

## 既存建物の調査結果に基づく仕上塗材の中性化抑制効果と 透気係数による中性化予測に関する研究

唐沢 智之\*1・西脇 敬一\*2・川又 篤\*2

### 概 要

仕上塗材が施され築年数が経過した既存建物よりコア供試体を採取し、そのコア供試体を用いて促進中性化試験を行った。促進中性化の試験結果より拡散理論に基づき劣化した仕上塗材の中性化抑制効果を確認し、さらに、同時に測定した透気係数より求めた中性化進行予測との比較を行い、築年数が経過した既存建物における透気係数による仕上塗材の中性化抑制効果の評価について検証を行った。その結果、仕上塗材の経年劣化を考慮し、透気係数により推定した中性化深さは、促進中性化試験結果による実測の中性化深さと一致することが確認された。

キーワード：仕上塗材・中性化抑制効果・中性化予測・透気係数

## RESEARCH ON CARBONATION SUPPRESSIVE EFFECT OF COATING MATERIALS FOR TEXTURED FINISHES AND AIR PERMEABILITY COEFFICIENT BASED ON THE RESULT OF A SURVEY OF AN EXISTING STRUCTURE

Tomoyuki KARASAWA \*1, Keiichi NISHIWAKI \*2

Atsushi KAWAMATA \*2

### Abstract

Core samples were taken from a structure several decades old, with coating materials for textured finishes, to make an accelerated carbonation test. Referring to the test result, the carbonation suppressive effect of the aged coating materials for textured finishes was evaluated on the basis of the diffusion theory. In addition, the evaluation result was compared with the prediction of carbonation progress determined from the air permeability coefficient measured at the time of the test. This comparison was intended to validate the reliability of the assessment of the carbonation suppressive effect of the coating materials for textured finishes on the aged structure, using the air permeability coefficient. This study demonstrated that the carbonation depth estimated from the air permeability coefficient, with consideration given to the aging of the coating materials for textured finishes, agreed well with the carbonation depth measured in the accelerated carbonation test.

Keywords: Coating materials for textured finishes, Carbonation suppressive effect, Carbonation depth prediction, Air permeability coefficient

\*1 Manager, Construction Material Group, Research and Development Department, Engineering Division

\*2 Construction Material Group, Research and Development Department, Engineering Division

## 既存建物の調査結果に基づく仕上塗材の中性化抑制効果と 透気係数による中性化予測に関する研究

唐沢 智之\*1・西脇 敬一\*2・川又 篤\*2

### 1. はじめに

一般に、鉄筋コンクリート造建物の多くは、外壁に仕上げが施されており、仕上塗材は最も一般的な外装仕上材の一つである。仕上塗材には意匠性、美観性の他、建物の耐久性の重要な評価指標であるコンクリートの中性化を抑制することが報告<sup>1)</sup>されている。仕上塗材によるコンクリートの中性化抑制効果の評価方法としては、一般的に仕上塗材を施したコンクリートと施していないコンクリートの中性化を比較することが行われているが、仕上塗材が経年変化により劣化するために、仕上塗材による建物の耐久性を評価する場合には、仕上塗材の劣化まで考慮した中性化抑制効果を明らかにする必要がある。筆者らは、迅速かつ実際の建物における原位置でも中性化を評価できる方法として、Torrent が開発したダブルチャンバー法<sup>2)</sup>(以下、トレント法)により透気係数を測定し、測定した透気係数と中性化率の間に相関があることを明らかにした<sup>3)</sup>。さらに、仕上塗材の透気係数と拡散係数との関係について理論的検討を行い、透気係数の測定結果から求めた拡散係数、および仕上塗材の中性化抑制効果を表す中性化抵抗より、仕上塗材を施したコンクリートの中性化進行を予測できることを明らかにした<sup>4)</sup>。また、築年数が経過した既存建物において測定した透気係数より、仕上塗材の劣化を考慮した中性化進行を予測出来ることを明らかにした<sup>5)</sup>。

本研究では、仕上塗材が施され築年数が経過した既存建物より採取したコア供試体を用いて促進中性化試験を行い、拡散理論に基づき劣化した仕上塗材の中性化抵抗を確認し、同時に測

定した透気係数と中性化抵抗の関係について検討を行い、既往の研究<sup>4) 5)</sup>で明らかにした透気係数による仕上塗材の中性化抑制効果の評価方法、および中性化進行予測方法の適合性の検証を行った。

### 2. 調査概要

#### 2.1 調査建物と調査箇所

調査建物の概要は、表-1 に示すように、1972年に竣工した鉄骨鉄筋コンクリート造の共同住宅である。調査は、2009年に実施しており、竣工年からの築年数は37年である。調査対象とした部位は、屋外に面した2階の大梁である。コンクリートは、設計基準強度225kg/cm<sup>2</sup>の軽量コンクリートが用いられている。調査建物の仕上塗材の種類は、建築当初が合成樹脂エマルション系複層仕上塗材(以下、複層塗材 E)、改修(吹き替え)後が防水形外装合成樹脂エマルション系薄付け仕上塗材(以下、防水形外装薄塗材 E)である。調査建物では、築33年の時点で、既存の仕上塗材の上に新たに仕上塗材を塗り重ねる方法で改修が行われている。

#### 2.2 調査方法

調査項目は、調査建物の築年数37年におけ

表-1 調査建物概要

所在地	東京都板橋区
用途	共同住宅
主体構造	鉄骨鉄筋コンクリート造
階数	16F
設計基準強度	225kg/cm <sup>2</sup>
竣工年	1972年
調査年	2009年
築年数	37年
仕上塗材	複層塗材 E 防水形外装薄塗材 E(改修後)

\*1 エンジニアリング本部 研究開発部 建設材料グループ グループリーダー

\*2 エンジニアリング本部 研究開発部 建設材料グループ

るコンクリートの中性化深さ，仕上塗材の上から測定した透気係数，および調査建物から採取したコア供試体を用いた促進中性化試験である。

**(1) ドリル法による中性化深さの測定**

築年数 37 年におけるコンクリートの中性化深さの測定は，屋外側の仕上塗材面で行い，次の(2)で透気係数を測定した個所の近傍で行った。中性化深さの測定方法は，日本非破壊検査協会規格 NDIS 3419-1999「ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法(以下，ドリル法)」<sup>6)</sup>によった。なお，中性化深さは，ドリル法により測定した値から，次の(3)の採取コアを用いて実測した平均的な仕上塗材の塗膜厚さであった 1.0mm を減じた値とした。

**(2) トレント法による透気係数の測定**

透気係数の測定は，屋外側の仕上塗材面，および屋内側の仕上のない打放し面において，トレント法によって行った。試験の原理は，図-1 に示すように，内部セルと外部セルをポンプにより真空状態にした後，内部セルの圧力  $P_s$  と外部セルの圧力  $P_0$  を等しく保つために外部セルの圧力のみをポンプにより制御することにより，周りから内部セルへの空気の流れが排除され，内部セルでは栓流が形成され，透気係数が精度良く測定できるものである。その時の内部セルの圧力  $P_s$  の変化と時間  $t$  を測定することにより，ハーゲン・ポアズイユ則における透気係数  $K$ ，および試験の影響を受けるコンクリートの深さ  $L$  が算出されるものである。打放しコンクリートの透気係数をトレント法により測定した場合，コンクリート中の圧力が定常状態に変化すると仮定すると，試験の影響を受ける深さ  $L$ ，大気圧  $P_a$ ，内部セルの圧力  $P_s$  の関係は図-1 のように表される。一方，仕上塗材を施したコンクリートの透気係数をトレント法により測定した場合，測定される透気係数  $K$  は，仕上塗材のみの透気係数ではなく，仕上塗材の下のコンクリートを含めた透気係数になる。ここで，仕上塗材が施されたコンクリートの場合，打放しコンクリートの場合と同様に，仕上塗材

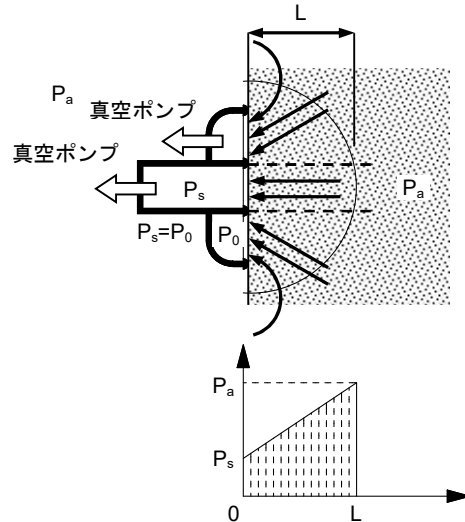


図-1 トレント法における試験の影響を受ける深さの概念図

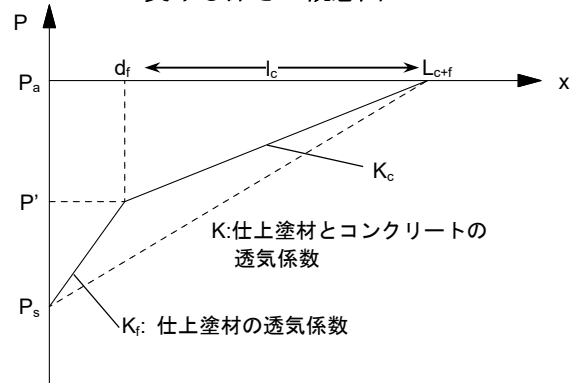


図-2 仕上塗材がある場合の圧力と透気係数の関係

中，およびコンクリート中の圧力が定常状態に変化すると仮定した場合，図-2 に示すように，仕上塗材とコンクリートの界面の圧力を  $P'$  とすると，仕上塗材部分とコンクリート部分における透気量が等しいことから関係式(1)が成り立つ。

$$K \frac{P_a - P_s}{L_{c+f}} = K_c \frac{P_a - P'}{l_c} = K_f \frac{P' - P_s}{d_f} \quad (1)$$

ここに， $K$ ：仕上塗材を施した試験体の透気係数( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )， $P_a$ ：大気圧(N/mm<sup>2</sup>)， $P_s$ ：内部セルの圧力(N/mm<sup>2</sup>)， $L_{c+f}$ ：仕上塗材を施した試験体における試験の影響を受けるコンクリートの深さ(m)， $K_c$ ：仕上塗材のない試験体(打放し)の透気係数( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )， $P'$ ：仕上塗材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( $L_{c+f} - d_f$ )(m)， $K_f$ ：仕上塗材のみの透気係数( $\times 10^{-16} \text{m}^2$ )， $d_f$ ：仕上塗材に含まれている樹脂質量に対する平均塗膜厚さ(以下，

樹脂塗膜厚さ)(m)

式(1)より仕上塗材のみの透気係数  $K_f$  は式(2)により算出できる。

$$K_f = \frac{K \cdot K_c \cdot d_f}{K_c \cdot L_{c+f} - K(L_{c+f} - d_f)} = \frac{K_c \cdot d_f}{\left(\frac{K_c}{K} - 1\right)L_{c+f} + d_f} \quad (2)$$

**(3) 採取コアによる促進中性化試験**

前述の(1), (2)の調査箇所付近から採取したφ100mm, 長さ200mm程度のコア供試体を用い, 促進中性化試験に供した。中性化期間毎に1本, 合計4材齢分となる4本を採取し, 温度20°C, 相対湿度60%の環境で4週間乾燥養生した後, 促進中性化試験を開始した。促進中性化試験にあたり, 図-3に示すように採取したコア供試体の側面にアルミテープを貼付け二酸化炭素を遮断し, コア供試体の両端面を中性化試験対象面とした。コア供試体の一端面は仕上塗材が施された面であり, もう一端面は梁の内部部分の切断面である。促進中性化試験の条件と測定方法を表-2に示す。

**2. 3 促進中性化試験結果の拡散理論に基づく検討**

二酸化炭素が仕上塗材および中性化した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, 調査建物から採取したコア供試体を用いた促進中性化試験において, 仕上塗材が施されたコンクリートの中性化進行について理論的に検討を行った。促進中性化試験のモデルを図-4に示す。

**(1) 仕上塗材がない切断面**

仕上塗材がない場合, 深さ方向に直角な面の面積  $S$  あたりを  $\Delta t$  時間に中性化したコンクリート中を拡散して深さ  $x$  に達する二酸化炭素の量  $\Delta CO_2$  は式(3)で表される。また, 中性化領域を拡散してきた二酸化炭素が, 厚さ  $\Delta x$  の境界領域に存在する  $Ca(OH)_2$  と瞬時に反応して  $CaCO_3$  になる時に消費される二酸化炭素の量  $\Delta CO_2$  は式(4)で表される。

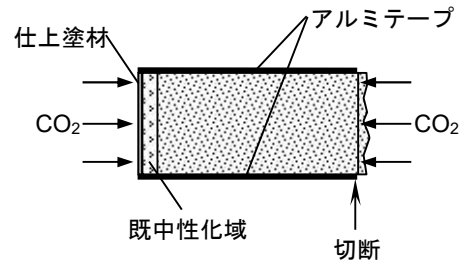


図-3 採取コアによる促進中性化試験用供試体  
表-2 促進中性化試験条件と測定方法

促進方法	測定方法	中性化期間
温度: 20±2°C	所定材齢にてコア供試体を割裂し, 割裂面に1%フェノールフタレインエタノール溶液を噴霧して表面から赤色部分までの距離を5点測定し, その平均値を求める。中性化深さには仕上塗材の厚みを含めない。	4週
相対湿度: 60±5%		13週
CO <sub>2</sub> 濃度: 5±0.2%		26週
		52週

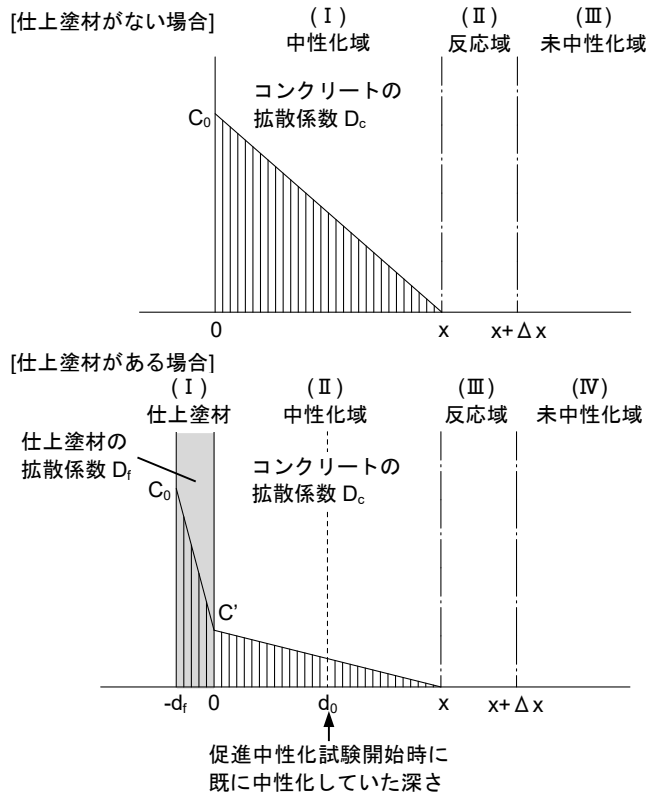


図-4 促進中性化試験のモデル

$$\Delta CO_2 = D_c \cdot \frac{C_0}{x} \cdot S \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$\Delta CO_2 = \Delta x \cdot S \cdot H \quad (4)$$

ここに,  $C_0$ : コンクリート表面の  $CO_2$  濃度  
 $D_c$ : コンクリートの  $CO_2$  拡散係数,  $x$ : 中性化深さ,  $t$ : 時間,  $S$ : 面積,  $H$ : コンクリートの単位体積あたりの  $Ca(OH)_2$  量,  $\Delta x$ : 境界領域の厚さ,  $\Delta t$ : 微小時間

$\Delta t \rightarrow 0$  とすれば次の微分方程式が得られる。

$$x \frac{dx}{dt} = \frac{D_c \cdot C_0}{H}$$

切断面側は、中性化していないため t=0 のとき x=0 として、両辺を積分する。

$$\int_0^x x dx = \frac{D_c \cdot C_0}{H} \int_0^t dt$$

$$\frac{x^2}{2} = \frac{D_c \cdot C_0}{H} \cdot t$$

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H}} \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

$\sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H}} = A_5$  とおくと、 $A_5$  は CO<sub>2</sub> 濃度が 5% の場合の中性化速度係数となる。

$$x = A_5 \sqrt{t}$$

**(2) 仕上塗材がある面**

仕上塗材がある場合、材齢 t にコンクリートの表面から深さ x の位置まで中性化が進行した定常状態において、深さ方向に直角な面の面積 S あたりを Δt 時間に仕上塗材を拡散してコンクリート表面に達する二酸化炭素の量 ΔCO<sub>2</sub> は式(6)で表される。また、中性化したコンクリート中を拡散する二酸化炭素の量、さらに、未中性化域で反応する二酸化炭素の量 ΔCO<sub>2</sub> は式(7)、式(8)で表される。

$$\Delta CO_2 = D_f \cdot \frac{C_0 - C'}{d_f} \cdot S \cdot \Delta t \quad (6)$$

$$\Delta CO_2 = D_c \cdot \frac{C'}{x} \cdot S \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$\Delta CO_2 = \Delta x \cdot S \cdot H \quad (8)$$

ここに、C<sub>0</sub> : 仕上塗材表面の CO<sub>2</sub> 濃度(式(3)におけるコンクリート表面の CO<sub>2</sub> 濃度と同じ)、C' : 仕上塗材とコンクリートとの界面の CO<sub>2</sub> 濃度、D<sub>f</sub> : 仕上塗材の CO<sub>2</sub> 拡散係数、d<sub>f</sub> : 仕上塗材の樹脂塗膜厚さ

式(6), (7), (8)の二酸化炭素の量が等しいことより

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{D_c \cdot C'}{H \cdot x} = \frac{D_c}{H} \cdot \frac{D_f}{D_f \cdot x + D_c \cdot d_f} \cdot C_0$$

Δt → 0 とすれば次の微分方程式が得られる。

$$(D_f \cdot x + D_c \cdot d_f) \frac{dx}{dt} = \frac{D_c \cdot D_f \cdot C_0}{H}$$

仕上塗材側は、促進中性化試験開始時に深さ d<sub>0</sub> まで中性化が進行しているから t=0 のとき x=d<sub>0</sub> として、両辺を積分する。

$$\int_{d_0}^x (D_f \cdot x + D_c \cdot d_f) dx = \int_0^t \frac{D_c \cdot D_f \cdot C_0}{H} dt$$

$$\frac{1}{2} D_f \cdot x^2 + D_c \cdot d_f \cdot x = \frac{D_c \cdot D_f \cdot C_0}{H} \cdot t + \frac{1}{2} D_f \cdot d_0^2 + D_c \cdot d_f \cdot d_0$$

$$\left(x + \frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right)^2 = \frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H} \cdot t + \left(d_0 + \frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right)^2$$

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H} \cdot t + \left(d_0 + \frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right)^2} - \frac{D_c \cdot d_f}{D_f}$$

$$x = \sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H}} \left\{ \sqrt{t + \frac{H}{2 \cdot D_c \cdot C_0} \left(d_0 + \frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right)^2} - \sqrt{\frac{H}{2 \cdot D_c \cdot C_0}} \left(\frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right) \right\} \quad (9)$$

$$\sqrt{\frac{2 \cdot D_c \cdot C_0}{H}} = A_5, \sqrt{\frac{H}{2 \cdot D_c \cdot C_0}} \left(\frac{D_c \cdot d_f}{D_f}\right) = R_5, \frac{D_c \cdot d_f}{D_f} = B \text{ とおくと,}$$

式(9)は式(10)のように表される。

$$x = A_5 \left\{ \sqrt{t + \frac{1}{A_5^2} (d_0 + B)^2} - \frac{B}{A_5} \right\} \quad (10)$$

切断面側の促進中性化試験の結果より、式(5)の A<sub>5</sub> が求まり、この A<sub>5</sub> の値を式(10)に代入して、式(10)の B および d<sub>0</sub> を最小二乗法により求める。また、A<sub>5</sub> と B から R<sub>5</sub> が求まる。

なお、仕上塗材が施されたコンクリートの中性化進行については、t=0 のとき x=0 で仕上塗材が中性化期間中に劣化しないものとした場合、中性化深さは式(11)で表せ、式(11)の中性化抵抗 R は、式(12)で表せる。

$$X = A \left( \sqrt{t + R^2} - R \right) \quad (11)$$

$$R = \frac{D_c}{\left(\frac{D_f}{d_f}\right)} \cdot \frac{1}{A} \quad (12)$$

従って、促進中性化試験で求めた R<sub>5</sub> は、築年数 37 年時点での促進中性化試験条件における中性化抵抗(√週)と言える。

**3. 調査結果**

**3. 1 促進中性化試験結果**

促進中性化試験の結果を表-3、図-5に示す。なお、試験開始時の中性化深さの測定値は、仕上塗材面についてはドリル法による中性化深さの測定値、切断面については試験対象面が梁の内部であり中性化していないため 0mm とした。各材齢毎、異なるコア供試体により中性化深さを測定しているため、ばらつきが大きいものの、材齢が進むにつれて中性化深さが大きく

なる傾向を示した。切断面および仕上塗材面の各材齢の中性化深さの測定結果より、 $A_5$ 、 $B$ 、 $d_0$ 、および  $R_5$  を最小二乗法により求めた結果、 $A_5=8.92\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$ 、 $B=22.16\text{mm}$ 、 $d_0=16.04\text{mm}$ 、 $R_5=2.48\sqrt{\text{週}}$  となった。

3. 2 仕上塗材の透気係数測定結果

透気係数  $K$  の調査結果を表-4 に示す。

仕上塗材の拡散係数  $D_f$  は、式(12)より式(13)で表せる。

$$D_f = \frac{D_c}{A_5 \cdot R_5} \cdot d_f \quad (13)$$

仕上塗材の拡散係数については、既報 4)において、仕上塗材の透気係数と相関が認められることを報告した。既報 3、4)では、劣化していない仕上塗材を施した試験体を用い、促進中性化試験結果より求めた中性化抵抗を式(12)に代入して求めた仕上塗材の拡散係数と、透気係数の測定結果を式(2)に代入して求めた仕上塗材の透気係数の関係について考察を行った。既報 3、4)における透気係数の測定結果より算出した仕上塗材の拡散係数と透気係数の関係を図-6 に示す。図-6 の結果は、劣化していない仕上塗材を施した試験体によるものであるが、劣化した仕上塗材についても、仕上塗材の拡散係数と透気係数の関係は、同様であると仮定すると、仕上塗材の拡散係数  $D_f$  は、式(14)により算出できる。

$$D_f = 1.2538 \cdot K_f^{0.253} \quad (14)$$

ここに、 $D_f$ : 仕上塗材の拡散係数( $\times 10^{-7}\text{cm}^2/\text{s}$ )、 $K_f$ : 仕上塗材の透気係数( $\times 10^{-20}\text{m}^2$ )

式(2)、式(13)、式(14)より、式(15)が成り立つ。

$$1.2538 \cdot \left[ \frac{K_c \cdot d_f}{(K_c/K - 1)L_{c+f} + d_f} \right]^{0.253} = \frac{D_c}{A_5 \cdot R_5} \cdot d_f \quad (15)$$

$K_c$ 、 $K$ 、 $L_{c+f}$  は透気係数の測定結果より、 $A_5$ 、 $R_5$  は促進中性化試験結果より求まる。 $d_f$  については、筆者らが行った既往の実験式 8)より求めた。筆者らは、カーボンアークランプ式の耐候性促進試験機により劣化させた仕上塗材を施したコンクリートの促進中性化試験を行い、仕上

表-3 促進中性化試験結果

促進材齢 (週)	中性化深さ(mm)	
	仕上塗材面	切断面
0(試験開始時)	18.40(ドリル法)	0.00
4	18.62	11.55
8	17.74	17.59
13	33.09	42.95
26	36.83	44.55

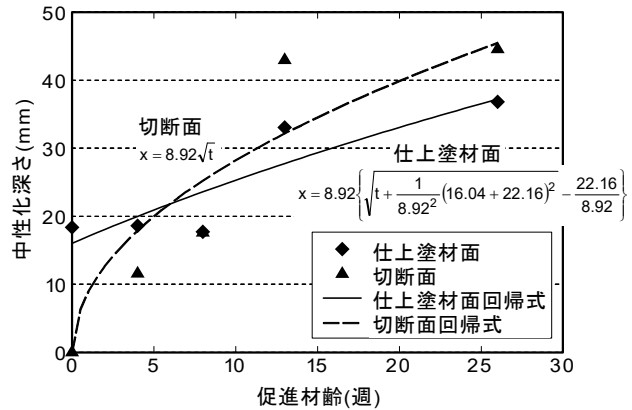


図-5 拡散理論に基づいた中性化進行

表-4 透気係数調査結果

調査部位	透気係数 ( $\text{m}^2$ )	試験の影響を受ける深さ (mm)	仕上塗材の透気係数*
			( $\text{m}^2$ )
2F 梁	屋外	K	$1.21 \times 10^{-16}$
			$7.48 \times 10^{-17}$
			$3.86 \times 10^{-16}$
			$8.84 \times 10^{-17}$
	平均	$1.68 \times 10^{-16}$	
屋内	$K_c$	251.1	

※: 仕上塗材の透気係数は後述の  $d_f$  の値を用いて算出した。

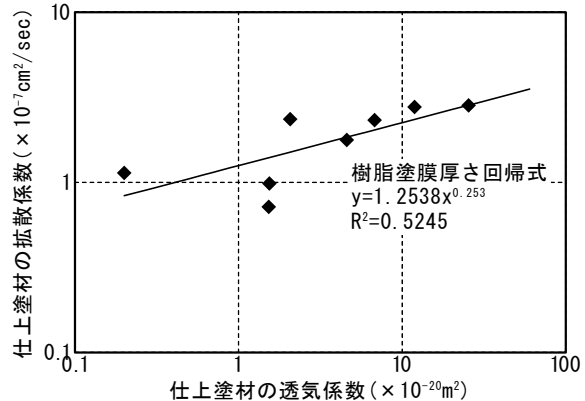


図-6 仕上塗材の拡散係数と透気係数の関係

塗材の劣化により中性化抑制効果が低下することを明らかにし、中性化抵抗を樹脂塗膜厚さで除した樹脂塗膜厚さに対する中性化抵抗と劣化年数との関係は、式(16)、式(17)で表されることを報告した 8)。

$$\frac{R_5}{d_f} = -0.0098t + 0.088 \quad [t \leq 6] \quad (16)$$

$$\frac{R_5}{d_f} = -0.0018t + 0.041 \quad [6 < t \leq 12] \quad (17)$$

ここに、 $R_5$ ：中性化抵抗(√週)、 $d_f$ ：樹脂塗膜厚さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ ：劣化年数(年)

劣化年数 12 年以降も劣化年数 6 年から 12 年と同じ割合で樹脂塗膜厚さに対する中性化抵抗が低下していくと仮定すると、劣化年数 23 年で樹脂塗膜厚さに対する中性化抵抗は 0 となる。従って、改修を行った 33 年時点での改修前の仕上塗材については、経年劣化が生じ、中性化抑制効果が期待できないと考えられるので、改修前の仕上塗材の樹脂塗膜厚さは 0 と仮定した。すると、37 年時点での中性化抵抗は、改修後の仕上塗材の中性化抵抗と見なせ、改修後 4 年目の中性化抵抗となる。促進中性化試験結果より求めた中性化抵抗と改修からの年数を式(16)に代入し、改修後の仕上塗材の樹脂塗膜厚さ  $d_f$  を算出すると  $50.5\mu\text{m}$  であった。改修後の仕上塗材(防水形外装薄塗材 E)の樹脂塗膜厚さは、後述する複層塗材 E の樹脂塗膜厚さよりも薄くなっており、仕上塗材の塗布量が標準塗布量よりも少なかったと推察される。

以上より式(15)における未知数は、コンクリートの拡散係数  $D_c$  のみとなり、算出すると  $11.4 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$  となった。ここで、コンクリートの拡散係数  $D_c$  は、中性化速度係数 A の 2 乗に比例し、また同水セメント比の軽量コンクリートの中性化速度係数は、普通コンクリートの 1.2 倍<sup>9)</sup>とされているので、軽量コンクリートの拡散係数は、普通コンクリートの 1.44 倍となる。設計基準強度  $225\text{kg}/\text{cm}^2$  に対応する水セメント比は、建築時の JASS 5(1969)<sup>10)</sup>に従って算出すると 64.2%となり、既往の研究<sup>7)</sup>において同程度の水セメント比のモルタル板を用いて測定した拡散係数が  $9.84 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$  であるので、軽量コンクリートの拡散係数は、その 1.44 倍である  $14.2 \times 10^{-5}\text{cm}^2/\text{s}$  であり、促進中性化試験、および透気係数の測定結果から求めた拡散係数とほぼ一致した。従って、透気係数による仕上塗材の中性化抑制効果の評価方法、および既往の実験式による中性化抵抗の経年変化の予測は、妥当であったと考えられる。

#### 4. 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行予測

##### 4.1 中性化抵抗の経年変化

中性化抵抗の経年変化は、式(16)、式(17)で表される。ただし、式(16)、式(17)による中性化抵抗は、炭酸ガス濃度 5%の促進中性化試験の結果から導かれたものなので、実構造物の劣化年数に合わせるために、屋外の炭酸ガス濃度を 0.03%として式(18)により補正し、屋外暴露条件での中性化抵抗の経年変化とした。

$$R = \frac{R_5}{\sqrt{52 \times CO_2 / 5}} \quad (18)$$

ここに、 $R$ ：屋外暴露における中性化抵抗(√年)、 $R_5$ ：促進中性化試験における中性化抵抗(√週)、 $CO_2$ ：屋外の炭酸ガス濃度(0.03%)

建築時の仕上塗材(複層塗材 E)の樹脂塗膜厚さは、今回調査した建物では明らかではなかった。そこで、仕上塗材の樹脂塗膜厚さは、国土交通省の公共建築工事標準仕様書<sup>11)</sup>(以下、標準仕様書)の所要量と建設省の建築工事共通仕様書<sup>12)</sup>(以下、共通仕様書)の塗布量、および国内の主要メーカー4社のカタログの標準塗布量を参考に算出した。仕上塗材の塗布量の標準値を表-5に示す。調査建物の建築時の共通仕様書には塗布量の記述がなかった。一方、共通仕様書に塗布量が記述された昭和 60 年版、および現在の標準仕様書平成 17 年版の所要量を比較して見ると、塗布量に大きな差は見られなかった。従って、調査建物の建築時から、共通仕様書、標準仕様書における塗布量は大きく変化していないと仮定した。また、主要メーカーの標準塗布量は、標準仕様書平成 17 年版の所要量を挟んで、メーカー間で若干の差異が見られる。以上より、塗布量の標準値は、標準仕様書平成

表-5 仕上塗材の塗布量の標準値

		複層塗材 E(kg/m <sup>2</sup> )			
		下塗材	主材基層	主材模様	上塗材
公共建築工事標準仕様書	平成 17 年版	0.10 以上	0.70 以上	0.80 以上	0.25 以上
建築工事共通仕様書	昭和 60 年版	0.10 以上	1.50 以上		0.30 以上
メーカー標準塗布量	最小	0.07	0.40	0.40	0.18
	最大	0.17	0.85	0.85	0.40

17年版の所要量程度と考えられるが、実施工時の施工環境等により生じる塗厚さのばらつきを考慮し、主要メーカーの標準塗布量の最小値とした。一方、主材模様については、凹凸が生じるため塗膜厚さが不均一となり、透気係数は塗膜厚さが薄い凹部分における数値として測定されると考えられるため、凹部分を評価対象とすることとした。テクスチャーの凹部分の塗膜厚さは、平均塗膜厚さの0~60%と報告されているので<sup>13)</sup>、その中央値の30%を主材模様の塗膜厚さとした。以上の塗布量を基に算出した仕上塗材の樹脂塗膜厚さを表-6に示す。

表-6の建築時の仕上塗材の樹脂塗膜厚さ、および前述の改修後の仕上塗材の樹脂塗膜厚さを式(16)、式(17)に代入して算出した仕上塗材の中性化抵抗の経年変化を図-7に示す。

#### 4.2 透気係数による中性化予測

筆者らが提案した仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行モデル<sup>14)</sup>と、中性化深さの実測値の比較を行い、仕上塗材の経年劣化を考慮した透気係数による中性化深さの推定方法の検証を行った。式(19)による仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行予測を図-8に示す。なお、中性化速度係数Aは、促進中性化試験より得られた値を式(20)により補正して用いた。

$$X = A \sqrt{t + R_0^2 + \frac{2}{A} \{ (R_1 - R_0)x_1 + (R_2 - R_1)x_2 + \dots + (R_i - R_{i-1})x_i \} - R_i} \quad (19)$$

ただし、 $i=0$ の時  $X = A \left( \sqrt{t + R_0^2} - R_0 \right)$

ここに、X：時間  $t(t \geq T_i, i=0,1,2,\dots)$  におけるコンクリートの中性化深さ(mm)、A：中性化速度係数(mm/√年)、 $R_0$ ：劣化していない仕上塗材の中性化抵抗(√年)、 $R_i$ ：時間  $t(T_i \leq t \leq T_{i+1})$  における仕上塗材の中性化抵抗(√年)、ただし、

$$R_i = \frac{D_c}{\left( \frac{D_{fi}}{d_f} \right)} \cdot \frac{1}{A}, \quad D_{fi} : \text{時間 } t(T_i \leq t \leq T_{i+1}) \text{ における}$$

る仕上塗材の拡散係数(mm<sup>2</sup>/年)、 $D_c$ ：コンクリートの拡散係数(mm<sup>2</sup>/年)、 $d_f$ ：仕上塗材の塗膜厚さ(mm)、 $x_i$ ：時間  $t(T_i \leq t \leq T_{i+1})$  における中性化深さ(mm)

表-6 仕上塗材の樹脂塗膜厚さ

		複層塗材 E(建築時の仕上塗材)		
		最小	最大	標準※
設定塗布量 (kg/m <sup>2</sup> )	下塗材	0.07	0.17	0.10
	主材基層	0.40	0.85	0.70
	主材模様	0.12	0.26	0.24
	上塗材	0.18	0.40	0.25
理論樹脂塗膜厚さ (μm)	下塗材	24.0	58.3	34.3
	主材基層	38.7	82.1	67.7
	主材模様	11.6	24.6	23.2
	上塗材	46.3	102.9	64.3
	総塗膜厚さ	120.6	267.9	189.5

※：標準の数値は公共建築工事標準仕様書の所要量による塗膜厚さ

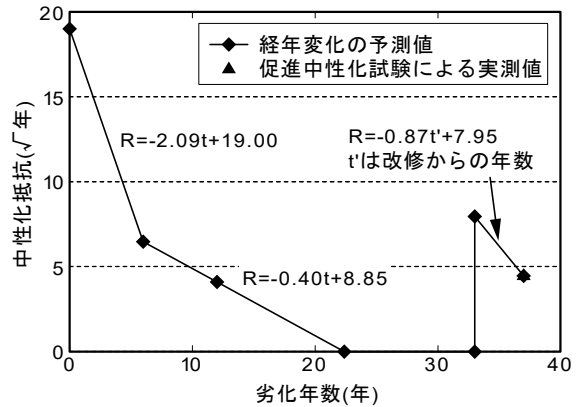


図-7 中性化抵抗の経年変化

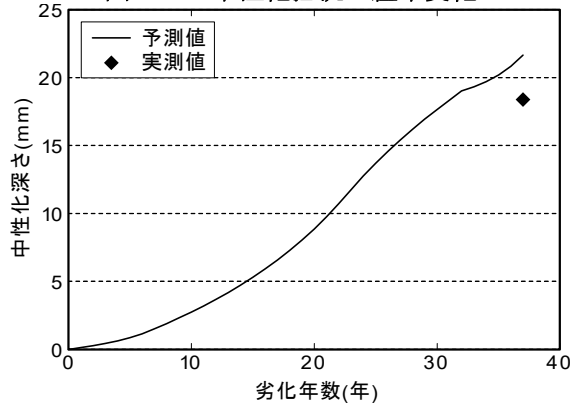


図-8 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行予測

$$A = \left( \sqrt{52 \times CO_2 / 5} \right) \cdot A_5$$

ここに、A：屋外暴露における中性化速度係数(mm/√年)、 $A_5$ ：促進中性化試験における中性化速度係数(mm/√週)、 $CO_2$ ：屋外の炭酸ガス濃度(0.03%)

透気係数により予測した築年数 37 年の中性化深さと、ドリル法により測定した中性化深さとの差は 3.3mm であり、ほぼ一致していた。従って、本建物で調査した仕上塗材については、透気係数の測定結果を用いて推定した中性化抵抗の経年変化より、中性化進行を予測できることが分かった。



## 5. まとめ

本研究結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 促進中性化試験結果、および中性化抵抗の経年変化の予測値より改修後の仕上塗材の樹脂塗膜厚さを算出した結果、改修後の仕上塗材の塗布量は標準塗布量よりも少なかったと推察された。
- (2) 促進中性化試験結果、透気係数の測定結果、および中性化抵抗の経年変化の予測値により算出したコンクリートの拡散係数は、既往の実験値とほぼ一致しており、透気係数による仕上塗材の中性化抑制効果の評価方法、および中性化抵抗の経年変化の予測は、妥当であったと考えられる。また、仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化進行を予測する場合、中性化抵抗の経年変化は図-7の回帰式で表せる。
- (3) 透気係数の測定結果を用いて推定した中性化抵抗の経年変化より予測した中性化深さは、実測の中性化深さとほぼ一致しており、透気係数の測定から中性化抵抗を推定でき、中性化進行を予測できることが分かった。

## 謝辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導下さいました宇都宮大学の榊田佳寛教授には、厚く御礼申し上げます。また、ご助言を頂きました宇都宮大学の李榮蘭助教に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 建設大臣官房技術調査室監修, (財)国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986
- 2) R.J.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992
- 3) 唐沢智之ほか: 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, pp.645-650, 2008

- 4) 唐沢智之ほか: 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, 第63号, pp.435-442, 2009
- 5) 唐沢智之, 榊田佳寛: 既存建物の仕上塗材の透気係数と中性化深さの調査に基づく仕上塗材の中性化抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, 第661号, pp.449-454, 2011.3
- 6) 日本非破壊検査協会: ドリル削孔粉を用いたコンクリート構造物の中性化深さ試験方法, NDIS 3419-1999
- 7) 河野政典ほか: 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, 第62号, pp.318-325, 2008
- 8) 河野政典ほか: 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
- 9) 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(案)・同解説, pp.92-108, 2004
- 10) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, 鉄筋コンクリート工事, pp.127-146, 1969
- 11) 国土交通省: 公共建築工事標準仕様書建築工事編, pp.152-154, 平成17年版
- 12) 建設省: 建築工事共通仕様書建築工事編, pp.196-197, 昭和60年版
- 13) 河野政典ほか: 仕上塗材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果評価手法の暴露データによる検証, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.9-14, 2006.11
- 14) 李榮蘭ほか: 仕上塗材の劣化がコンクリートの中性化進行に及ぼす影響に関する解析的検討, セメント・コンクリート論文集, 第63号, pp.443-449, 2009