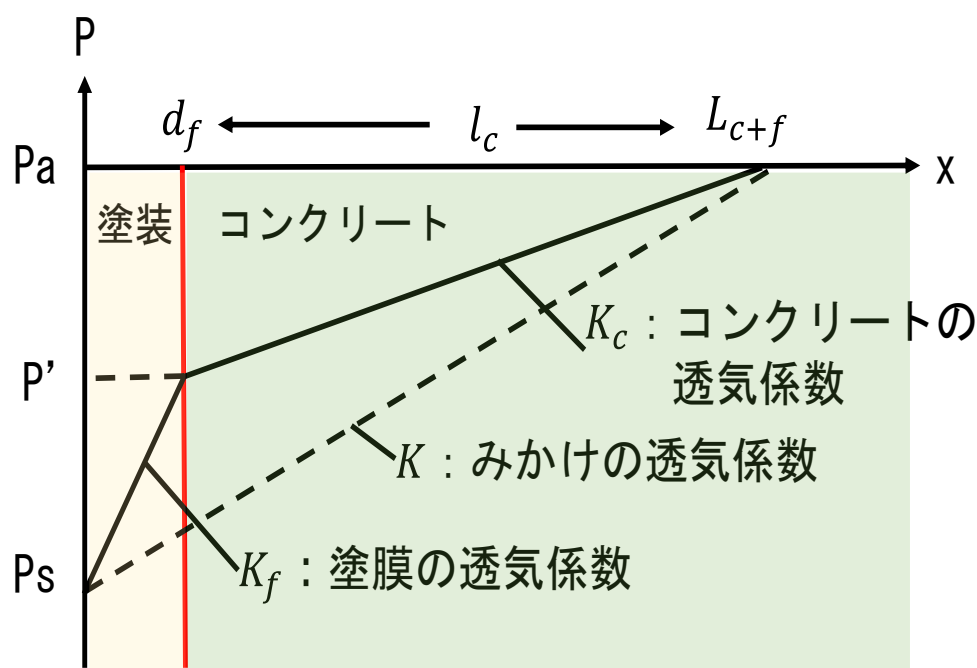


図 5-1 塗装内部及びコンクリート内部の圧力変化の推移と透気係数の関係<sup>1)</sup>

### 5.2.1 測定深さに関する実験概要

本実験では、DC 法で取得される測定深さ  $L$  と実際に DC 法で圧力減少が生じる範囲の比較を行うため、 $300*300*150\text{mm}$  の角柱のモルタルを作製し、図 5-2 で示すように試験体上面から 10mm, 20mm, 30mm, 50mm の位置に光ファイバセンサを埋め込み、透気係数の計測時に発生するコンクリート内部のひずみを検知することによって、DC 法によるコンクリート内部の圧力の有無を確認するとともに、DC 法における評価範囲についての確認を行った。

本研究で使用した塗材は表 3-1 と同様の 6 種類を使用している。また、使用したモルタルの調合条件を表 5-1、使用材料を表 5-2 に示す。モルタルは打設後 3 日で脱型を行い、脱型後の 28 日間を  $20^{\circ}\text{C} \cdot 60\%\text{RH}$  の気中養生とし、その後に塗装を行った。また、透気係数の測定は塗装前、塗装工程中及び塗装後にそれぞれ行った。

表 5-1 調合条件

単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
水	セメント	細骨材	
W	C	S1	S2
273	497	714	714

表 5-2 使用材料

材料名	種類及び物性値
セメント	C:普通ポルトランドセメント(密度= $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ )
細骨材	S1:広島県福山市鋼管町産スラグ骨材(密度= $2.76\text{g}/\text{cm}^3$ )
	S2:広島県東広島市黒瀬産砕砂(密度= $2.57\text{g}/\text{cm}^3$ )

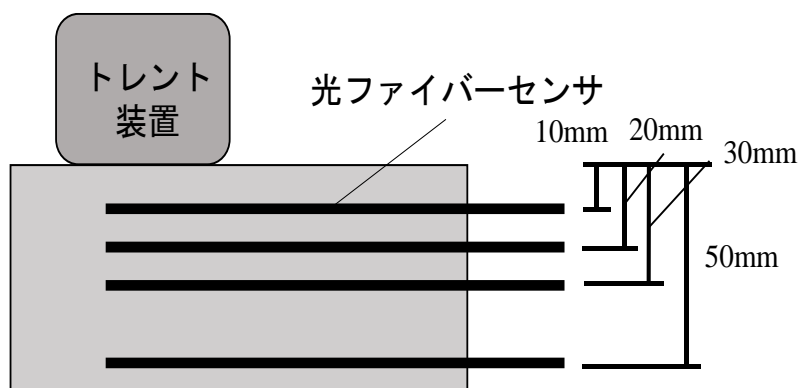


図 5-2 DC 法における評価範囲の確認試験概要

### 5.2.2 測定深さに関する実験結果

透気試験を行った際のひずみの推移の一例を図 5-3 に示す。ここでは代表的な試験結果として塗装 B（複層塗材 E）の結果を示している。透気試験中におけるひずみの測定を行うと図 5-3 のようにモルタル表面に近いほど負のひずみが得られる傾向を示す。この推移から DC 法における評価範囲の検討を行うため、測定開始時から測定終了時までに生じたひずみの平均を取り、その平均値を光ファイバセンサが埋め込まれた位置でのひずみとすることで考察を行った。

塗装前、塗装工程中及び塗装後で、DC 法中に生じたひずみの平均値とモルタル表面からの深さの関係を図 5-4 に示す。図中の赤線は DC 法によって算出された測定深さ  $L$  の値を示している。

この図から、モルタル表面から深くなるほど、発生する負のひずみ量は小さくなる傾向を示した。また、塗装を施すことによってモルタル表面から浅い位置であっても負のひずみが検出されにくくなり、DC 法における評価範囲が小さくなる傾向を示した。さらに、DC 法によって算出された測定深さ  $L$  よりも浅い箇所では大きな負のひずみを検出し、深い位置ではひずみを検出なくなる傾向が確認された。このことから、DC 法によって算出される測定深さ  $L$  と、透気係数測定時に影響を受ける範囲は概ね整合性が取れていることが確認できた。

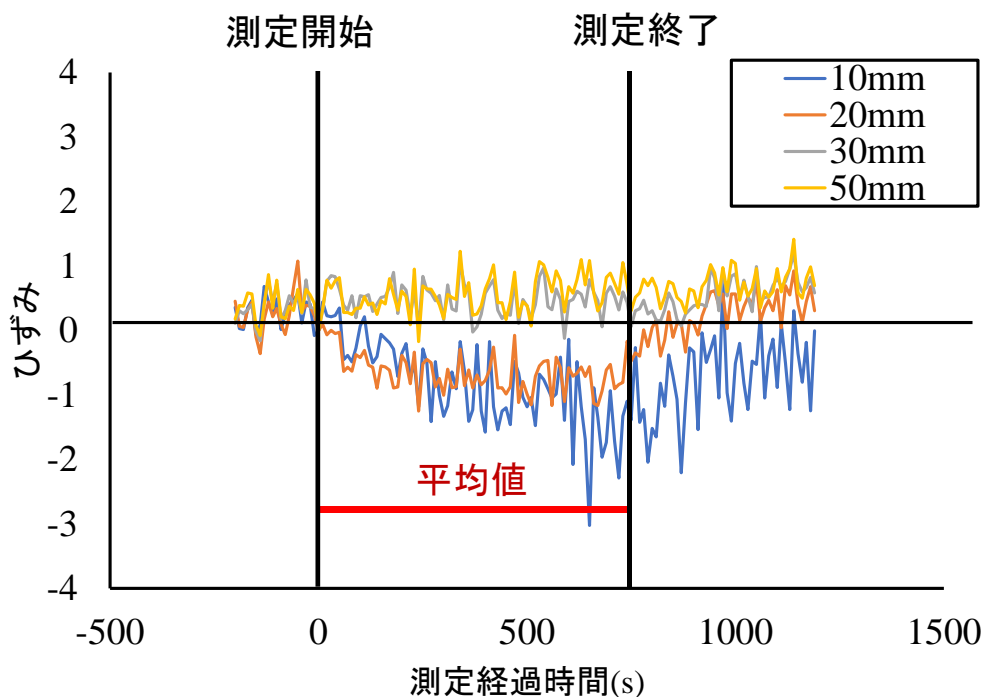
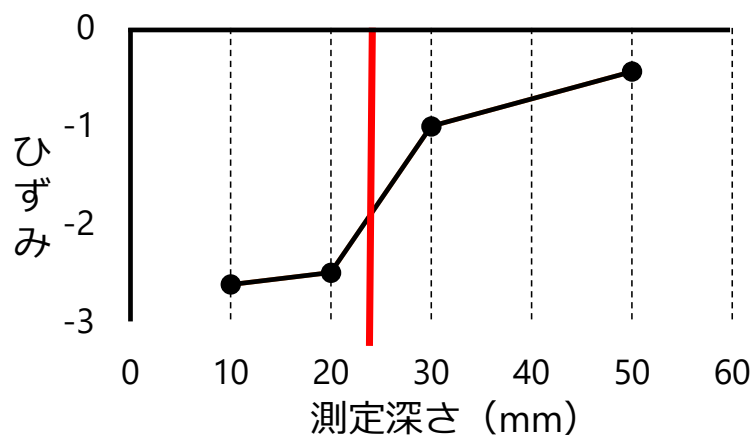
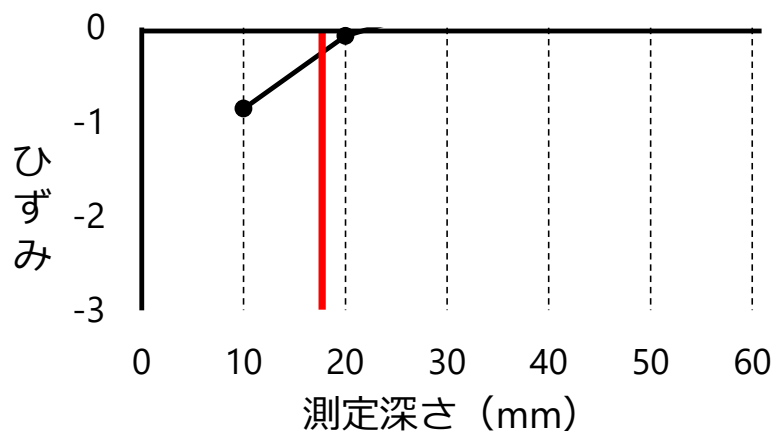


図 5-3 ひずみの推移の一例

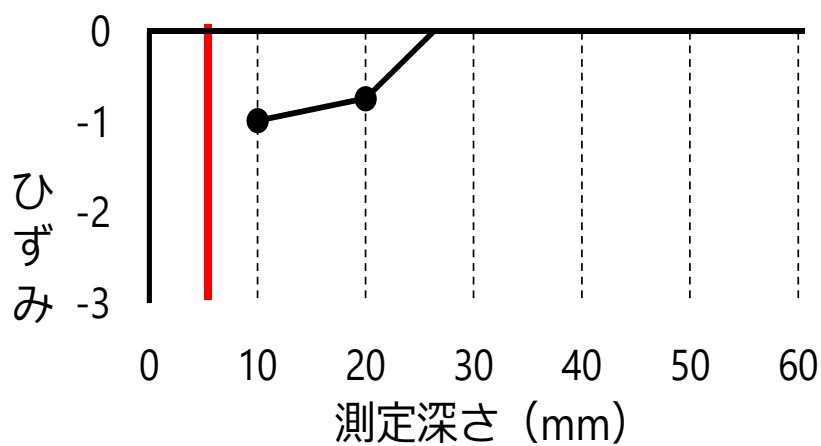




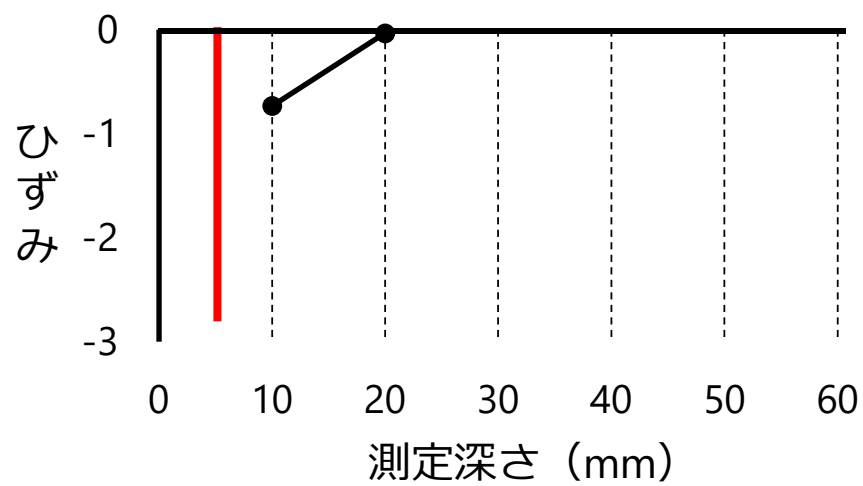
I) 塗装前



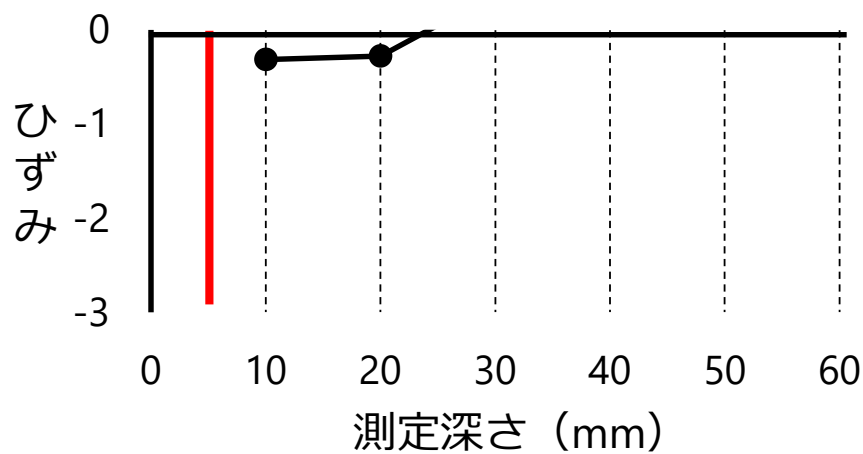
II) 下塗り後



III) 主塗り後 (1回目)



IV) 主塗り後 (2 回目)



V) 上塗り後

図 5-4 ひずみの平均値とモルタル表面からの深さの関係

### 5.2.3 塗膜単体の透気係数の推定に関する実験

前節の検討によって、式 (2-15) の  $L_{c+f}$  に、透気係数から得られる測定深さ  $L$  を使用してよいことを確認した。

本節では、6 種類の塗装を施したコンクリートを用意し、塗装の前後における透気係数を取得し、塗膜単体の透気係数  $K_f$  を推定した。

試験体は 4 章の透気試験と同様に、150\*150\*150mm の角柱のコンクリートとし、底面を試験面とした。使用した塗料、コンクリートの調合、使用材料も 4 章の透気試験と同様であり表 3-1, 4-1, 4-2 に示している。コンクリートの養生は打設後 3 日で脱型し、脱型後の 28 日間を 20°C・60%RH の気中養生とした。その後、各種塗装を施した。

DC 法によって得られたコンクリートのみかけの透気係数、測定深さ、塗装前のコンクリートの透気係数、および算出した塗膜単体の透気係数を表 5-3、劣化した試験体のコンクリートのみかけの透気係数、測定深さ、塗装前のコンクリートの透気係数、および算出した塗膜単体の透気係数を表 5-4 に示す。

使用した透気試験機の仕様が小数第 4 位までしか表示されないため、一部の試験体では塗装後のみかけの透気係数が 0 と表記され、塗膜の透気係数の算定値も 0 とされている。数値が得られた塗装 B (複層塗材 E)、塗装 D (マスチック A) では、みかけの透気係数と比較して塗膜の透気係数は一桁程度小さい透気係数を示した。その他の塗装も測定値上は 0 と表示されているが、実際には極めて小さな値が存在していると考えられる。

また、劣化した試験体では塗装 C (防水形複層塗材 E) 以外の試験体でみかけの透気係数を検出することが出来た。みかけの透気係数塗及び塗膜単体の透気係数は塗膜を劣化させた方が多くの値を検出することが確認された。

後述する促進中性化試験ではこの微小な透気係数の差異が中性化深さに影響を与えている可能性があるため、塗膜単体の性能評価方法の高精度化は更なる検討を要すると考えられる。

表 5-3 透気係数一覧（健全）

記号	みかけの透気係数 $K$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )	測定深さ $L$ (mm)	コンクリートの透気係数 $K_c$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )	塗膜単体の透気係数 $K_f$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )
A	0	0	0.889	0
B	0.0001	1	0.339	9.081E-05
C	0	0	0.667	0
D	0.658	38	0.962	0.0474
E	0	0	0.699	0
F	0	0	0.202	0

表 5-4 透気係数一覧（劣化）

記号	みかけの透気係数 $K$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )	測定深さ $L$ (mm)	コンクリートの透気係数 $K_c$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )	塗膜単体の透気係数 $K_f$ ( $\times 10^{-16}\text{m}^2$ )
A	0.117	17	1.580	0.0101
B	0.0058	5	0.500	9.134E-04
C	0	0	0.719	0
D	0.531	35	1.080	0.0253
E	0.0063	5	0.247	1.751E-04
F	0.0023	3	0.361	1.519E-03

### 5.3 中性化促進試験

#### 5.3.1 実験概要

促進中性化試験は JIS A 1153 に準拠し、20℃、60%RH、二酸化炭素濃度 5%の環境下で実施した。中性化深さの測定は 1, 2, 4, 8, 13 および 26 週に実施した。

本実験の使用した塗料、コンクリートの調合、使用材料は透気試験及び、前節の塗膜の透気係数の推定実験と同様である。本実験で作製したコンクリートの標準養生材齢 28 日における圧縮強度は 27.8N/mm<sup>2</sup>、現場封緘養生材齢 28 日における圧縮強度は 23.1N/mm<sup>2</sup>であった。

試験体のパラメータは表 5-1 に示すように塗装無し及び 6 種類の塗装であり、それぞれ 3 体ずつ作製した。また、塗膜を劣化させた場合についても実験を行っており、それについてもそれぞれ 3 体ずつ作製した。本実験の目的は、各種塗装が中性化進行速度に及ぼす影響を確認することであるため、コンクリートの養生方法は JIS A 1153 とは異なる方法を採用した。すなわち、コンクリートは打設後 3 日で脱型し、脱型後の 28 日間を 20℃、60%RH の気中養生とし、その後、各種塗装を施した。なお、劣化手法については 3 章の光沢度試験及び 4 章の透気試験の結果からフタル酸ジイソブチルを刷毛で 95g/m<sup>2</sup> 塗布する方法を採用した。

表 5-1 中性化促進試験 パラメータ

n=3	健全	劣化
塗装無し	○	○
塗装 A (防水性薄塗材 E)	○	○
塗装 B (複層塗材 E)	○	○
塗装 C (防水形複層塗材 E)	○	○
塗装 D (マスチック A)	○	○
塗装 E (つや有り合成樹脂エマルジョンペイント)	○	○
塗装 F (可とう系改修塗材 E)	○	○

### 5.3.2 実験結果及び考察

各塗装における試験材齢 26 週までの中性化深さの経時変化を図 5-5 に示す。その結果、塗装種類によって中性化深さが大きく異なる傾向を示した。塗装無しの試験体が最も大きな中性化進行速度を示し、塗装 D（マスチック A）及び塗装 E（つやあり合成樹脂エマルションペイント）でも比較的大きな中性化深さが確認された。この 2 種類の塗装は他の塗装に比べて塗布量が比較的少ないため、塗装自体の透湿性が高くなっており、コンクリート中の水分が逸散しやすく、コンクリート内の水分量が減少することによって中性化の進行が促進された可能性が考えられる。また、同様の塗装を採用している既往研究<sup>12), 3)</sup>では塗装 D（マスチック A）及び塗装 E（つやあり合成樹脂エマルションペイント）は比較的中性化抑制効果が小さくなることが報告されており、本研究においても概ね同様の傾向が得られた。

また、各塗装における試験材齢 26 週までの塗膜を劣化させた際の中性化深さの経時変化を図 5-6 に示す。その結果、劣化していない場合と同様に塗装 D（マスチック A）及び塗装 E（つやあり合成樹脂エマルションペイント）で比較的大きな中性化深さが確認できた。また、塗膜を劣化させた場合、長期材齢における中性化進行がより促進されていることが確認できた。

ここで、みかけの透気係数と測定材齢 26 週時の中性化深さの関係を塗膜が劣化していない場合と劣化している場合に分けて図 5-7 に示す。その結果、塗膜が劣化していない状態では、前節でも示したように、塗装 B（複層塗材 E）及び塗装 D（マスチック A）の 2 種類しか数値を示さないため、実験値が 2 点しかないもののみかけの透気係数の増加に伴って、中性化深さは増加する傾向が確認された。また、塗膜が劣化している場合にも概ね同様の傾向が示され、塗膜が劣化していない場合に比べてみかけの透気係数及び中性化深さが大きくなる傾向が確認された。さらに、塗装の劣化の有無によって分類しているものを合わせてみかけの透気係数と中性化深さの関係について考察を行った。その結果、みかけの透気係数の上昇に伴って中性化深さが上昇していくことが確認された。

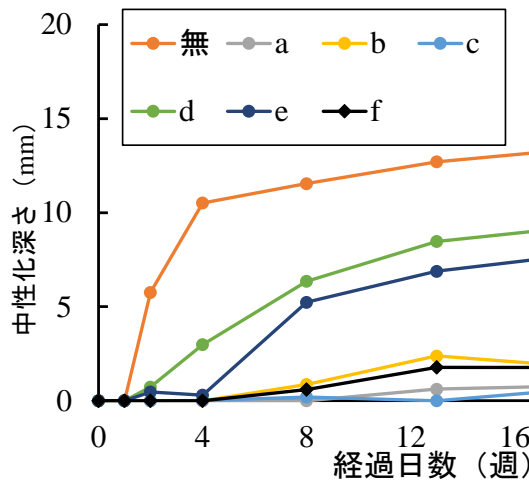


図 5-5 中性化深さの経時変化 (健全)

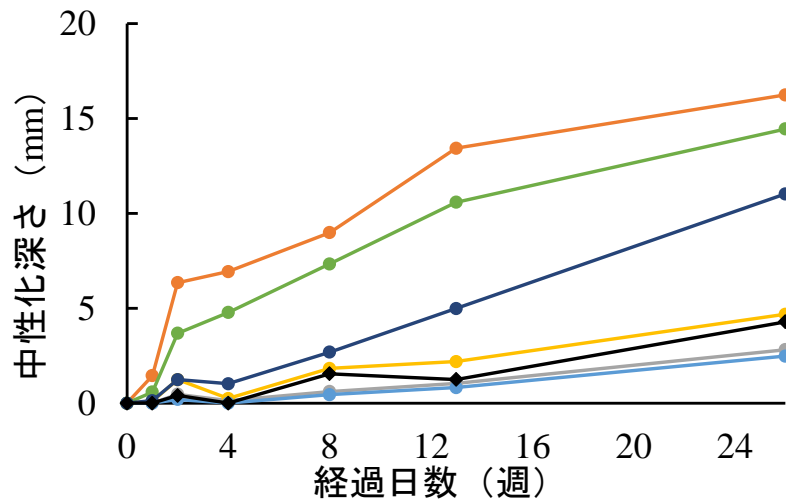


図 5-6 中性化深さの経時変化 (劣化)

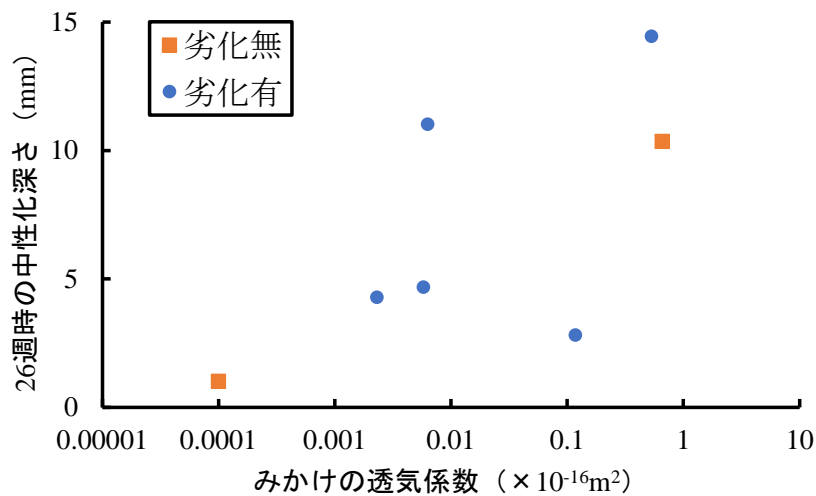


図 5-7 みかけの透気係数と中性化深さの関係

#### 5.4 塗装を有するコンクリートの中性化進行予測式の提案

塗装が施されたコンクリートの中性化進行について、2 章でも述べたように、馬場ら<sup>4)</sup>は、セメント系の仕上げ材以外の仕上げ材を施したコンクリートの中性化進行の予測式(2-6)を提案している。

$$D = A \left[ \sqrt{(T + R^2)} - R \right] \quad (2-6)$$

ここで、 $D$ ：中性化深さ (mm)， $A$ ：中性化速度係数 (mm/day<sup>1/2</sup>)， $T$ ：期間 (day)， $R$ ：中性化抵抗 (day<sup>1/2</sup>) である。

河野らの研究では、二酸化炭素が塗装及びコンクリート中をフィックの第一法則に従って拡散していくと仮定し、中性化抵抗  $R$  を用いた式(2-6)の妥当性が検討されている<sup>5)</sup>。本研究でも式(2-6)を用いて最小二乗近似で変数  $A$  と  $R$  を取得した。結果が表 5-2、表 5-3 と図 5-8 である。図 5-8 から、式(2-6)を用いた場合、塗装を有するコンクリートの中性化深さの実験値を、材齢初期では過大に評価し、長期的には過小評価する傾向が確認できる。このことは、図 5-5、図 5-6 でみられるような塗装を有するコンクリート特有の中性化深さの時間遅れや、その後の立上りを適切に評価できていないことを示している。

そこで本研究では、コンクリート表面に塗装が施されることによって、コンクリート表層部の CO<sub>2</sub> 濃度が炭酸化反応を継続できる程度に至るまでのタイムラグがあると仮定して、式(5-1)に示すように中性化が開始するまでの潜伏期間  $t_0$  を考慮することで説明性が向上すると考えた。

$$D = A \left[ \sqrt{((T - t_0) + R^2)} - R \right] \quad (5-1)$$

ここで  $t_0$ ：コンクリート表層で炭酸化反応が生じるまでの潜伏期間 (day) である。式(5-1)に基づき、促進中性化試験 26 週における中性化深さの結果から最小二乗法によって、中性化抵抗  $R$  及び潜伏期  $t_0$  を算出した結果を表 5-2、表 5-3 と図 5-8 に示す。図 5-8 から、式 (5-1) は式 (2-6) に比べて、実験値の再現性が向上していることが示された。



表 5-2 最小二乗近似から得られた式 (2-6) の値

	記号	変数	
		$A$	$R$
健全	A	27.118	118.900
	B	0.149	63.065
	C	37.673	100.702
	D	72.436	5.025
	E	1.115	7.786
	F	0.260	55.328
劣化	A	38.974	1363.12
	B	1.139	20.330
	C	48.477	1994.84
	D	1.252	1.764
	E	123.467	1059.16
	F	59.988	1385.56

表 5-3 最小二乗近似から得られた式 (5-1) の値

	記号	変数		
		$A$	$R$	$t_0$
健全	A	14.923	85.497	14.923
	B	0.147	63.065	0.147
	C	0.147	37.145	0.147
	D	0.861	4.517	0.861
	E	0.791	6.642	0.791
	F	0.159	53.111	0.159
劣化	A	72.518	2372.11	7.819
	B	1.239	20.332	0
	C	1.139	20.332	0
	D	1.100	0	6.604
	E	66.110	544.366	5.145
	F	22.332	431.123	20.894

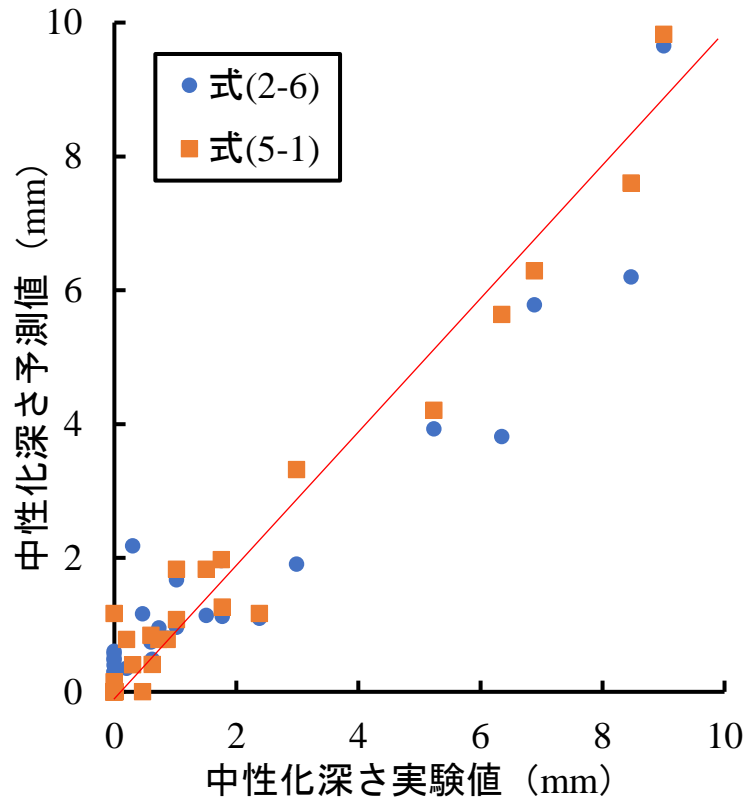


図 5-8 中性化深さの実験値と予測値の比較

### 5.5 塗装を有するコンクリートの中性化進行と透気係数の関係

前節の検討によって、潜伏期 $t_0$ を考慮することで中性化進行予測に関する説明性が向上することが分かった。本節では、最小二乗近似により得られた中性化抵抗 $R$ 及び潜伏期 $t_0$ と、5章2節で取得したみかけの透気係数及び塗膜単体の透気係数との関係性を考察する。

$R$ 及び $t_0$ とみかけの透気係数及び塗膜の透気係数の関係をそれぞれ図 5-9、図 5-10 に示す。本実験でみかけの透気係数が 0 でなかったデータのみでの比較にはなるものの、みかけの透気係数及び塗膜単体の透気係数が大きくなるほど中性化抵抗 $R$ は小さくなり、塗装内部での空気の潜伏期間は短くなる傾向が示された。

本研究の範囲では実験データが著しく不足しているため、各係数と透気係数との関係性を関数化することが困難であるが、実験データを蓄積することで透気係数から中性化深さや $\text{CO}_2$ 固定量の予測精度を向上することが期待できる。

また、一般建築に施されている塗装は経年劣化によって性能が変化していくことが想定されるため、みかけの透気係数から $R$ や $t_0$ の経年変化を推定することができれば、塗装を有するコンクリート構造物でも長期的な中性化深さ予測が可能となり、再塗装が必要とされる年次の目安にもなりうる。また、塗膜単体で評価することで、塗装の劣化などで同時に起こるコンクリートの乾燥や、それに伴う水和反応、炭酸化反応の速度の変化を中性化速度係

数 $A$ として個別に評価できる可能性があると考えている。

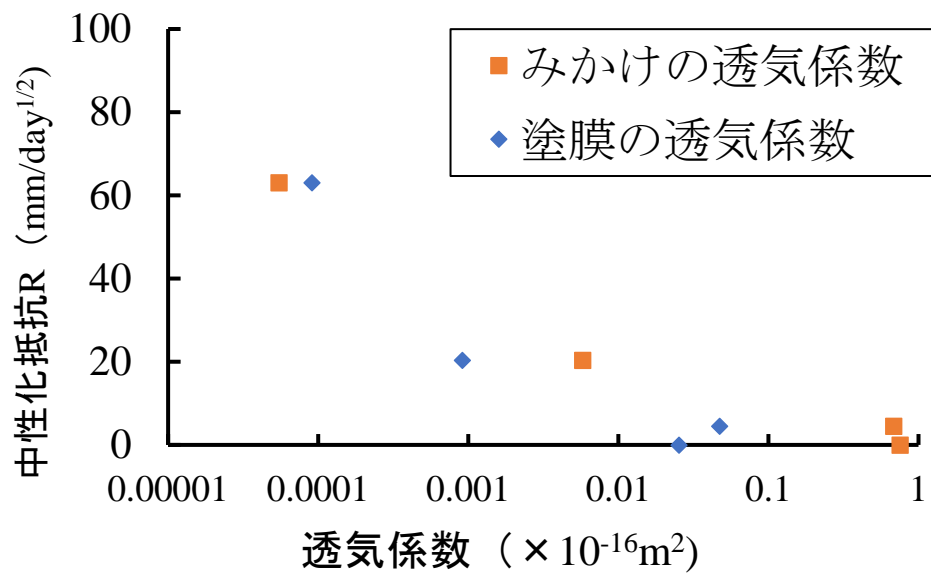


図 5-9 中性化抵抗  $R$  と取得したみかけの透気係数及び塗膜単体の透気係数の関係

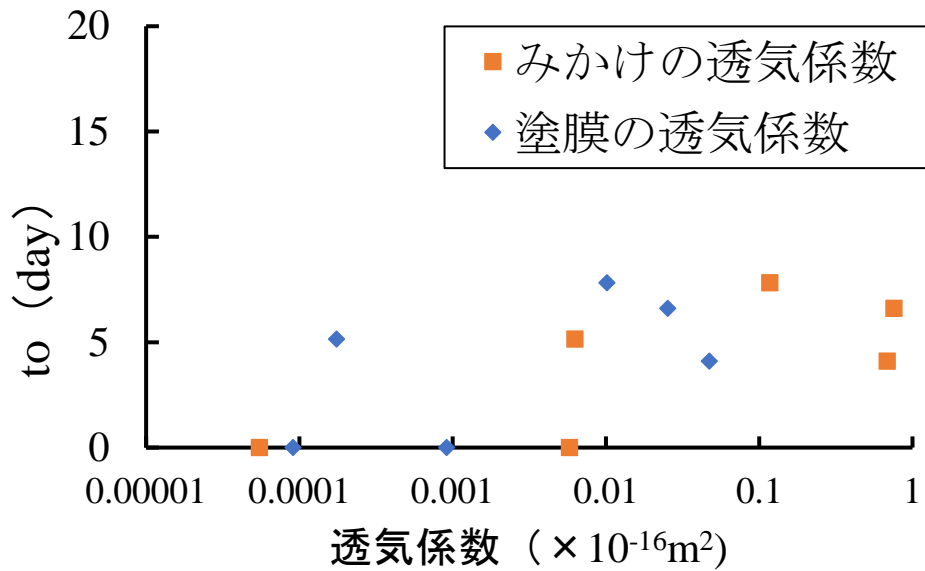


図 5-10 潜伏期間  $t_0$  と取得したみかけの透気係数及び塗膜単体の透気係数の関係

## 5.6 CO<sub>2</sub> 固定量の推定

本節では既往研究で用いられているコンクリート中の CO<sub>2</sub> 固定量の算出方法及び本研究での試験結果を用いてコンクリート中の CO<sub>2</sub> 固定量の経時変化を計算により取得した。

CO<sub>2</sub> 固定量の算出方法として兵頭ら<sup>9)</sup>が示す式(2-1)、式(2-2)及び式(2-3)を使用した。式中の  $d$  : 中性化深さ (mm) を本研究で提案した式(5-1)および透気試験と促進中性化試験の結果から算出を行った。式(5-1)中の  $R$  および  $t_0$  は図 5-11、図 5-12 に示す関係性を基に計算を行った。なお、中性化速度係数は本研究で行った促進中性化試験の塗装無のデータを用いて最小二乗近似を行った際の数値を用いている。また、式(2-3)の中性化度は兵頭ら<sup>9)</sup>が計算の際に用いている数値を採用した。

計算により求めた塗膜の透気係数ごとの中性化深さおよび CO<sub>2</sub> 固定量の時間推移を図 5-13、図 5-14 に示す。なお、ここでは膜厚を 100 $\mu$ m としたものを記載する。その結果、中性化深さおよび CO<sub>2</sub> 固定量は塗膜の透気係数の増大に伴って増大する傾向が示された。

また、計算により求めた塗膜の膜厚ごとの中性化深さおよび CO<sub>2</sub> 固定量の時間推移を図 5-15、図 5-16 に示す。なお、ここでは塗膜の透気係数を 0.001 としたものを記載する。その結果、膜厚が大きくなるほど中性化深さおよび CO<sub>2</sub> 固定量は初期の測定材齢において反応を示さず、その後は同様の経時変化を示すことが確認された。

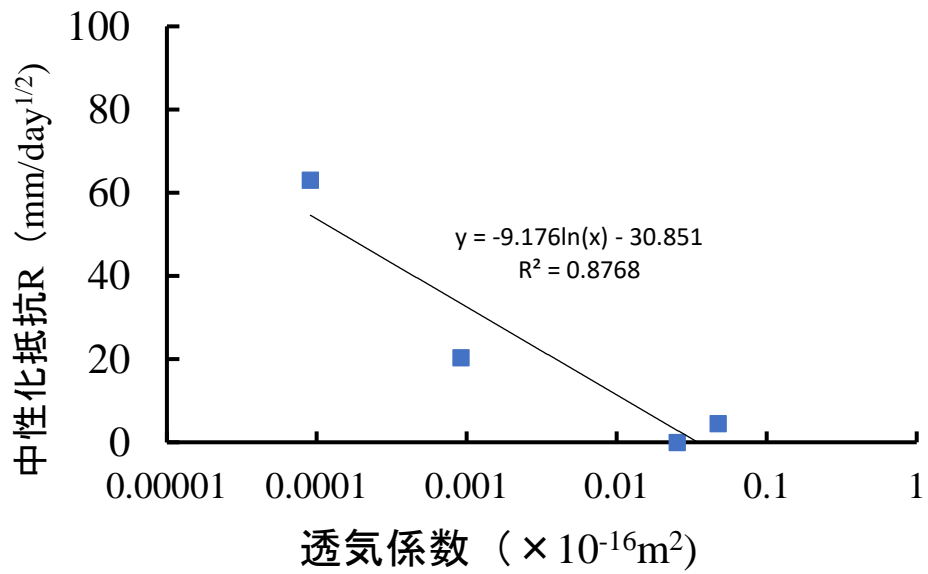


図 5-11 塗膜の透気係数と中性化抵抗の関係

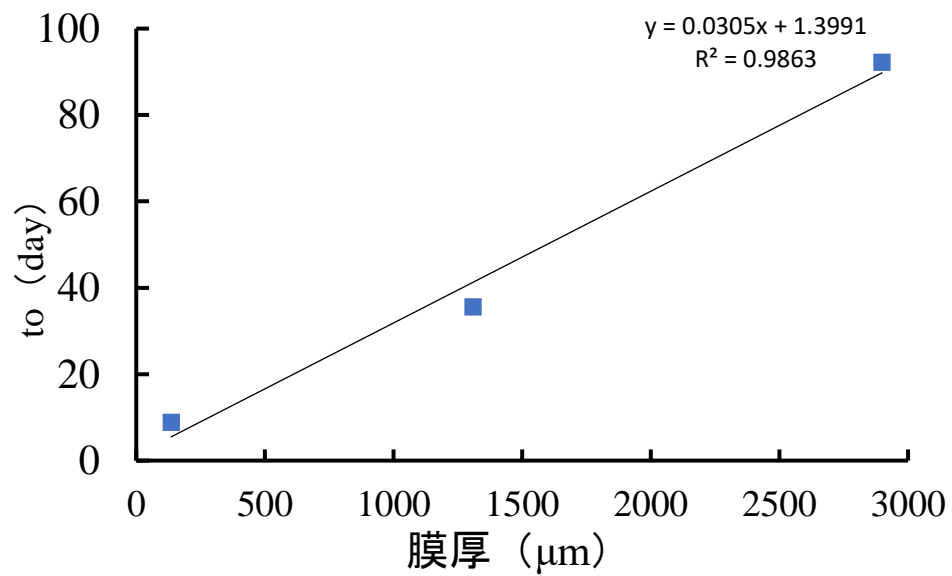


図 5-12 膜厚と潜伏期間の関係

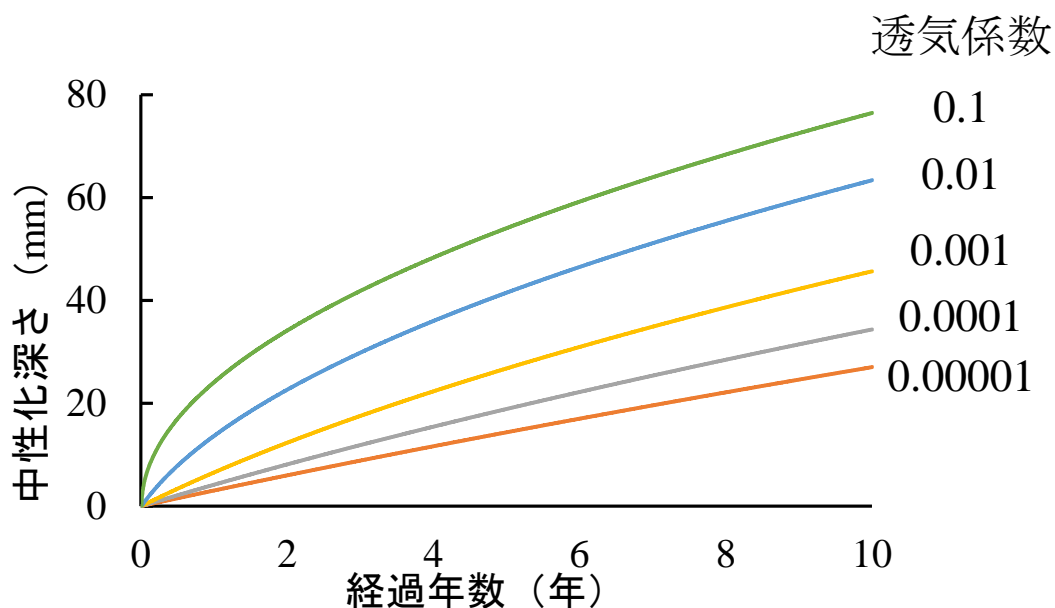


図 5-13 計算によって求めた中性化深さの経時変化 (透気係数ごとの比較)

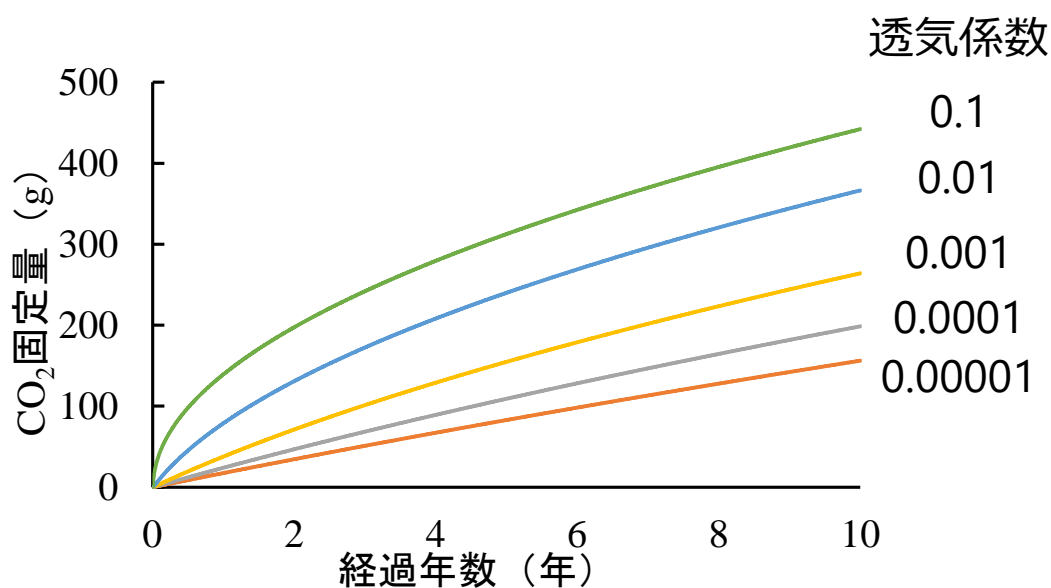


図 5-14 計算によって求めた CO<sub>2</sub> 固定量の経時変化 (透気係数ごとの比較)

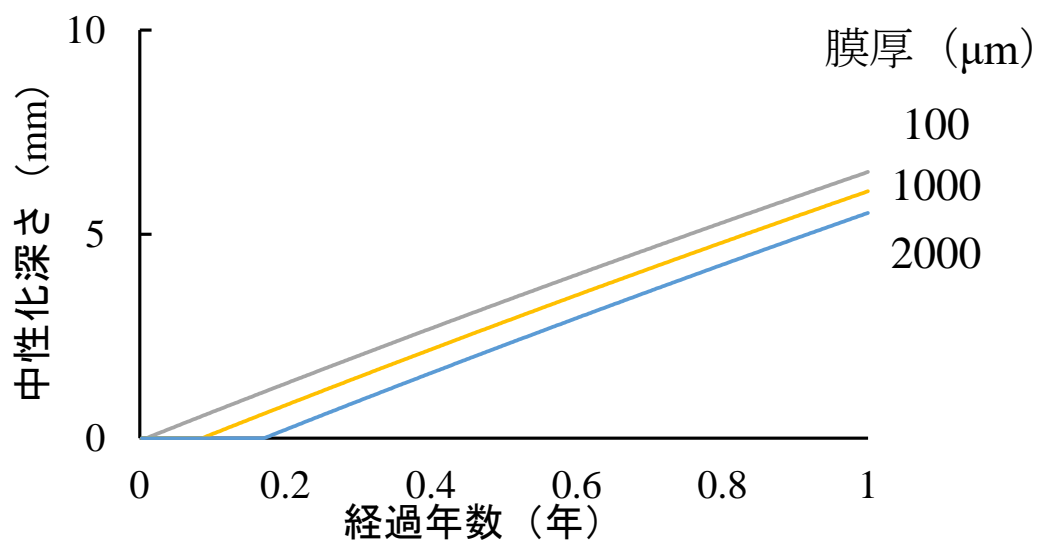


図 5-15 計算によって求めた中性化深さの経時変化 (透気係数ごとの比較)

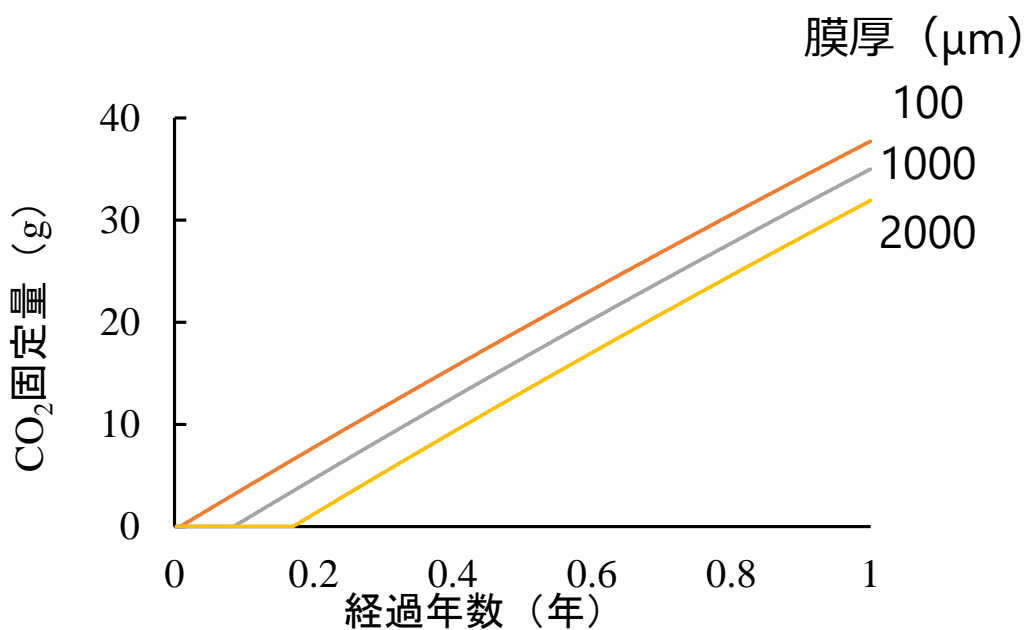


図 5-16 計算によって求めた CO<sub>2</sub> 固定量の経時変化 (透気係数ごとの比較)

## 5.7 参考文献

- 1) 唐沢智之, 河野政典, 梶田佳寛, 李榮蘭: ダブルチャンバー法による仕上塗材の透気係数と中性化進行予測に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.63, 2009
- 2) 濱崎仁, 本橋健司, 越中谷光太郎, 則竹慎也, 松沢晃一, 土屋直子: 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, Vol.87, No.797, pp. 600-609, 2022.7
- 3) 親本俊憲, 板谷俊郎, 大岡督尚, 長瀬公一: 躯体コンクリートの中性化抑制に寄与する各種仕上げ材の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 4) 馬場明生, 千歩修: 各種の表面層を持つコンクリートの中性化深さ推定方法に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 5) 河野政典, 梶田佳寛, 起橋考徳, 中村祐介: 仕上塗材の経年劣化を考慮した拡散理論に基づく中性化進行予測に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.318-325
- 6) 兵頭彦次, 星野清一, 平尾宙, 野村幸治: ライフサイクルを通じたコンクリートの CO<sub>2</sub> 固定量算定に関する研究, Cement Science Concrete Technology, Vol.74, pp.333-340



## 第 6 章 結論

本研究では、本研究では塗装の種類、塗装の劣化の有無をパラメータとした促進中性化試験を行うことにより、塗装を有するコンクリートにおける中性化深さを実験的に取得するとともに、透気試験を実施することでコンクリートの中性化と深くかかわる二酸化炭素及び水分の移動と高い相関がある透気係数を用いた中性化進行予測の精度向上を試みることを目的として、実験及び検討を行った。

### 第 1 章 序論

本研究の背景及びフローチャートを示し、最後に本論文の構成を示した。

### 第 2 章 既往の研究

コンクリート分野における大気中の  $\text{CO}_2$  の固定化に関する検討及び非破壊透気試験を用いた中性化速度係数を評価する方法についての報告例についてまとめた。また、これらを経験するにあたって塗装及び塗装の劣化手法を評価する必要があるが、塗装の選定及び劣化手法の選定において参考にした既往研究についても並行してまとめた。

### 第 3 章 塗膜の促進劣化手法の提案

塗装を劣化させる手法として一般的なキセノンウェザーメーターやサンシャインウェザーメーターは試験体の大きさ及び光源の大きさからコンクリートに塗布された塗膜全体に紫外線を均一に当てることが困難であることから、新たな塗膜の促進劣化手法の提案を行った。そのために、5.0wt%次亜塩素酸ナトリウム水溶液、3.0wt%過酸化水素水、フタル酸ジイソブチルを、70℃定常で加熱する方法の 4 種類を選定し、光沢度試験を行った。

その結果、70℃定常で加熱する方法以外に光沢度の低下が確認された。そのため、加熱による劣化は塗装の劣化に大きく影響しないと考え、透気係数の測定を実施する際には、この実験で使用した薬品 3 種類を劣化因子として用いることとした。

### 第 4 章 塗装及びその劣化がコンクリートの透気係数に及ぼす影響

コンクリートの透気係数に及ぼす塗装の種類及び塗装の劣化の影響について検討するた

め、塗装前、塗装の各工程後、塗装完了後、塗装の劣化処理後にそれぞれ透気試験を行うことによって各段階におけるみかけの透気係数を取得した。なお、劣化処理には 5.0wt% 次亜塩素酸ナトリウム水溶液、3.0wt% 過酸化水素水、フタル酸ジイソブチルを刷毛で 95g/m<sup>2</sup> 塗布する手法を採用した。

その結果、すべての塗装において下塗りではみかけ透気係数が減少せず、塗装 D（マスチック A）を除いて主塗り以降においてはみかけの透気係数が減少する傾向が得られた。これは、下塗り材が水性のシーラーで構成されていること及び、主材の膜厚が影響影響している可能性が考えられる。

また、フタル酸ジイソブチルを劣化因子として用いた場合、塗装 C（防水形複層塗材 E）及び塗装 D（マスチック A）を除く 4 種類の塗装でみかけの透気係数の上昇が確認された。

## 第 5 章 透気係数を用いた塗装を有するコンクリートの中性化進行予測

3 章及び 4 章で行った試験から塗装種類及び劣化因子を参考にして、塗装 6 種類及び劣化の有無をパラメータとした中性化促進試験を行った。その結果、劣化の有無にかかわらず、塗装 D（マスチック A）及び塗装 E（つやあり合成樹脂エマルジョンペイント）において中性化深さが大きくなる傾向が得られた。この 2 種類の塗装は他の塗装に比べて塗布量が比較的少ないため、塗装自体の透湿性が高くなっており、コンクリート中の水分が逸散しやすく、コンクリート内の水分量が減少することによって中性化の進行が促進された可能性が考えられる。

また、馬場らは中性化進行の予測式として式(2-6)を提案しているが、塗装を有するコンクリートの中性化深さの実験値を、材齢初期では過大に評価し、長期的には過小評価する傾向が確認できた。

そこで、コンクリート表面に塗装が施されることによって、コンクリート表層部の CO<sub>2</sub> 濃度が炭酸化反応を継続できる程度に至るまでのタイムラグがあると仮定して、式(5-1)に示すように中性化が開始するまでの潜伏期  $t_0$  を考慮することで説明性が向上すると考えた。その結果、式(2-6)に比べて実験値の再現性が向上していることが確認された。

$$D = A \left[ \sqrt{(T + R^2)} - R \right] \quad (2-6)$$

$$D = A \left[ \sqrt{((T - t_0) + R^2)} - R \right] \quad (5-1)$$

ここで、 $D$ ：中性化深さ（mm）、 $A$ ：中性化速度係数（mm/day<sup>1/2</sup>）、 $T$ ：期間（day）、 $R$ ：中性化抵抗（day<sup>1/2</sup>）、 $t_0$ ：コンクリート表層で炭酸化反応が生じるまでの潜伏期間（day）

最小二乗近似によって  $R$  及び  $t_0$  を算出し、それぞれみかけの透気係数及び塗膜の透気係数と比較してみたところ、みかけの透気係数及び塗膜単体の透気係数が大きくなるほど中性

化抵抗 $R$ は小さくなり、塗装内部での空気の潜伏期間は短くなる傾向が示された。

本研究では、塗装種類および塗膜の劣化の考慮した中性化進行予測の精度を中性化が開始するまでの潜伏期間 $t_0$ を考慮することで向上させるとともに、みかけの透気係数および塗膜単体の透気係数を用いて中性化抵抗 $R$ および潜伏期間 $t_0$ の評価を行った。一方で、塗膜の劣化は経年劣化であり本研究では劣化の経過時間については考慮できていない。よって、今後は既往研究の暴露試験の結果または暴露試験を行い、その試験体に対して透気試験を行うことでみかけの透気係数から劣化年数などを推定することで、塗装の経年劣化を考慮した中性化進行予測およびコンクリート中の $\text{CO}_2$ 固定量の推定精度が向上する可能性が考えられる。また、既往研究<sup>2)</sup>においても塗装の劣化年数に応じて中性化抵抗 $R$ が減少していく傾向を示していることから、実験値を増やすことによって、より明確な傾向を確認することができれば、非破壊透気試験によって得られるみかけの透気係数から、中性化抵抗 $R$ や潜伏期 $t_0$ を推定できる可能性が考えられる。

## 参考文献

- 1) 馬場明生, 千歩修: 各種の表面層を持つコンクリートの中性化深さ推定方法に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 2) 河野政典, 梶田佳寛, 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

# 付録

## 塗装の選定理由

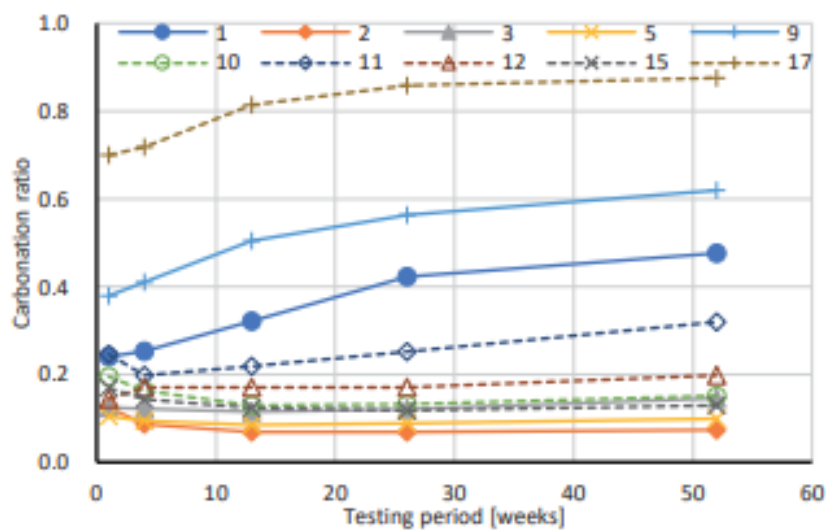
本研究で使用する塗装の選定は濱崎ら<sup>1)</sup>が使用した塗装を参考に選定している。ここで、その研究で使用している塗装を表-1に示す。表-1の塗装はすべて建築用の外装塗材として一般紙使用されているものである。その中から、図-1に示す中性化率の経時変化、図-2に示す二酸化炭素透過率、図-3に示す劣化後の二酸化炭素透過率のデータから塗装によってコンクリートの中性化進行に差が生まれ、塗膜の劣化の進行についても塗装ごとに差が生まれるように6種類を選定した。表-2に濱崎らの塗装の番号、本研究での塗装記号およびそれぞれの実験の大まかな結果を示す。基本的に塗膜には中性化抑制効果があるため中性化率が大きいものは少なかったが、劣化後の二酸化炭素透過率が大きくなるものがあり、採用した。その他の塗装についてはその他の既往研究数多く採用されているものを中心に選定した。なお、外装薄塗材Eおよび外装厚塗材Eについては中性化率が大きくなっているものの廃版になっている、表面に凹凸がある影響でDC法による非破壊透気試験が行えないなどの理由で採用していない。

No.	Standard	Type	呼び名	Method	Construction specification				
					Dosage [kg/m <sup>2</sup> ]				Remarks
					Base	Main 1	Main 2	Topcoat	
1		Exterior thin coating material E	外装薄塗材 E	Spray	0.11	2.48	—	—	standard dosage
2		Waterproof exterior thin coating material E	防水形外装薄塗材 E	Roller	0.12	0.83	0.67	—	standard dosage
3		Multi-layer coating material E	複層塗材 E	Spray	0.08	0.93	0.83	0.29	standard dosage
4		Multi-layer coating material E	複層塗材 E	Spray	0.08	0.83	—	0.29	omit the base of the main layer of No.3
5	JIS A 6909	Waterproof multi-layer coating material E	防水形複層塗材 E	Spray	0.05	2.98	1.05	0.19	standard dosage
6		Waterproof multi-layer coating material E	防水形複層塗材 E	Spray	0.05	1.05	—	0.20	omit the base of the main layer of No.5
7		Waterproof multi-layer coating material E	防水形複層塗材 E	Spray	0.05	1.47	1.05	0.26	omit the half of base of the main layer of No.5
8		Waterproof multi-layer coating material E	防水形複層塗材 E	Spray	0.05	2.98	1.05	—	omit the topcoat of No.5
9	Note 1	Mastic A	マスティック A	Roller	0.07	1.66	—	—	standard dosage
10		Mastic AE	マスティック AE	Roller	0.07	1.66	—	0.31	standard dosage
11	JIS A 6909	Exterior thick coating material E	外装厚塗材 E	Spray	0.12	1.57	6.04	—	standard dosage
12	JIS K 5660	Glossy synthetic resin emulsion paint	つや有合成樹脂エマルジョンペイント	Roller	0.14	—	—	0.27	standard dosage
13	JIS A 6909	Flexible type repair coating material E	可とう形改修塗材 E	Roller	0.11	1.03	—	0.30	
14		Flexible type repair coating material E	可とう形改修塗材 E	Roller	0.11	0.31	—	0.26	
15	JIS A 6021	Liquid-applied compounds for waterproofing membrane coating of buildings	塗膜防水材	Roller	0.05	2.25	—	0.26	standard dosage
16	JIS A 6909	Multi-layer coating material CE	複層塗材 CE	Spray	0.07	1.71	1.93	0.44	standard dosage
17		Exterior thick coating material C	外装厚塗材 C	Spray	0.07	4.65	4.52	—	standard dosage

表-1 濱崎ら<sup>1)</sup>が使用した塗材一覧

表-2 選定した塗材および大まかな実験結果一覧

番号 <sup>1)</sup>	記号	中性化率	二酸化炭素透過率	劣化後の二酸化炭素透過率
2	A	低い	低い	大きくなる
3	B	低い	低い	少し大きくなる
5	C	低い	低い	変化なし
9	D	高い	少し高い	検証していない
12	E	低い	低い	大きくなる
13	F	低い	低い	検証していない

図-1 中性化率の経時変化<sup>1)</sup>

No.	Carbon dioxide transmission rate	No.	Carbon dioxide transmission rate	No.	Carbon dioxide transmission rate
1	3.93	7	0.09	13	0.04
2	0.05	8	0.05	14	0.03
3	0.08	9	0.50	15	0.06
4	0.16	10	0.05	16	0.07
5	0.16	11	1.15	17	8.48
6	1.88	12	0.08		

図-2 二酸化炭素透過率一覧<sup>1)</sup>

No.	Type	This study Accelerated test	MLIT/Acc. Accelerated test	BRI/Acc. Accelerated test	BRI/Out. Outdoor exposure test	Hasegawa/11y Outdoor exposure test	Hasegawa/20y Outdoor exposure test	JASS 5 Literature, Field survey
1	Exterior thin coating E	0.50	—	0.84	0.97	0.45	0.55	1.02
2	Waterproof exterior thin coating E	0.08	0.12	0.18	0.02	—	—	0.68
3	Multilayer coating E	0.16	0.09	0.30	0.10	0.00	0.00	0.22
5	Waterproof multilayer coating E	0.11	0.11	0.10	0.02	0.13	0.17	0.40
11	Exterior thick coating E	0.35	0.25	—	—	0.06	0.92	0.35
12	Glossy synthetic resin emulsion paint	0.21	—	0.08	0.04	—	—	0.64
17	Exterior thick coating C	0.88	0.37	—	—	—	—	0.31

図-3 塗膜劣化後の二酸化炭素透過率一覧<sup>1)</sup>

## 吸水試験

塗装が健全な試験体に対して透気試験を行ったところ、大半の試験体で透気係数が 0 を検出してしまいデータ不足となってしまったため、追加で塗膜の透気性に関する検討を行った。

実験は促進中性化試験 13 週の試験後の試験体を使用し、写真-1 に示すように塗装面に底面をくりぬいて筒状にしたシリンダーをエポキシ樹脂系の接着剤（クイックメンダー）を使用しシリンダー内の水の減少量を 1, 8, 11 日に目視により測定した。なお、本実験では、塗膜内で水が横に広がることがないように事前にシリンダー周辺の塗膜とそれ以外の塗膜をカッターにより引き離している。

塗装ごとの測定日数と水の深さの関係を図-4 に示す。その結果、塗装 D（マスチック A）および塗装 E（つやあり合成樹脂エマルジョンペイント）は直線的に水の量が減少していったものの、その他の塗装においては変化を示さなかった。

また、水の減少量と中性化深さの関係を図-5、みかけの透気係数と水の減少量の関係性を図-6 に示す。その結果、水の減少と中性化深さには相関性があるものの、水の減少と透気係数の関係には相関性が得られなかった。理由として透気試験の実験的なエラーである可能性が考えられるが、その理由は不明である。

## 参考文献

- 1) 濱崎仁，本橋健司，越中谷光太郎，則竹慎也，松沢晃一，土屋直子：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，Vol.87，No.797，pp. 600-609，2022.7

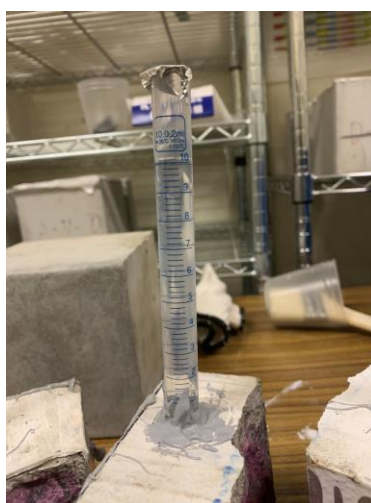


写真-1 試験体の様子

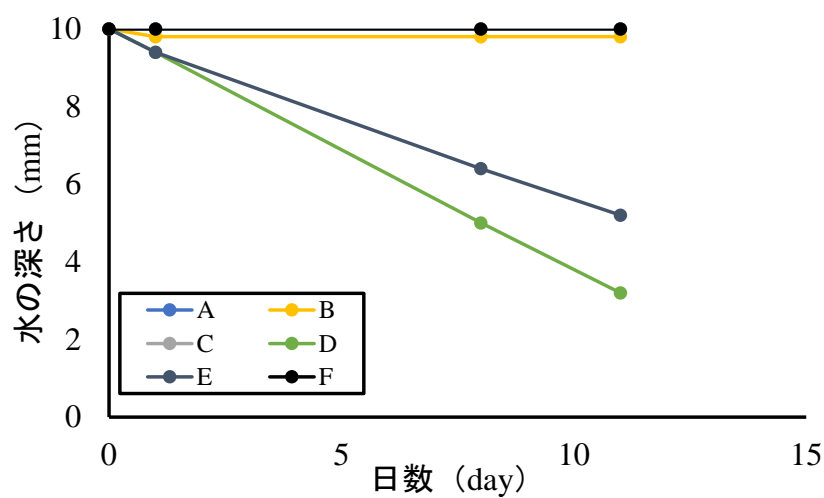


図-4 塗装ごとの測定日数と水の深さの関係

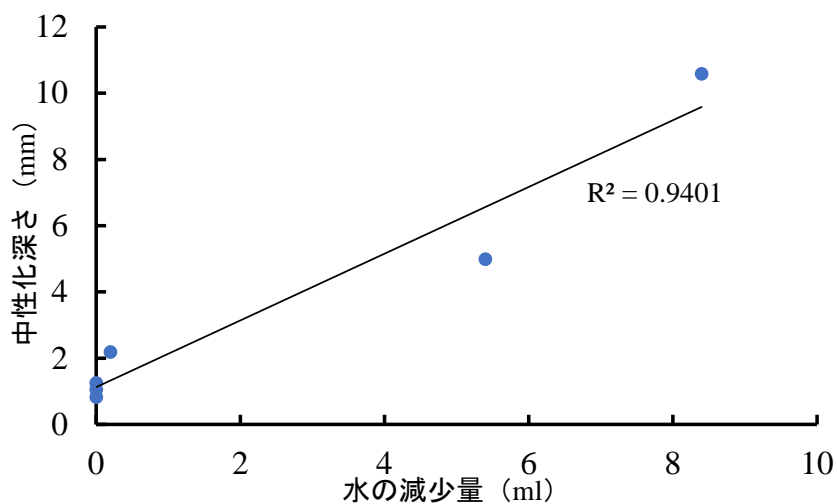


図-5 水の減少量と中性化深さの関係

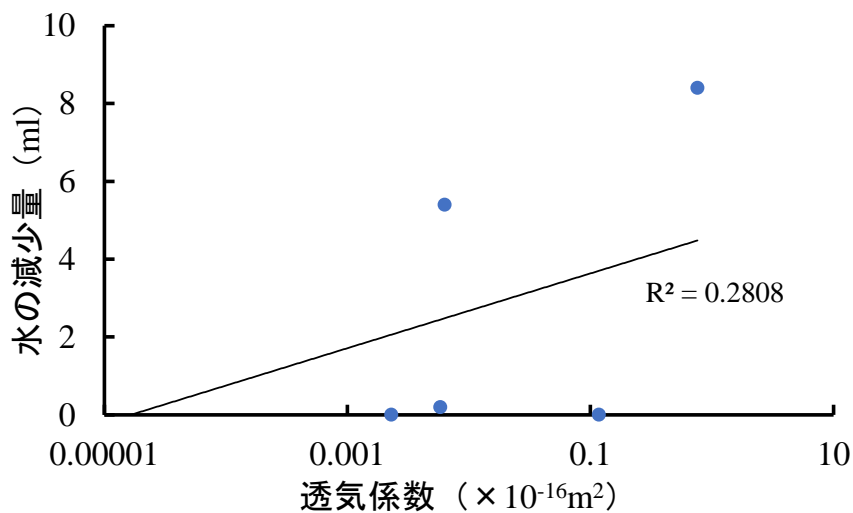


図-6 みかけの透気係数と中性化深さの関係

## 謝辞

本研究を行うにあたり，寺本篤史准教授には日々の研究室での活動や研究など様々な場面で助言を頂き，本当に感謝しています。無事修士論文を書き上げ，卒業できるのも先生方の適切な助言があったからであると考えています。

研究室の同期，先輩，後輩どの世代の人にも恵まれ，研究室にいる3年間絶えず楽しく過ごすことができました。本当にお世話になりました。

また，大久保孝昭教授および河合研至教授には副指導教員として2年間ご助言およびご指導を頂きましたことを大変感謝いたします。

この成果は，国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP21023）の結果得られたものです。また，塗装の選定および劣化手法にあたっては，芝浦工業大学の濱崎仁博士，北海道大学の北垣亮馬博士に貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。