論文　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

庭野　究[*1]・今本　啓一[*2]・清原　千鶴[*3]・陣内　浩[*4]

要旨：打放しコンクリートの中性化速度を，表層透気性の観点から予測することの有用性が示唆されている。しかしながら，仕上げ材が施されたコンクリートでは仕上げ材の影響が大きくなることから，表層透気性と中性化速度との相関が認められないものが多くある。本研究では，表層透気試験によるコンクリート内部の減圧領域を明らかにし，表層透気試験による評価方法の検証を行うとともに，促進中性化試験の結果を基に評価指標の妥当性の検討を行った。実験の結果，表層透気試験は主に仕上げ材の粗密の影響が大きく，提案する評価指標により，これまで評価の難しかったコンクリートの中性化速度を概ね評価できることを示した。

キーワード：ダブルチャンバー法，中性化，仕上げ材，中性化抑制効果，評価式

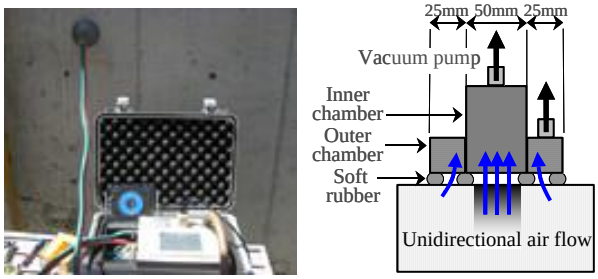
1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において，仕上げ材を施すことでコンクリートの中性化が抑制されることが一般的に広く知られている [1)]。しかしながら，仕上げ材の種類は極めて多く，鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考えるうえで，施工状況，使用用途，仕上げ材の経年劣化による性能低下，環境条件等，考慮すべき点が多々存在する。住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）及び長期優良住宅の普及の促進に関する法律（長期優良住宅促進法）では，コンクリートの中性化抑制効果を期待できる仕上げ材としてタイル貼り（張り），モルタル塗り，外断熱工法及びこれらと同等とみなせる仕上げ材が規定されており，上記の仕上げ材が施されている場合には，建築基準法を満たすことを前提に，屋外部分に限り，各法律で設定した最小かぶり厚さを 10mm 低減できるとしている [2)]。よって，このような仕上げ材の中性化抑制効果を非破壊かつ現位置で評価できれば非常に有用である。そこで本研究では，非破壊試験であるトレント透気試験 [3)]に着目し，透気試験結果から仕上げ材を施したコンクリートの中性化抵抗性を評価する手法について，室内実験をベースに検討を行った。

2. トレント法透気試験の評価領域の検証

2.1 評価領域検証実験概要

本研究では，表層透気性を評価するため，ダブルチャンバー法トレント試験機（**図－1**，以下 DC 法）を用いた。本試験機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。チャンバー内を減圧した後，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，式(2)を用い透気深さを算出する。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。既往の研究より，打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一定の相関が認められ，表層透気性による中性化進行評価の可能性が示唆されている [4)]。仕上げ材を有するコンクリートにおいて DC 法によって測定，算出される値は仕上げ材を含めたコンクリートの透気性であり，従来の評価方法では仕上げ材単体の性能を評価することが困難である。唐澤，桝田らによって，仕上げ材単体の透気係数算出のための理論的補正式等 [5)]も提案されているが，現状，仕上げ材の種類，品質，厚さおよび基部コンクリートの品質が仕上げ材を有するコンクリートの透気係数へ及ぼす影響を検証した例はない。そこで本項では異なる水セメント比の 3 種類のコンクリート試験体を作製し，各種仕上げ材を施した後，透気試験を行い，その際の試験体内圧力分布について検証を行った。



図－1 トレント試験概要図

*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　博士（工学）　（正会員）
*3 東京理科大学　工学部建築学科　補手　博士（工学）　（正会員）
*4 大成建設(株)技術センター　主席研究員　博士（工学）　（正会員）

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

$$L = \left(\frac{2 \cdot Kt \cdot P_a \cdot t_f \cdot}{\varepsilon \cdot \mu} \right)^{0.5} \qquad (2)$$

ここに，

K_t	:	透気係数	[m^2]
L	:	透気深さ	[m^2]
V_c	:	内部チャンバー体積	[m^3]
A	:	内部チャンバー断面積	[m^2]
μ	:	空気の粘性	[Ns/m^2]
ε	:	空隙率（0.15）	-
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	:	計測開始時間（60 秒）	[s]

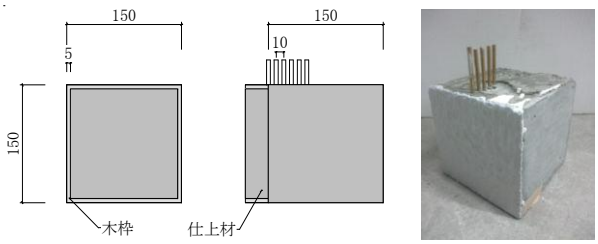
2.2 試験体概要

測定は，**図－2** に示す 150×150×150mm の立方体の基材コンクリート（以下，基材と称す）に各仕上げ材を施した試験体を用いた。圧力変化を測定するため，基材および仕上げモルタルに真鍮パイプを等間隔で埋設，圧力センサーにより圧力を計測した。**表－1** に基材の調合概要，**表－2** に測定を行った試験体一覧を示す。基部コンクリートは異なる水セメント比のものを 3 水準，仕上げは塗材（複層塗材・塗装）およびモルタル仕上げとした。モルタルについては基材への圧力の伝わりやすさを考慮して水セメント比 65%とし，塗厚は 10mm，20mm，30mm のものを作製した。試験体は，基材打設後，材齢 3 日まで 20℃封かん養生を行い，脱型後恒温恒湿室（20℃，60%RH）で材齢 28 日まで乾燥させた後，仕上げ材を施した。塗材を塗布した試験体は塗布後，材齢 56 日（28 日間）まで恒温恒湿室（20℃，60%RH）に存置，モルタルを施した試験体は材齢 3 日まで封かん養生を行い，材齢 28 日まで恒温恒湿室（20℃，60%RH）にて乾燥後，透気試験を実施した。透気試験時の圧力変化量⊿P の測定は減圧終了時（減圧開始から 60 秒後）から行い，圧力変化の最大値を圧力変化量⊿P とした。圧力変化はコンクリート表面深さ 10mm より 10mm 間隔で 5 箇所測定行った。またモルタル厚 20mm の M65-1b においては表面から深さ 10mm の位置でも同様に圧力の計測を行った。

2.3 結果および考察

2.3.1 打放し試験体における圧力分布

図－3 に測定結果を示す。縦軸を大気圧からの圧力変化量⊿P の最大値，横軸を測定深さとしている。また本



図－2 減圧領域測定用試験体概要図

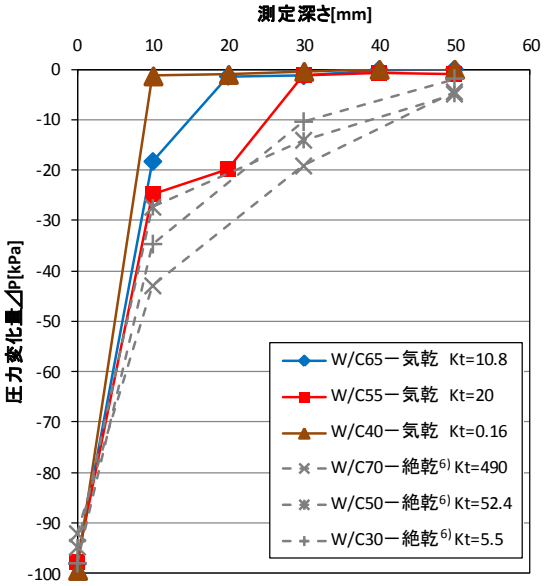
表－1 基材コンクリート調合概要

試験体名	W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ値 (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m^3)			
					C	W	S	G
C'1	65	44	18	4.5	275	179	794	1017
C'2	55	42	18	4.5	331	182	724	1034
C'3	40	38	18	4.5	463	185	608	1034

■ 水 (W) ： 上水道
■ セメント (C) ： 普通ポルトランドセメント【密度3.16g/cm^3】
■ 細骨材 (S) ： 大井川水系　陸砂【表乾密度2.59g/cm^3　FM.2.57】
■ 粗骨材 (G) ： 青梅産　砕石【表乾密度2.66g/cm^3　実績率62.7%】

表－2 試験体一覧

試験体番号	仕上概要	仕上厚	基材
C'1	打ち放し(W/C=65)	－	－
C'2	打ち放し(W/C=55)	－	－
C'3	打ち放し(W/C=40)	－	－
CM'1-1	複層塗材E	－	C'1
CM'1-2		－	C'2
CM'1-3		－	C'3
CM'2-1	合成樹脂エマルション系ペイント（外装仕様）	－	C'1
CM'2-2		－	C'2
CM'2-3		－	C'3
M'65-1a	普通セメントモルタル (W/C=65%，B:S=1:2.5)	10mm	C'1
M'65-1b		20mm	
M'65-1c		30mm	
M'65-2a		10mm	C'2
M'65-3a		10mm	C'3



図－3 減圧状況（打放し試験体）

実験結果とともに既往の研究 [6]による実験結果も併載した。すべての試験体において表層 10mm の深さでの圧力変化量⊿P が大きく，圧力変化量⊿P と深さで曲線的非線形な関係を示した。既往の研究によって提唱されている内部圧力分布は線形モデルであるが本実験では異なる結果となった。絶乾状態と気乾状態を比較すると，同等の透気係数であっても気乾状態の試験体の減圧領域は小さい傾向を示しているが，これは絶乾状態のものは試験体全体が乾燥しているのに対し，気乾状態のものは内部の含水率が高いため，見かけ上透気係数が表面に比べ小さく透気深さが小さくなったものと考えられる。**図－4** に実験結果から予測されるトレント法によるコンクリート内部の圧力分布を示す。既存建築物での評価においては，気乾状態の対象物の評価が多いと考えられることから，気乾状態で得られた結果を基に，圧力分布モデルの検討を行った。この図からコンクリートの透気性は実際の透気深さの範囲よりも表層の位置の影響が大きいと考えられる。

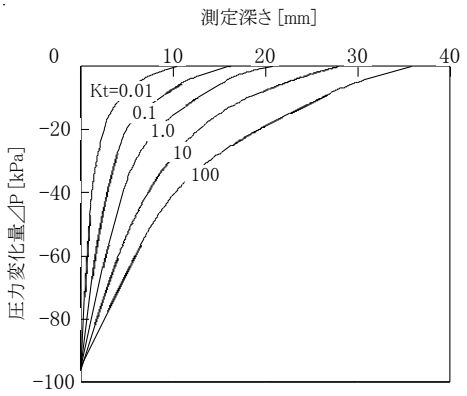
2.3.2 仕上げ材を有する試験体における圧力分布

図－5，**図－6** に仕上塗材およびモルタル仕上げを施した試験体における内部コンクリートの圧力分布図を示す。仕上塗材試験体においては，透気係数 Kt＝0.1～0.001［×10^{-16}m^2］と緻密であり，深さ 10mm の範囲においてはほぼ減圧が生じない結果となった。また透気係数の測定値と基材の品質に関係が見られなかった。以上のことからこの範囲の仕上塗材において，透気係数に与える影響は仕上塗材の粗密さの影響が支配的と考えられる。モルタル仕上げ試験体においては塗厚が 10mm 程度であっても基材コンクリートまで圧力が伝わっていない結果となった。これはコンクリートとモルタルの境界面の微細な間隙および表面のモルタルからの空気の流入による影響が大きいためと考えられ，モルタル仕上げ試験体において，基材の品質が透気係数へ与える影響はモルタルの粗密さに関わらず小さいと考えられる。

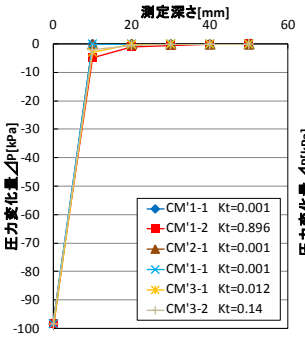
3. 表層透気試験により中性化進行評価

3.1 実験概要

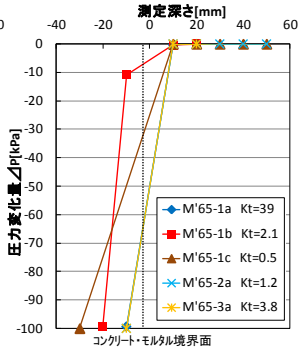
仕上げ材が中性化の進行を抑制することは一般的に指摘される [1]。そこで本項では，仕上げ材を施したコンクリート試験体を用いて JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準じた促進中性化試験を行い，仕上げ材を持たないコンクリートに仕上げ材を施すことで中性化がどの程度抑制されるか，また仕上げ材を有する場合の抑制効果を表層透気性の観点からどのように評価していくのが良いのかを検証した。**表－3** に促進中性化試験に用いた試験体の基材コンクリート調合概要を，**表－4** に中性化の抑制効果を評価するに当たり，仕上塗材とモルタルが施されたコンクリートでは中性化の進行モデル [7]が異なることから，仕上塗材試験体およびモルタル仕上げ試験体で，それぞれ検討を行った。



図－4 通常環境下にあるコンクリートにおける圧力分布イメージ図



図－5 減圧状況（ 仕上塗材 ）



図－6 減圧状況（モルタル仕上げ）

表－3 基材コンクリート調合概要

試験体名	W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ値 (cm)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m^3) C	W	S	G
C1	60	49	15	4.5	287	172	613*1 / 266*2	655*1 / 289*2
C2	65	44	18	4.5	275	179	794*3	1017*3
C3	55	42	18	4.5	331	182	724*3	1034*3
C4	40	38	18	4.5	463	185	608*3	1034*3

■ 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^3 】
■ 細骨材 (S) ： 秩父産 砕砂 【 表乾密度2.61g/cm^3 FM.2.20 】※1
富津産 天然砂 【 表乾密度2.63g/cm^3 FM.3.20 】※2
大井川水系 陸砂 【 表乾密度2.59g/cm^3 FM.2.57 】※3
■ 粗骨材 (G) ： 大月産 砕石 【 表乾密度2.62g/cm^3 実績率60.0% 】※1
秩父産 砕石 【 表乾密度2.70g/cm^3 実績率60.0% 】※2
青梅産 砕石 【 表乾密度2.66g/cm^3 実績率62.7% 】※3

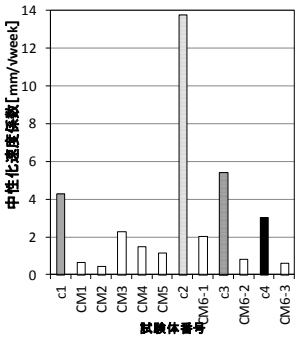
表－4 仕上塗材供試体一覧

試験体番号	仕上概要	仕上厚	基材
CM1	複層塗材E	－	C1
CM2	防水形複層塗材E	－	
CM3	外装厚塗材C	－	
CM4	外装厚塗材E	－	
CM5	可とう形外装薄塗材E	－	
CM6-1	複層塗材E	1mm	C2
CM'6-2		1mm	C3
CM'6-3		1mm	C4

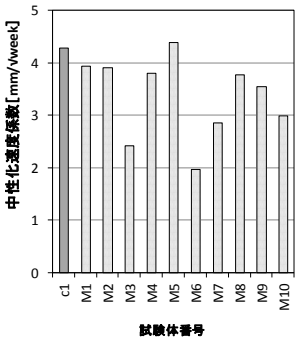
表－5 モルタル仕上げ試験体一覧

試験体番号	仕上概要	ポリマー量	仕上厚	養生条件	基材
M1	下地調整塗材 アクリルエマルション系	－	1mm	気中養生	C1
M2			2mm	気中養生	
M3			10mm	気中養生	
M4	下地調整塗材 エチレンビニルエマルション系	－	1mm	気中養生	
M5			2mm	気中養生	
M6			10mm	気中養生	
M7	エチレンビニルエマルション系	－	10mm	気中養生	
M8	エチレンビニル系粉末樹脂	－	10mm	気中養生	
M9	現場練りモルタル (W/C=36%,C:S=1層1:2.5, 2層1:3)	6%	10mm	気中養生	
M10			15mm	気中養生	
M11	普通タイプ(W/C=33%)	3%	10mm	i：気中養生 ii：2日湿布後気中 iii：7日湿布後気中	C'1
M12	普通タイプ(W/C=40%)	3%	10mm		
M'12		6%	10mm		
M13	普通タイプ(W/C=50%)	3%	10mm		
M14	早強タイプ（W/C=40%）	3%	10mm		
M15	微粒子タイプ（W/C=40%）	3%	10mm	気中養生	
M16	軽量タイプ（W/C=40%）	3%	10mm	気中養生	
M17	普通タイプ(W/C=40%)	3%	5mm	気中養生	
M18			20mm		
M19			30mm		
M20	普通タイプ(W/C=40%)	3%	30mm	気中養生	
M21	早強タイプ（W/C=40%）	3%	30mm	気中養生	
M22	微粒子タイプ（W/C=40%）	3%	30mm	気中養生	
M23	軽量タイプ（W/C=40%）	3%	30mm	気中養生	
M24-1	普通セメントモルタル (W/C=65%, C:S=1:2.5)	－	a：10mm	1日封緘後気中	C2
M24-2			b：20mm		C3
M24-3			c：30mm		C4
M25-1	普通セメントモルタル (W/C=50%, C:S=1:2.5)	1%	a：10mm	3日封緘後気中	C2
M25-2			b：20mm		C3
M25-3			c：30mm		C4
M26-1	普通セメントモルタル (W/C=40%, C:S=1:2.5)	3%	a：10mm	3日封緘後気中	C2
M26-2			b：20mm		C3
M26-3			c：30mm		C4

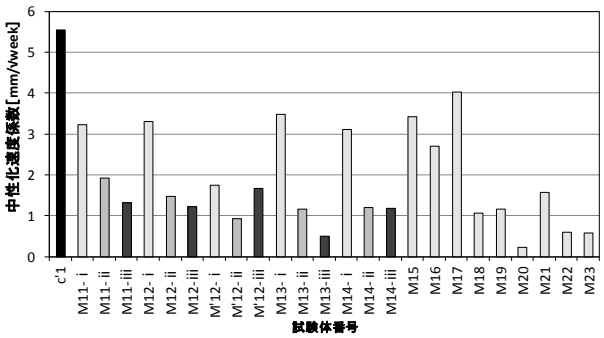
※C'1はC1と同調合であるが，別時期に試験体の作製を行った



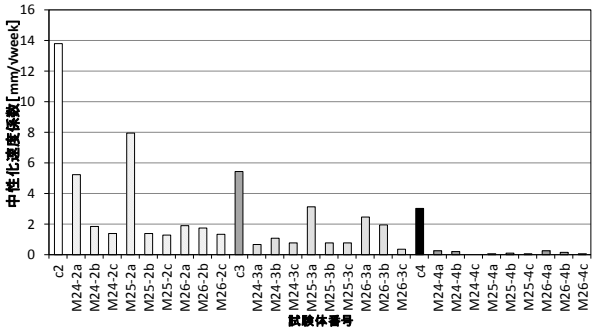
図－7 促進中性化試験結果
（ 仕上塗材 CM1～CM6 ）



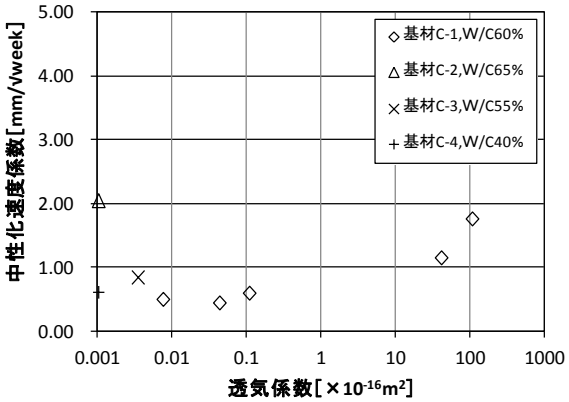
図－8 促進中性化試験結果
（モルタル仕上げ M1～M10）



図－9 促進中性化試験結果（モルタル仕上げ M11～M23）



図－10 促進中性化試験結果（モルタル仕上げ M24～M26）



図－11 透気係数と中性化速度係数の関係(仕上塗材)

3.2 実験結果および考察

3.2.1 促進中性化試験結果

図－7～図－10 に促進中性化試験結果を示す。仕上塗材試験体においては一部を除き，中性化がほぼ進行しない結果となったのに対し，モルタル仕上げは，品質，厚みの違いにより，中性化の進行は異なる結果となった。特に養生を十分に行うことや,ポリマーを混合するなど，モルタルの組織を緻密にする条件の試験体で中性化が抑制される結果となった他，塗厚がある程度確保されている試験体についても中性化が抑制される傾向にあった。また図－10 より同じ仕上げ材であっても基材が緻密であるほど中性化は抑制される結果となったことから，仕上げ材を有するコンクリートの中性化進行検討において仕上げ材，基材の両者を評価していく必要がある。

3.2.2 仕上塗材試験体における透気係数と中性化の関係

図－11 に仕上塗材試験体における透気試験と中性化速度係数の関係を示す。基材が同じ場合，透気係数の増加に伴い中性化も進む傾向にあるが，基材の品質によっては，透気係数が緻密な値を示す場合でも中性化が比較的進んでいるケースが見られた。これは中性化の進行が仕上げ材による炭酸ガスの侵入抑制とコンクリート自身の気体透過性等により決まってくるのに対し，前項で述べたように，表面法による透気性評価は測定対象のごく表層部の影響が大きく，仕上げ材の下のコンクリートまで完全に評価しきれていないためと考えられる。以上の事から基材と仕上げ材をそれぞれ評価し，それらの評価を組み合わせた評価指標の構築を行うことが望ましいと考えられる。

3.2.3 モルタル仕上げにおける透気係数と中性化の関係

図－12 にモルタル仕上げ試験体における透気係数と中性化速度係数の関係を示す。透気係数の増加に伴い中性化が進行する傾向にあるが，透気係数の値が大きいにも関わらず，中性化が抑制されている試験体が一定数見られた。これは透気試験がモルタルの透気性のみを評価しているため，後述するモルタル厚の増大による抑制効果を評価できないためであると考えられる。仕上げ厚による中性化抑制は，**図－13** に示すように，仕上げ材の仕様，品質に関わらず仕上げ厚の増大に伴って中性化の進行が抑制されていることからも，重要な要素の一つであると言える。これは既存建築物の調査結果からも同様の傾向が得られており [8]，モルタル仕上げの評価指標構築においてはコンクリートの透気性，モルタルの透気性と塗厚から検討を行うことが望ましいと考えられる。

3.3 評価式の検討

中性化の進行に影響を及ぼす要因として，測定対象の①水セメント比，②養生条件，③使用材料，④仕上げ材の種類，⑤仕上げモルタルの水セメント比，⑥仕上げ塗厚,⑦コンクリート境界面の炭酸ガス濃度,⑧環境条件，等が挙げられる。①～⑤は透気試験によりある程度評価できると考えられるが，⑦および⑧については別途検討が必要であると考えられる。⑥についてはモルタルの塗厚によりある程度評価がすることができると仮定して評価式の検討を行った。

3.3.1 仕上塗材試験体における評価

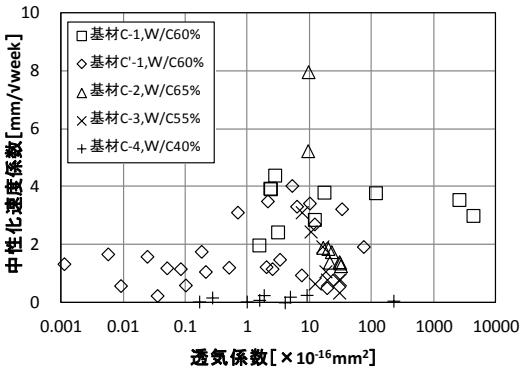
仕上塗材の透気性評価として式(3)に示す，仕上塗材単体の透気係数補正式が既往の研究 [5]により提案されているが，中性化を評価する上では，実測値の評価と比較しても大きく向上は見られなかった。そこで，透気係数の逆数，つまり 1/Kt を炭酸ガス浸透に対する透気抵抗とし，基材および仕上げ材の透気抵抗の対数値の和を仕上塗材試験体の透気抵抗 R_{cm} (式(4)) として評価を行った。基材の透気係数は打放しの試験体の試験結果から得られるが，仕上塗材試験体は塗厚が薄く，基材の品質による影響が無いとは言えない。そこで仕上塗材単体の透気係数 Kt_f を式(3)により補正し [5]，透気抵抗の算出に用いることとした。なお，仕上げ塗材を施したにも関わらず基材よりも透気係数が大きい値を示すものについては，補正を行わず，透気係数 Kt_{cm} を用いることとした。**図－14** に算出した透気抵抗 R_{cm} と中性化速度係数の関係図を示す。透気抵抗の値が増加に伴い，中性化の進行は抑えられる結果となった。**図－11** で仕上げ材により透気係数が緻密な値を示す場合でも，基材の品質によっては中性化が進む事があるが，評価式による透気抵抗は基材を含めて評価を行っているため,透気係数単体の評価にくらべ，全体の傾向をつかめていると考えられる。

$$Kt_f = \frac{Kt_{cm} \cdot Kt_c \cdot d_f}{Kt_c \cdot L_{cm} - Kt_{cm}(L_{cm} - d_f)} \tag{3}$$

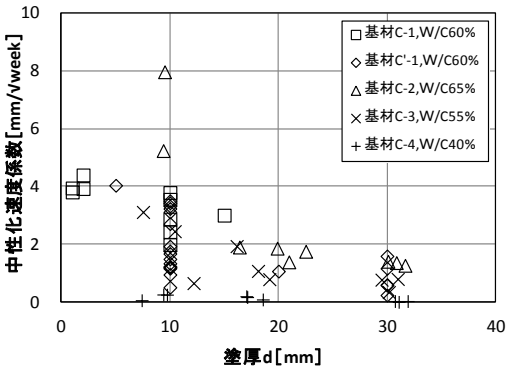
$$R_{cm} = \log(1/Kt_c) + \log(1/Kt_f) \tag{4}$$

ここに

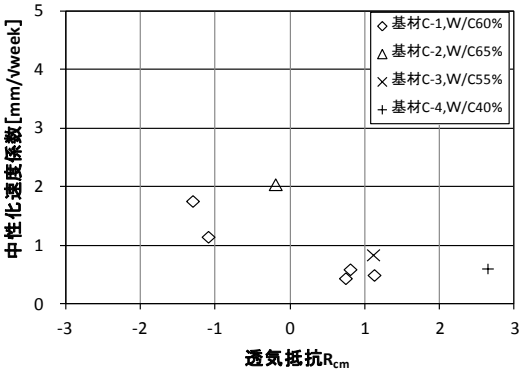
Kt_f	:	仕上塗材単体の透気係数	[m²]
Kt_{cm}	:	仕上塗材試験体透気係数	[m²]
Kt_c	:	基材コンクリート透気係数	[m²]
d_f	:	仕上厚	[m]
L_{cm}	:	仕上塗材表面からの透気深さ	[m]
R_{cm}	:	仕上塗材試験体の透気抵抗	[－]



図－12 透気係数と中性化速度係数の関係（モルタル仕上げ）



図－13 仕上げ厚と中性化速度係数の関係



図－14 透気抵抗 R_{cm} と中性化速度係数の関係

3.3.2 モルタル仕上げにおける評価

モルタル仕上げにおいては 2 項の実験結果から 10mm 程度の塗厚でも基材の透気性を評価できていないと考え，測定値を仕上げモルタルの透気係数 Kt_m として考え，さらに塗厚の影響も加味したうえで d/Kt_m を仕上げモルタルによる透気抵抗とし，基材の透気係数 Kt_c の逆数との対数値の和を全体の透気抵抗 R_m（式(5)）として検討を行った。**図－15** に透気抵抗とモルタル仕上げにおける中性化速度係数の関係を示す。仕上塗材試験体のケース同様，透気係数単体の評価に比べ全体の傾向がつかめているように見える。これは仕上げ厚，仕上げ材の緻密性と基材の緻密性の評価により，炭酸ガス浸入への抵抗を総合的に評価できているためであると考える。とくに**図－12** で，透気係数が高いにも関わらず中性化が進行していない傾向を概ね評価できていることからも，透気抵抗による評価はある程度妥当ではないかと考えられる。

$$R_m = \log(1/Kt_c) + \log(d/Kt_m) \qquad (5)$$

ここに

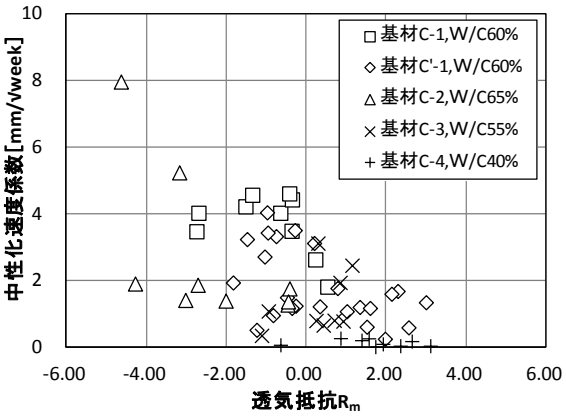
R_m	:	モルタル仕上げ試験体の透気抵抗	[－]
Kt_c	:	基材コンクリート透気係数	[m^2]
Kt_m	:	仕上げモルタル試験体透気係数	[m^2]
d	:	仕上げ塗厚	[m]

4. まとめ

表層透気試験による仕上げ材の中性化抑制効果評価について室内実験の結果を通して得られた知見は以下のとおりである。

1) コンクリートにおいてはトレント透気試験機における試験時の圧力勾配は非線形となる。
2) 非破壊透気試験により測定対象内部の減圧領域の結果から，透気係数は表層の品質の影響が大きく，仕上げ材を有する場合，仕上げ材の透気係数が測定結果に大きく影響することを示した。
3) 基材および仕上げ材の透気係数と塗厚を説明変数とした評価指標を示した。透気係数単体の評価に比べ全体の傾向をつかめており，とくに透気係数が大きく，中性化が抑制されるケースの評価が可能であることを示した。

謝辞：本研究の一部は，「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－15 透気抵抗 R_m と中性化速度係数の関係

参考文献

1) 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，2004
2) 陣内浩 ほか：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 1~8，日本建築学会大会梗概集，2011.8～2013.9
3) 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.
4) 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 号，pp1539-1544，2013.9
5) 唐沢智之，河野正典，桝田佳寛，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，pp435-442，2009
6) 松田啓，今本啓一，陣内浩，清水昭之：マルコフ連鎖モデルと現位置非破壊透気試験を組み合わせた外壁仕上げ材料の経年劣化と躯体保護効果の評価に向けた基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.78 No.683 号，27-33，2013.1
7) 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一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 9，No.1，pp.333-338，1987
8) 庭野究，今本啓一，佐藤幸惠，陣内浩：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.35，No.1，pp.1861-1866，2013