

論文 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

山崎 順二*1・今本 啓一*2・下澤 和幸*3・永山 勝*4

要旨: 水セメント比 30~100%の範囲のコンクリート供試体を作製し、促進中性化および材齢 4 年までの自然暴露を行い、中性化速度係数と簡易透気性の関連性を評価した。また、呼び強度 21,27 および 36 の 3 種類のコンクリートを用いて実大 RC 壁を作製し、各種の簡易透気性試験を行った。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。これらの関連性を適用して、原位置でのかぶり厚さとかぶりコンクリートの簡易透気性試験により、RC 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, 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のが、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、構造物の耐久性に重要な役割を担う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な情報となる。

そこで本報では、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。

簡易透気性試験法として、ドリル削孔法¹⁾、トレントによるダブルチャンバー法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試験の結果と中性化深さとの関連性を基に、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

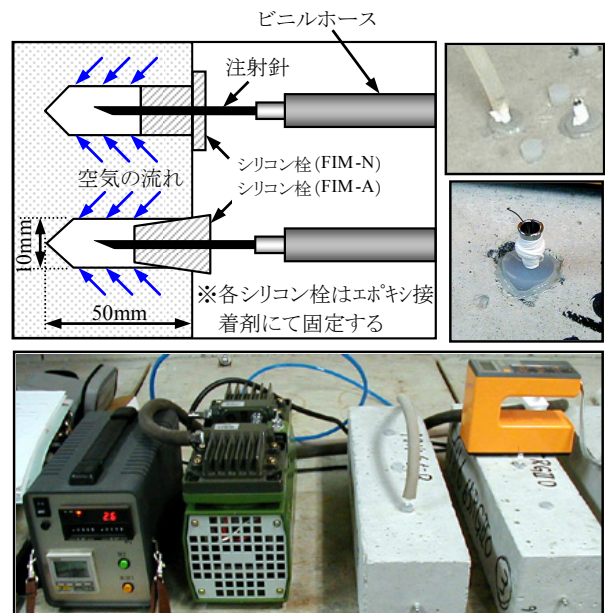


図-1 ドリル削孔法 (FIM法)

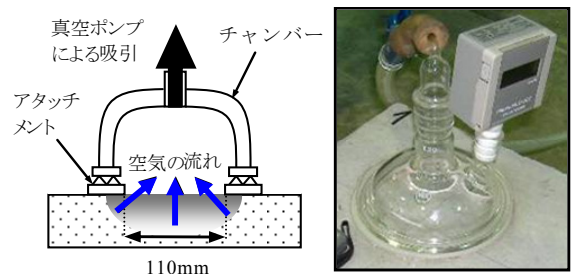


図-2 シングルチャンバー法 (SCM 法)

*1 (株) 浅沼組 大阪本店建築部技術グループ主任 工修 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科准教授 博 (工) (正会員)

*3 (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)

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

コンクリートにて密封し、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法においては笠井⁵⁾らや下澤ら⁶⁾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)の2種類のシリコン栓を使用した。

2.2 シングルチャンパー法 (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パー内部を真空状態にした後、チャンパー内部の圧力が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 : チャンパー内部の圧力が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法(FIM-A, FIM-N)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⁴⁾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、促進中性化深さ測定のための10×10×40cm供試体、縦打ちした高さ30×幅30×厚10cmの小型試験体(ブリーディングの影響を考慮し側面端部より約5cm以上内側の位置で試験を実施)および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 中性化深さ試験の結果および考察

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、材齢約4年までの雨がかりのない屋外自然暴露における中性化深さを図-3に示す。なお、供試体100-200の材齢26週での促進中性化深さは材齢13週までの促進中性化深さから計算により求めた数値を用いた。

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: 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: ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 AE: AE減水剤 |

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 |

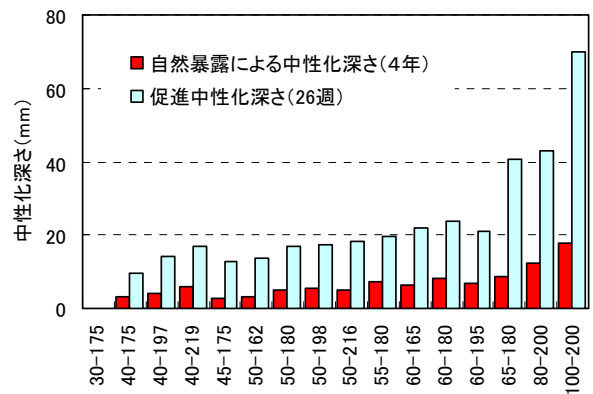


図-3 供試体の中性化深さ試験結果

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いほど、また同一水セメント比において単位水量が大きいほど大きくなっている。

3.3 中性化速度係数と透気性試験値との関係

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-4~図-7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 $R=0.88\sim0.96$ 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-4および図-5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 (FIM-A)法との関係を併せて示した。促進試験による中性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。

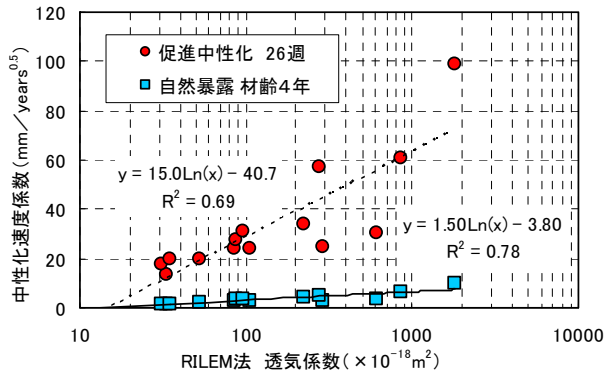


図-4 中性化速度係数とRILEM法による透気指標値

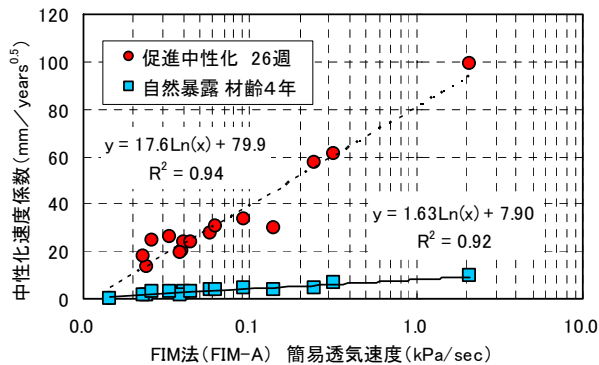


図-5 中性化速度係数とFIM-A法による透気指標値

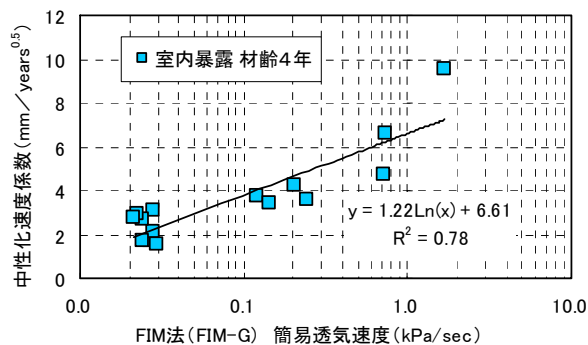


図-6 中性化速度係数とFIM-N法による透気指標値

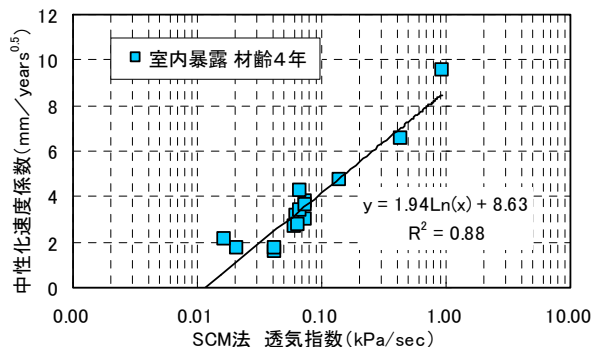


図-7 中性化速度係数とSCM法による透気指標値

4. 実大 RC 壁における簡易透気性試験の評価

4.1 実大RC壁の概要および試験概要

写真-1に示す高さ3.6m×幅2.4m×厚さ0.2mの実大RC壁を、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それぞれ作製した。使用材料を表-3に、調査計画および物理的性質を表-4に示す。

壁の型枠はコンクリート打込み後2日目に脱型した。壁の西面(W)は空気と日射に暴露されており、東面(E)は建物が隣接する日陰面であり、打込み後7日間ビニールシートで封かん状態とした。

実大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○印で示した RC 壁の上部、中央部および下部(片面 18ヶ所)で、FIM(-A,-N)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 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 RILEM 法透気性試験に供した。

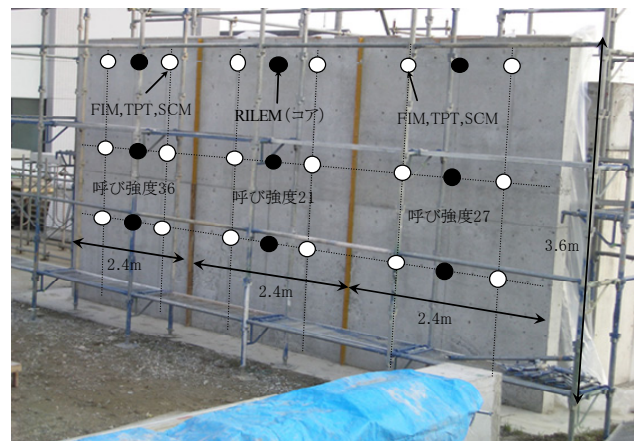


写真-1 実大RC壁と各種の試験位置

表-3 実大RC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：密度3.16g/cm ³ |
| 水 (W) | 上水道水 |
| 細骨材 (S) | 山砂 (城陽産)：表乾密度2.57g/cm ³ , FM：2.80、混合率70% |
| | 砕砂 (高槻産)：表乾密度2.66g/cm ³ , FM：2.80、混合率30% |
| 粗骨材 (G) | 砕石 (高槻産)：表乾密度 2.69g/cm ³ , 実積率：58.0% |
| 混和剤 (Ad) | SP：ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 |
| | AE：AE減水剤 |

表-4 計画調査の概要およびコンクリートの性質

| 呼び強度 | W/C (%) | s/a (%) | 単体量 (kg/m ³) | | | | 混和剤種類 | スランブ (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 |

また、実大RC壁の作製と同時に、縦打ちした高さ30×幅30×厚み10cmの小型試験体をそれぞれ2体ずつ作製した。養生条件として、「A：標準」は脱型後1ヶ月間20℃水中養生の後20℃-60%RHの気中養生したもの、「C：気中」は脱型後2ヶ月間20℃-60%RHでの気中養生したものである。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、30×30cmの面の端部より約5cm以上内側の位置において、材齢約2ヶ月で透気性試験を実施した。

4.2 φ15×5cm供試体のRILEM法による透気性試験結果

実大RC壁と同時に作製して標準養生を行ったφ15×30cm円柱供試体からφ15×5cmにスライスした供試体を、透気性試験値のベンチマークとなるRILEM法による試験に供した。なお、透気性試験の前に供試体を50℃の環境下に静置し、供試体の含水率を安定させた。

φ15×5cm供試体によるRILEM法による透気性試験結果およびJIS A 1153による促進材齢26週までの中性化深さを表-5に示す。RILEM法による透気係数は、呼び強度21、27、36に対して、それぞれ、738、168、112×10⁻¹⁸m²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、呼び強度が小さく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%)と小さい数値であった。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。

これより、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。

4.3 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-8に、その変動係数を図-9に示す。両図には表-5に示したφ15cm供試体での結果(呼び強度ごと3本の試験体の結果)を併せて示した。図-8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コア採取位置の上中下の順)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、打込み時の圧密の影響や養生条件などにより部位ごとの品質が異なることが影響しているためと考えられる。この他、簡易透気性試験値の変動は、FIM法では骨材の偏在に伴うばらつきの影響を、SCM法ではFIM法(-A,-N)よりもかぶりコンクリートの表層組織の影響を大きく受ける^{7) 8)}と推察される。この点については更なる検討が必要であるが、いずれの透気性試験法も、コンクリートの表層の粗密の程度を概ね評価し得ていると考えられ

表-5 φ15×5cmでのRILEM透気係数と中性化深さ

| 呼び強度 | RILEM法 透気係数 (×10 ⁻¹⁸ 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 |

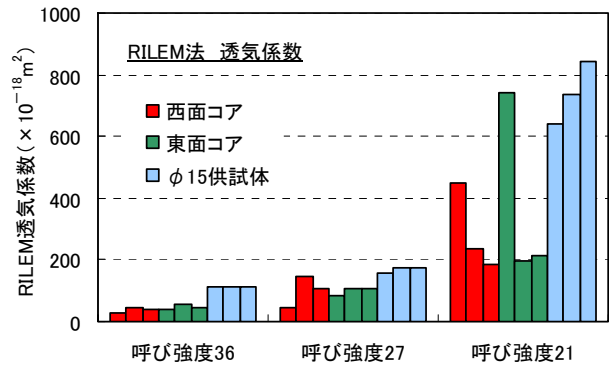


図-8 実大RC壁におけるRILEM法による透気係数

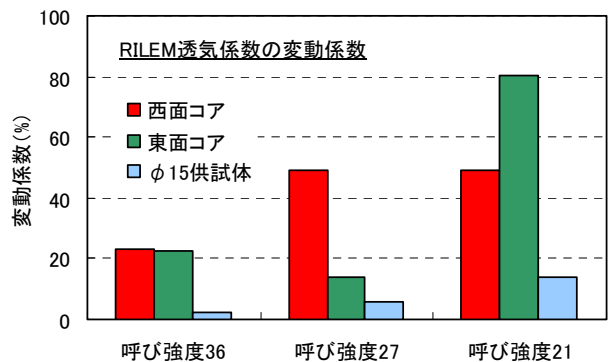


図-9 RILEM法による透気係数の変動係数

ることから、本研究に用いている透気性試験は、一般的なコンクリートの品質(かぶりコンクリートの密さ)の違いを評価することができると考えられる。

4.4 実大RC壁での簡易透気性とサンプリング手法

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⁾にて実施した。原位置での簡易透気性試験から得られた測定値の範囲は、FIM法(-A,-N)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。図-10に示すように、小型試験体の変動係数の平均は約33%であるのに対し実大RC壁試験体では66%であり、実大RC壁試験体の変動係数は小型試験体の2倍程度となった。

これらの結果から、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、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ばらつきを評価する場合など、試験

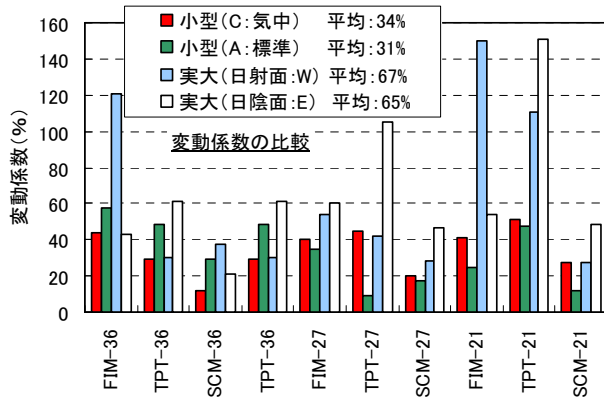


図-10 実大RC壁と小型試験体の変動係数の比較

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も必要と考える。具体的には、前者の場合は測定された全ての値を用いて品質の差異の程度を評価することが必要となる。一方後者の場合は、同一部材において複数ヶ所（理想的には6ヶ所以上⁹⁾)で測定した時点で測定値の変動係数を算定し、実大RC壁での変動係数を小型試験体レベル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、平均値を求める等などの手法を用いる。これにより、評価目的に応じた構造体コンクリートの透気性による耐久性の評価が可能になると考えられる。

5. 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を用用期間と定義する。Torrentの考え方¹⁰⁾に基づき、中性化深さがかぶり厚さ(t)に達する材齢を構造物の供用年数($S.L.$)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-11～図-14に、式(3)によるかぶり厚さと、RILEM法、FIM法(FIM-A)、FIM法(FIM-N)およびSCM法による透気性試験に基づくチャート(供用年数 SL30・65・100年)の例を示す。本報における係数 A, B は、図-4～図-7に示した中性化速度係数とそれぞれの透気試験による透気指標値との関係により得られたものを用いた。

さらに、前述の3種類の実大RC壁における各透気試験結果および文献¹²⁾に示した実大壁での測定(各図中の nS30 : 呼び強度30)を、呼び強度(nS)別にそれぞれのチ

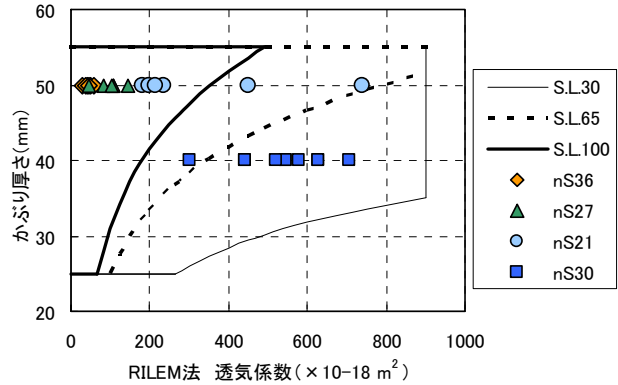


図-11 耐久性評価チャート：RILEM法

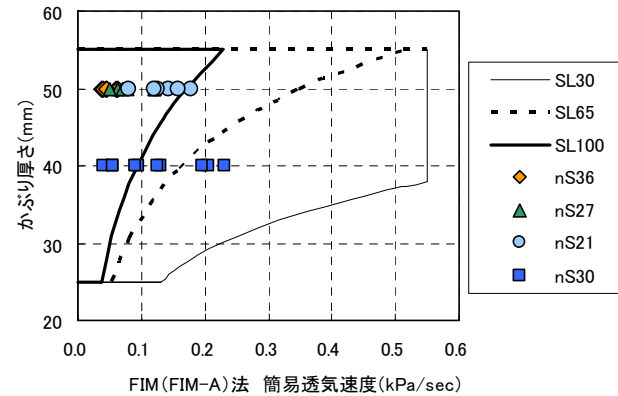


図-12 耐久性評価チャート：FIM-A法

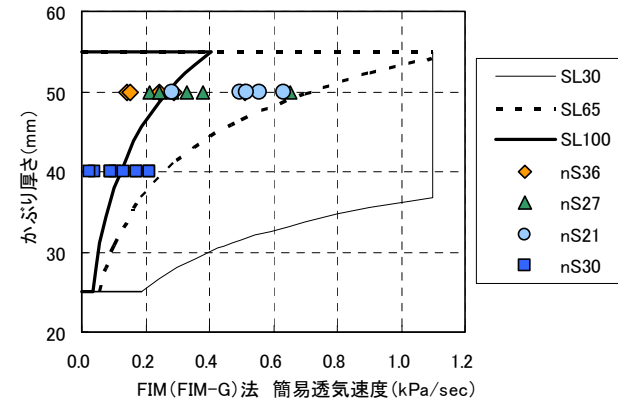


図-13 耐久性評価チャート：FIM-N法

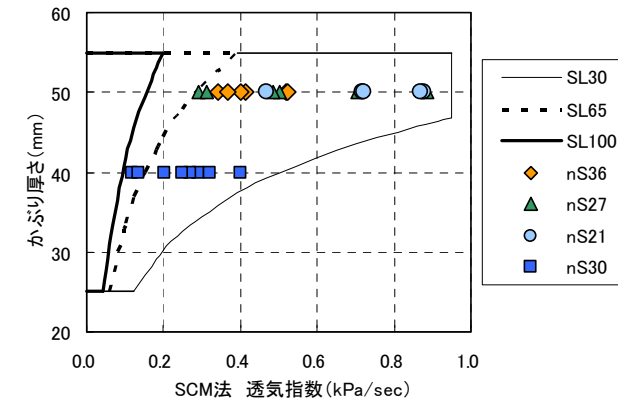


図-14 耐久性評価チャート：SCM法

ャート上にプロットした。

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ていることがわかる。

一方、SCM法とFIM法とはやや異なる評価となっているが、これはSCM法の方が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。

以上、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が可能になると考える。

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、施工条件や養生条件などの影響で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の透気性による評価は、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が必要になると考える。
- (4) 中性化速度係数と透気性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。

本報に示した原位置での各種の簡易透気性試験とかぶり厚さの測定によって、鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価や竣工時の健全性評価、寿命予測等のために有用となる情報を与えると考えられる。

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ている。

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) 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 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.
- 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) Dhir,R.K., Hewlett, P.C. and Chan, Y.N., Near-surface characteristics of concrete: assessment and development of in situ test methods, Magazine of Concr. Res., Vol.39, No.141, pp.183-195, Dec. 1987
- 8) 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
- 9) 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
- 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) 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