

論文 鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連について

下澤 和幸*1・今本 啓一*2・山崎 順二*3・永山 勝*4

要旨: 鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を検証するための基礎的な研究として、かぶりコンクリートの透気性と中性化深さの関連について検討した。本論では、国内で検討が進められている3種類の原位置透気試験方法によるコンクリート表層の透気性を評価するための比較試験において、W/Cや養生条件の違いによる透気性の違いを、有意水準1~5%の有意差をもって概ね評価できることを確認した。また、全16種類のコンクリートによる実験より、透気性と自然暴露による中性化深さには相関が認められ、概ね一意的に、透気性に基づいて中性化の進行予測を論じることが可能であることを示した。

キーワード: かぶりコンクリート, 透気性, 中性化深さ, 原位置試験, 非破壊, 微破壊

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物が耐久性を確保するためには、内部鉄筋の腐食を抑制する役割を担うかぶりコンクリートが、外部からの劣化因子の浸透・拡散を抑制する性能を有することが重要となる。この性能を向上させるための材料的研究は、これまで精力的に行われてきているが、複数の工程を経た鉄筋コンクリート構造物において、材料性能そのものが耐久であることは、構造物の耐久性能を満足するための必要条件となるが、十分条件とは言い難い。打込み・締固めおよび養生などの複数の施工プロセスが、鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を大きく左右することは明らかである。これらプロセスの所産としての鉄筋コンクリート構造物の耐久性を、原位置で評価することが重要であり、かぶりコンクリートの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の評価に繋がるものと考えられる。

本論では、主に国内で検討が進められている原位置透気試験方法によるコンクリート表層の透気性を評価するための比較試験の結果、およびコンクリートの透気性と長期自然暴露したコンクリートの中性化深さとの関連について検討した結果について述べる。

2. 各種透気試験によるコンクリート表層の透気性を評価するための比較試験

本研究では、国内において現在検討が進められている次に示す各透気試験方法について検討を行った。

2.1 各試験方法の概要

(1) RILEM Cembureau 法 (RILEM 法)

本方法は、RILEM TC116-PCD "Permeability of Concrete

as a Criterion of its Durability" によって提案された試験方法¹⁾であり、特に海外においてはベンチマーク試験として位置づけられている。試験には、直径15cm、厚さ5cmの試験体(円板状)を用い、試験前処理として50℃の環境下で乾燥させる。試験体は、図-1に示す試験セルに格納し、試験体周囲を気密にした状態で圧力を印加して、その状態における透気量から式(1)のハーゲン・ポアズイユ則により透気係数 K (m²) を求める。

$$K = \frac{2Qp_a L \eta}{A(p^2 - p_a^2)} \quad (1)$$

ここに、 Q は透気量(m³/s)、 p は透気係数を求める際の印加圧力(N/m²)、 L は試験体厚さ(m)、 η は気体の粘性(Ns/m²)、 A は試験体断面積(m²)および p_a は大気圧(N/m²) である。

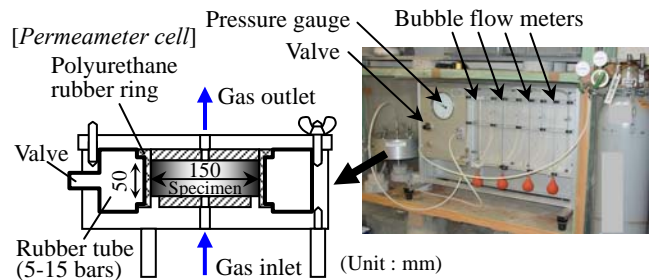


図-1 RILEM Cembureau 法

(2) ドリル削孔法

この方法は、J.W.Figg によって開発され²⁾、国内では笠井らによって改良が加えられた³⁾。本研究では、この笠井らによる試験方法によった。本法は図-2のとおり、試験位置に設けたドリル孔(直径10mm×深さ50mm)を

*1 (財) 日本建築総合試験所 試験研究センター材料部材料試験室主査 (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 (株) 浅沼組 大阪本店建築部技術グループ主任 工修 (正会員)

*4 (財) 日本建築総合試験所 試験研究センター材料部長 博士(工学) (正会員)

用いる。この試験孔をシリコンキャップにて密栓し、孔内をある程度の余裕をもって減圧した後、孔内部の圧力が特定の圧力に戻るまでに要する時間を計測し、式(2)によって、簡易透気速度 P.V. (kPa/s) を求める。

$$\text{簡易透気速度 P.V.} = (25.3 - 21.3) / t \quad (2)$$

ここに、t は孔内の圧力が 21.3kPa から 25.3kPa へ戻るのに要する時間(s)である。なお、式(2)の圧力範囲において t < 10 秒の場合、13.3kPa から 33.3kPa の範囲にて再測定を行う。

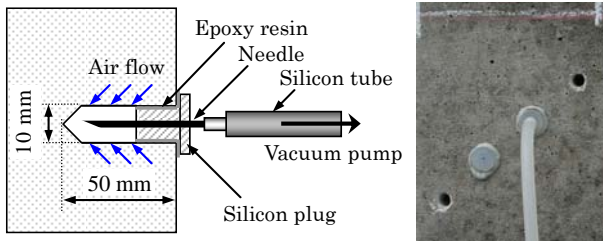


図-2 ドリル削孔法

(3) シングルチャンバー法

この方法は、Schönlin, Hilsdorf が開発⁴⁾し、継続的な検討がなされた。本法は図-3 のとおり、コンクリート表面に装着させたチャンバー内部をある程度の余裕をもって減圧した後、チャンバー内部の圧力が特定の値に戻るまでに要する時間（圧力と時間変化関係において線形性が成り立つ範囲）を計測し、式(3)によって透気指数 A.P.I. (kPa/s) を求める⁵⁾。

$$\text{透気指数 A.P.I.} = (33.3 - 16.0) / t \quad (3)$$

ここに、t はチャンバー内圧力が 16.0kPa から 33.3kPa に戻るのに要する時間(s)である。

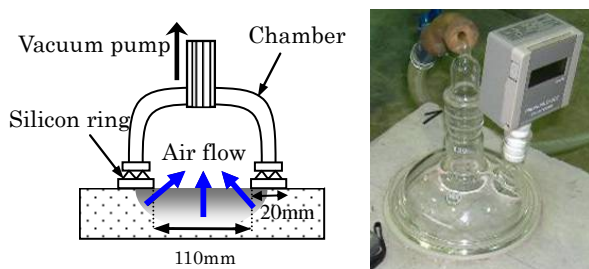


図-3 シングルチャンバー法

(4) ダブルチャンバー法（トレント法）

この方法は、R.Torrent によって開発され⁶⁾、RILEM 法とはほぼ一致する空気流を原位置試験で実現した方法である。本法（以下、トレント法と呼称）は図-4 のとおり、内部と外部の2つのチャンバー内を減圧させながら、各チャンバー内の圧力を等しく制御し、減圧開始 60 秒以降の内部チャンバー直下からの栓流によるチャンバ

一内の圧力変化量とその経過時間から、式(4)によって透気係数 K_T を求める。

$$K_T = 4 \left(\frac{V_c (dp_i/dt)}{A(p_a^2 - p_i^2)} \right) \frac{\eta p_a}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_a} \right)^2 \right] dt \quad (4)$$

ここに、 V_c は内部チャンバーと接続要素（ホース等）の容積(m^3)、 ε は本法で仮定されたコンクリートの空隙量： $0.15(m^3/m^3)$ ⁶⁾、 p_i は内部チャンバーの圧力(N/m^2)および A は仮定された栓流の断面積(m^2)である。

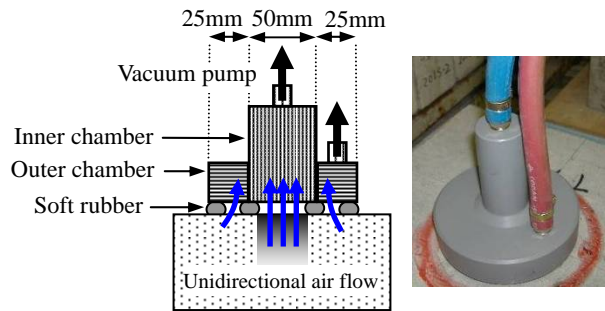


図-4 ダブルチャンバー法（トレント法）

2.2 試験体および試験の概要

比較試験には、生コン工場で製造された呼び強度 21、27 および 36 の 3 種類のコンクリートを用いた。各コンクリートは、水(W)は上水道水、セメント(C)は普通ポルトランドセメント（密度 $3.16g/cm^3$ ）、細骨材(S)は、山砂（城陽産、密度 $2.75g/cm^3$ 、FM2.80）を 70% と砕砂（高槻産、密度 $2.66g/cm^3$ 、FM2.80）を 30% として混合したもの、粗骨材(G)は砕石（高槻産、密度 $2.69g/cm^3$ 、実績率 58.0%）、混和剤(Ad)は AE 減水剤（AE: リグニンスルホン酸系）、または高性能 AE 減水剤（SP: ポリカルボン酸エーテル系）を用いた。計画調合と物性を表-1 に示す。

表-1 コンクリートの計画調合と物性

呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)
			W	C	S	G	Ad.			
21	63	46.6	184	292	826	974	AE:3.10	16.0	5.9	32.0
27	54	49.2	180	333	860	915	SP:2.90	9.5	5.0	38.7
36	44	48.7	180	409	821	890	SP:4.13	21.5	5.5	44.4

試験体は、外形寸法：幅 30cm × 高さ 30cm × 奥行き 10cm の平板とし、30 × 10 cm の小口より縦打ちでコンクリートを打設した。打設 2 日後に型枠脱型を行い、一方を標準養生（20℃水中 1 ヶ月間 + 恒温恒湿室（20℃、60% R.H.）にて 1 ヶ月間）、他方を気中養生（型枠脱型の後、恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて 2 ヶ月間存置）とした 2 種類を用意した。試験は、材齢約 2 ヶ月時点におい

て、試験体の側面（型枠に接していた 30×30 cm 面）を対象とし、試験体端部より約 5cm 以上内側の位置において、計 6 箇所（一部については 5 箇所）を測定した。なお、試験体の測定箇所数は、サンプル数に基づく推定平均値と推定標準偏差が、統計理論上一定に収束するとされる回数（6 回）とした⁷⁾。また、3 種類のコンクリートについては、目標スランプ 18±2.5cm を外れるものもあったため、その品質の違いを確認するため、RILEM 法用としてφ15×30 cm の円柱試験体（28d 標準養生）を、促進中性化試験（JIS A 1153）用として 10×10×40cm の角柱試験体（28d 標準養生）をそれぞれ作製し、試験に供して、その差異を予め確認した。本比較試験の評価は、RILEM TC-189 NEC "Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover" で実施された方法に準拠し、測定結果に対して t 検定により有意差を検証した⁸⁾。

2.3 比較試験の結果

試験は、同一の試験体において、トレント法、シングルチャンバー法およびドリル削孔法の順で実施した。表-2 の結果および養生条件として想定される透気指標値の大小関係（レーティング）について、計 6 回の測定結果に基づく t 検定を行った。ここでは、標準養生の試験体を"A"、気中養生の試験体を"C"と表記した。

表-2 RILEM 法透気係数と促進中性化深さ

呼び強度	透気係数 (×10 ⁻¹⁸ m ²)			平均値 (×10 ⁻¹⁸ m ²)	変動係数 (%)	26 週促進中性化深さ (mm)
21	640	734	840	738	13.6	34.4
27	157	176	172	168	6.0	16.7
36	112	110	115	112	2.2	5.5

表-3 t 検定の結果

変動要因		呼び強度			
比較条件		A21-A27	A27-A36	C21-C27	C27-C36
大小関係(レーティング)		A21<A27	A27<A36	C21<C27	C27<C36
ドリル削孔法	t	9.07	1.67	8.36	2.68
	検定結果	+++	--	+++	++
シングルチャンバー法	t	8.86	4.24	6.06	3.81
	検定結果	+++	+++	+++	+++
トレント法	t	31.05	3.61	31.29	7.10
	検定結果	+++	+++	+++	+++
変動要因		養生方法			
比較条件		A21-C21	A27-C27	A36-C36	
大小関係(養生方法)		A21>C21	A27>C27	A36>C36	
ドリル削孔法	t	6.24	6.33	7.55	
	検定結果	+++	+++	+++	
シングルチャンバー法	t	1.53	2.30	2.96	
	検定結果	--	++	++	
トレント法	t	32.73	22.79	22.51	
	検定結果	+++	+++	+++	

注) 表中の記号は、+++ (有意水準 1% で有意差あり)、++ (有意水準 5% で有意差あり)、-- (有意差は認められない) を示す。

表-3 に示すとおり、ドリル削孔法とシングルチャンバー法の一部の結果を除き全体的にみれば、いずれの試験方法も有意水準 1~5% で、各コンクリートの透気性を概ね評価することができている。なお、ドリル削孔法において呼び強度の違いによる評価の有意水準が低いのは、骨材の偏在に伴うばらつきの影響を受けたためと考えられ、シングルチャンバー法において養生方法の違いによる評価の有意水準が低いのは、主として表層組織の影響のためと考えるが、この点については更なる検討が必要であると考えられた。

3. 透気性の指標値と中性化深さ

透気試験結果の閾値は、これまでに文献 2) や 9) などによって、主に海外において提案されている。また国内では、コンクリートの透気性と中性化深さには密接な関係があるとの考えから、透気係数と促進中性化深さの関係から評価値の提案がなされている³⁾。しかし、コンクリートの中性化における促進試験と自然暴露の対応は、必ずしも明確なものではない。このように、いまだ統一的な評価値は、確立されたものが存在しない。

本研究では、限定された期間（約 4 年間）ではあるが、雨掛かりのない屋外暴露環境におけるコンクリートの中性化深さに基づき、各試験方法の透気性の指標値と中性化深さとの関係について検討を行った。

3.1 実験概要

本実験には、試験室で製造した 16 種類のコンクリートを用いた。各コンクリートは、水(W)は上水道水、セメント(C)は普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）、細骨材(S)は山砂（枚方産、密度 2.57 g/cm³、FM2.75）、粗骨材(G)は砕石（高槻産、密度 2.68 g/cm³、実績率 58.0%）、混和剤(Ad)は AE 減水剤（N: リグニンスルホン酸系）、または高性能 AE 減水剤（H: ポリカルボン酸系）を用いた。計画調査およびその物性を表-4 に示す。

シングルチャンバー法およびドリル削孔法に用いた試験体は、外形寸法: 15×15×53 cm の角柱試験体とし、打設 2 日後に型枠脱型を行い、一方を標準養生（20℃水中 1 ヶ月間+恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて 1 ヶ月間）、他方を気中養生（打設 2 日後に型枠脱型の後、恒温恒湿室（20℃、60%R.H.）にて 2 ヶ月間存置）とした 2 種類を用いた。また、RILEM 法用として、φ15×30 cm の円柱試験体を製作し、打設 2 日後に型枠脱型を行い、上記の角柱試験体と同様の養生を行った後、円柱試験体の中央部をφ15×5cm にカット成形した。さらに、中性化試験のために、屋外自然暴露用として 30×30×10 cm の平板試験体（養生は上記の標準養生と同様）、および 15×15×53cm の角柱試験体（養生は上記の気中養生と同様）を、また、JIS A 1153 による促進中性化試験（促

進期間 26 週) 用として 10×10×40cm の角柱試験体を製作した。

ドリル削孔法およびシングルチャンバー法による透気試験は、試験体の材齢約 2 ヶ月の時点において、試験体の長手方向の側面 (型枠に接していた 15×53 cm 面) を対象に実施した。また、RILEM 法は、養生を終えた試験体について所定の試験前処理を行ない、試験に供した。さらに、屋外自然暴露による中性化試験は、雨掛かりのない環境下において約 4 年間にわたり実施した。

表-4 コンクリートの計画調合および物性

試験体記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				Ad. (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)
			W	C	S	G				
30-175	30	46.8	175	583	734	870	H:1.2	---	1.3	71.3
40-175	40	45.7	175	438	754	933	H:0.6	19.0	5.5	46.3
40-197	45	45.7	197	438	754	933	H:0.6	21.0	3.8	40.9
45-175	45	46.8	175	398	787	933	H:0.6	20.0	4.7	44.5
50-162	45	47.4	162	360	805	933	N:1.0	2.0	5.0	40.4
40-219	50	45.7	219	438	754	933	H:0.7	21.0	3.8	31.6
50-180	50	47.4	180	360	805	933	N:1.0	16.5	5.2	33.7
50-198	55	47.4	198	360	805	933	N:1.0	22.0	3.3	32.5
55-180	55	48.2	180	327	831	933	N:1.1	19.0	5.6	30.1
60-165	55	48.8	165	300	853	933	N:1.3	18.0	4.6	25.6
50-216	60	47.4	216	360	805	933	N:1.0	25.5	2.2	30.0
60-180	60	48.8	180	300	853	933	N:1.3	18.0	5.2	23.6
60-195	65	48.8	195	300	853	933	N:1.3	23.0	4.9	25.1
65-180	65	50.2	180	277	887	917	N:1.5	20.0	4.0	16.6
80-200	80	53.5	200	250	977	886	---	5.5	2.6	13.6
100-200	100	54.5	200	200	1018	886	---	18.0	1.0	8.8

注) □ は基準調合を示し、他は W/C=40, 50 および 60%の基準調合に加水もしくは減水した(±5%または+10%W/C 相当)ものである。
また、圧縮強度は材齢 28 日標準養生によるものである。

3.2 実験結果と考察

各透気試験と促進中性化試験の結果を表-5 に、自然暴露約 4 年における中性化深さを図-5 に示す。表-5 のとおり各透気試験による指標値は、コンクリートの W/C が大きくなるほど、また標準養生に比して気中養生のものほど大きくなる傾向を示した。これは透気試験に関する研究論文において、一般に指摘のなされることである^{4),6),10)}。また、図-5 のとおり、自然暴露による中性化深さも一般に指摘のなされるように、標準養生に比して気中養生のもの中性化が進行する傾向を示した。さらに、促進中性化試験と雨掛かりのない屋外暴露 (標準養生のもの) による中性化深さについて、 \sqrt{t} 則より求めた両者の中性化速度係数の関係を図-6 に示す。屋外の CO₂ 濃度を 0.05%とした場合、理論的には自然暴露による中性化速度係数は促進中性化 (CO₂ 濃度 5%) の平方根となる¹¹⁾が、結果はそれを支持するものとなった。

表-5 各透気試験結果と促進中性化深さ

試験体記号	RILEM 法 透気係数 ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)		ドリル削孔法 簡易透気速度 (kPa/s)		シングルチャンバー法 透気指数 (kPa/s)		促進養生による 中性化深さ (mm)
	標準	気中	標準	気中	標準	気中	
30-175	8	9	0.026	0.036	0.012	0.013	0
40-175	33	33	0.029	0.026	0.013	---	9.4
40-197	53	162	0.027	0.028	0.016	0.084	14.1
45-175	31	46	0.039	0.030	0.012	0.030	12.7
50-162	35	177	0.022	0.024	0.016	0.028	13.8
40-219	106	653	0.025	0.028	0.023	0.033	17.0
50-180	86	375	0.024	0.024	0.028	0.141	16.9
50-198	294	481	0.031	0.022	0.043	0.206	17.3
55-180	87	327	0.016	0.120	0.029	0.273	19.5
60-165	97	446	0.031	0.145	0.032	0.082	21.8
50-216	---	---	0.029	0.022	0.055	0.430	18.2
60-180	224	1660	0.022	0.203	0.030	0.113	23.8
60-195	611	2348	0.024	0.242	0.024	0.075	21.2
65-180	275	816	0.064	0.712	0.051	0.845	40.5
80-200	861	1575	0.109	0.737	0.133	2.238	42.9
100-200	1824	4051	0.352	1.669	4.358	10.433	70.0

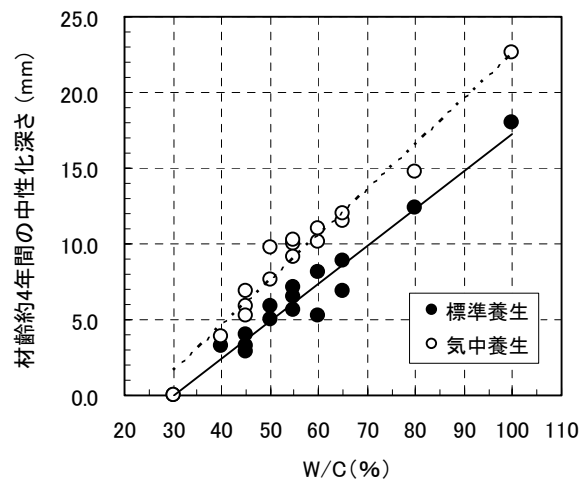


図-5 各養生方法による自然暴露下での中性化深さ

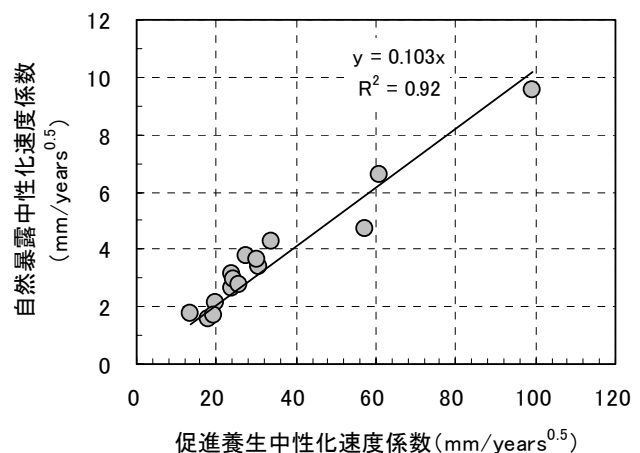


図-6 促進養生と自然暴露 (約 4 年) による中性化速度係数

次に、標準養生とした試験体による約4年間の屋外自然暴露における中性化速度係数に基づき、建築基準法に示されたRC主要部材(柱・梁・耐力壁)のかぶり厚さ30mmに中性化が到達するまでの期間を算出した。この算出値と各透気試験方法における透気性の指標値について比較検討した結果を図-7~10に示す。図中の小さなプロットは、各コンクリートにおける気中養生試験体の試験結果を示したものである。また各図には、日本建築学会 JASS5 で検討された計画供用期間の級のうち、「短期」(30年)、「長期」(100年)および「超長期」(200年)を横線として示した。各図に示すとおり、かぶり厚さ30mmに中性化が到達すると予想される期間と透気性の指標値には概ね相関があると考えられた。

図-7に示すRILEM法は、図中の縦線として示した既に提案された閾値が存在する⁹⁾が、文献においてその根拠は乏しい。約4年の間に全く中性化していないものもあるのに係らず、本実験においては"Low"(透気が小さい)に属するコンクリートは存在しなかった。

本実験の範囲内では、透気係数が概ね $50 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 以下は、JASS5での計画供用期間の級としての「超長期」(200年)に対応しており、透気係数 $700 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 以上は「短期」(30年)に対応する閾値になり得ると考えるが、RILEM法による国内でのコンクリートの透気性の評価のための閾値については、今後も継続して検討が必要であると考えられた。

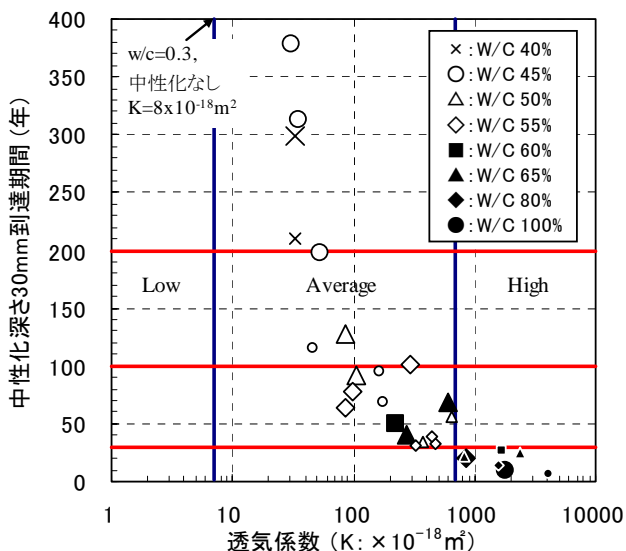


図-7 透気係数と中性化深さ30mm到達期間 (RILEM法)

図-8に示すドリル削孔法は、本実験の範囲内において簡易透気速度 0.10 kPa/s 付近が、「短期」の級に対応する閾値になり得ると考えられた。本法の閾値は、笠井・湯浅らにより既に提案されているものがあるが³⁾、中性化の手段や使用材料が異なることなどから、今後もデー

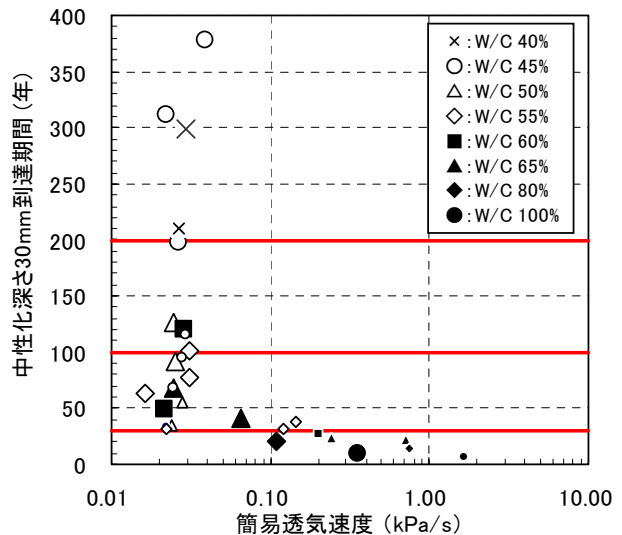


図-8 簡易透気速度と中性化深さ30mm到達期間 (ドリル削孔法)

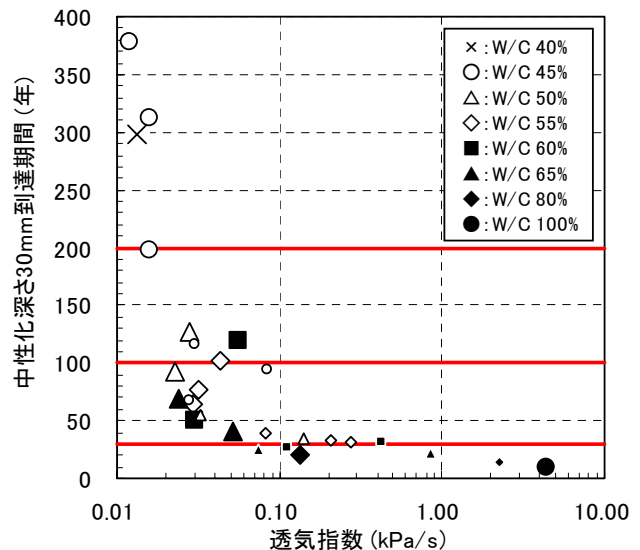


図-9 透気指数と中性化深さ30mm到達期間 (シングルチャンバー法)

タを集積して検討する必要があると考える。

図-9に示すシングルチャンバー法は、これまで閾値の提案はみられないが、本実験の範囲内では透気指数 0.015 kPa/s 以下は「超長期」の級に、 0.10 kPa/s 付近が「短期」の級に対応する閾値になり得ると考えられた。

なお、ドリル削孔法およびシングルチャンバー法の透気性の指標値と30mm中性化到達期間の関係において、本実験の範囲内では、養生方法の違いによる分布の乖離は認められない。また、シングルチャンバー法におけるコンクリート表層部の粗な組織の影響を受けやすい点についても、その影響は見られない。すなわち、各透気試験法については、概ね一意的に、透気性の指標値と30mm中性化到達期間の関係を論じることが可能であると考えられた。

トレント法については、本実験のコンクリートによる試験は実施していないが、上述の比較試験で得た RILEM 法とトレント法の透気係数の関係 ($K_T = (K + 0.4074)/12.332$; $R^2=0.97$) より、本実験での RILEM 法の透気係数から K_T の推定値と求め、図-10 に示した。トレント法と RILEM 法は等値の関係となることが文献¹²⁾に示されているが、上述の関係がそのようになってないのは、試験前の処理 (2.1(1)を参照) の違いによるものと考えられる。本法は、Torrent によって図中の縦線として示した閾値が提案されている。算出した推定値は、中間的な"Good"から"Bad"の郡に概ね万遍なく分布する結果であった。

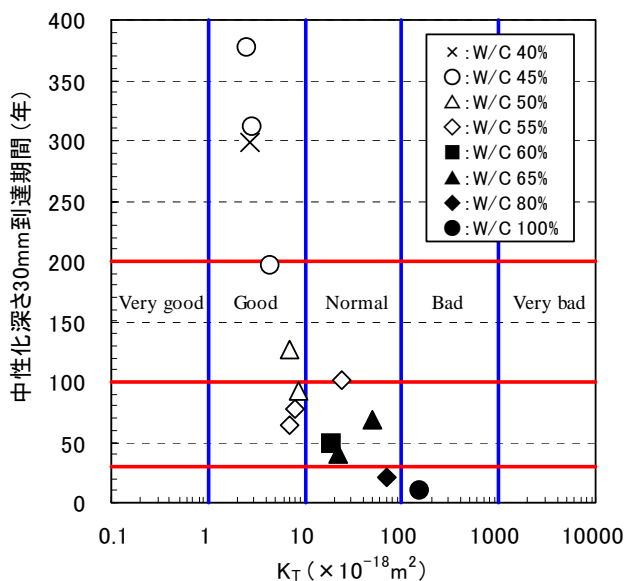


図-10 透気係数 (K_T) の推定値と中性化深さ 30 mm 到達期間 (トレント法)

4. まとめ

本論での実験結果から、次の知見を得た。

- (1) ドリル削孔法、シングルチャンバー法およびトレント法は、呼び強度 21, 27 および 36 における W/C や養生条件の異なるコンクリート表層の透気性を、ドリル削孔法とシングルチャンバー法の一部の結果を除き全体的にみれば、有意水準 1~5%の有意差をもって概ね評価できると考えられた。
- (2) W/C30%~100%の全 16 種類のコンクリートによる約 4 年間の雨掛かりのない屋外暴露下での中性化速度係数から、中性化深さが 30mm に到達する期間を算定した値と各透気試験法における透気性の指標値を比較した結果、両者には概ね相関が認められた。また、本実験の範囲内では、透気性の指標値と 30mm 中性化到達期間の関係において、コンクリートの養生方法の違いによる分布の乖離

は認められず、概ね一意的に、透気性に基づいて中性化到達期間の関係を論じることが可能であると考えられた。

参考文献

- 1) RILEM TC 116-PCD: Recommendations of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of the gas permeability of concrete by the RILEM - CEMBUREAU method, Mater. & Struct., Vol.32, pp.176-178, Apr.1999
- 2) Figg, J.W.: Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 25, No. 85, pp.213-219, Dec.1973
- 3) 笠井芳夫・湯浅昇ほか：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法 その 1~その 2, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.699-702, 1999.9
- 4) Schönlin, K. and Hilsdorf, H.: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures, ACI SP-100, Concrete Durability, Katharine and Bryant Mather Intern. Confer., Vol.1, pp.207-226, Detroit, ACI, 1987
- 5) 今本啓一ほか：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 607 号, pp.31-38, 2006.9
- 6) Torrent, R.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater.&Struct., Vol.25, No.150, pp.358-365, July.1992
- 7) 永山勝ほか：構造物コンクリートの各種表層透気試験法と評価 その 3, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, pp.1253-1254, 2007.8
- 8) 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
- 9) Concrete Society Technical Report No.31: Permeability testing of site concrete - A review of methods and experience, p75, Aug.1988
- 10) Hong, C.Z. and Parrott, L.J., Air permeability of cover concrete and the effect of curing, British Cement Assoc. Report C/5, Oct.1989
- 11) 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.105-106, 2004
- 12) Torrent, R. und Ebensperger, L.: Studie über methoden zur messung und beurteilung der kennwerte des überdeckungsbetons auf der baustelle - Teil 1, p.119, Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar.1993