

9. 簡易透気性試験による RC 構造体の耐久性評価に関する研究

Study on Evaluation of Durability of Reinforced Concrete Structure with Air-permeability Tests of Concrete Cover

山崎 順二*¹ 立松 和彦*²

要 旨

透気性試験値と中性化深さとの関連性を、水セメント比 30～100%の範囲のコンクリート供試体を用いて材齢 4 年までの自然暴露により評価した。また、呼び強度 21～36 の範囲で 5 種類の実大 RC 壁を作製して簡易透気性試験を行い、試験値の変動量を調査した。検討の結果、中性化速度係数と簡易透気性には高い相関が認められ、簡易透気性試験によってコンクリートの中性化速度が予測できることが分かった。また、実大 RC 壁における簡易透気性試験値のサンプリング手法を検討し、計画供用期間と部材のかぶり厚さに応じた RC 構造物の耐久性評価や寿命を予測するためのチャートを示すとともに、簡易透気性試験値の閾値を示した。

キーワード：簡易透気性／かぶり厚さ／耐久性評価／ドリル削孔法／シングルチャンバー法／中性化深さ

1. はじめに

かぶりコンクリートは、鉄筋コンクリート (RC) 構造物の耐久性に重要な役割を担うが、その品質は使用材料や調査条件だけでなく、施工時の締固めの程度、収縮ひび割れの存在、養生方法などの施工条件によって大きな影響を受ける。そのため、かぶりコンクリートの原位置における物質浸透性を適切に評価することは、構造物の竣工時点での耐久性の評価、経過年数に応じた構造物の寿命予測、補修時期などの立案のために有用な情報となる。

本報では、水セメント比 30～100%のコンクリート供試体を用いて、RC 構造物の原位置での試験に適用できると考えられるドリル削孔法¹⁾およびシングルチャンバー法²⁾による簡易透気性試験、透気性のベンチマークとして扱われる RILEM 法³⁾による透気性試験を行った。また、呼び強度 21～36 の範囲の 5 種類のコンクリートを用いて実大 RC 壁試験体を作製し上記 3 種の透気性試験を行い、壁試験体における透気性試験値の変動量を調査した。

本報では、供試体における簡易透気性と中性化深さの関連性を把握し、これらの関係に基づいた RC 構造物の耐久性評価や寿命を予測するためのチャートを示すとともに、実大 RC 壁における簡易透気性試験のデータサンプリング手法について検討を加え、計画供用期間と部材のかぶり厚さに応じた透気性試験の閾値について検討する。

リコン栓にて密封し、孔内を減圧 (X1) した後、孔内部の真空度が所定の圧力 (X2) に戻るまでに要する時間を計測し、簡易透気速度を求める。

簡易透気速度 P.V. (kPa/s) は、孔内を X1 まで減圧した後、圧力が X1 (kPa) から X2 (kPa) まで復圧するのに要した時間を T (秒) とすると、式 (1) により求められる。

$$P.V. = (X2 - X1) / T \quad (1)$$

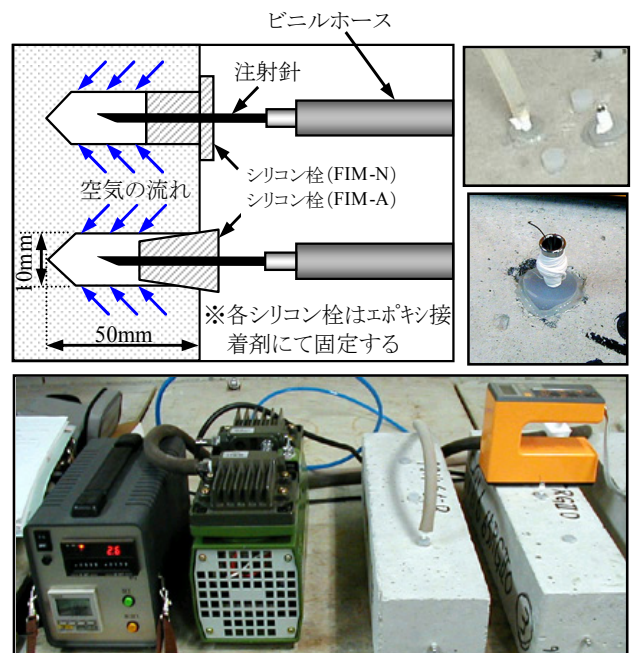


図-1 ドリル削孔法 (FIM法)

2. 各種の簡易透気性試験の概要

2.1 ドリル削孔法 (FIM-A 法、FIM-N 法)

図-1 に示すように、試験位置に設けたドリル孔をシ

*¹ 大阪本店建築部技術グループ

*² 技術研究所環境・生産研究グループ

本報では、簡易透気速度 P.V.(kPa/s)を得るための圧力の範囲について、X1 を 21.3kPa、X2 を 25.3kPa とした。この範囲は文献⁴⁾の 160～190mmHg に相当する。

なお、FIM 法においては笠井⁴⁾や下澤ら⁵⁾によって用いられている従来型(FIM-N)と、試験準備段階での栓の設置の作業性がやや改善できるコーン型(FIM-A)¹⁾の 2 種類のシリコン栓を使用した。

2.2 シングルチャンバー法 (SCM 法)

図-2 に示すように、コンクリート表面に装着させたチャンバー内部を真空状態にした後、チャンバー内部の圧力が 16.0kPa から 33.3kPa に戻るまでに要する時間 T(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(2) により透気指数 A.P.I.(kPa/s)を求める。

$$\text{透気指数 A.P.I.} = (33.3 - 16.0) / T \quad (2)$$

ここに、

T : チャンバー内部の圧力が 16.0kPa から 33.3kPa に戻るまでに要する時間(s)

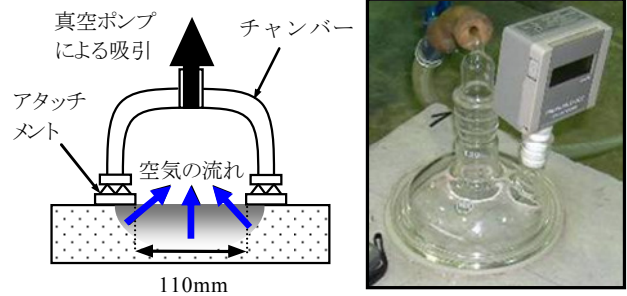


図-2 シングルチャンバー法 (SCM 法)

表-1 供試体の使用材料

使用材料	品 質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (太平洋製) : 密度 3.16g/cm ³
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	山砂 (枚方産) : 表乾密度 2.57g/cm ³ , FM : 2.75
粗骨材 (G)	碎石 (高槻産) : 表乾密度 2.68g/cm ³ , 実積率 : 58.0%
混和剤 (Ad)	SP : 高性能 AE 減水剤 AE : AE 減水剤

3. 供試体による中性化深さと簡易透気性試験値

3.1 実験の概要

水セメント比 30%～100%までの全 16 種類の計画調査によるコンクリートを用いて室内試験に供する供試体を作製し、JIS A 1153 に準じた促進中性化試験、材齢約 4 年までの雨がかりのない屋外自然暴露による中性化試験および簡易透気性試験 (FIM-A 法、FIM-N 法および SCM 法) を行った。加えて、透気性試験値のベンチマークとなる RILEM 法³⁾による透気性試験を行った。コンクリートの使用材料を表-1 に、16 種類の調査計画を表-2 に示す。供試体の種類は、簡易透気性試験および促進中性化深さ測定のための 10×10×40cm 供試体、RILEM 透気性試験のための φ15×30cm 円柱供試体(円柱供試体を厚さ 5cm にスライスしたものを使用)とした。

3.2 中性化速度係数と透気指標値との関係

水セメント比 30%～100%の供試体において、材齢約 4 年の自然暴露試験体における中性化試験結果から求めた中性化速度係数と各種の透気試験結果との関係を図-3～図-6 に示す。各図中にはそれぞれの回帰式を示した。相関係数は R=0.88～0.96 となり、試験法によってやや差はあるがいずれも高い相関が認められた。これらの関係を適用することによって、中性化の進行の程度を簡易透気性試験の結果から予測できることになる。

一方、図-3 および図-4 には、材齢 26 週までの促進中性化試験による中性化速度係数と、RILEM 法および FIM-A 法との関係を併せて示した。促進試験による中性

表-2 供試体の計画調査の概要

供試体記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad C×(%)
			W	C	S	G	
30-175	30	46.8	175	583	734	870	SP:1.2
40-175	40	45.7	175	438	754	933	SP:0.6
40-197	40	45.7	197	438	754	933	SP:0.6
40-219	40	45.7	219	438	754	933	SP:0.7
45-175	45	46.8	175	398	787	933	SP:0.6
50-162	50	47.4	162	360	805	933	AE:1.0
50-180	50	47.4	180	360	805	933	AE:1.0
50-198	50	47.4	198	360	805	933	AE:1.0
50-216	50	47.4	216	360	805	933	AE:1.0
55-180	55	48.2	180	327	831	933	AE:1.1
60-165	60	48.8	165	300	853	933	AE:1.3
60-180	60	48.8	180	300	853	933	AE:1.3
60-195	60	48.8	195	300	853	933	AE:1.3
65-180	65	50.2	180	277	887	917	AE:1.5
80-200	80	53.5	200	250	977	886	0
100-200	100	54.5	200	200	1018	886	0

化速度係数に対する材齢約 4 年までの自然暴露における中性化速度係数は概ね 1/10 程度であった。

3.3 透気性試験値の試験方法による比較

透気性試験のベンチマークとして扱われる RILEM 法による透気係数と、本報で用いた FIM-A 法、FIM-N 法および SCM 法による簡易透気性試験値の関係を図-7～図-9 に示す。また、FIM-A 法と FIM-N 法による簡易透気速度の関係を図-10 に示す。それぞれにおいて、各透気性試験値間に高い相関が認められた。これらの中でも、コンクリート表面からチャンバーを用いて透気性を測定

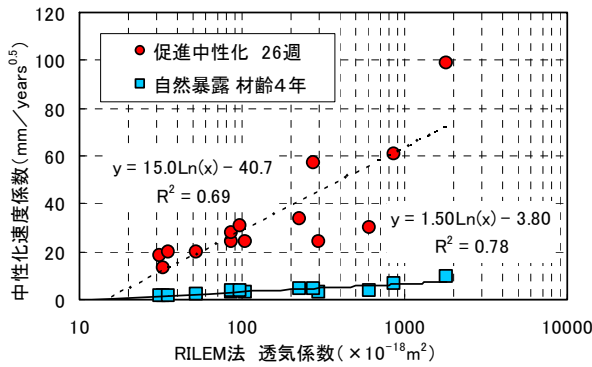


図-3 中性化速度係数とRILEM法による透気指標値

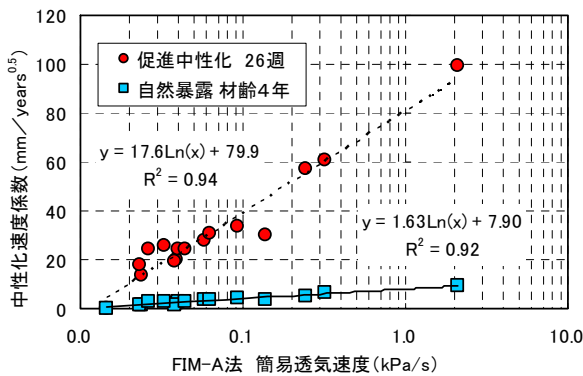


図-4 中性化速度係数とFIM-A法による透気指標値

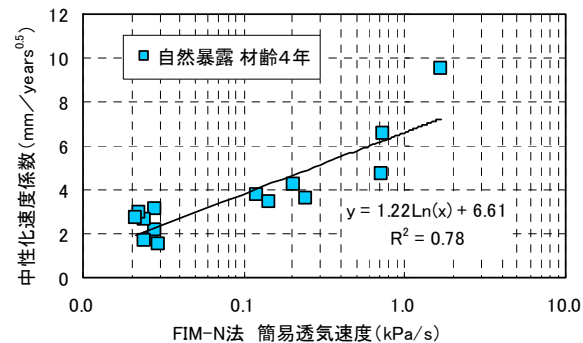


図-5 中性化速度係数とFIM-N法による透気指標値

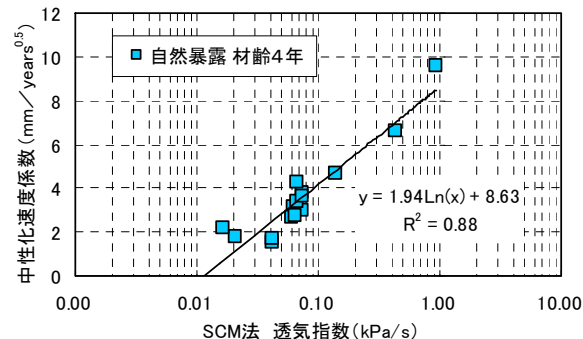


図-6 中性化速度係数とSCM法による透気指標値

する RILEM 法と SCM 法の関係、また、ドリル削孔を用いて測定する FIM-A 法と FIM-N 法の関係において、より

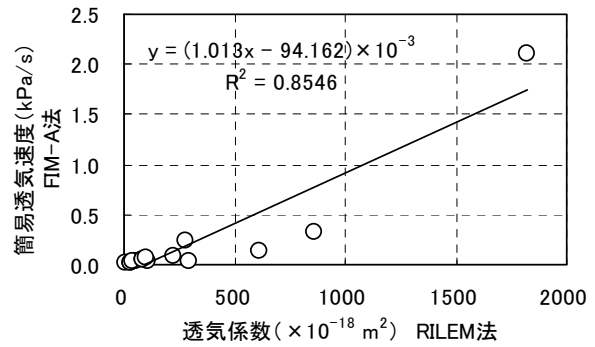


図-7 FIM-A 法と RILEM 法による透気試験値

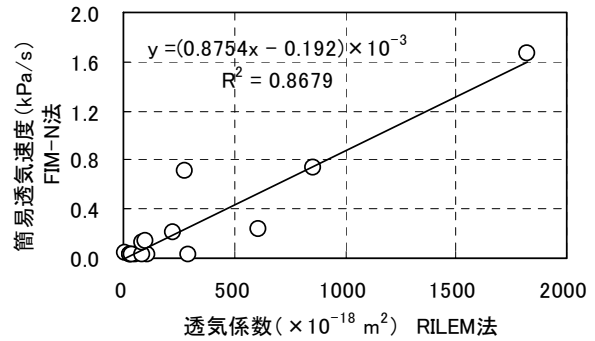


図-8 FIM-N 法と RILEM 法による透気試験値

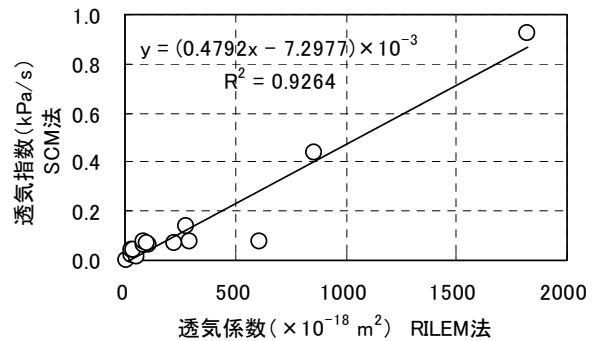


図-9 SCM 法と RILEM 法による透気試験値

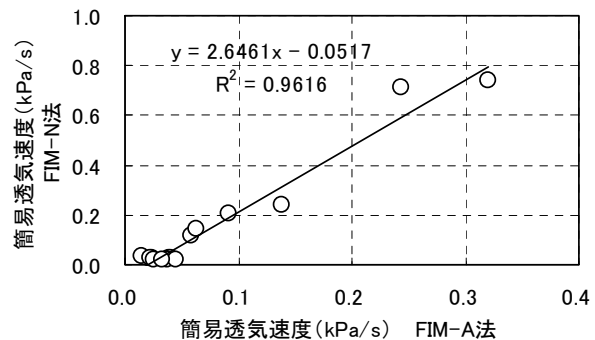


図-10 FIM-N 法と FIM-A 法による透気試験値

高い相関が認められた。

3.4 透気性試験値と中性化深さの到達期間

RC 建物の構造体および部材は、設計耐用年数の期間内は中性化によって設計限界状態に達しないように配慮し

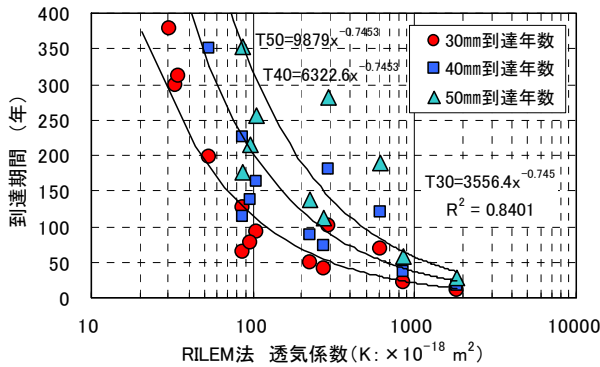


図-11 中性化深さ到達期間と透気係数 (RILEM 法)

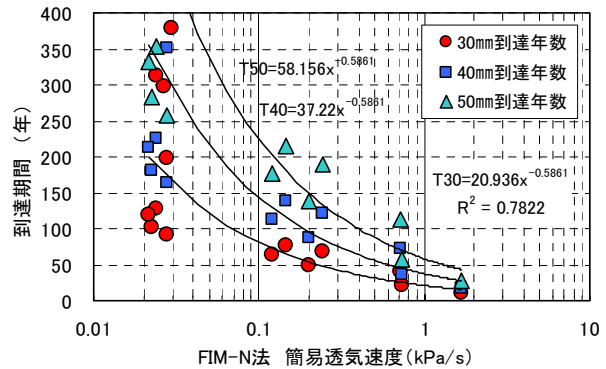


図-13 中性化深さ到達期間と簡易透気速度 (FIM-N 法)

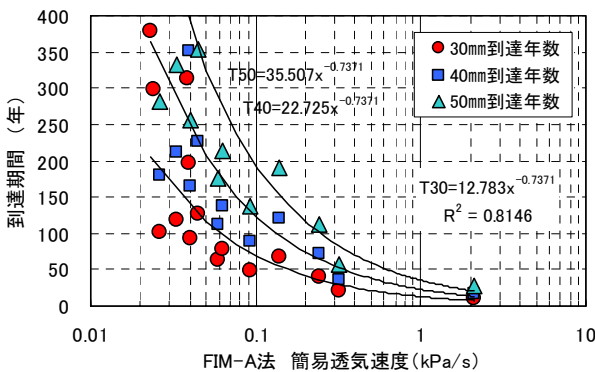


図-12 中性化深さ到達期間と簡易透気速度 (FIM-A 法)

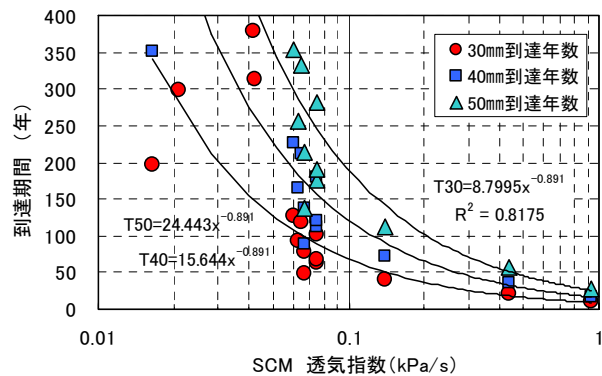


図-14 中性化深さ到達期間と透気係数 (SCM 法)

て設計されるが、施工品質の程度や条件によっては所要の品質が確保されない場合がある。このような不具合を早い段階で防止するために、建物竣工時に簡易な透気性試験を行うことによってかぶりコンクリートの品質を適切に評価する手法が考えられる。

日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 (JASS5) に部材ごとかつ計画供用期間ごとに設計かぶり厚さが定められている。そこで、この設計かぶり厚さに到達するまでの到達期間と各透気試験値との関係について、前述の材齢 4 年の自然暴露試験体の中性化速度係数に基づき算出した結果を図-11～図-14 に示す。図中に示した回帰式の左辺の T30、T40 および T50 の表記は、凡例に示す 30mm 到達年数、40mm 到達年数および 50mm 到達年数に相当する。これらの関係を用いれば、かぶりコンクリートが中性化する期間が透気性試験値によって予測できることになる。さらに、後述する実大 RC 部材での透気性試験値の変動係数を適切に設定することにより、計画供用期間の級に対して必要となる部材のかぶり厚さごとの透気性試験値の指標値 (閾値) を得ることができる。

4. 実大 RC 壁における簡易透気性試験

4.1 実大 RC 壁の概要

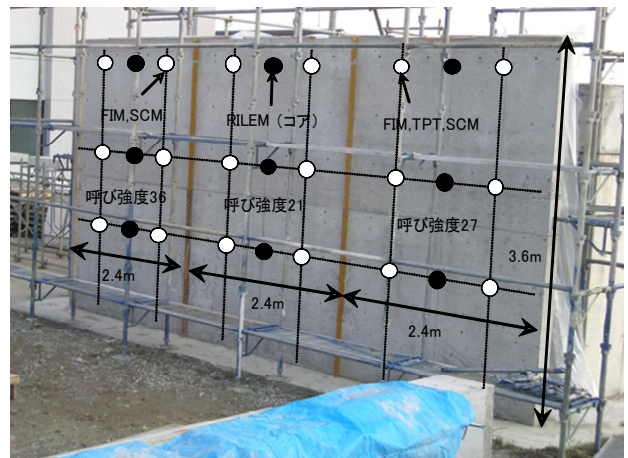


写真-1 実大RC壁 (R) と透気性測定位置

実際のRC構造物において原位置でFIM-A法、FIM-N法およびSCM法による簡易透気性試験を行った場合の測定値の変動係数は、そのコンクリートが受ける環境条件や打込み欠陥などの施工品質の影響によって、供試体レベルでの変動係数よりもかなり大きくなることが予測される。そこで、写真-1に示すような高さ3.6m×幅2.4m×厚さ0.2mの実大RC壁 (R) ⁶⁾ を呼び強度21、27および36の3種類のコンクリートを用いて作製し、上記の3種の簡易透気性試験と、ベンチマークとなるRILEM法による透気性

試験を行い、透気性試験値の変動量を調査した。これに加えて、呼び強度30（高さ3.5m×幅2.0m×厚さ0.2m）の実大RC壁（S）⁷⁾ および呼び強度24（高さ2.2m×幅6.5m×厚さ0.18m）の実大RC壁（K）⁸⁾ においても同様に簡易透気性試験を行った。なお、これらの実大RC壁に打ち込んだコンクリートは、いずれも、大阪広域生コンクリート協同組合の標準配合（JIS規格品）であり、スランプ15～18cmの普通コンクリートであった。

4.2 実大RC壁での透気性試験の位置選定および算出手法

(1) 透気性試験の位置の選定

それぞれの実大RC壁試験体における透気性の測定は、統計的理論に基づき各試験法とも1面あたり6ヶ所以上⁹⁾の位置で実施した。

呼び強度（nS）21、27、36の実大RC壁における原位置でのかぶりコンクリートの簡易透気性試験は、写真-1に○印で示すように高さ方向に3段（上部、中央部および下部）とし、呼び強度ごとに2列とした計6ヶ所の位置においてFIM-A法、FIM-N法およびSCM法の3種類の簡易透気性試験を行った。また、呼び強度24および30の実大RC壁においては、1面あたり高さ方向に5段×4列の計20ヶ所の位置で簡易透気性試験を行った。簡易透気試験時の実大RC壁の高周波容量式により測定した含水率は4～5%の範囲¹⁾であった。

(2) 透気性試験方法と試験値の算出方法

まず、ドリル孔を用いるFIM-A法およびFIM-N法においては、1孔当たり4回の測定を連続して行い、1回目の測定値を除いた2～4回目の3回の平均値をその孔の簡易透気速度として扱った。同じ位置における簡易透気速度の測定は、FIM-AおよびFIM-Nとも10～20cmの距離をおいた2孔ずつを用いて行い、1孔当たりの測定回数3回×2孔の計6回の測定結果からその位置の簡易透気速度を求めた。さらに、同じ高さで1～2mの間隔で2つの位置で6回（3回×2孔）の測定を行い、合計12回の測定値の平均値からその領域もしくはその壁の透気性試験値を得ることとした。高さ位置を合わせて透気性を評価することとしたのは、打込み時のコンクリートの自重による圧密などによる影響を少しでも軽減することにより、透気性試験値の変動係数の低減を図ろうとしたためである。

一方、チャンバーを用いるSCM法においては、FIM法と同様に、FIM法とほぼ同じ箇所2点を設定し、各位置とも3回の測定を行い、3回×2点の合計6回の測定によりその領域の透気指数を求めた。

4.3 簡易透気性試験結果と測定値のサンプリング手法

5種類の呼び強度の実大RC壁における原位置での簡易

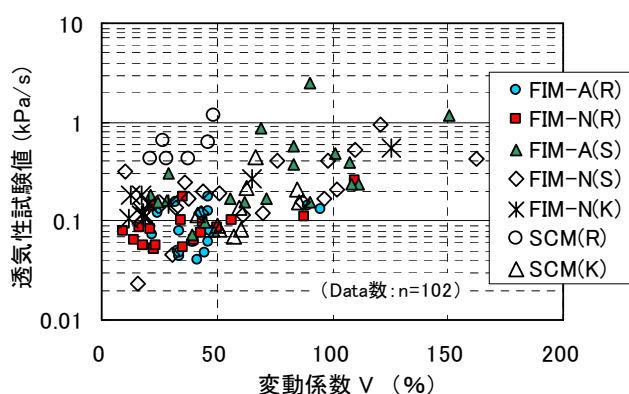


図-15 全ての透気性試験値から求めた変動係数

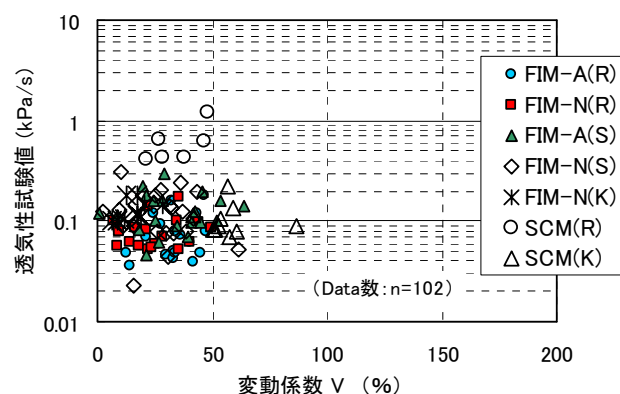


図-16 サンプリングした試験値から求めた変動係数

透気性試験から得られた合計102点の透気性試験値の範囲は、いずれの簡易透気性試験においても呼び強度や実大RC壁の試験体の違いによらず広範な結果であった。そのため、4.2に示した位置および算出方法で求めた全ての簡易透気性試験値を採用した場合の変動係数は、図-15に示すように最大160%程度となった。この結果から、実際の構造体コンクリートの部材を対象とする簡易透気性試験においては、試験を行う際の評価目的に応じて選択的に測定データをサンプリングすることが必要と考えられた。

そこで、簡易透気性試験値のサンプリング手法として、各回（本報ではFIM-A法およびFIM-N法は12回、SCM法は6回）の測定値の偏差が平均値の60%以上となる測定値を局所的な打込み欠陥等の不具合に起因する異常値とみなして棄却し、再度、残りの測定値の平均値を求めることによってその領域の簡易透気性試験値とすることを試みた。この手法によりサンプリングした簡易透気性試験値から求めた変動係数を図-16に示す。

その結果、実大RC壁(R)については、簡易透気性試験値の変動係数が40%程度、実大RC壁(S)については60%程度となり、図-15と比較して簡易透気性試験値の変動

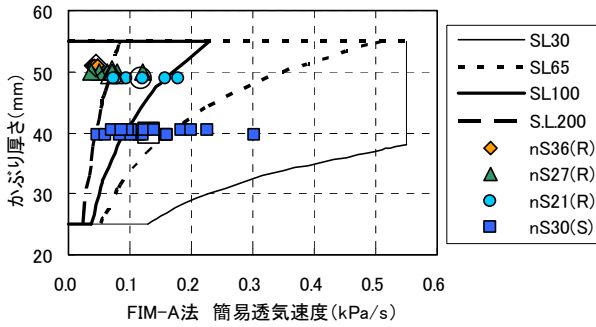


図-17 耐久性の評価チャート例 (FIM-A 法)

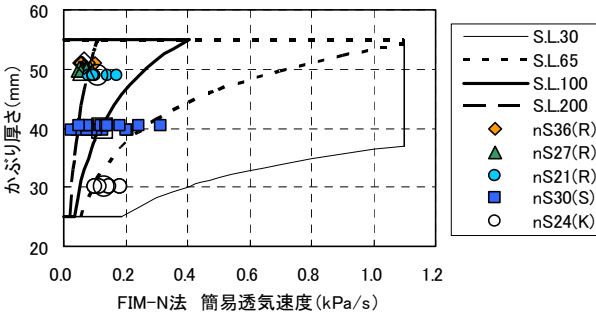


図-18 耐久性の評価チャート例 (FIM-N 法)

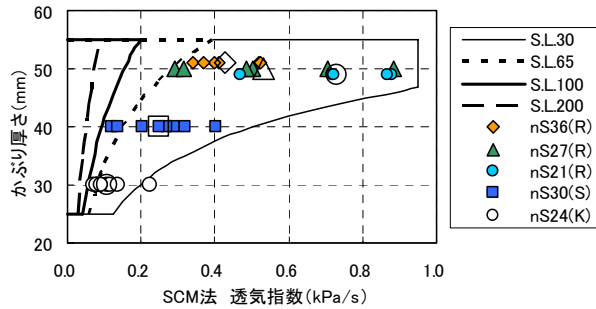


図-19 耐久性の評価チャート例 (SCM 法)

係数が大きく低減されている。平均値から大きく外れた測定値を異常値として扱う手法を採用することによって、簡易透気性による構造体コンクリートの耐久性の評価および予測が可能になると思われる。

5. 簡易透気性試験による耐久性評価手法

耐久性の評価手法として、中性化深さがかぶり厚さに到達した時点を経済物の供用限界状態と定義する。Torrentの考え方¹⁰⁾に基づき、中性化深さがかぶり厚さ(t)に達する材齢を経済物の供用期間($S.L.$)とすると、これらの関係は式(3)として表すことができる。

$$S.L. = \{ t / (A \cdot \ln(Rair) + B) \}^2 \quad (3)$$

ここに、 $Rair$: 透気試験結果 (透気指数、簡易透気速度)

A, B : 環境や材料などに応じた係数

なお、耐久性予測に用いるかぶり厚さの設定値は、施工等による標準偏差が通常 10mm¹¹⁾とされているが、原位置

表-3 計画供用期間と部材のかぶり厚さによる簡易透気性試験値の閾値 (案)

供用期間の級	透気性試験法	部材のかぶり厚さ		
		30mm	40mm	50mm
超長期 200年	FIM-A (kPa/s)	0.04	0.09	0.15
	FIM-N (kPa/s)	0.035	0.10	0.20
	SCM (kPa/s)	0.04	0.08	0.15
	RILEM ($\times 10^{-18} m^2$)	50	100	200
長期 100年	FIM-A (kPa/s)	0.10	0.25	0.40
	FIM-N (kPa/s)	0.12	0.30	0.70
	SCM (kPa/s)	0.09	0.15	0.30
	RILEM ($\times 10^{-18} m^2$)	150	300	550
標準 65年	FIM-A (kPa/s)	0.20	0.40	0.75
	FIM-N (kPa/s)	0.25	0.65	1.50
	SCM (kPa/s)	0.15	0.25	0.45
	RILEM ($\times 10^{-18} m^2$)	250	500	1000
短期 30年	FIM-A (kPa/s)	0.55	1.20	2.20
	FIM-N (kPa/s)	0.90	2.50	5.20
	SCM (kPa/s)	0.35	0.65	1.10
	RILEM ($\times 10^{-18} m^2$)	700	1500	2700

で測定したかぶり厚さのばらつきを考慮して設定値を決定する必要があると考えられる。

図-17～図-19に、式(3)によるかぶり厚さと、FIM-A法、FIM-N法およびSCM法による透気性試験に基づくチャート(JASS5-2009による供用期間SL30・65・100・200年)を示す。係数 A, B は、図-3～図-6に示した中性化速度係数を適用した。また図中の透気性試験値には前述の手法によりサンプリングした値を用いた。凡例のnSの後ろの数値は試験体に打ち込んだコンクリートの呼び強度を表している。各図中に大きなマーカーで示した値がその構造体の代表値を表している。各種の透気試験結果ごとに変動がみられるが、かぶり厚さが等しい場合、呼び強度が高いほど経済物の供用期間が概ね長く評価されていることがわかる。一方、SCM法はFIM法とやや異なる傾向を示しているが、これはSCM法による簡易透気性試験値は、コンクリートのごく表層部の影響を受けているためと思われる。

これらのチャートによれば、測定結果がプロットされた領域によってコンクリートの原位置での透気性とかぶり厚さに応じた供用期間が予測できるので、経過年数に応じた経済物の寿命予測、竣工時点での耐久性の評価や補修時期の立案などが可能になると考える。

また、所要の供用期間とRC経済物の部材ごとのかぶり厚さに応じた簡易透気性試験値の目標値(閾値)について、図-16を参考にして実大RC壁における変動係数(FIM法では40%、SCM法では20%、RILEM法は8%¹²⁾)を考慮し、図-11～図-14の関係に基づき求めた閾値

(案)を表-3に示す。これらの閾値は、本報に示した簡易透気試験によって RC 構造物の供用期間に対する耐久性性能の照査を行う際などに参考となり得る値と考えられる。

6. まとめ

かぶりコンクリートの透気性を原位置で評価することにより RC 構造物の耐久性の評価や寿命を予測する手法について、供試体および実大 RC 壁を作製し、それらに3種類の簡易透気性試験を適用して検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 中性化速度係数と簡易透気性試験結果との間には高い相関が認められ、その関係を用いて部材ごとのかぶり厚さと透気試験の結果に基づく構造物の耐久性の予測のための評価手法を示した。
- (2) 実大 RC 壁における簡易透気性試験のデータサンプリング手法を提案し、変動係数を考慮に入れた計画供用期間と部材のかぶり厚さに応じた簡易透気性試験値の閾値 (案) を示した。

今後、さらに実大 RC 構造物での透気性試験値を蓄積し、簡易透気性試験結果とかぶり厚さとの関係に基づく合理的な耐久性予測の評価手法の高度化を目指す所存である。

[謝 辞]

本研究は、東京理科大学今本啓一准教授、日本建築総合試験所材料部主査の下澤和幸氏ならびに同材料部部長の永山勝氏らとの共同研究の成果の一部をまとめたものである。ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 山崎順二、下澤和幸、今本啓一、二村誠二：簡易透気性試験による構造体コンクリートの耐久性評価手法に関する研究、コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集 (Vol.2)、非破壊検査協会、pp.297-302、2006.8.
- 2) 今本啓一、山崎順二、下澤和幸、永山勝、二村誠二：かぶりコンクリートの非破壊透気性試験法の開発、日本建築学会関東支部研究発表会、pp.33-36、2005.
- 3) RILEM TC116-PCD、Recommendations of TC116-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.176-179、1999.

- 4) 笠井芳夫・松井勇・湯浅昇・野中英：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、日本建築学会学術講演梗概集 A-1 (中国) pp.699-700、1999.
- 5) 下澤和幸、永山勝、今本啓一、成田瞬、山崎順二、二村誠二：構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価 (その 1)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1249-1250、2007.
- 6) 山崎順二、今本啓一、下澤和幸、永山勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.31、No.1、pp.1999-2004、2009.
- 7) 山崎順二、今本啓一、下澤和幸、永山勝、二村誠二：簡易透気性試験によるコンクリートの耐久性評価に関する研究 (その 2)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.141-142、2006.
- 8) 下澤和幸、永山勝、今本啓一、山崎順二：かぶりコンクリートの耐久性評価に関する研究 (その 2)、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.1179-1180、2005.
- 9) 永山勝ほか：構造体コンクリートの各種表層透気試験法と評価、日本建築学会学術講演梗概集 A-1 (中国) pp.1253-1254、2007.
- 10) Torrent R.J.、Performance-based specification and conformity control of durability、International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability、19-21 March 2006、Madrid、Spain.
- 11) 日本建築学会(AIJ): 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、p.92、2004.
- 12) 下澤和幸、山崎順二、今本啓一、永山勝、二村誠二：国内のコンクリートを対象とした各種透気性試験の閾値の提案、日本建築学会学術講演梗概集 A-1、pp.803-804、2008.