

論文 透気試験複合法による補修材の中性化抑制効果の評価手法に関する実験的研究

村井辰央*1・今本啓一*2・清原千鶴*3

概要：仕上げ材が施されていることの多い鉄筋コンクリート造建築物において中性化速度評価を正確に行うためには、仕上げ材とかぶりコンクリートの透気性をそれぞれ評価する必要がある。そこで本研究では、実構造物から採取した試験体を対象として、仕上げ材部をダブルチャンバー法、コンクリート部をドリル削孔法により測定した。それぞれの測定結果を複合させた手法により透気抵抗値を算出し、中性化評価方法を提案した。また、各試験体に対して補修を行った後、促進中性化試験を実施することで中性化評価手法の適用性および補修による中性化抑制効果を確認した。

キーワード：仕上げ材、ダブルチャンバー法、ドリル削孔法、複合法、透気性、中性化、補修材

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価の判断材料の1つとして中性化がある。中性化は、かぶりコンクリートを通して進行するが、実構造物において、破壊を伴う内部の中性化状況を確認することは困難である。そこで、表層透気試験から中性化状況を間接的に評価する方法が考えられる。しかしながら、既存の鉄筋コンクリート造建築物のほとんどは仕上げ材が施されている。仕上げ材は中性化抑制効果があり、種類は多岐にわたるが仕上げ材の種類によって中性化抑制効果は異なり、また同一の種類であっても施工方法、環境条件、劣化状況などによっても異なることが考えられる。仕上げ材による中性化抑制効果と透気係数の関係は不明瞭なことが多く、かぶりコンクリートまでの評価がされているとは限らない。

これまで筆者らは先行研究²⁾にて、図-1に示すような仕上げ材付きコンクリートにおける仕上げ材部分の透気性をダブルチャンバー法により測定し、内部のコンクリート部分の透気性をドリル削孔法により測定して評価を行う複合法について検討を行い、実構造物への適用性について検討を行ってきた。複合法においては仕上げ材と内部のコンクリート部分の透気性を個別に評価できるため仕上げ材の劣化状態や補修材ならびに改修後の仕上げ材の中性化抑制効果を検討できるものと考えた。そこで、本研究では築50年程度経過している既存鉄筋コンクリート建築物から採取したコア試験体に対して、複合法を適用し、補修後の中性化抑制効果の評価方法について実験的に検討を行った。

2. 透気試験

2.1 ダブルチャンバー法

ダブルチャンバー法(以下、DC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の独立2

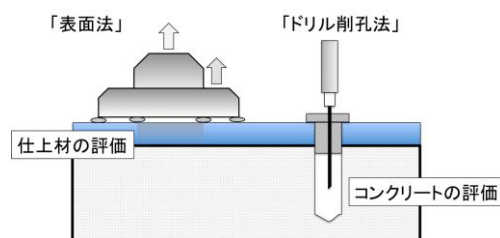


図-1 複合法の概念図²⁾

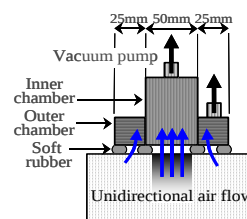


図-2 DC法²⁾

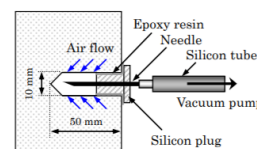


図-3 FIM法²⁾



図-4 調査建物外観(2021年7月)

(左:1号棟 右:2号棟)

重構造物から成り立っている(図-2)。外部と内部の圧力を等しく制御することで、外部から内部のチャンバーに空気の流入を物理的に排除し、シングルチャンバー法などで懸念されるコンクリート表層の脆弱部における影響を根本的に解決した試験方法である。内部チャンバー下からの栓流によるチャンバー内の経過時間と気圧変化量からかぶりコンクリートにおける透気係数および透気深さを式(1)、式(2)より求める。

*1 東京理科大学大学院 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 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 嘱託助教 博士(工学) (正会員)

なお、内部・外部チャンパーをコントロールすることで内部チャンパーにおける一次方向の透気性を評価できる。

$$Kt = \left(\frac{Vc}{A}\right)^2 \cdot \frac{\mu}{2 \cdot \varepsilon \cdot Pa} \cdot \left(\frac{\ln \frac{Pa + \Delta P}{Pa - \Delta P}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right) \quad (1)$$

$$L = \left(\frac{2 \cdot Kt \cdot Pa \cdot t_f}{\varepsilon \cdot \mu}\right)^2 \quad (2)$$

Kt	透気係数	[m ²]
L	透気深さ	[mm]
Vc	内部チャンパーの体積	[m ³]
A	内部チャンパーの断面積	[m ²]
μ	空気の粘性	[Ns/m ²]
ε	空隙率	[－]
Pa	外気圧	[N/m ²]
ΔP	t ₀ ~t _f 間の圧力増分	[N/m ²]
t _f	計測の終了時間	[s]
t ₀	測定開始時間	[s]

2.2 ドリル削孔法

ドリル削孔法(以下、FIM 法)を図-3 に示す。FIM 法は、試験位置に設けたドリル孔(直径 10mm×深さ 50mm)をシリコン栓内で密封して孔内を減圧後、孔内部の圧力が 21.3kPa から 25.3kPa の圧力に戻るまでに要する時間より透気速度(API)を求めることで、かぶりコンクリートの透気性を評価する。削孔することで、仕上げ材による影響を大きく受けることなくコンクリート内部における透気性を評価ができることが示唆されている。算出式を式(3)に示す。

$$API = (25.3 - 21.3) / (t_1 - t_2) \quad (3)$$

API	透気速度	[kPa/s]
t ₁	孔内圧力が 25.3kPa に戻った時間	[s]
t ₂	孔内の圧力が 21.3kPa になった時間	[s]

3. 実構造物調査

3.1 調査概要

本研究で採取した実構造物の概要について表-1 に示す。また、実構造物の外観を図-4 に示す。コア試験体採取時は、M アパート 1 号棟が築 44 年および M アパート 2 号棟が築 58 年であった。2 つの実構造物は隣接しており、1 号棟東面、2 号棟西面の外壁より φ150×120mm のコア試験体を湿式にて 6 本ずつ採取した。採取後は 20℃、60%RH の室内環境下で 2 週間静置し、十分に乾燥させた。

本研究のフローを図-5 に示す。コア採取時にコア孔にフェノールフタレイン 1%溶液を吹き付け、躯体コンクリートの中性化深さを測定し、各コア試験体の初期状態とした。採取後のコア試験体を利用して、側面にフェノールフタレイン 1%溶液を吹き付け、再度中性化深さ

表-1 調査建物概要

名称	構造形式	竣工年	外装仕上げ概要
M アパート 1 号棟	3 階建	1977 年 (2005 年改修)	モルタル下地 +
M アパート 2 号棟	RC 壁式構造	1963 年 (2006 年改修)	吹付け仕上げ

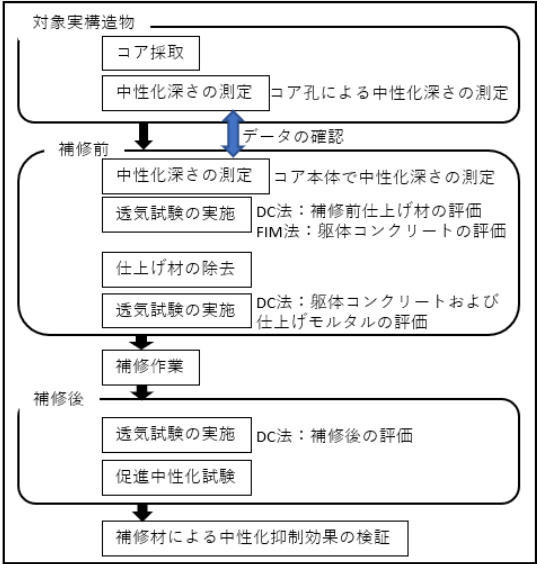


図-5 本研究のフロー

表-2 補修項目

試験体名		補修概要
1 号棟	2 号棟	
M1-1	M2-1	躯体コンクリートのみ
M1-2	M2-2	既存モルタル+既存仕上げ
M1-A	M2-A	既存モルタル+補修材 A
M1-B	M2-B	既存モルタル+補修材 B
M1-C	M2-C	既存モルタル+プライマー
M1-D	M2-D	既存モルタル+既存仕上げ+プライマー

表-3 使用した補修材の特性

種類	主成分	塗布量
補修材 A	1 層 主剤: エポキシ樹脂 硬化剤: ポリアミドアミン	0.2 kg/m ²
	2 層 主剤: ウレタンプレポリマー 硬化剤: ポリアミン	0.5 kg/m ²
	3 層 主剤: アクリルポリオール	0.1 kg/m ²
補修材 B	1 層 主剤: エポキシ樹脂 硬化剤: ポリアミドアミン	0.2 kg/m ²
	2 層 主剤: ウレタンプレポリマー 硬化剤: ポリアミン	1 回目 1.0 kg/m ² 2 回目 0.5 kg/m ²
	3 層 主剤: アクリルポリオール	0.1 kg/m ²
プライマー	1 層 アクリル酸アルキルエステル・メタクリル酸	0.15 kg/m ²

を測定しコア孔での測定値の確認を行った。また、DC 法、FIM 法による透気性試験を実施した。その後、表-2 に示す補修項目に準じて仕上げ材の除去等の作業を行った。なお、仕上げ材の除去後、躯体コンクリートおよび既存仕上げモルタルの透気性能を把握するため、DC 法にて透気係数の測定を実施した。その後、表-3 に示す補修材を用いて補修作業を行った。補修材 A、B はいずれも 3 層構造となっており、補修材 B は 2 層目を 2 回に分けて塗布している点で補修材 A と異なる。補修後に再度補修面の透気試験を DC 法にて実施し、JISA1153 に準拠し、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%の環境下で促進中性化試験を開始した。促進期間 13 週における中性化深さの測定結果を基に、 $\sqrt{t}$ 則に基づいて中性化速度係数を算出し、補修後の中性化抑制効果について評価を行った。

3.2 調査結果

採取したコア試験体の概要を表-4 に示す。また、コア試験体の一例を写真-1 に示す。いずれのコア試験体の仕上げ材表面は写真-1b)に示すように目視で確認した範囲ではひび割れは見られなかった。1 号棟のモルタル下地平均厚さは 16.5mm、2 号棟は 28.5mm であった。モルタル下地と躯体コンクリート表面との境界を起点とした躯体コンクリートの中性化深さは 1 号棟で平均 5.3mm、2 号棟で 1.93mm であった。写真-1 で見られる試験体上部の紫色部分はモルタル下地の非中性化範囲である。本調査で対象として実構造物は、それぞれ 2005 年および 2006 年に改修工事が行われており、改修以前に躯体コンクリートの中性化が進行していたものと考えられる。なお、改修時の中性化深さのデータが無い場合、ここでは、測定した躯体コンクリートの中性化深さと竣工年からの経過年数により、 $\sqrt{t}$ 則に基づいて中性化速度係数を算出した。改修による影響については引き続き実構造物データを蓄積し検討していく予定である。

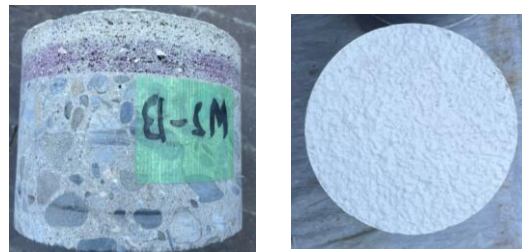
(1) 躯体コンクリートの透気性能

図-6 に FIM 法により測定した透気速度の結果を示す。各試験体のコンクリート素地面をドリルにより削孔したが、測定不能の試験体の一部があった。これより 1 号棟の透気速度は 0.22~0.87kPa/s、2 号棟の透気係数は 0.18~0.51kPa/s となった。各棟の変動係数は 1 号棟で 38%、2 号棟で 27%であった。既往の研究⁴⁾において透気速度の変動係数は 34%程度であることが示されていることから、本研究では透気速度の測定ができなかった試験体に関しては、各棟の平均値を代用値として用いた。

図-7 に透気速度と中性化速度係数の関係を示す。なお、図中には既往の研究⁵⁾で得られた実大壁コンクリート暴露 4 年の測定結果から得た値も示している。近似式を用いると、1 号棟の中性化速度係数は 6.83mm/year^{1/2}、2 号棟は 6.32mm/year^{1/2} となる。実際の調査結果は、既往の研究⁵⁾に比べて大幅に中性化速度係数が低下している。

表-4 コア試験体の概要

1 号棟	仕上げ厚さ (mm)		中性化深さ (mm)	2 号棟	仕上げ厚さ (mm)		中性化深さ (mm)
	モルタル	吹付			モルタル	吹付	
M1-1	17.45	3	4.32	M2-1	28.1	3	2.08
M1-2	14.25	3	5.32	M2-2	31.9	3	1.6
M1-A	20	3	5.8	M2-A	26.75	3	2.2
M1-B	15.15	3	5.74	M2-B	29.85	3	2.1
M1-C	19.1	3	4.48	M2-C	27.4	3	1.72
M1-D	13.1	3	6.16	M2-D	26.8	3	1.88



a) コア試験体の側面 b) 既存仕上げ材表面
写真-1 コア供試体の一例

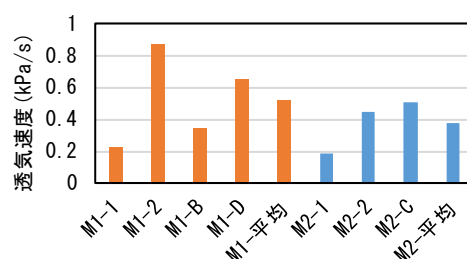


図-6 透気速度の測定結果

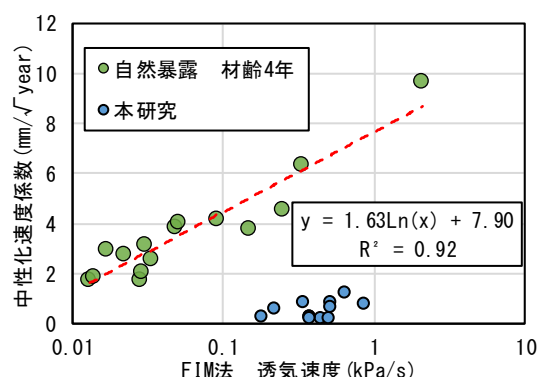


図-7 透気速度と中性化速度係数の関係⁴⁾



写真-2 補修後の試験体の状況の一例 (M1-A)

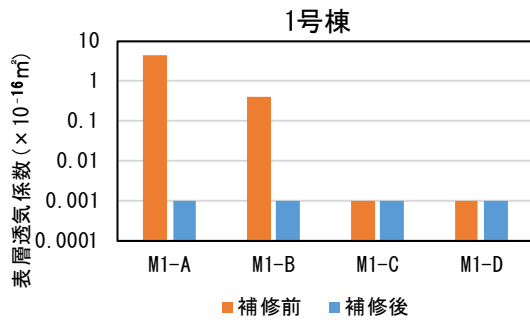


図-8 試験体ごとの透気係数(1号棟)

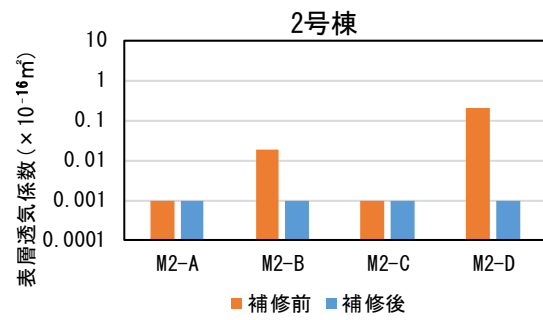


図-9 試験体ごとの透気係数(2号棟)

(2) 仕上げ材の透気性能

DC 法による仕上げ材の透気係数を図-8, 9 に示す。測定値が $0.001 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 未満と示されたものは図中の値を $0.001 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ としており、本調査で採取したコア試験体は非常に緻密であるものが多い。しかしながら、その中でも M1-A, M1-B, M2-D の透気係数は他の試験体よりも透気係数が高く、測定箇所において透気係数が異なっている。

DC 法により得られた透気係数と中性化速度係数の関係を図-10 に示す。透気係数の値が高くなるほど、中性化速度係数の値も高くなるはずだが、相関は低かった。DC 法のみでは仕上げ材付きコンクリートの中性化速度係数の評価までは困難であることが確認できた。

図-8, 9 に示す補修後の透気係数を見てみると、元々緻密だったコア試験体の透気係数は変わらず、M1-A, M1-B, M2-B および M2-D 試験体においては、補修材を塗布することで、透気係数が小さくなっている。

(3) モルタル厚さと中性化速度係数の関係

図-11 にモルタル厚さと中性化速度係数の関係を示す。図中には既往の実構造物調査⁹⁾により得られた結果も示している。モルタル厚さが大きいほど中性化速度係数は小さくなっており、両者の相関性は高い。特に2号棟では、すべての試験体の中性化速度係数が $0.3 \text{ mm}/\sqrt{\text{year}}$ を下回っており、中性化抑制効果が顕著にみられた。

図-11 よりモルタル厚さ20mm以上のほとんどの試験体で中性化速度係数が1を下回っており、モルタル厚さが20mm以下になるとモルタル厚さの変化に対して、中性化速度係数の変化が大きくなっている。

これらの測定結果より、図-7 で示した同一の透気速度においても本調査による中性化速度係数が既往研究⁹⁾より小さい値を示したのは、仕上げ材が緻密であったこととモルタル下地が厚いことによる影響を受けているものと考えられる。このことから中性化速度係数の評価には躯体コンクリートの透気性だけでなく仕上げ材の透気係数ならびにモルタル下地の厚さの影響を考慮する必要があることが確認できた。

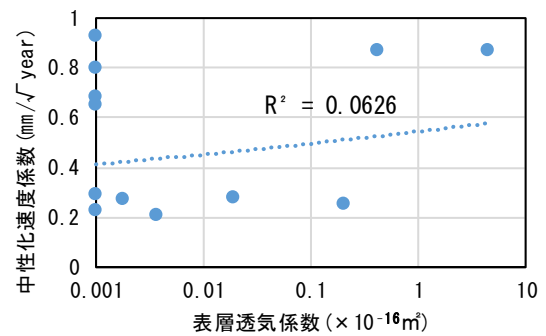


図-10 透気係数と中性化速度係数の関係

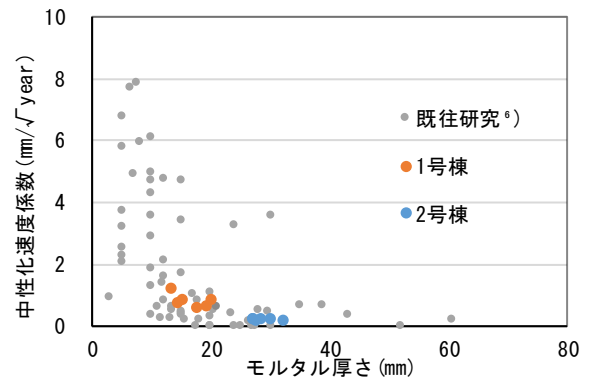


図-11 モルタル厚さと中性化速度係数の関係

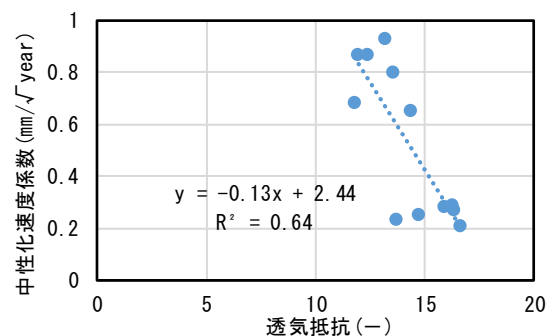


図-12 透気抵抗と中性化速度係数の関係

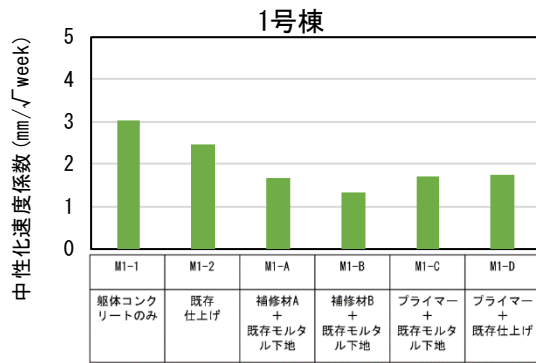


図-13 促進中性化試験結果(1号棟)

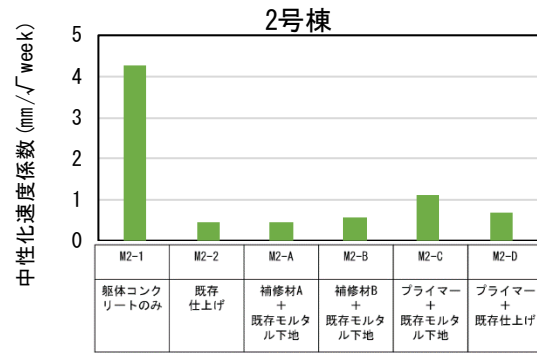


図-14 促進中性化試験結果(2号棟)

4. 複合法による中性化評価

4.1 複合法の提案

1つの透気試験では仕上げ材付きコンクリートの中性化進行を正確に予測するに至らないことから、図-1に示すDC法とFIM法の複合法を検討することとした。仕上げ厚を仕上げ面透気係数で除した値の対数値、および基材透気速度の逆数の対数値を各々の係数に応じて重みづけをし、その和を透気抵抗 R とした。算出式を式(4)に示す。重みづけ係数は、モルタル厚、透気係数、透気速度の3要素による重回帰分析を行うことにより決定した。

$$R = \alpha \log(d/Kts) + \beta \log(1/API) \quad (4)$$

R : 透気抵抗 (-)

d : 仕上げ+モルタル厚 (mm)

Kts : 仕上げ面透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)

API : 躯体コンクリート透気速度 (kPa/s)

α, β, γ : 重みづけ係数($\alpha=0.3$ $\beta=0.7$ $\gamma=13.8$)

式(4)により算出した透気抵抗 R と中性化速度係数の関係を図-12に示す。透気抵抗が大きくなるにつれて中性化速度係数が小さくなる傾向がみられ、両者の間には $R^2=0.64$ の比較的高い相関関係があった。複合法を用いた透気抵抗により仕上げ材付きコンクリートの中性化速度係数を総合的に評価できる可能性が示唆された。

4.2 補修材の効果の検証

上記で検討した透気抵抗を用いて補修材の中性化抑制効果の検証を行うこととした。

(1) 促進中性化試験結果

図-13および図-14に13週目の中性化深さより算出した中性化速度係数の結果を示す。表-4より、1号棟では促進中性化前の中性化深さが2号棟より進行しており、13週の促進期間でも概ね中性化の進行速度が速い。

躯体コンクリートのみのM1-1およびM2-1試験体においては1号棟のM1-1試験体に比べて2号棟M2-1試験体の中性化速度係数が大きい。一方で、既存仕上げ材のまま促進中性化試験を実施したM1-2およびM2-2と比較すると、2号棟M2-2の中性化速度係数の値が小さ

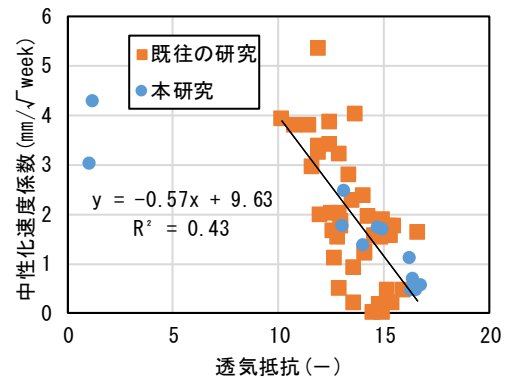


図-15 透気抵抗と中性化速度係数の関係
(既往研究を含む)

い。これは、2号棟のモルタル下地が厚いことが要因であると考えられる。補修材の効果については、モルタル下地が厚い2号棟では補修材の効果が明確には現れなかった。一方、1号棟においては、いずれの補修材においても中性化抑制効果が現れている。

(2) 補修材の効果の検証

これらの結果と前述した式(4)に補修後の透気係数、透気速度、仕上げ材塗厚の値を代入し、透気抵抗 R を算出した。様々な仕上げ材ならびにモルタル下地厚さで促進中性化試験を実施している既往研究のデータを含めた促進中性化試験における中性化速度係数との関係を図-15に示す。透気抵抗が極めて低い2点は躯体コンクリートのみのM1-1およびM2-1試験体のものである。躯体コンクリート試験体2体以外は既往研究を含めたデータにおける近似線に沿っており、仕上げ材付きコンクリートの評価としては良好な結果であるといえる。

図-15において求められた近似式を式(5)に示す。この近似式から仕上げ材付きコンクリートの中性化速度をある程度予測できることがわかる。

$$y = -0.5659x + 9.6346 \quad (5)$$

y : 中性化速度係数(mm/√week)

x : 透気抵抗

表－5 透気抵抗を用いた予測結果一覧

	1号棟			2号棟		
	透気抵抗 算出値 式(4)	中性化速度係数 (mm/√week)		透気抵抗 算出値 式(4)	中性化速度係数 (mm/√week)	
		予測値 式(5)	実測値		予測値 式(5)	実測値
既存仕上げ	13.17	2.18	2.47	16.58	0.25	0.46
補修材 A	14.93	1.19	1.67	16.36	0.38	0.46
補修材 B	14.08	1.67	1.35	16.81	0.12	0.55
プライマー	14.74	1.29	1.72	16.25	0.44	1.10
既存仕上げ +プライマー	13.02	2.26	1.76	16.36	0.38	0.68

表－5 に中性化促進開始前に得られた透気速度および透気係数を基に式(4)を用いて透気抵抗を求め、式(5)を用いて算出した中性化速度係数の予測値と実測値の一覧表を示す。また、図－16 に各試験体における中性化速度係数の補修前予測値と実測値の比較を示す。

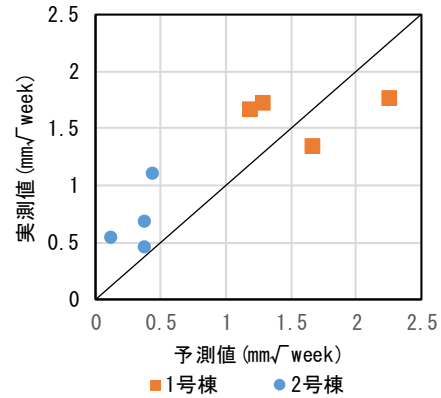
既存仕上げの透気抵抗算出値によると、2号棟に比べて1号棟の透気抵抗算出値が小さくなっており、1号棟の方が中性化進行しやすいことが確認できる。また、補修材 A、B を用いた際の透気抵抗値は1号棟においてはどちらも既存仕上げよりも値が大きくなっている。一方で、2号棟の透気抵抗値は補修材を用いても透気抵抗値があまり変化していない。

図－16 によるとばらつきがあるが式(4)および式(5)を用いて概ね補修後の中性化速度係数の予測が可能であることが示唆された。なお、本予測結果においても、既存の仕上げ材付きコンクリートの透気抵抗が低い1号棟では、補修材の効果が明確に確認できたが、既存の透気抵抗が高い2号棟では、補修材の効果が明確に現れないことが確認できた。このことから、補修材の適用の有無を判断する透気抵抗値の閾値があることが示唆された。一方、本実験では図－8、9 に示すように使用した補修材の透気係数が全て小さく、補修材の違いによる影響が確認できていない。今後は補修材の劣化状況なども含めて本提案手法が適用可能かどうか検討していく予定である。

5. まとめ

本研究により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 仕上げ厚さが中性化進行に大きく影響している。
- 2) 式(5)から導出した中性化速度係数の予測値と促進中性化試験による実測値の結果をみると、1号棟においては補修材中性化抑制効果が期待できるものの、既存仕上げ材付きコンクリートの透気抵抗が高い2号棟の場合は補修材の効果が明確には現れないことが確認できた。補修材の適用の有無を判断する透気抵抗値の閾値があることが示唆された。
- 3) DC 法と FIM 法の複合法による検討を行うことで、ある程度の中性化進行予測が可能であることが示唆された。



図－16 透気抵抗を用いた予測値と実測値の比較

謝辞

本研究の実施において、宇部興産建材株式会社の河本孝紀氏および安藤寛将氏、他関係者の皆さまのご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 李榮蘭, 梶田佳寛, 河野政典, 唐沢智之: 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, 63巻1号, pp.443-449, 2009
- 2) 加藤猛, 今本啓一, 清原千鶴, 山崎順二: 仕上材を有するコンクリートの透気性評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.595-600, 2017
- 3) 馬場明生ほか: 各種表面層をもつコンクリートの中性化深さ推定式に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.1, pp.333-338, 1987
- 4) 今本啓一: コンクリートの表層透気試験方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.7
- 5) 山崎順二, 今本啓一, 清原千鶴, 下澤和幸, 田中章夫, 本庄敬祐: 表層透気性によるコンクリートの品質評価に関する研究, その5.模擬壁試験体における各種の透気試験の関係, 日本建築学会学術講演梗概集(関東), pp.367-368, 2015.9
- 6) 中井明日香, 庭野究, 今本啓一, 清原千鶴, 田中章夫: 各種仕上げ材料がコンクリート中性化抑制効果に及ぼす影響, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.97-100, 2013.3
- 7) 庭野究, 今本啓一, 清原千鶴, 陣内浩: 非破壊透気試験による仕上げ材付きコンクリートの中性化進行評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2164-2169, 2014
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 pp.148-154, 2009