

論文 鉄筋コンクリート造建築物の表層透気性を評価する上での2, 3の課題に関する検討

田中 章夫*1・今本 啓一*2・唐沢 智之*3・山崎 順二*4

要旨: 本研究は実構造体における透気係数の特異点の原因探求とコンクリートの耐久性を向上させる手法の一つを提案するものである。本論では、一つ目として仕上げ材を施したコンクリートの耐久性について検討を行った。耐久性評価方法としてトレント透気試験と促進中性化試験を行い、コンクリート自体の促進中性化深さと表層透気性の関係に位置づけられる仕上げ材の効果を検討し、仕上げ材の有効性について述べるものである。二つ目として実構造物の透気性分布と異なる透気係数になる理由について原因を探り検討を行い論じるものである。

キーワード: 表層透気性, トレント透気試験機, 透気係数, 促進中性化深さ, 仕上げ材, 透気深さ

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐久性能は、一般に、鉄筋の腐食度合いで定義されるが、コンクリート内部に有害物質が無い限り、鉄筋を腐食せしめる因子は外部よりかぶり部分のコンクリートを通して浸入する。したがってコンクリートをより緻密化して、かぶり部分における物質の透過性をより小さなものとする材料レベルの開発は自らその意義を持つ。しかし、複数の施工工程を経た RC 構造物において、材料の性能そのものが耐久的事業であることは構造物の耐久性能を満足するための必要条件ではあるが十分条件とは成り得ない。打込み・締固めおよび養生などの複数の施工プロセスが構造物の耐久性能を大きく左右する RC 構造物の耐久性を原位置で評価することが重要である。かぶりコンクリートの、例えば透気性といった粗密の評価はこの意味で、鉄筋コンクリート構造物の直接的な耐久性評価につながるものであると考える。

同一設計基準強度でも、土木構造物よりも建築構造物を想定したコンクリートの方が、透気性が大きくなる傾向にある¹⁾。この理由は定かではないが、一つに同じ水セメント比であっても高いスランプ値が要求されるために単位水量が相対的に大きい調合にならざるを得ない建築用コンクリートの特性が関与しているものと思われる。一方、透気性の原位置試験を行い、当該構造物の躯体の耐久性を評価・判定する際、懸念される現実的問題の一つに、「不合格」が出た場合の対応がある。建築物の場合、一般に仕上げ材が用いられることが多いが、近年、この仕上げ材を美観の観点からだけでなく、中性化抑制といった耐久性向上の観点から評価できるこ

とが示されている²⁾。以上の点を勘案すると、表層透気性による躯体の耐久性判定のフェイルセーフの手段として仕上げ材を活用することが考えられ、仕上げ材の影響も含めた躯体の中性化抵抗性と原位置透気試験の間に一定の関係を見出すことができれば、建築物における表層透気性に基づく竣工検査方法の確立に資することができるものとする。また、実構造物への適用にあたって透気性のばらつきについて検討しておくことは重要である。仕上げ材が表層透気性に及ぼす影響は唐沢らにより既に検討されているが³⁾、本研究では、シリーズ I としてコンクリート自体の促進中性化深さと表層透気性の関係に加え、壁状試験体の透気係数の分布と特異点の原因の検討を行い、シリーズ II ではフェイルセーフとしての仕上塗材の効果を検討した結果を述べるものである。

2. 実験概要

本実験では、シリーズ I として水セメント比別の試験体および、呼び強度 21N/mm², 27N/mm² の実大模擬壁部材 (0.2m×2.1m×3.6m) を作製し、シリーズ II では下地調整塗材および仕上塗材を施した試験体を作製した。いずれのシリーズの試験体また実大模擬壁部材のコンクリートコアを温度 20±2℃, 湿度 60±5%, 二酸化炭素濃度 5±0.2% の環境下に在置して中性化促進試験を実施し、促進期間 26 週の時点で促進中性化深さを測定した。あわせて写真-1 に示すダブルチャンバー法トレント透気試験機 (以下 DC 法) を用い、図-1 に示す測定チャンバーによって透気試験を行い、両者の相関を検討した。

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*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 鉄建建設株式会社 建設センター (正会員)

*4 浅沼組 大阪本店建築部 工修 (正会員)



写真-1 透気試験機

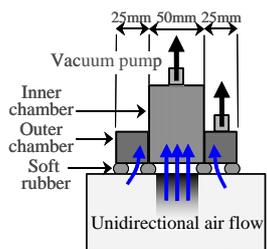


図-1 測定チャンパー

3. シリーズ I

3.1 試験体概要

(1) 水セメント比別試験体

水セメント比別のコンクリート試験体の使用材料を表-1、計画調合を表-2に示す。本シリーズにおけるコンクリートの水セメント比は100~30%に分布し、あわせて単位水量を増減した試験体も作製している。試験体形状は15×15×60cmとし、6面のうち側面を残し4面をエポキシ樹脂でコーティングしている。前述の促進中性化試験とは別途に作製した同形状(15×15×60cm)の試験体を約5年屋内に在置した後に暴露面において透気係数 K_{torr} (DC法)を測定した。

表-1 コンクリートの使用材料

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 ³
粗骨材 (G)	砕石 密度 2.68g/cm ³ , 実積率 58%
細骨材 (S)	山砂 密度 2.57g/cm ³ , FM:2.75
混和剤	N: AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系) H: 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-2 計画調合

供試体記号	W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]				Ad. 添加率 [%]
			W	C	G	S	
100-200	100	54.5	200	200	1018	886	-
80-200	80	53.5	200	250	977	886	-
65-195	65	48.8	195	300	853	933	N:1.3
65-180	65	50.2	180	277	887	917	N:1.5
60-216	60	47.4	216	360	805	933	N:1.0
60-180	60	48.8	180	300	853	933	N:1.3
55-198	55	47.4	198	360	805	933	N:1.0
55-180	55	48.2	180	327	831	933	N:1.1
55-165	55	48.8	165	300	853	933	N:1.3
50-219	50	45.7	219	438	754	933	H:0.7
50-180	50	47.4	180	360	805	933	N:1.0
45-197	45	45.7	197	438	754	933	H:0.6
45-175	45	46.8	175	398	787	933	H:0.6
45-162	45	47.4	162	360	805	933	N:1.0
40-175	40	45.7	175	438	754	933	H:0.6
30-175	30	46.7	175	583	734	870	H:1.2

(2) 実大模擬壁部材

実大模擬壁部材に使用したコンクリートの使用材料表-3に示す。実大模擬壁部材のコンクリートは、呼び強度21N/mm², 27N/mm²とし、計画調合を表-4に示す。壁部材形状は幅2.1m×高3.6m×厚0.2mとなっている。

この部材の地盤面から高さ1.0mから1.4mの範囲で透気試験機を走査しDC法による透気係数 K_{torr} の分布を取得した。同測定位置において測定面の組織を破壊しないようにφ75mmのコンクリートコアを拔出し、促進中性化試験を実施し、促進期間26週の中性化深さと比較を行った。また一部のコンクリートコアにおいて、マイクロCTスキャン(東芝ITコントロールシステム)を実施し断層画像を取得した、Adobe製Photoshopを使用して透気係数測定部の中心部φ50mm断層画像の気泡構造を二階調化し実大模擬壁部材におけるコンクリートの表層透気性に影響する因子の検討を行った。

表-3 コンクリートの使用材料

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 ³
粗骨材 (G)	砕石(大阪府高槻産) 密度 2.69g/cm ³ , 実積率 58%
細骨材	S1: 山砂(京都府城陽産) 密度 2.57g/cm ³ , FM:2.80 S1: 砕砂(大阪府高槻産) 密度 2.66g/cm ³ , FM:2.80
混和剤	(呼び強度 21) AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系) (呼び強度 27) 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)

表-4 実大模擬壁部材の計画調合

呼び強度	W/C	s/a	単位量 [kg/m ³]				
			W	C	S1	S2	G1
21	63	46.6	184	292	406	420	974
27	54	49.2	180	333	421	439	915



写真-2 実大模擬壁部材 (左: 21N/mm², 右: 27N/mm²)

3.2 実験結果検討

水セメント比別試験体の透気係数 K_{torr} および促進中性化深さの結果を表-5に示す。両者の関係と後の実大模擬壁部材における両者の関係を図-2に示す。図より K_{torr} 法でも透気係数 K_{torr} が大きくなるにつれ中性化深さが大きくなっていることから、両者に相関があることが示された。また、同じ水セメント比についてみた場合、単位水量が増加することによって透気係数 K_{torr} は大きくな

り、この傾向は促進中性化深さと合致することも確認された。

表-5 透気係数 K_{torr} と促進中性化深さ

供試記号	透気係数	促進中性化深さ
	$[\times 10^{-16} \text{m}^2]$	[mm]
100-200	71	50.0
80-200	9.7	37.0
65-180	13	31.6
60-195	8	16.2
60-180	3.2	21.9
60-165	3.1	17.5
55-180	3.3	15.0
50-216	11	13.3
50-198	3.7	14.2
50-180	2.6	8.5
50-162	1.4	5.9
45-175	1.3	6.7
40-219	5.5	13.9
40-197	1.6	7.9
40-175	1.2	6.1
30-175	0.094	0.0

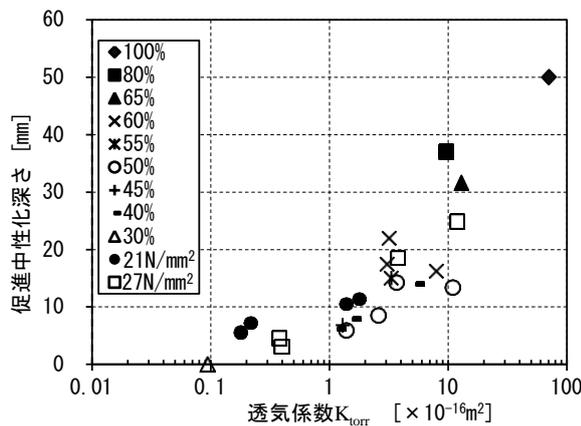


図-2 透気係数 K_{torr} と促進中性化深さ

実大模擬壁部材の透気係数の分布を図-3に、コンクリートコアの促進中性化深さ(最大値)を図-4に示す。呼び強度 $21\text{N}/\text{mm}^2$ の透気係数の平均値 0.74 、標準偏差 0.46 、 $27\text{N}/\text{mm}^2$ では平均値 2.88 、標準偏差 4.68 となった。

この結果より、同一のコンクリートを比較評価する場合でも透気係数のばらつきが存在し、透気係数に伴い促進中性化深さも変化していることが認められた。また、例として No. 20 透気係数 3.8 のコンクリートでは、その表面は大きな気泡も見られずごく一般的な表面であった。しかし、透気係数は大きく、割裂した結果、写真-3に示す気泡空隙が確認された。この気泡によって、促進中性化深さが $18.5[\text{mm}]$ と写真-4に示すように中性化が局所的に進行し No. 18 の促進中性化深さ $4.5[\text{mm}]$ に比べ著し大きくなったと考えられる。このことにより実構造物の表層透気性を評価する上で、そのばらつきを検討することは重要であり耐久性上問題となる可能性が高いことが示された。

透気係数に影響を与える因子の特定に向け、呼び強度 $21\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリート No. 1 透気係数 1.8 と No. 12 透気係数 0.18 のコンクリートコアを表面から CT スキャンを行い抽出した透気係数 0.18 の断層画像を図-5、透気係数 1.8 の断層画像を図-6、そして 2 点の気泡量の結果を図-7に示す。ここで気泡とは画像において認識できる大きさを意味しており、約 0.3mm 以上のものが対象となっている。

この結果から、透気係数が大きいコアについては特に表層より 10mm 付近の中心部にて気泡(量)が若干ながら大きいことがわかる。この気泡はコンクリート打設時に巻き込まれたものと推定される。写真-3、写真-4 および上記の結果からごく表層部の気泡(空隙)が透気係数と促進中性化深さに影響を与えている可能性を示した。

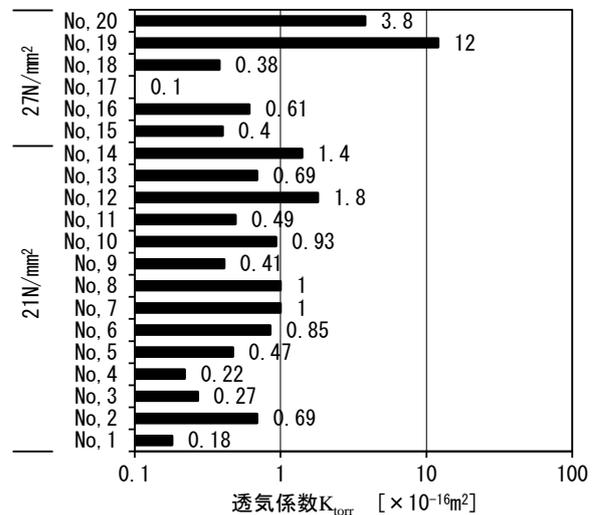


図-3 原位置における透気係数 K_{torr} の分布

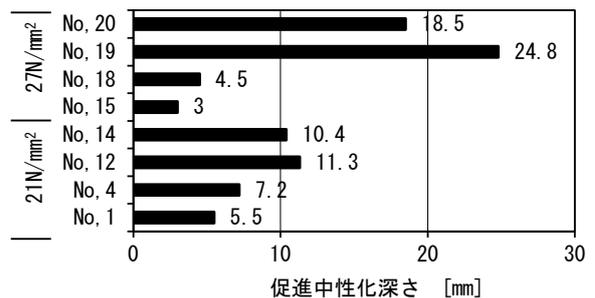


図-4 コンクリートコアの促進中性化深さ(最大値)



写真-3 内部気泡



写真-4 促進中性化深さ

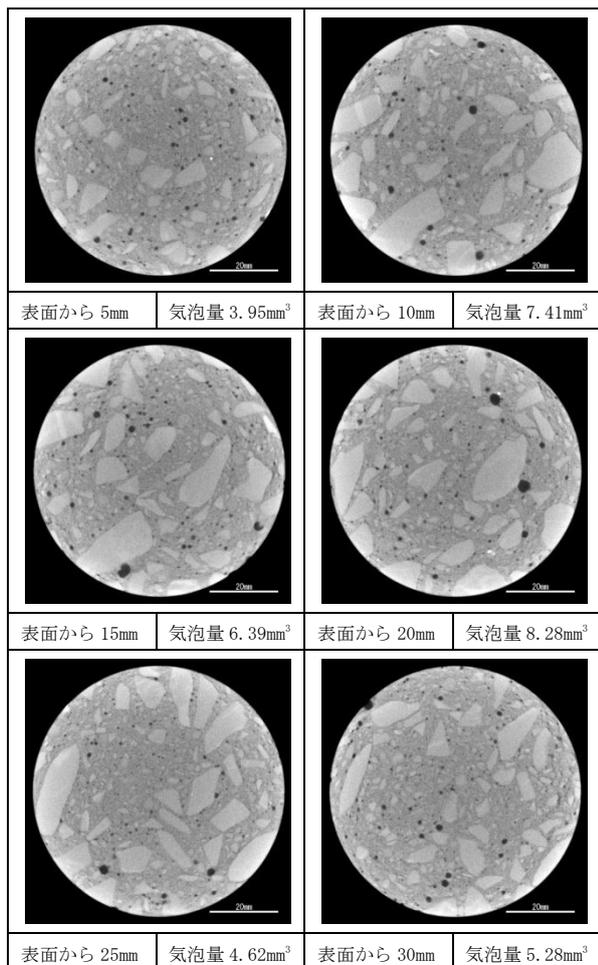


図-5 No. 1 の断層画像

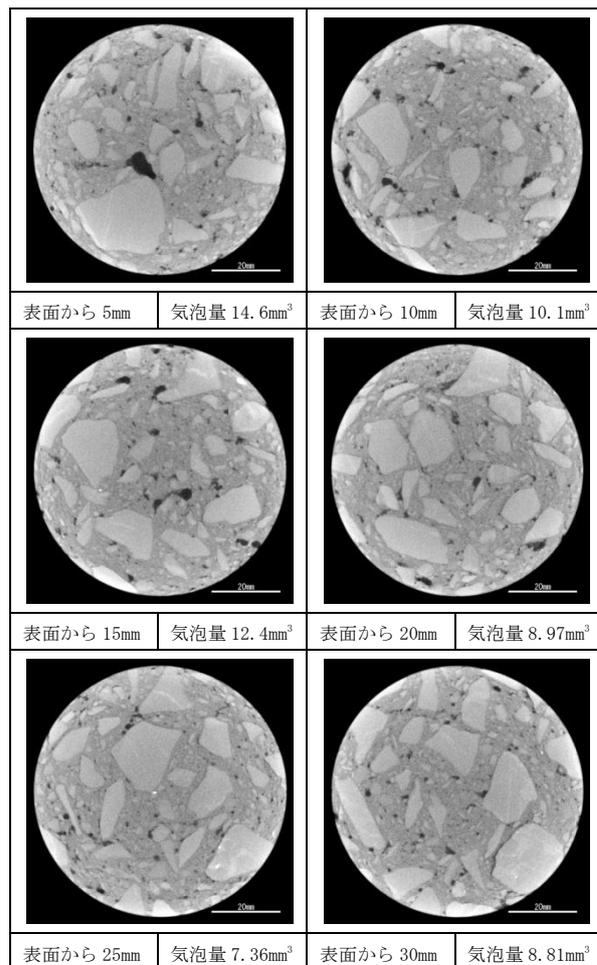


図-5 No. 12 の断層画像

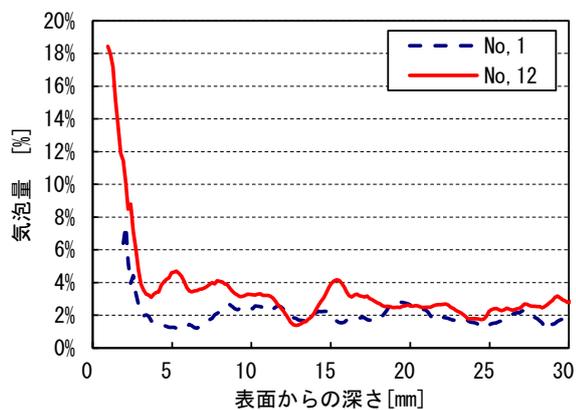


図-7 異なる透気係数の気泡量

4. シリーズⅡ

4.1 概要

(1) コンクリートの調査

コンクリートの使用材料を表-6、計画調査を表-7に示す。コンクリートの水セメント比は60%とした。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

(2) 各種仕上げ材の要因と水準

要因と水準を表-8に、試験体種類を表-9に示す。下

地調整塗材に加え、実施工を対象とし、仕上塗材を組み合わせた場合についても実験対象とした。

下地調整塗材はJIS A 6916に適合するもので、セメント系下地調整塗材の下地調整塗材 C-1 および C-2、合成樹脂エマルジョン系下地調整塗材の下地調整塗材 E、セメント系下地調整厚塗材の下地調整塗材 CM-1 および CM-2 を用いた。C-1、C-2 および E の塗料製造所の3銘柄を、CM-1、CM-2 はセメント系材料製造所の2銘柄を選定した。塗厚さは材料種類毎の使用に応じ実施工に用いられる塗厚さとした。

仕上塗材はJIS A 6909に適合するもので、使用実績が多く、中性化抑制効果が期待できる合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材（以下、複層塗材 E と記す）、防水形外装合成樹脂エマルジョン系薄付仕上塗材（以下、防水形外装薄塗材 E と記す）および防水形合成樹脂エマルジョン系複層仕上塗材（以下、防水形複層塗材 E と記す）の3種類とし、製造所は3銘柄を選定した。なお、塗厚さは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て仕上塗材毎の標準施工塗厚さの1/2とし、写真-5に示すように施した。

(3)試験体製作方法と透気試験方法

試験体形状は、試験体寸法 10×10×40cm とした。コンクリート打設後、材齢 4 週まで標準水中養生した後、材齢 8 週まで温度 20℃、湿度 60%の環境で養生し、その後下地調整材を施し、2 週間の乾燥養生後、仕上塗材を施しさらに 4 週間乾燥養生を行った。下地調整材および仕上調整塗材はコンクリート試験体の打設側面に施し、上面と底面はアルミテープを張り付けた。1 試験体の 2 側面には種類の異なる仕上げを施した。同一仕上げ条件の測定面は 2 面とし、その 2 面の平均値を中性化深さとし、促進期間 26 週時に測定した。試験体の透気係数 K_{torr} は、材齢 52 週の促進中性化後に測定した。

表-6 コンクリートの使用材料

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 ³
粗骨材	G1 : 栃木県鹿沼産砂岩 2005 表乾密度 2.65g/cm ³
	G2 : 栃木県栃木産石灰岩 2005 表乾密度 2.70g/cm ³
細骨材	S1 : 茨城県神栖産陸砂 表乾密度 2.60g/cm ³
	S2 : 栃木県鹿沼産砕砂 表密 2.63/cm ³
混和剤	AE 減水剤, 空気調整剤

表-7 計画調査

W/C	s/a	単位量 [kg/m ³]					
		W	C	G		S	
				G1	G2	S1	S2
60	47.2	179	298	477	486	585	255

表-8 要因と水準

要因		水準				
材料組合せ		下地調整塗材, 仕上塗材, 下地調整塗材+仕上塗材, なし				
下地調整塗材	種類	セメント系 下地調整塗材		合成樹脂 エマルジョン系	セメント系 下地調整厚塗材	
	塗厚 [mm]	C-1	C-2	E	CM-1	CM-2
	製造所	3 社 [記号 a,b,c]			2 社 [記号 d,e]	
仕上塗材	種類	複層塗材 E[記号 AT] 防水形外装薄塗材 E[記号 SE] 防水形複層塗材 E[記号 ET]				
	塗厚 [mm]	標準施工厚さの 1/2				
	製造所	3 社 [記号 a,b,c]				

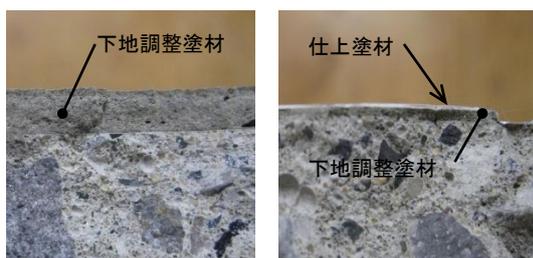


写真-5 試験体断面 (左: 下地調整塗材, 右: 下地調整塗材+仕上塗材)

表-9 試験体種類

記号	下地調整塗材			仕上塗材		
	種類	塗厚 [mm]	製造所	種類	塗厚 [mm]	製造所
C105a(b,c)	C-1	0.5	a(b,c)	(なし)	(なし)	(なし)
C210a(b,c)	C-2	1.0	a(b,c)			
C230a(b,c)		3.0	a(b,c)			
E05a(b,c)	E	0.5	a(b,c)			
CM130d(e)	CM-1	3.0	d(e)			
CM230d(e)	CM-2	3.0	d(e)			
B-ATa(b,c)	(なし)	(なし)	(なし)	AT	標準 ×1/2	a(b,c)
B-SEa(b,c)				SE		a(b,c)
B-ETa(b,c)				ET		a(b,c)
C2-ATa(b,c)	C-2	1.0	a	AT		a(b,c)
C2-SEa(b,c)	C-2	1.0	a	SE		a(b,c)
C2-ETa(b,c)	C-2	1.0	a	ET		a
B-B	(なし)			(なし)		

4.2 実験結果検討

下地・仕上げなし, 下地調整塗材, 仕上げ塗材および下地調整塗材+仕上げ塗材の 4 タイプの仕上げ試験体における促進中性化深さおよび透気係数を図-8, 図-9 に示す。この結果から下地調整塗材や仕上塗材の種類によっては試験体の中性化を抑制していることが分かる。透気係数についても同様の傾向が認められる。

シリーズ I およびシリーズ II を総合した透気試験結果と促進中性化深さを図-10 に示す。中性化深さと透気係数 K_{torr} の関係は、下地調整塗材, 仕上塗材の有無に関係なく使用材料も異なるシリーズ I・II を通して概ね相関が認められた。仕上塗材を施すことによって促進中性化が約 17mm 程度抑制され、この試験結果はシリーズ I の水セメント比に換算すると水セメント比にして 10~20%の低減に相当するものと評価できる。

一方、下地調整塗材を施工した試験体の一部において、促進中性化と透気係数 K_{torr} の一連の相関から外れるケースが 2 点存在する。この試験体はセメント系下地調整塗材 3 mm (C230a) とセメント系下地調整厚塗材 3 mm (CM130d) を施工したいわゆる厚塗りである。本結果は厚塗りのセメント下地そのものの透気性が K_{torr} に影響する一方で、下地調整塗材に含まれているアルカリによって CO₂ が消費されコンクリート部分への CO₂ の浸入が遅れた結果として中性化の進行が抑制されたと考えられる。

なお、 K_{torr} の本質は均質な物体における透気性を表すものであり、仕上げが施された不均質なものに平均としての透気性をもって評価するには矛盾がある。しかしながら、図に示されている一意的な相関は実用上有用であり、仕上塗材による中性化抑制効果を原位置で検証できる手段の一つとして今後の検討を進めてゆきたい。また、本論では仕上塗材の経年劣化の影響は対象としていないが、実際はこの影響を考慮する必要があり、この点は今後の課題である。

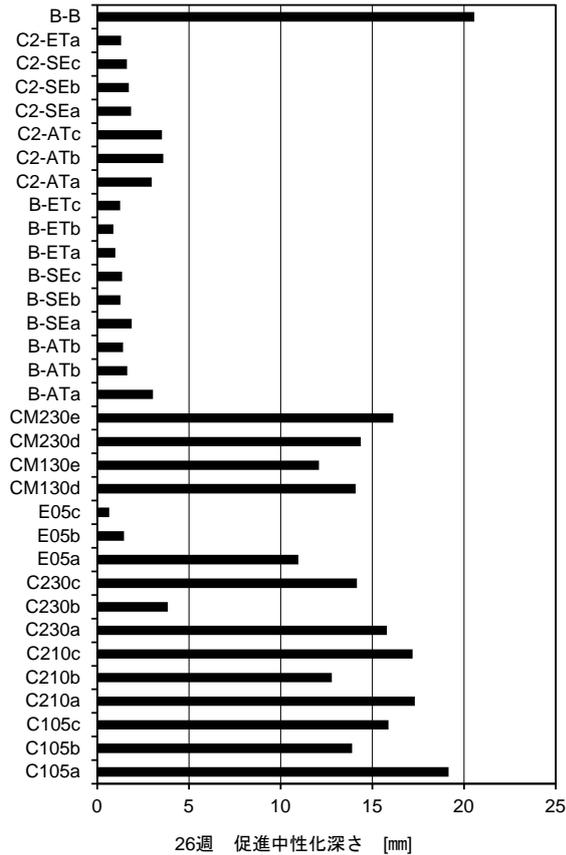


図-8 シリーズIIにおける促進中性化深さ

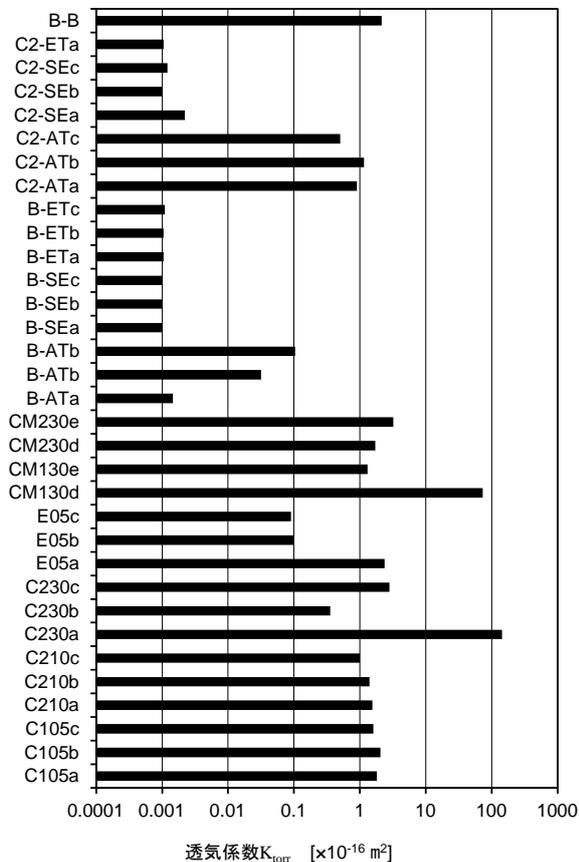


図-9 シリーズIIにおける透気係数 K_{torr}

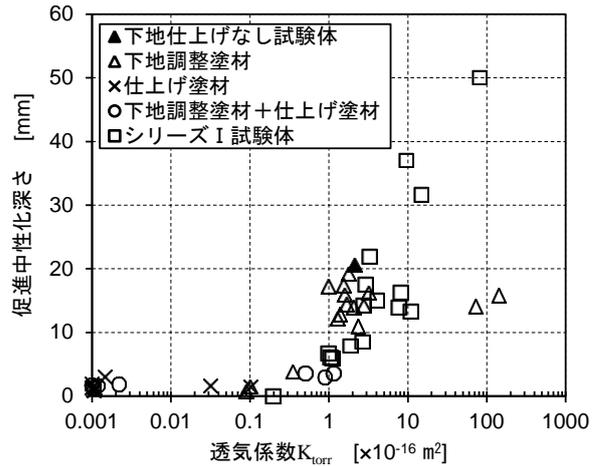


図-10 透気係数 K_{torr} と促進中性化深さ

5. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) コンクリートの透気係数 K_{torr} と促進中性化深さには相関が認められる。
- (2) 一様なコンクリートでも透気係数にばらつきが存在し透気係数に対応して中性化深さも進行していることが認められた。この透気係数および中性化は表層の気泡量が影響する可能性を示した。
- (3) 仕上げ材を施すことによりコンクリート中性化深さは抑制される。この仕上げ材の有無に関わらず透気係数 K_{torr} と促進中性化深さには概ね相関が認められる。
- (4) 仕上げ付試験体の一部において中性化と透気係数 K_{torr} に相関が認められない例として、セメント系下地調整塗材の存在が挙げられる。これは下地調整塗材のアルカリの存在により、コンクリート部分への中性化の進行が遅れるためと考えられる。
- (5) 建築分野のコンクリートの中性化抵抗性能評価において仕上げ材の効果を考慮することは重要であるが、この性能を原位置試験で概ね評価できる可能性を示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、御助力を頂きました日本建築総合試験所の下澤 和幸 様に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会 JCI-TC074A「品質試験方法と施工時諸特性との相関性評価研究委員会」委員会報告書, 2009.8.
- 2) 日本建築学会コンクリート工事標準仕様書 JASS5, 2009.
- 3) 唐沢智之ほか: 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 その 10 仕上げ材の中性化抑制効果と透気性に関する考察, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, pp.959-960, 2008.
- 4) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater& Struct ,v25,n.150, pp.358-365, July 1992.