

# 論文 仕上げ材を有する既存構造物に対する非破壊透気試験による中性化抑制効果の評価に関する研究

庭野 究\*1・今本 啓一\*2・佐藤 幸恵\*3・陣内 浩\*4

**要旨：**既存打ち放し鉄筋コンクリート構造物における中性化深さと表層透気性には一定の相関が見られるとの知見をふまえ、本研究では、仕上げ材を有するコンクリートの中性化抑制効果を表層透気性の観点から評価することを目的に、仕上げ材を施した供試体の促進中性化試験と透気試験を実施した。また、仕上げ材が施された既存鉄筋コンクリート構造物を対象に透気試験およびコアの採取を行い、中性化深さを測定した。室内試験の結果、透気係数および仕上げ厚さと各供試体の中性化率に一定の相関が見られた。また既存構造物においても、建物ごとで透気性と中性化率に一定の相関が認められ、仕上げ材の中性化抑制効果について表層透気性による評価が可能であることが示唆された。

**キーワード：**ダブルチャンバー法、既存構造物、仕上げ材、中性化抑制効果、透気性能

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価は一般に鉄筋の腐食度合いによって決定される。鉄筋腐食の評価指標の一つとしてかぶりコンクリートの中性化深さが挙げられるが既存構造物における中性化の進行を把握するためにはコンクリートコアの採取等、構造物に損傷を与える試験が必要となる。そこで近年、建物に損傷を与えない非破壊試験を用いた耐久性評価手法の確立が求められている。これまでの調査の結果から、打ち放しの条件に限り透気係数とコンクリートの中性化には建物ごとに一定の相関が認められ、中性化の進行を表層透気性による評価の可能性が示唆されている<sup>1)</sup>。一方、表層透気試験は仕上げを含めたコンクリートの表層部の透気性能を評価しているため、仕上げの種類や仕上げの厚さ、躯体コンクリートの情報を正確に評価することが難しいとされている。しかし実際の建築物は、仕上げ材を有するケースが大半であり、既存構造物の耐久性評価において、各種仕上げ材による中性化の進行への影響を無視することができない。一般的に仕上げ材は中性化の原因となる炭酸ガスの浸入を抑制できるとされ、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」や「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」などにおいても仕上げ材の中性化抑制効果について記載されている。しかしその抑制効果について検証した例は少なく、またその具体的な評価方法についての規定もない<sup>2)</sup>。そこで本研究は仕上げ材の中性化抑制効果を透気性能の観点から評価することを目的に中性化抑制効果を室内実験および実地調査で明らかにするとともに、その評価方法についての検討を行った。

## 2. 透気試験概要

図-1にダブルチャンバー法（トレント試験機）の概要を示す。ダブルチャンバー法は透気性測定部の内部チャンバーと圧力調整用の外部チャンバーから構成されている。チャンバー内圧力を特定の値まで初期減圧した後、特定圧力に到達するまでの時間から式(1)を用い透気係数を算出する。外部チャンバーの圧力を内部チャンバーの圧力にコントロールすることにより内部チャンバーへの空気のリークを防ぐ構造となっている。そのため測定対象の表面状態の影響を受けづらいのが特徴である<sup>1)</sup>。

$$K_t = \left( \frac{V_c}{A} \right) \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot P_a} \cdot \left\{ \frac{\ln \frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}} \right\} \quad (1)$$

$K_t$ :	透気係数	[m <sup>2</sup> ]
$V_c$ :	内部チャンバー体積	[m <sup>3</sup> ]
$A$ :	内部チャンバー断面積	[m <sup>2</sup> ]
$\mu$ :	空気の粘性	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$ :	空隙率 (0.15)	-
$P_a$ :	外気圧	[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta P$ :	$t_0 \sim t_f$ 間の圧力増分	[N/m <sup>2</sup> ]
$t_f$ :	計測の終了時間	[s]
$t_0$ :	計測開始時間 (60秒)	[s]



図-1 透気試験概要

\*1 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)  
 \*2 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)  
 \*3 東京都市大学 工学部建築学科 講師 工博 (正会員)  
 \*4 大成建設(株)技術センター 主席研究員 工博 (正会員)

### 3. 室内実験

#### 3.1 実験概要

本項では仕上げ材の中性化抑制効果を評価する手法の提案を目的として、[シリーズ I] では仕上げ材の種類を、[シリーズ II] ではモルタルの仕様を変動要因として促進中性化試験を行うとともに、各材齢で透気試験を実施した。基材コンクリートの調合を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。作製したコンクリート供試体は作製翌日に脱型し、その後は材齢 28 日まで 20℃封かん養生を行い、20℃60%の恒温恒湿室で 28 日間乾燥させた。乾燥後、側面の一面に仕上げを行い、養生期間を含め、材齢 84 日まで 20℃60%の恒温恒湿室に存置した。表-3 および表-4 に各種仕上げ材の仕様を示す。供試体に用いた仕上げ材は、国内で多く使われているモルタル塗り仕上げ、外断熱工法、仕上げ塗材、タイル仕上げの 4 種を対象とし、促進中性化試験は、JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じ、試験開始材齢は、基材コンクリートの材齢 84 日からとした。また促進中性化試験開始前に透気性  $K_t$ (initial 値)の測定を行い、透気性の観点から中性化抑制効果について検討を行った<sup>2)</sup>。

表-1 使用材料

W/C (%)	s/a (%)	質量(kg/m <sup>3</sup> )					
		C	W	S1	S2	G1	G2
60	48.5	287	172	613	266	655	289

表-3 各種仕上げ材仕様

仕上げ材種類	供試体記号	仕様
打ち放し	C1	なし
モルタル仕上げ	M-1~M-10	M-1, M-2: 下地調整材 C-1 (1.0mm) M-3, M-4: 下地調整材 C-2 (2.0mm) M-5, M-6: 下地調整材 CM-1 (1.0mm) M-7, M-8: 下地調整材 CM-2 (2.0mm) M-9: 下塗り+上塗り(10mm) M-10:下塗り+上塗り(15mm)
外断熱工法	IN-1~IN-5	IN-1, IN-2: ビーズ法ポリスチレン 4号(30mm) IN-3: 押出法ポリスチレン 3種(30mm) IN-4, IN-5: ウレタンフォーム A種 2種 2号
仕上げ塗材	CM-1~CM-5	CM-1, CM-2: 複層塗材 CM-3: 厚付け仕上げ塗材 CM-4, CM-5: 薄付け仕上げ塗材 (CM-1~CM-5 の下地は M1)
タイル仕上げ	T-1~T-5	T-1, T-2, T-3: 吸水率 I 類(95×45mm) T-4, T-5: 吸水率 II 類(108×60mm)

表-4 仕上げモルタル仕様

仕上げ材種類	供試体記号	セメントタイプ	仕様
打ち放し	C1-2	なし	なし
モルタル仕上げ	M11-1~M23-1	普通タイプ	M11-1~M13-3: 塗厚 10mm, ボリマー量 3% M12'-1~M12'-3: 塗厚 10mm, ボリマー量 6% M17-1: 塗厚 5mm, ボリマー量 3% M18-1: 塗厚 20mm, ボリマー量 3% M19-1: 塗厚 30mm, ボリマー量 3% M20-1: 塗厚 30mm, ボリマー量 6%
		早強タイプ	M14-1~M14-3: 塗厚 10mm, ボリマー量 3% M21-1: 塗厚 30mm, ボリマー量 3%
		微粒子タイプ	M15: 塗厚 10mm, ボリマー量 3% M22-1: 塗厚 30mm, ボリマー量 3%
		軽量タイプ	M16: 塗厚 10mm, ボリマー量 3% M23-1: 塗厚 30mm, ボリマー量 3%

表-2 使用材料

水 (W)	上水道水
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1 (S1)	富津産 天然砂 (表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> FM. 2.20)
細骨材 (S2)	秩父産 砕砂 (表乾密度2.63g/cm <sup>3</sup> FM. 3.20)
粗骨材(G1)	大月産 砕石 (表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> 実績率60%)
粗骨材 (G2)	秩父産 砕石 (表乾密度2.70g/cm <sup>3</sup> 実績率60%)

#### 3.2 実験結果および考察

##### 3.2.1 仕上げ材の中性化抑制効果の評価

中性化抑制効果は式 (2) に示す中性化率を用い、仕上げ材の中性化抑制効果を透気係数  $K_t$  からどの程度評価可能か。また透気試験を用いた評価における課題点について検討した。

$$R = \frac{A_f}{A_{cr}} \quad (2)$$

R:	中性化率	[-]
A <sub>f</sub> :	中性化速度係数 (仕上げ有)	[mm/√year, week]
A <sub>cr</sub> :	中性化速度係数 (打放し)	[mm/√year, week]

##### 3.2.2 各種仕上げ材の透気性と中性化抑制効果

図-2 に各種仕上げ材を施した供試体の透気係数  $K_t$  (initial 値)と促進材齢 26 週における中性化率の関係を示す。透気係数が低い供試体ほど中性化率が低い傾向にあることが分かる。特にモルタル、複層仕上げ塗材を施した供試体でその傾向が顕著であった。一方タイル仕上

げ、外断熱材の供試体においては透気係数が高い場合でも中性化が抑制される結果となった。タイル仕上げにおいては中性化深さの測定がタイル直下部分で計測したのに対し、透気試験がモルタル目地部を含め評価をしているため、目地モルタルの品質の影響を受けたためであると考えられる。また外断熱工法については断熱材の厚みにより、それ自体の透気性が高い場合でも中性化が抑制されたと考えられる。以上のことから、塗材およびモルタルについては透気係数の観点からある程度中性化抑制効果を評価できるが、仕上げ材の種類によっては他の要因を加味して評価する必要があると考えられる。

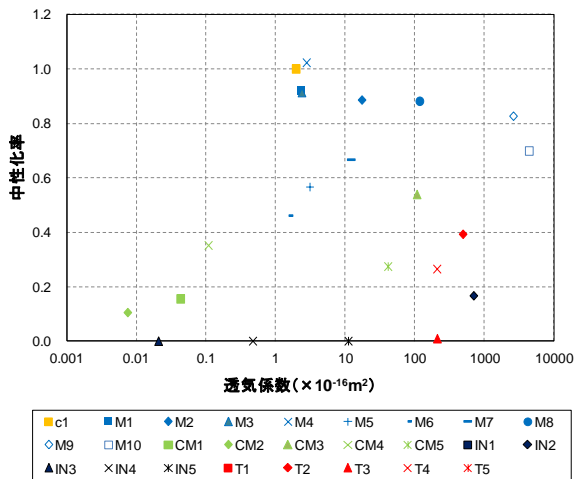


図-2 透気係数-中性化率の関係 [シリーズ I]

### 3.2.3 仕上げモルタルの仕様の違いについての検討

仕上げモルタルの仕様の違いが中性化抑制効果に及ぼす影響について検討を行った。図-3 にモルタルの仕様を変動要因とした供試体の透気係数  $K_t$  (initial 値) と促進材齢 26 週における中性化率の関係を示す。透気係数が大きくなるにつれて中性化率が增大する傾向にあることがわかる。両者の関係にはバラツキが見られるが、これはモルタルの仕上げ厚が異なるため、厚みによる影響を透気試験により捉えきれていないためであると考えられる。また一部、M23-1 や M13-3 (図-3 中○印) のように、透気係数が非常に高いにも関わらず中性化の進行が抑制されている供試体が見られるが、これは写真-1 に示すように、基材コンクリートに施された仕上げモルタルの表面に発生したひび割れからチャンパー内に空気がリークしたためであると考えられる。図-4、図-5 に塗厚の違いによる中性化率の比較を示す。図-4 よりモルタルの仕様に関わらず塗厚が増すほど中性化の進行が抑制されていることがわかる。また図-5 より塗厚が 20mm 以上になるとモルタルの種類や緻密さに関わらず中性化が抑制されている。よってモルタルの塗厚がある程度確保されている場合、仕上げモルタルの粗密さに関

わらず中性化抑制効果を見込むことができる。以上のことから透気性能以外に塗厚による中性化抑制効果も加味した評価方法の検討が必要があると考えられる。

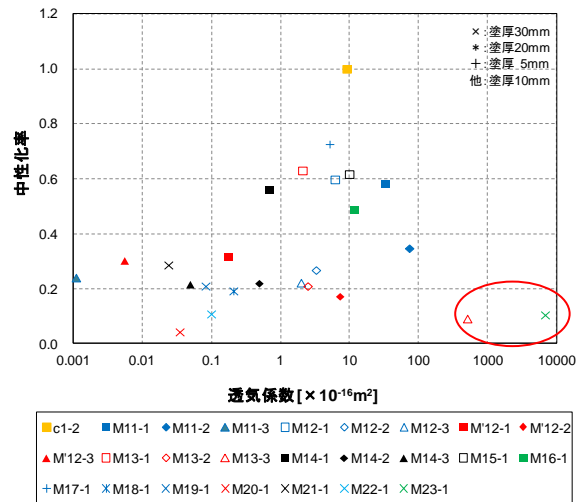


図-3 透気係数-中性化率の関係 [シリーズ II]

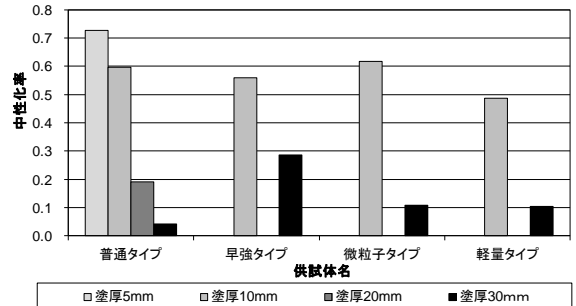


図-4 各仕様ごとのモルタル厚と中性化率の関係

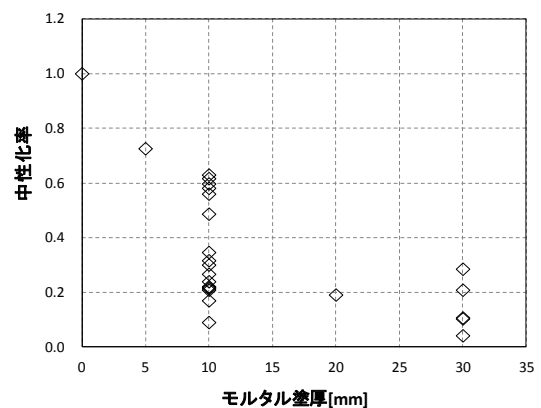


図-5 モルタル塗厚-中性化率の関係

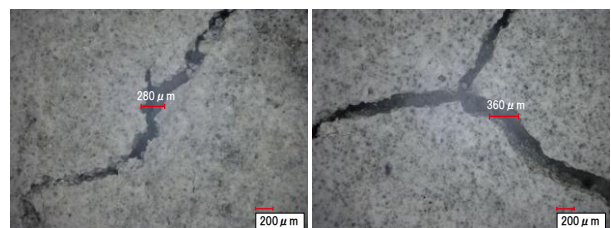


写真-1 マイクロスコープによる供試体表面写真  
(左: M13-3 右: M23-1)

### 3.4 塗厚および透気係数による評価

前項において塗厚が厚いほど中性化抑制効果が高くなることが示された。しかし透気試験単体による評価では仕上げの厚さによる抑制効果の評価をすることは難しい。そこで、透気係数と塗厚によって中性化率を評価する事を試みた。図-6<sup>3)</sup>から、①コンクリートとモルタル境界面の炭酸ガス濃度は塗厚に比例して減少する。また、②透気係数が主に仕上げ材の拡散係数を評価している、と仮定し、式(3)から塗厚と透気係数の中性化に及ぼす影響を1:1の関係にあると考えた。以上のことから、図-7に示すように、塗厚/透気係数(d/Kt)を評価指標として中性化率を評価した。また打ち放しの供試体についてはd/Kt=0.001とした。図-7より透気係数単体で評価を行うよりも、全体の傾向をつかめているように見受けられる。

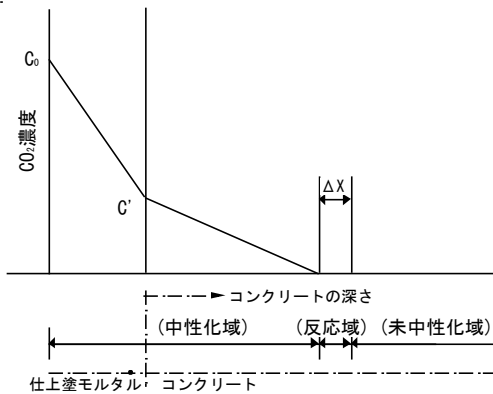


図-6 モルタル仕上げにおけるCO<sub>2</sub>拡散の模式図<sup>3)</sup>

$$X = \sqrt{\frac{2D \cdot C}{H}} \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

- x: コンクリートの中性化深さ [mm]
- C: 表面の炭酸ガス濃度 [mol/mm<sup>3</sup>]
- D: コンクリートの拡散係数 [mm<sup>2</sup>/year, week]
- H: 単位体積当たりのCa(OH)<sub>2</sub>量 [mol/mm<sup>3</sup>]

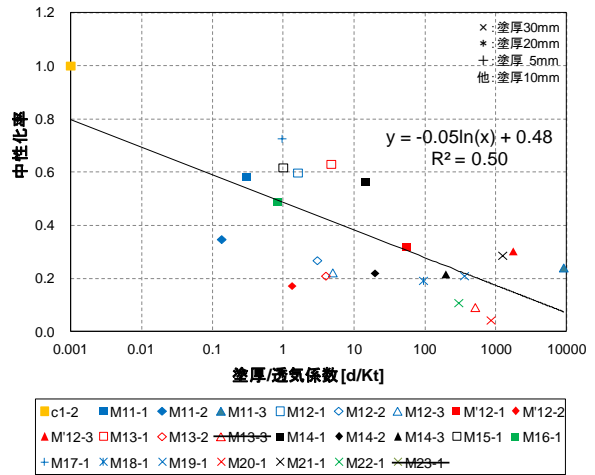


図-7 d/Kt-中性化率の関係 [シリーズ II]

### 3.5 透気試験の実施時期

図-8に[シリーズII]における各促進材齢ごとの透気試験結果を示す。材齢が進むにつれ測定不能となるケースや透気係数が異常に高い値を示すケースが見られるようになる(図-8中□印)。これは基材コンクリートに施されたモルタルの収縮が、基材によって拘束されることにより、モルタル表面にひび割れが発生するためであると考えられる(写真-1)。なお、これら供試体は目視においてもひび割れが確認された。中性化は供試体表面からの平均的な深さによって評価される一方、透気試験はひび割れ等局所的欠陥の影響を受けるため、モルタル塗り仕上げ材の評価にあたっては、モルタルの収縮ひび割れが発生しない時期、例として仕上げ後1カ月程度を目安として試験を実施し、中性化抑制効果の評価を行うのが望ましいと考えられる。ひび割れの無い供試体は材齢の進行に関わらず、概ね一定の数値の範囲となっていることから、ひび割れが確認されない測定対象に限っては時間が経過しても十分に評価可能であると考えられる。

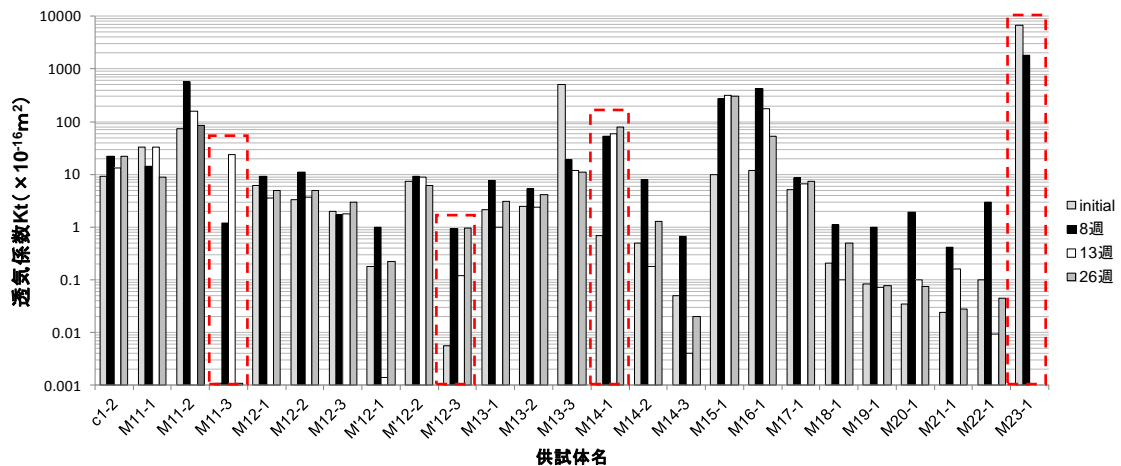


図-8 透気試験結果

#### 4. 既存鉄筋コンクリート構造物

##### 4.1 調査概要

表-5 に調査対象とした既存鉄筋コンクリート構造物の概要を、写真-2 に調査対象の写真を示す。既存構造物において透気試験実施箇所と同一箇所にてコアの採取もしくはドリル孔削法により中性化深さの測定を行った。また調査対象 TU, HS-A, HK のコアについてはモルタル塗厚の計測も行った。

##### 4.1.2 室内外の中性化速度係数補正について

実環境下では、室内と室外の炭酸ガス濃度に差があるため、室内外の炭酸ガス濃度の差を考慮し、式(4)により中性化速度係数の補正を行い、透気係数と中性化深さの関係を検討した。なおCO<sub>2</sub>濃度の測定データがない対象については、これまでの調査の平均的な値を採用し、室内側を2000ppm、室外側を500ppmとした<sup>4)</sup>。

$$X = A \cdot \sqrt{\frac{CO_2 \text{ in}}{CO_2 \text{ out}}} \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

- x : コンクリートの中性化深さ [mm]
- A : 中性化速度係数 [mm<sup>2</sup>/year]
- CO<sub>2 in</sub> : 室内側炭酸ガス濃度 [ppm]
- CO<sub>2 out</sub> : 室外側炭酸ガス濃度 [ppm]

##### 4.2 結果および考察

##### 4.2.2 打ち放し部位における中性化進行予測

図-9 に調査対象の打ち放し部位における透気係数と中性化速度係数の関係を示す。透気係数 Kt が 1.0 × 10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup> 以下の供試体では中性化がほぼ進まずこの範囲

においては中性化の進行は極めて小さいと判断して良いと考えられる。Kt 値が 1.0 × 10<sup>-16</sup>m<sup>2</sup> 以上の範囲については透気係数の増加に伴い中性化速度係数が大きくなる傾向がある。また調査対象全体で比較するとバラツキが大きい、図-10 のように、調査建物ごとに比較・検討をすることで、比較的良い相関が見られる事がわかる。以上のことから建物ごとに透気係数と中性化の進行を検討していくことで中性化の進行を透気試験によって精度良く予測することができると考えられる。

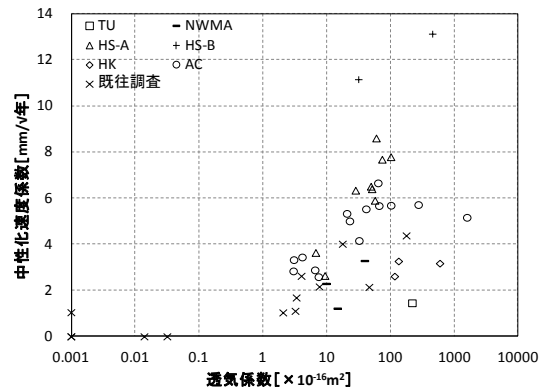


図-9 透気係数-中性化速度係数の関係

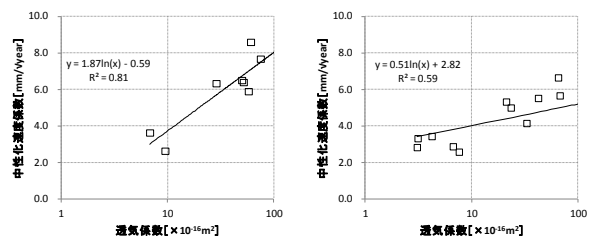


図-10 透気係数-中性化速度係数の関係  
(左: HS-A 右: AC)

表-5 調査対象概要

名称	記号	詳細	
		竣工年 (測定時材齢)	仕上げ概要
東京都市大学 1 号館	TU	1966 年(46)	(外装) モルタル下地+塗装仕上げ (内装) モルタル下地+塗装仕上げ
公営団地 K 住宅	HK	既存: 1961 年(49) 増築: 1992 年(18)	(外装) 既存: モルタル下地+吹付けリシン仕上げ (外装) 増築: モルタル下地+吹付けリシン仕上げ
公営団地 S 団地	HS-A	A 棟: 1968 年(41)	(外装) モルタル下地+吹付けリシン仕上げ
	HS-B	B 棟: 1969 年(42)	(外装) モルタル下地+吹付けリシン仕上げ
国立西洋美術館本館	NMWA	1959 年(50)	(外装) 打放し仕上げ, モルタル仕上げ
コンクリート供試体	AC	(12~32)	打ち放し (コンクリート実環境曝露供試体)



東京都市大学 1 号館



公営団地 K 住宅



公営団地 S 団地



国立西洋美術館本館

写真-2 調査対象写真

## 4.2 塗厚の違いによる中性化抑制効果について

図-11 に仕上げ材が施された既存構造物の中性化率とモルタルの塗厚の比較を示す。室内実験の項でも述べたが、既存構造物においても、モルタルの塗厚が確保されている場合（本ケースでは約 30mm）、モルタルの品質に関わらず中性化が抑制されていることがわかる。以上の事から塗厚がある程度確保されているものについては、モルタルの品質に関わらず高い中性化抑制効果が見込め、それ以下の塗厚の場合において、仕上げモルタルを含めた部材の透気性の評価が重要であると考えられる。

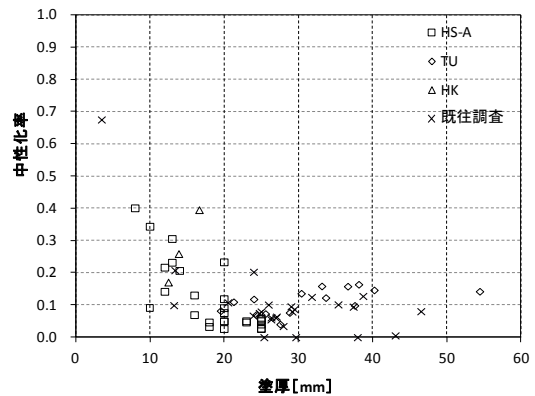


図-11 塗厚—中性化率の関係

### 4.2.3 実環境下における仕上げ材の中性化抑制効果

透気試験が仕上げ材表層部を主に評価し、構造物の躯体コンクリートの品質が均質であるという仮定のもと室内実験と同様に仕上げ材の中性化抑制効果を透気性能と中性化率から検討した。仕上げ材を有する既存構造物の打ち放し部位の中性化測定結果の平均値を基準として中性化率を算出した。図-12 に全測定対象の透気係数と中性化率の関係を示す。図-13 に HS-A, HK (塗厚 20mm 以下) および TU (塗厚 30~60mm) の透気係数と中性化率の関係を示す。図-12 より透気係数が大きくなるほど中性化率が高くなる事がわかる。しかしバラツキが大きいことから調査建物ごとに分けて検討を行った。図-13 より、建物ごとに比較を行うと、透気係数と中性化率の間に高い相関があることが分かる。以上のことから既存構造物における仕上げ材の抑制効果の評価においても、建物ごとに評価を行う事が有用であると考えられる。

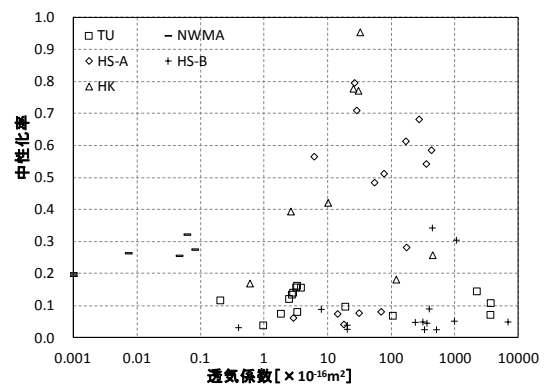


図-12 透気係数—中性化率の関係

## 5. まとめ

- 1) 仕上げ材をモルタル仕上げ、仕上塗材に限定することにより、その中性化抑制効果を透気試験によってある程度評価できると考える。また厚さの要素を加えることにより、より高い精度を得られる可能性がある。
- 2) モルタルの仕様に関わらず塗り厚を増すことにより高い中性化抑制効果が見込め、既存構造物において塗り厚が 30mm を超えるとほぼ中性化が抑制される結果となった。
- 3) モルタル仕上げにおける中性化抑制効果はモルタル厚が支配的要因としてあり、厚さが不足する場合の抑制効果を透気性能の観点から評価していくことが有用であると考えられる。

謝辞：本研究は、「建築基準整備促進事業 26. コンクリート造建築物の劣化対策に関する基準の整備に資する検討」(国住指第 1602-20 号)の一環として実施したものである。ここに記してご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

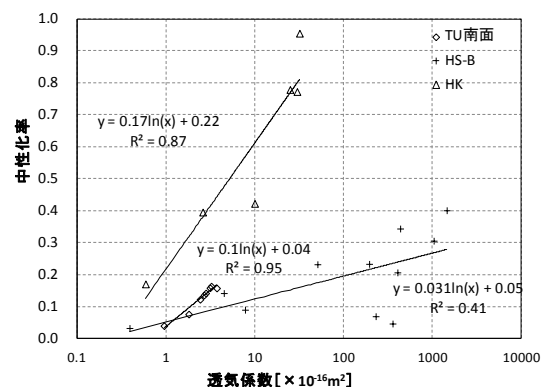


図-13 透気係数—中性化率の関係（建物ごとの検討）

## 参考文献

- 1) RILEM Report 40, Non-Destructive Evaluation of the Penetrability and Thickness of the Concrete Cover, State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 189-NEC "Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover", Edited by R. Torrent and L. Fernandez Luco. 2007.
- 2) 国土交通省：コンクリート造構造物の劣化に関する基準の整備に資する検討 報告書, 2012 年 3 月
- 3) 李榮蘭, 樹田佳寛：表層コンクリートの品質と中性化進行に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集 第 75 巻, 第 649 号, 499-504, 2010 年 3 月
- 4) 田中章夫, 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸：シンポジウムコンクリート構造物の非破壊検査論文集, vol. 4, 63-70, 2012