

かぶりコンクリートの簡易透気性試験によるRC構造体の耐久性評価

Evaluation of Durability of Structural Reinforced Concrete by Air-Permeability Tests of the Cover Concrete

山崎 順二* 立松 和彦*²

高見 錦一*²

要 旨

かぶりコンクリートの簡易透気性試験値の変動量について、呼び強度21,27および36の3種類のコンクリートで作製した小型試験体(30×30×10cm) レベルでの調査および実大RC壁試験体(2.4×3.6×0.2m) レベルでの調査を行った。また、この調査結果を用いて、実構造物における透気性評価のためのサンプリング手法について検討した。

小型試験体での測定結果を用いて行ったt検定の結果、かぶりコンクリートの品質の違いを透気性試験によって評価できることがわかった。また、実大RC壁試験体での簡易透気性の変動係数は小型試験体よりも2倍程度大きくなったため、構造物の評価目的に応じて測定値に対するサンプリング手法を選定する必要があることを示した。さらに、かぶり厚さと原位置での簡易透気性試験により構造物の耐久性や寿命を予測する手法を示した。

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／変動係数／中性化深さ

1. はじめに

かぶりコンクリートの品質が鉄筋コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすことは良く知られているが、この理由は、かぶりコンクリートの物質浸透性がコンクリート構造物の耐久性に重要な役割を担っているためである。コンクリートを高耐久性化するためには、低水セメント比のコンクリートを使用すること等によってかぶりコンクリートを密実にすることが、CO₂や塩化物イオンの浸透を防止するために有効な手段である。また、かぶりコンクリートの品質には、使用材料や調合条件だけでなく、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も、大きな影響を与える重要な要因である。これらのことから、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、鉄筋コンクリート構造物の竣工時点での耐久性予測、経過年数に応じた構造物の寿命予測、補修時期などを立案するために有用となる。

著者らはこれまで、コンクリート構造体の健全性や耐久性を簡易に評価する手法を確立することを目的として、ドリル削孔法による簡易透気性試験を用いた耐久性評価手法について検討してきた¹⁾。その結果、耐久性判断の指標とされる中性化深さと簡易透気速度の間には水セメント比の違いに関わらず極めて高い相関があること、ドリル削孔法による簡易透気速度の平均値に対する変動係

数は17～37%程度とやや大きいことが分かった。

本報では、既報¹⁾に引き続き、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、0.3×0.3×0.1mの小型試験体と2.4×3.6×0.2mの実大RC壁試験体の2つの大きさの試験体をそれぞれ作製し、各種の簡易透気性試験を行った。簡易透気性試験方法として、既報¹⁾に示したドリル削孔法に加え、トレント法²⁾およびシングルチャンバー法³⁾の3種類の透気性試験に加え、透気性のベンチマークとして扱われるRILEM法⁴⁾による透気性試験を行った。

これらの簡易透気性の試験結果から、測定値の変動量を調査し、鉄筋コンクリート構造物の原位置試験による耐久性評価のための合理的なサンプリング手法について検討した。さらに、中性化深さと簡易透気性との関連性を用いて、かぶり厚さと透気性を指標とした鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価手法について検討した。

2. 各種の簡易透気性試験の概要

2.1 ドリル削孔法(FIM法)

図-1に示すように、試験位置に設けたドリル孔をシ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/sec)は、孔内をX1まで減圧した

*大阪本店建築部技術グループ

*²技術研究所建築研究グループ

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(sec)とすると、式(1)により求められる。

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

本報では、簡易透気速度P.V.(kPa/sec)を得るための圧力の範囲について、X1を21.3(kPa)、X2を25.3(kPa)とした。この範囲は文献⁵⁾の160～190(mmHg)に相当する。

なお、FIMによる簡易透気速度の測定においては、文献⁶⁾および下澤ら⁶⁾によって用いられている従来型(FIM-G)と、筆者が透気性試験の準備段階での栓の設置作業タスクがやや改善されるとしているコーン型(浅沼型:FIM-A)の2種類のシリコン栓を使用している。

2.2 トレント(ダブルチャンバー)法(TPT法)

図-2に示す通り、内部と外部の2つのチャンバーの圧力を等しくし、外部から内部チャンバーへの空気の流れを物理的に排除して、内部チャンバー下からの栓流によるチャンバー内の圧力変化量から透気係数を求める。測定値は、試験装置に組み込まれたプロセッサの演算処理によって表示される。

2.3 シングルチャンバー法(SCM法)

図-3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16.0(kPa)から33.3(kPa)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/sec)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16.0(kPa)から33.3(kPa)に戻るまでに要する時間(sec)

3. 供試体による中性化深さと簡易透気性

3.1 供試体による実験の概要

水セメント比30%～100%までの範囲の16種類の調合の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4年までの自然暴露による中性化試験および簡易透気性試験(FIM法(FIM-A, FIM-G)およびSCM法)を行った。加えて、図-4に示した透気性試験値のベンチマークとされるRILEM法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種類の調合計画を表-2に示す。供試体の種類は、促進中性化深さ測定のための10×10×40cm供試体、簡易透気試験のための30×30×10cm小型

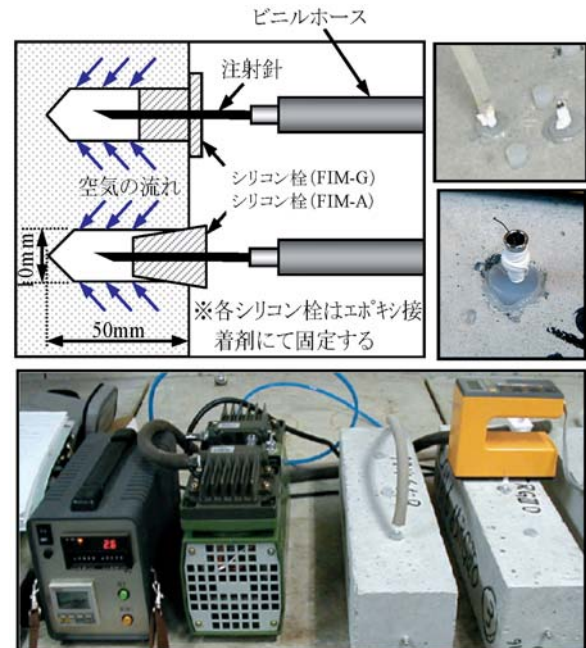


図-1 ドリル削孔法(FIM法)

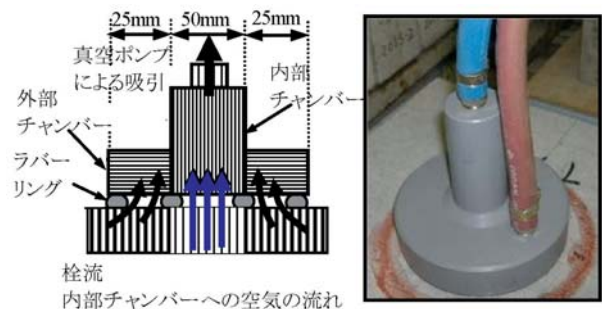


図-2 ダブルチャンバー法(TPT法)

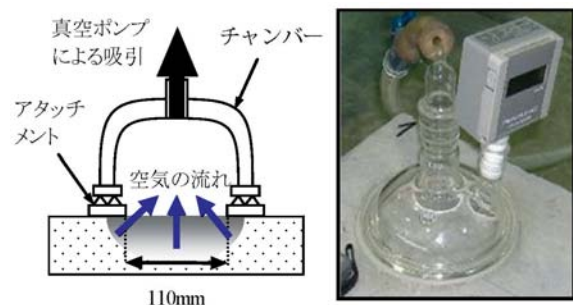


図-3 シングルチャンバー法(SCM法)

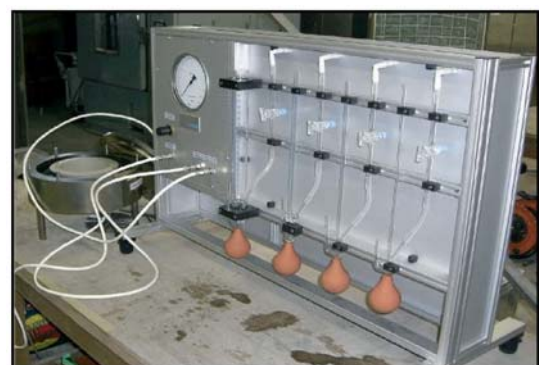


図-4 RILEM-PCD法(RILEM法)

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 (エヌエムビー社製 : SP-8SV) AE : AE減水剤 (エヌエムビー社製 : 15S)

表－２ 供試体の調合計画概要

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

試験体およびRILEM透気性試験のためのφ15×30cm円柱供試体 (RILEM透気性試験には円柱供試体を厚さ5cmにスライスして成形したものを使用) とした。これらの供試体は、後述の3種類の呼び強度の実大RC壁試験体を打設する際に全て同時に作製したものである。

3.2 中性化深さ試験結果および考察

JIS A 1153に準じた促進中性化試験による中性化速度係数と、材齢4年間の自然暴露 (雨がかりのない屋外暴露) における中性化深さを図-5に示す。

促進試験および材齢4年までの自然暴露による中性化深さは、水セメント比が大きくなるほど中性化深さが大きくなっていることがわかる。

また、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、材齢4年までの自然暴露における中性化速度係数の関係を図-6に示す。促進中性化試験におけるCO₂濃度は、大気中のCO₂濃度の約7~8/1000程度であるが、4年間の屋外暴露による中性化速度係数は、促進中性化試験のはば1/10程度であった。つまり、20℃-60%RH・CO₂濃度5%の促進条件における促進期間26週での中性化深さは、概ね50年間の自然暴露後の中性化深さに相当することになる。

3.3 中性化速度係数と透気性試験値との関係

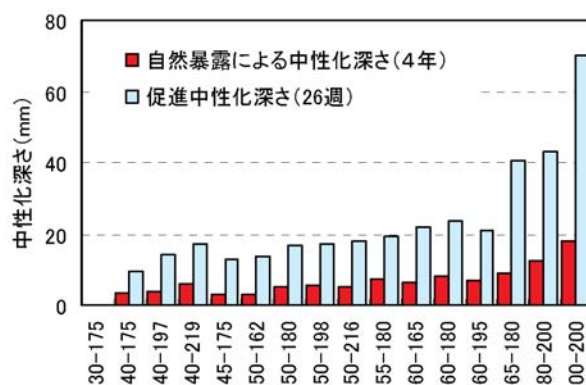


図-5 供試体の中性化深さ試験結果

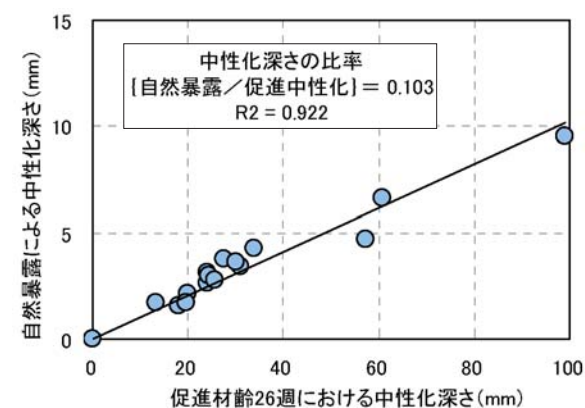


図-6 促進試験に対する自然暴露による中性化深さ

水セメント比30%~100%の供試体において、材齢4年の暴露供試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-7~図-10に示す。また、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法 (FIM-A) との関係を図-7および図-8に示す。各図中には材齢4年での中性化速度係数と透気性試験結果との回帰式を示した。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り、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。

4. 小型試験体における簡易透気性試験の評価

4.1 30×30×10cm小型試験体の概要

呼び強度を21,27および36N/mm²、養生条件を2種類 (AとC) とした計6種類の30×30×10cmの小型試験体を実大RC壁と同時に作製した。使用材料を表-3に示す。コンクリートの調合計画および物理的性質を表-4に示す。小型試験体の養生条件として、「A」は3日後に脱型し1ヶ月間20℃水中養生の後20℃-60%RHの気中養生したもの、「C」は試験までの2ヶ月間20℃-60%RHでの気中養生としたものである。これらの初期養生の後、

全ての試験体を20℃-60%RHの室内環境下に静置してコンクリートの含水率を安定させ、材齢48日から材齢56日の間に全ての透気性試験を行った。

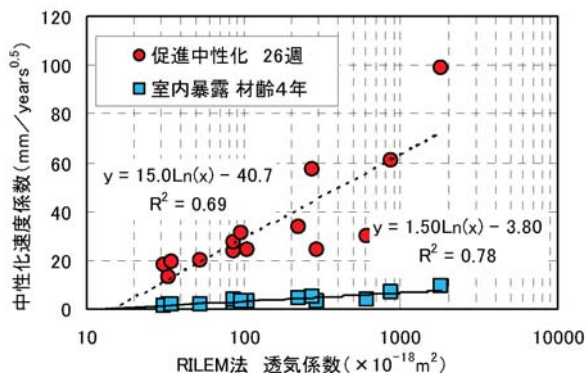


図-7 中性化速度係数とRILEM法による透気係数

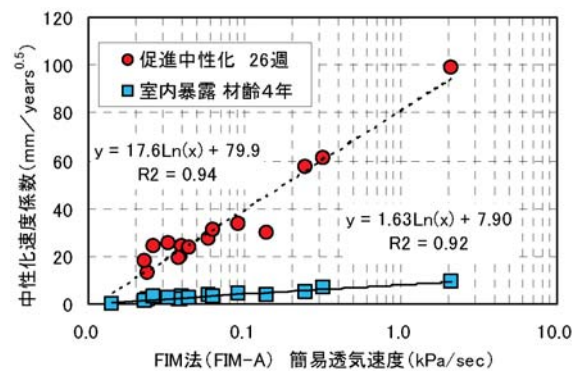


図-8 FIM法 (FIM-A) による簡易透気速度

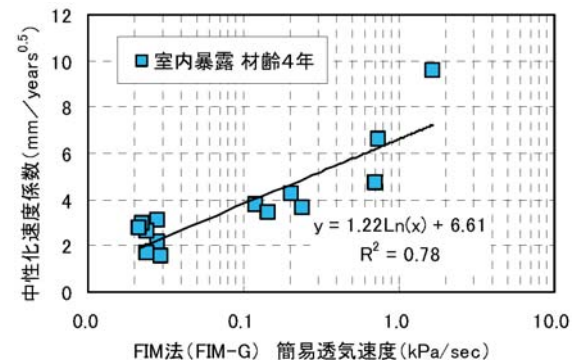


図-9 FIM法 (FIM-G) による簡易透気速度

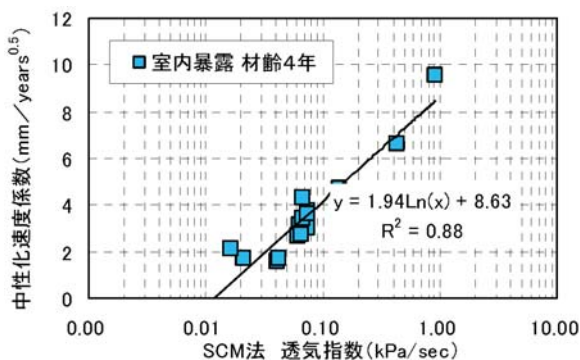


図-10 中性化速度係数とSCM法による透気指数

4.2 RILEM法による透気性試験結果

小型試験体と同時に作製して標準養生を行った $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 円柱供試体から、 $\phi 15 \times 5\text{cm}$ の厚さにスライスした供試体を成型し、透気性試験値のベンチマークとなるRILEM法による透気性試験を行った。なお、RILEM法による透気性試験は、試験前に供試体を50℃の環境下に静置し、全ての供試体の含水率を安定化させた後に行った。

$\phi 15 \times 5\text{cm}$ 供試体によるRILEM法による透気性試験結果およびJIS A 1153による材齢26週までの促進中性化試験の結果を表-5に示す。RILEM法による透気係数は、水セメント比44%,54%および63%に対してそれぞれ112, 168および $738 \times 10^{-18}\text{m}^2$ と、3種類のコンクリートの品質の違いを明確に表している。また、呼び強度が小さいほど変動係数が大きくなる傾向にあるが、変動係数は2%から14%の範囲(平均7.3%)であった。さらに、RILEM透気係数と促進試験による中性化深さには明瞭な相関が認められた。

以上より、 $\phi 15 \times 5\text{cm}$ 供試体では呼び強度が小さいほどRILEM法による透気性試験結果の変動係数が大きくなる傾向が認められたが、標準養生を行い十分に管理された供試体レベルのコンクリートであれば、透気性試験によりコンクリート自体(ポテンシャル)の品質の違いを精度良く評価できることが分かった。

表-3 小型試験体・RC実大壁での使用材料

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 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
水 (W)	上水道水
細骨材 (S)	山砂 (城陽産): 表乾密度 $2.57\text{g}/\text{cm}^3$, FM: 2.80、混合率70% 砕砂 (高槻産): 表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$, FM: 2.80、混合率30%
粗骨材 (G)	砕石 (高槻産): 表乾密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$, 実積率: 58.0%
混和剤 (Ad)	SP: 高性能AE減水剤 (エヌエムビー社製: SP-8SV) AE: AE減水剤 (エヌエムビー社製: 15S)

表-4 調査計画概要およびコンクリートの性質

呼び 強度	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				混和剤 種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)
			W	C	S	G				
21	63.0	46.6	184	292	826	974	AE	16.0	5.9	32.0
27	54.0	49.2	180	333	860	915	SP	9.5	5.0	38.7
36	44.0	48.7	180	409	821	890	SP	21.5	5.5	44.4

表-5 $\phi 15 \times 5\text{cm}$ でのRILEM透気係数と中性化深さ

呼び 強度	RILEM法 透気係数 ($\times 10^{-18}\text{m}^2$)				変動係数 (%)	中性化深さ 促進26週(mm)
	TP1	TP2	TP3	平均値		
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

4.3 小型試験体による簡易透気性試験の変動と t 検定

小型試験体の30×30cm面を測定面とし、片面3箇所、両面で6カ所にてFIM法(-A, -G),TPT法およびSCM法の透気性試験を実施した。各試験法による小型試験体での透気試験測定値(平均値)と変動係数を図-11⁶⁾に示す。なお、試験体の測定箇所数は、既往の検討結果から統計理論に基づく現実的かつ実施可能な箇所数とし、1エリアごとに6箇所⁷⁾とした。

次に、透気試験の有用性について、表-6に示した3種類のコンクリートの特性から想定されるレーティング(優劣関係)に対して、t検定による評価を行った。ここでの帰無仮説は、表-6のレーティングの行に示した通り「透気性はそのレーティングに基づく」こととしている。なお、今回のt検定には、それぞれの小型試験体について6カ所の測定データを用いた。

ここで、t検定の結果が、

- 有意水準1%以下で帰無仮説が棄却されるならば、その比較の組合せにおけるその試験での判別能力があり「高い有意差あり」(+++)
- 有意水準1%～5%の間で帰無仮説が棄却されるならば、その比較の組合せにおけるその試験での区別能力は「有意差あり」(++)
- 有意水準5%以下で帰無仮説が棄却されないならば、その比較の組合せにおいてその試験での区別能力は「有意差なし」(-)

とする。

小型試験体での透気性試験結果を用いた想定されるレーティングによるt検定の結果を表-6に示す。

まず、強度の影響評価によるt検定の結果、いずれの試験法でも有意水準1～5%で各コンクリートの透気性の有意差を評価することができており、原位置での透気試験が、かぶりコンクリートの透気性を明確に区別することが可能であると考えられる。各透気性試験のうち、TPT法が最も良い結果を示した。

一方、養生の影響評価によるt検定の結果、SCM法において有意水準5%で帰無仮説が棄却されなかった。これは表層にひび割れがあったためと思われる。同様に、FIM法において強度の有意性が低いのは、骨材の偏在に伴うばらつきの影響を受けたためと思われる。これは、SCM法では、FIM法(-A, -G)よりもかぶりコンクリートの表層部の透気性をより重点的に評価していることによるものと推察される。

しかし、いずれの透気性試験方法もコンクリートの品質を概ね評価し得ていると判断されることから、本研究

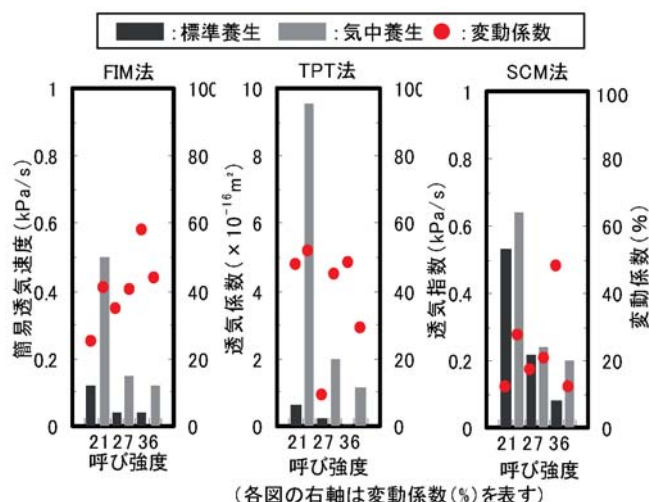


図-11 小型試験体における透気性と変動係数

表-6 小型試験体での測定結果による t 検定結果

変 動 要 因		圧 縮 強 度			
比 較 条 件		A21-A27	A27-A36	C21-C27	C27-C36
優劣(レーティング)		A21<A27	A27<A36	C21<C27	C27<C36
FIM法	t	9.07	1.67	8.36	2.68
	検定結果	+++	-	+++	++
TPT法	t	31.05	3.61	31.29	7.10
	検定結果	+++	+++	+++	+++
SCM法	t	8.86	4.24	6.06	3.81
	検定結果	+++	+++	+++	+++
変 動 要 因		養 生 方 法			
比 較 条 件		A21-C21	A27-C27	A36-C36	
優劣(養生方法)		A21>C21	A27>C27	A36>C36	
FIM法	t	6.24	6.33	7.55	
	検定結果	+++	+++	+++	
TPT法	t	32.73	22.79	22.51	
	検定結果	+++	+++	+++	
SCM法	t	1.53	2.30	2.96	
	検定結果	-	++	++	

(表中の記号) +++: 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

に用いた3種類の透気性試験は、一般的なコンクリートの品質(かぶりコンクリートの密実さ)の違いを判別する能力を有していると考えられる。

5. 実大RC壁での簡易透気性試験の評価

5.1 実大RC壁の概要および試験概要

30×30×10cm小型試験体およびφ15×30cm供試体と同時に、写真-1に示した幅2.4m、高さ3.6m、厚さ0.2mの実大RC壁3体を、大阪府高槻市の当社技術研究所敷地内に作製した。壁の型枠はコンクリート打込み後2日目に脱型した。壁の正面(W)は空気と日射に暴露されており、裏面(E)は建物が隣接する日陰面であり、



写真-1 実大RC壁と各種の試験位置

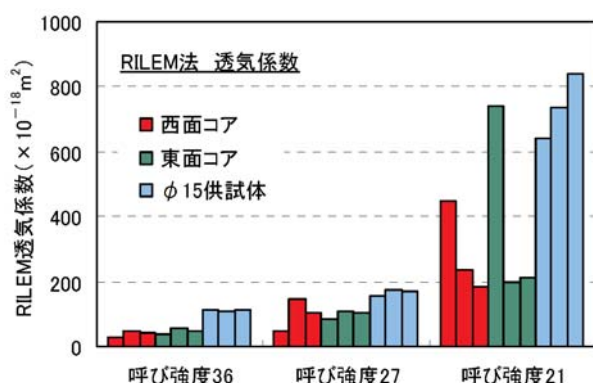


図-12 実大RC壁におけるRILEM法透気係数

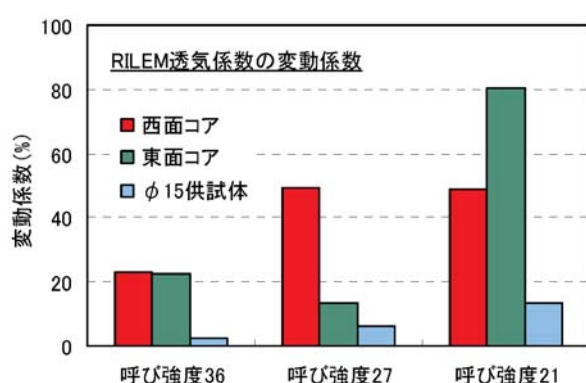


図-13 RILEM法透気係数の変動係数

打込み後7日間ビニールシートで封かん状態とした。使用材料および調査は表-3および表-4に示した小型試験体等と同じである。

実大壁における簡易透気性試験は、写真-1に○印で示したRC壁の上部、中央部および下部（片面18ヶ所）で、FIM法、TPT法およびSCM法の3種類の簡易透気性

試験を同じ位置で行った。さらに、写真-1に●印で示した実大壁試験体の上部、中央部および下部（9ヶ所）からφ15cmのコアを水平に貫通させて採取し、コア両端（W表面およびE表面）から厚さ5cmずつを供試体（西面コア(W)および東面コア(E)）として成型することによりRILEM法による透気性試験に供した。

5.2 実大RC壁でのRILEM透気係数とその変動係数

実大壁から採取したコア両端面の厚さ5cmの部分で測定したRILEM透気係数を図-12に、その変動係数を図-13に示す。両図には表-5に示したφ15cm供試体

の結果（呼び強度ごと3本の試験体の結果）を併せて示した。図-12には部位ごと（西面コア(W)および東面コア(E)の3つのデータはそれぞれ左から上中下の順）の透気係数を示した。呼び強度21においては、実大RC壁の西面コア(W)および東面コア(E)とも壁の上部と下部でRILEM透気係数が大きく異なり、これが実大RC壁の変動係数を大きくしている。この理由は、小型試験体と同様に、打込み時の圧密の影響により部位ごとの品質が異なることや、表層部のマイクロクラックの発生などが、RILEM透気係数の変動に大きな影響を及ぼしているためと考えられる。

6. データサンプリングの考え方と検定

6.1 部材全体をサンプリング対象とした場合

実大RC壁試験体での表層透気性の測定は、統計的理論に基づき各試験法とも片面につき6ヶ所⁷⁾実施した。

実大RC壁の原位置表層透気試験から得られた測定値の範囲は、FIM法(-A,-G)では0.05~0.73(kPa/s)、TPT法では0.17~1.75(×10⁻¹⁶m²)、SCM法では0.42~1.19(kPa/s)と、いずれの試験法においても広範な結果となった。これらそれぞれの測定値に対して、表-7に示した想定されるレーティング（優劣関係）に基づいたt検定を行った。

表-8に壁全体をサンプリング対象とした場合のt検定の結果を示す。いずれの試験法においてもバラツキの大きい結果となっており、有意水準5%では評価できないものが多数あった。また日射面(W)と日陰面(E)の初期養生の違いによる差も明確には評価できなかった。

6.2 小型試験体の変動係数に準じたサンプリングと検定

図-14に示すように、小型試験体の変動係数の平均は

表－7 実大RC壁において想定されるレーティング

比較条件	日射面 (W: 西面)			日陰面 (E: 東面)		
	21-27	27-36	21-36	21-27	27-36	21-36
優劣 (呼び強度)	21<27	27<36	21<36	21<27	27<36	21<36
比較条件	21W-21E		27W-27E	36W-36E		
優劣 (養生方法)	21W<21E		27W<27E	36W<36E		

表－8 壁全体のデータをサンプリング対象とした場合の t 検定結果

	日射面 (W: 西面)			日陰面 (E: 東面)		
優劣 (強度)	21<27	27<36	21<36	21<27	27<36	21<36
FIM法	-(1.18)	-(-)	-(1.21)	-(0.65)	-(1.41)	-(1.64)
TPT法	-(0.96)	+++ (4.41)	-(1.74)	-(0.76)	-(1.78)	-(1.43)
SCM法	-(1.97)	-(0.04)	++ (3.13)	++ (2.21)	-(1.94)	+++ (3.67)
優劣 (養生方法)	21W<21E		27W<27E	36W<36E		
FIM法	-(1.19)		-(1.82)	-(1.66)		
TPT法	-(-)		-(-)	++ (2.15)		
SCM法	-(-)		-(-)	-(0.10)		

表－9 小型供試体の変動係数に準じたサンプリングによる t 検定結果

	日射面 (W: 西面)			日陰面 (E: 東面)		
優劣 (強度)	21<27	27<36	21<36	21<27	27<36	21<36
SCM法	-(0.75)	+(1.56)	+++ (3.78)	-(-)	+++ (3.68)	++ (4.35)
TPT法	-(0.02)	+++ (4.40)	++ (2.12)	-(-)	+(1.63)	+++ (4.26)
FIM法	+++ (4.53)	-(-)	++ (2.20)	-(-)	-(-)	-(0.87)
優劣 (養生方法)	21W<21E		27W<27E	36W<36E		
SCM法	-(-)		-(-)	-(-)		
TPT法	-(1.07)		+++ (4.42)	++ (2.70)		
FIM法	+++ (4.63)		+++ (3.38)	++ (2.14)		

(表－8 および表－9 の記号) +++: 有意水準1%で有意差あり
 ++: 有意水準5%で有意差あり
 () 内の数値は t 検定による値

2 倍程度であった。

そこで、実大壁での変動係数を小型試験体の変動係数に近づけるべく、平均値から大きく離れた測定値を棄却して t 検定を行った結果を表－9 に示す。想定されるレーティングに基づく有意性は、表－8 と比較して概ね向上していることがわかる。

これらの結果より、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では、構造物全体としての耐久性や健全性を評価する場合や、柱・梁・壁などの各部材自体の品質のバラツキを評価する場合など、試験を行う際の評価目的に応じて選択的にデータをサンプリングすることも必要と考える。

具体的には、測定された全ての値を用いて変動の程度を評価する手法や、同一部材において複数ヶ所（理想的には6ヶ所以上⁷⁾）で測定した時点で測定値の変動係数を算定した後、実大壁での変動係数を小型試験体の変動係数に近づけるために測定値の平均から大きく外れているデータを棄却し、再度、平均値を求めること等の手法を適用することにより、評価目的に応じた透気性による耐久性の評価⁸⁾が可能になると考えられる。

7. かぶり厚さと透気性による耐久性評価手法の提案

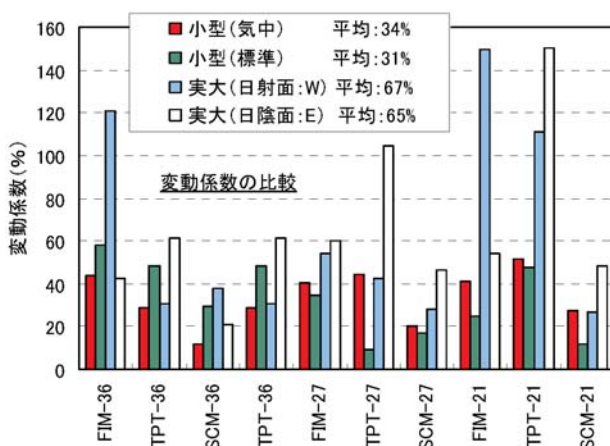
耐久性予測の手法として、中性化深さがかぶり厚さに到達した時点供用期間と定義する。Torrentの考え方⁹⁾に基づき、中性化深さがかぶり厚さ (T) に達する材齢を構造物の供用年数 (S.L.) とすると、これらの関係は(3)式として表すことができる。

$$T = \{A \cdot \ln(Rair) + B\} \times (S.L.)^{0.5} \quad (3)$$

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



図－14 小型試験体と実大RC壁の変動係数の比較

約33%であるのに対し、実大壁試験体では66%であり、部材全体として評価した場合の透気係数の変動係数は約

なお、耐久性予測に用いるかぶり厚さは、施工等による標準偏差が通常10mm¹⁰⁾とされているため、原位置で測定したかぶり厚さのばらつき（不良率4%に応じた正規偏差など）を考慮して決定する必要があると考えられ

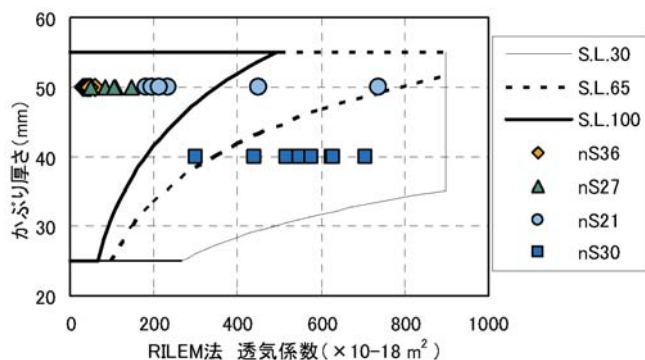


図-15 耐久性評価チャート例：RILEM法

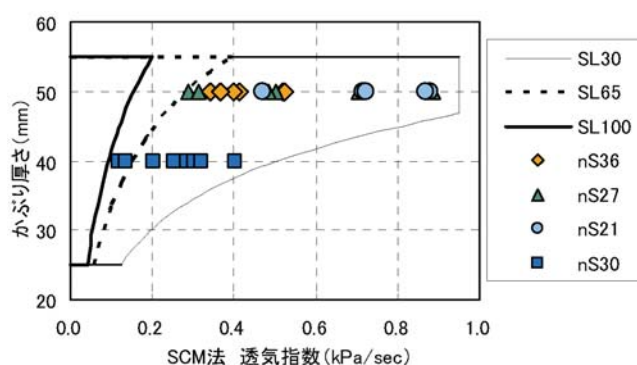


図-17 耐久性評価チャート例：SCM法

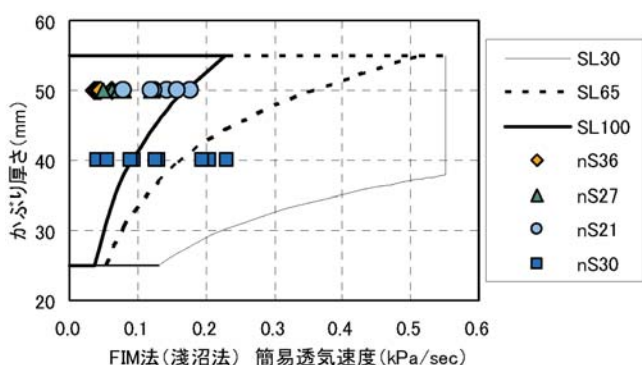


図-16 耐久性評価チャート例：FIM法（浅沼法）

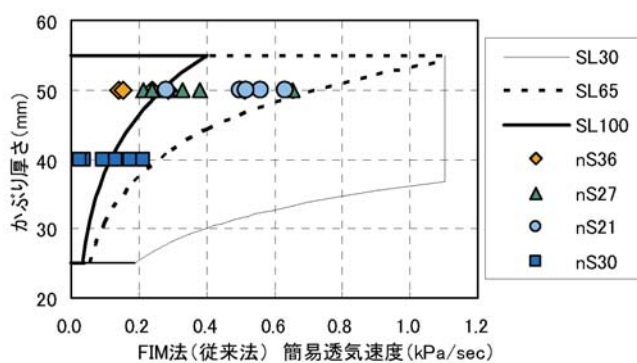


図-18 耐久性評価チャート例：FIM法（従来法）

る。

図-15～図-18に、(3)式によるかぶり厚さと、RILEM法、FIM法（FIM-A）、FIM法（FIM-G）およびSCM法による透気性試験に基づくチャート（SL30・65・100年）の例を示す。さらに、上述した3種類の実大RC壁における各透気試験結果および文献¹¹⁾に示した実大壁での測定値（各図中のnS30）を呼び強度（nS）別にチャート上にプロットした。透気試験結果に変動が見られるが、かぶり厚さが同じ場合、呼び強度が高いほど構造物の供用年数が長く評価されることがわかる。一方、SCM法においてはFIM法とやや異なる評価となっているが、これはコンクリート表層部の影響を相対的に大きく受けるためと考えられる。

これらのチャートによれば、透気試験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、経過年数に応じた構造物の寿命予測、竣工時点での耐久性予測や補修時期を立案することも可能になると考えられる。

8. まとめ

かぶりコンクリートの透気性を現位置で評価することにより鉄筋コンクリート構造物の寿命予測や耐久性を評価する手法について、実大RC壁を作製し、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) 標準養生を行い十分に管理された供試体レベルのコンクリートであれば、本実験に用いた3種類の簡易透気性試験により、コンクリート自体の品質（ポテンシャル）の違いを精度良く評価できる。
- 2) 実大RC壁試験体でのかぶりコンクリートの透気性測定値の変動係数は、供試体レベルのコンクリートと比較して2倍程度であった。
- 3) 構造体コンクリート部材の表層透気性は変動係数が大きくなるため、部材全体のデータを用いる場合と、小型試験体レベルの変動係数と同等になるように測定値を選択的にサンプリングする場合とを、試験目的や評価目的に応じて使い分けることが必要になると考える。
- 4) 中性化速度係数と各種の透気試験結果との間には高い相関が得られており、それらの関係を用いることによって、かぶり厚さと透気試験の結果に基づく構造物の耐久性予測のためのチャートを提案した。

以上、統計的に有意となる手法を用いた原位置でのかぶりコンクリートの透気性評価が可能となる3種類の手法を用いて実験的検討を行った。本報に示した結果は、

RC構造物の耐久性評価や寿命予測のために有用な情報を与えることができると考えられる。

将来的には、中性化速度係数に加え、材料・調合、養生条件などと透気試験結果とを関連付けることにより、かぶり厚さとの関係に基づく合理的な耐久性予測手法への展開が期待できると考える。

[謝辞]

本研究は、東京理科大学今本啓一准教授、元大阪工業大学二村誠二准教授、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・立松和彦・高見錦一：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、浅沼組技術研究所報、No.18、pp.39-44,2006.
- 2) 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, 1992, July.
- 3) 今本啓一他：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.
- 4) 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 -179,1999.
- 5) 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 (1350)、1999
- 6) 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 (1617)、2007
- 7) 永山勝・下澤和幸・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、日本建築学会学術講演梗概集A-1（中国）pp.1253-1254 (1619)、2007
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) 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. 実大壁モデルでの簡易透気性試験の適用性に関する検討、日本建築学会学術講演梗概集A-1材料施工「オーガナイズドセッション」、pp.141-144, 2006.9

