

6. 仕上材を施した RC 構造体の簡易透気性試験による耐久性評価手法に関する検討

Study on Performance-based Specification and Control of Durability of Reinforced Concrete Structures with Finished Material by Air Permeability Tests

山崎 順二* 立松 和彦*²
河合 智寛*²

要 旨

仕上材が施された RC 構造体の簡易透気性試験による耐久性評価手法を検討するため、呼び強度 27～40 の範囲のコンクリート試験体に、昨今の建築構造物に汎用されている 3 種類の仕上材をそれぞれ塗布し、表面法であるダブルチャンバー法とドリル削孔法の 2 種類の簡易透気性試験を行った。

その結果、上記の 2 種類の簡易透気性試験結果を複合させて評価する手法によって、表面法のみでは正確な評価が困難な仕上材が塗布されている構造体コンクリートの簡易透気性と、経年による仕上材の劣化の程度などを複合した RC 構造体の簡易透気性が評価できる可能性を示した。

キーワード：透気性試験／耐久性評価／ドリル削孔法／ダブルチャンバー法／仕上材／簡易透気速度

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、補修時期の立案などに有用な情報となる。

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、各種の簡易透気性試験を用いた RC 構造体の耐久性評価手法について検討し、簡易透気性と中性化深さの関係によるかぶり厚さと簡易透気性試験結果に基づく耐久性予測のチャート等を示してきた¹⁾。

一方、RC 構造物のほとんどは、コンクリート表面に何らかの仕上材が施されており、打放し面は少ない。そのため、これまで実施してきた打放し面による簡易透気性

試験結果からの検討のみでは、RC 構造体の耐久性が評価できない場合が考えられる。

そこで本報では、仕上材が施されたコンクリート構造体での簡易透気性試験の結果による耐久性評価手法について検討することとした。簡易透気性試験法としては、ドリル削孔法(FIM-A)¹⁾ および表面法(ダブルチャンバー法(トレント：TPT))の 2 種類を適用した。この 2 種類を適用した理由は、ドリル削孔法による簡易透気性は仕上材にほとんど影響されずにコンクリート内部の簡易透気性を評価できると考えられ、また、表面法では、コンクリート内部よりも仕上材の性能や仕上界面の影響を含んだ透気性が評価できると考えたためである。

2. 適用した簡易透気性試験方法の概要

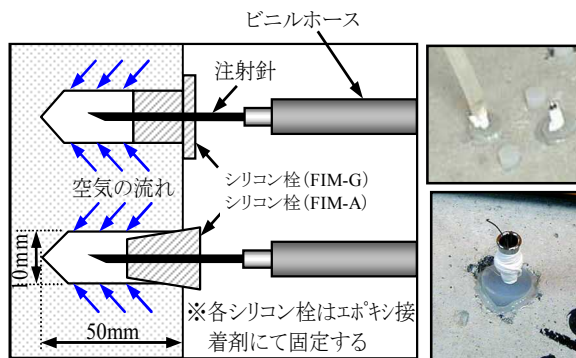
2.1 ドリル削孔法(FIM 法)

図－1 に示すように、試験位置に設けたドリル孔(直径 10mm 深さ 50mm)をシリコン栓にて密封し、孔内を減圧(X1)した後に孔内部の真空度が所定の圧力(X2)に復圧するまでに要する時間 T(sec)を計測する。簡易透気速度 P.V.(kPa/sec)は、孔内を X1 以下まで減圧した後、圧力が X1 から X2 まで復圧するのに要した時間 T(sec)から、式(1)により求められる指標である。

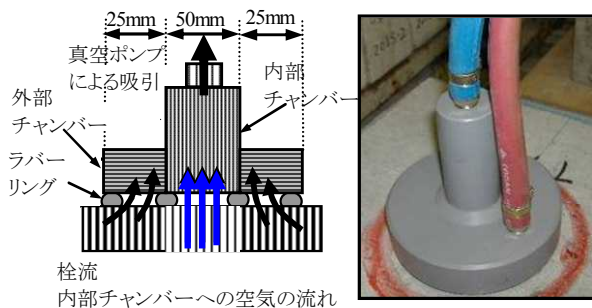
$$P.V. = \{ (X2 - X1) / T \} \quad (1)$$

本報では、簡易透気速度 P.V.(kPa/sec)を得るための圧

* 技術研究所 兼 大阪本店建築部品質管理室 *² 技術研究所



図－１ ドリル削孔法（FIM 法）



図－２ ダブルチャンバー法（トレント：TPT）

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²⁾の 160～190 (mmHg) に相当する。ドリル削孔法による簡易透気性試験は、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うこととした。本報に示す測定値は、2 孔の平均値である。

なお、FIM 法による簡易透気速度の測定においては、文献²⁾および下澤ら³⁾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の改善を意図して提案しているコーン型（浅沼型：FIM-A）の 2 種類のシリコン栓を使用しているが、本報では FIM-A の結果のみを用いて考察する。

2.2 ダブルチャンバー法（トレント：TPT）⁴⁾

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

表－１ コンクリート試験体の調合概要

呼び強度	スランプ cm	W/(C+FA) %	単位水量 kg/m ³	セメント量 kg/m ³	フライアッシュⅡ種 kg/m ³
24	18	57	180	316	0
27	15	54	170	252	63
30	18	50	175	280	70
36	18	44	175	318	80
40	18	40	175	350	88

表－２ 試験体に塗布した仕上材の種類

呼び名	分 類	分類別 中性化率 ³⁾	種類別中性化率 の範囲 ³⁾
外装薄塗E	薄付け仕上塗材 (リシン)	1.02	0.68～1.02
エマルション ペイント	塗料 (ペイント)	0.64	0.12～0.81
複層塗材E	複層塗材 (アクリル)	0.22	0.00～0.32



写真－１ 各種仕上材を塗布したコンクリート試験体の例

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。

3. コンクリート試験体および仕上材の種類

仕上材を塗布したコンクリート試験体は、呼び強度 24, 27, 30, 36 および 40 の 5 種類である。コンクリート試験体の調合概要を表－1 に示す。ここで、呼び強度 24 以外はセメント質量の 20% をフライアッシュで内割置換したコンクリートである。これらのフライアッシュを使用したコンクリートは、3 つの生コン工場 (T,I,S) にて実機で練り混ぜられたものであり、いずれの生コン工場でも骨材には砕石および砕砂を用いている。

呼び強度 24 以外の試験体の形状は、写真－1 に例示する 600×600×900mm の柱状試験体である。呼び強度 24 の

試験体は 600×1200×200mm の壁状試験体を使用した。この試験体に、表－2 に示す 3 種類の仕上材をそれぞれ塗布し、各仕上面においてドリル削孔法およびダブルチャンバー法による簡易透気性試験を行った。表－2 中には、日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS 5⁵⁾ に示される分類別中性化率および種類別中性化率の範囲を、仕上材ごとにそれぞれ併記した。ここでいう中性化率とは、既往の文献調査と実態調査に基づき、仕上材を施さない打放し面での中性化深さに対する各種の仕上材を施したコンクリートの中性化深さの比を表している数値であり、数値の小さい仕上材の方が中性化抑制効果が高いと判断されている。

なお、簡易透気性試験を実施した時点でのコンクリート試験体の材齢は、1 年半から 2 年程度経過したものである。それぞれの仕上材は、簡易透気性試験を実施する約 3 週間前に塗布し、コンクリート打放し面と同時に試験を行った。

4. 実験結果および考察

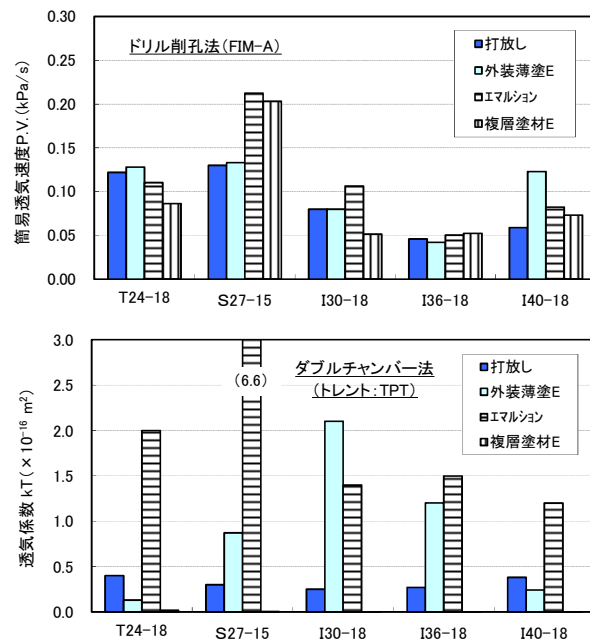
4.1 簡易透気性試験の結果

ドリル削孔法（FIM-A）による仕上材ごとの簡易透気速度 P.V.と、ダブルチャンバー法（TPT 法）による透気係数 kT の測定結果を図－3 に示す。凡例に示す記号 T,S,I は生コン工場、後の数値は「呼び強度－スランプ」を表している。

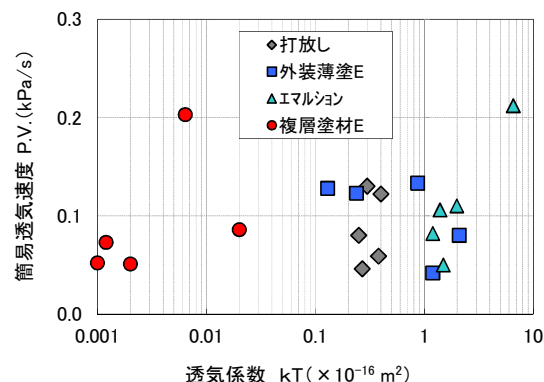
図－3 から、ドリル削孔法では簡易透気速度 P.V.が仕上材の有無および種類にあまり影響を受けていないが、表面法であるダブルチャンバー法では、仕上材の有無および種類の違いによって透気係数 kT が大きな影響を受けていることが分かる。これは、前述のように、ドリル削孔法ではコンクリート自体の表層から内部における透気性を評価しており、ダブルチャンバー法では主として表層部のかぶりコンクリートと仕上材界面を含んだ透気性を評価しているためと考えられる。

図－4 に、簡易透気速度 P.V.と透気係数 kT の関係を示す。透気係数 kT については、仕上材ごとに概ね同じ領域に分布しており、エマルジョンペイントを除いて打放し面の kT に対して概ね表－2 に示す種類別中性化率の範囲³⁾と同程度の数値であった。

一方、ダブルチャンバー法では、仕上材のない打放し面での測定結果よりも透気係数 kT が大きくなるエマルジョンペイントや外装薄塗 E は、仕上材とコンクリートの微細な界面からの空気の吸い込み等が原因で、仕上材の奥にあるコンクリート表層部を含めた透気性を測定で



図－3 FIM-A 法および TPT 法による簡易透気性



図－4 簡易透気速度 P.V. と透気係数 kT の関係

きていない可能性があると考えられる。

このことから、ダブルチャンバー法は、完全非破壊であることや作業性も簡便であり、コンクリート打放し面での透気性の測定には極めて有用であるが、仕上材が塗布された面での透気性の測定については、正確な透気性の測定および評価が困難となる場合があると考えられる。

4.2 簡易透気速度と透気係数の複合に関する検討

簡易透気性試験と中性化速度係数には、既往の研究結果により高い相関が認められている¹⁾。しかし、簡易透気性試験によって仕上材の施された RC 構造体の中性化抵抗性を評価する際には、ドリル削孔法（FIM-A 法）とダブルチャンバー法（TPT 法）のそれぞれの短所として、FIM-A 法では仕上材による効果の評価がやや困難となること、逆に、TPT 法ではコンクリート自体の透気性が正

確に評価できない可能性があることに配慮する必要があると考える。

そこで、これらの試験法の短所を補うため、FIM-A 法による簡易透気速度 P.V.と、TPT 法による透気係数 kT の両方の測定結果を複合して、仕上材が施された RC 構造体の透気性を評価する手法について検討する。

まず一例として、既往の研究による実大 RC 壁（呼び強度 21,27,36）による実験結果¹⁾によれば、打放し面における簡易透気速度 P.V.n と透気係数 kTn には、図-5 に示すような良好な相関がある。この関係を用いれば、式(2)により、仕上面における透気係数 kT を、簡易透気速度 P.V.s に変換できることになる。

なお、図-5 に示した回帰線の傾きを表す係数 β については、式(3)により、打放し面のほぼ同じ位置において、

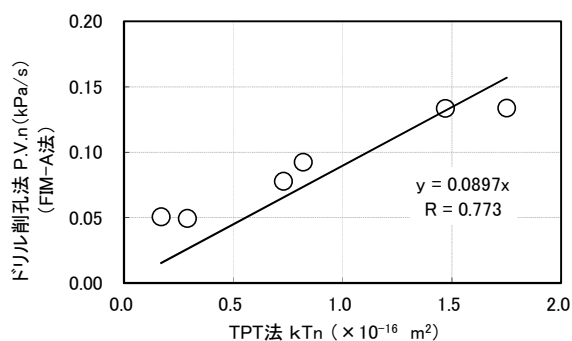


図-5 打放し面での簡易透気性(P.V.n と kTn)の関係

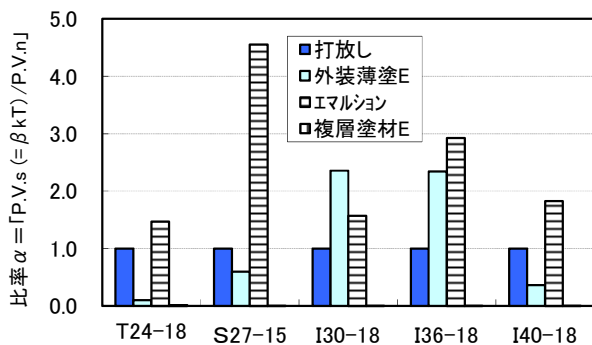


図-6 簡易透気速度の比率 α

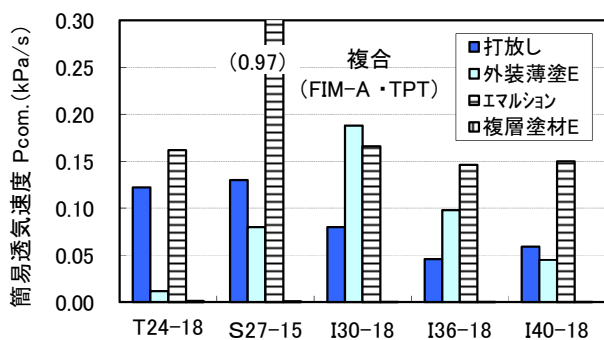


図-7 FIM-A 法と TPT 法の複合による簡易透気速度

FIM-A 法と TPT 法の両方の簡易透気性試験を行うことによって得られる。既存構造物の耐久性調査などにおいては、原位置において両方の試験を行い、換算係数 β の値の整合性を確認する必要があると考えられる。

$$P.V.s = \beta \cdot kT = 0.0897 \cdot kT \quad (2)$$

ここに、

P.V.s: kT を P.V.に変換した簡易透気速度 (kPa/s)

kT: 仕上材を施した面での透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)

$$\beta = P.V.n / kTn \quad (3)$$

ここに、

β : P.V.n と kTn の回帰線の傾き (kPa/s/ $\times 10^{-16} \text{ m}^2$)

P.V.n: 打放し面でのドリル削孔法による

簡易透気速度 (kPa/s)

kTn: 打放し面でのダブルチャンバー法による

透気係数 ($\times 10^{-16} \text{ m}^2$)

次に、仕上材を施していない打放しコンクリート面の FIM-A 法における簡易透気速度 P.V.n に対する、仕上材を施したコンクリート面の TPT 法による透気係数 kT を β により簡易透気速度に変換した P.V.s (式(2)) の比率 α を、式(4)のように表現する。式(4)により得られた簡易透気速度の比率 α を図-6 に示す。この比率 α は、JASS 5 に示される中性化率⁵⁾と同様の考え方を簡易透気性試験に適用したものである。更に多くのデータを蓄積し検討することが必要と考えられるが、表-2 に示す種類別中性化率と比較すると、外装薄塗 E および複層塗材 E については、JASS 5 に示される中性化率⁵⁾と概ね同様の傾向を示していると考えられる。

$$\alpha = P.V.s / P.V.n \quad (4)$$

ここで、式(4)により得られた比率 α を、仕上材を施したコンクリート面における FIM-A 法による簡易透気速度 P.V.f に乗じることによって、中性化率⁵⁾と同様に、簡易透気性に及ぼす仕上材の影響を考慮したことに同意になると考えられる。

このことから、両方の試験結果を複合した簡易透気速度 P.com. を式(5)のように表す。

$$P.com. = \alpha \times P.V.f \quad (5)$$

ここに、

P.com.: 試験結果を複合した簡易透気速度 (kPa/s)

P.V.f：仕上材を施した面での FIM-A 法による
簡易透気速度（kPa/s）

式(5)により得られた P_{com} を図-7 に示す。特にエマ
ルションペイントについては、打放し面の $P_{com}(=P.V.n)$
よりも簡易透気速度が大きくなる傾向がみられるが、こ
れは、図-3 に示す TPT 法による簡易透気性の試験結果
を反映しているためと考えられる。また、複層塗材につ
いては仕上材による簡易透気性の低減効果が極めて大き
いため、図-3 にと同様に極めて小さい値（図には表示
されない程度の微少な値）となった。

図-8 に、本報で考案しているドリル削孔法（FIM-A
法）とダブルチャンバー法（TPT 法）を複合した簡易透
気性試験「透気ハイブリッド法」のイメージを示す。

実用面での手順として、まず、RC 構造体の打放し面の
ほぼ同位置において、ダブルチャンバー法による kTn と
ドリル削孔法による $P.V.n$ を測定し、換算係数 β を確認す
る。その後、得られた β により仕上面においてダブルチ
ャンバー法により測定した透気係数 kT を $P.V.s$ に換算し、
 $P.V.s$ と $P.V.n$ から簡易透気速度の比率 α を算出する。さら
に、仕上面においてドリル削孔法により測定した簡易透
気速度 $P.V.f$ に比率 α を乗じると、2 つの試験結果を複合
した簡易透気速度 P_{com} が得られることになる。

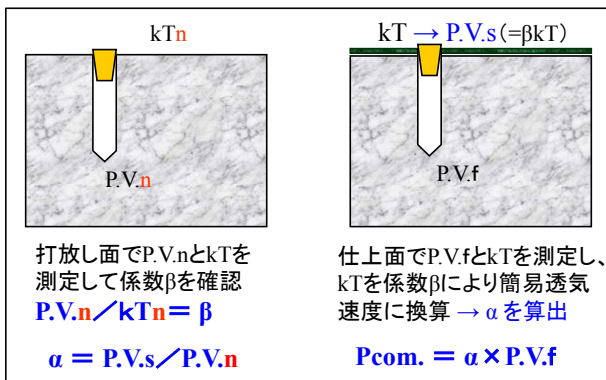


図-8 「透気ハイブリッド法」による簡易透気性試験法

5. まとめ

仕上材が施された RC 構造体の透気性を、ドリル削孔
法（FIM-A 法）とダブルチャンバー法（TPT 法）を併用
して評価する手法として、「透気ハイブリッド法」を考案
した。

現時点ではデータがまだ少ないが、この手法によれば、
1 つの簡易透気性試験の結果を用いて中性化速度を予測
してかぶり厚さとの関連から RC 構造物の耐久性を評価
する場合よりも、評価の精度が少なくとも向上するもの

と考えられる。

今後、竣工前などの若材齢のコンクリートに加え、経
年劣化した既存構造物の構造体コンクリート等からもデ
ータを収集・蓄積することにより、簡易透気性試験によ
る汎用性の高い耐久性評価手法の提案と、その後の実用
化を目指したい。

[参考文献]

- 1) 山崎順二・今本啓一・下澤和幸・永山勝：簡易透気
試験による RC 構造体の耐久性評価に関する研究、
コンクリート工学年次論文集、Vol.32,No.1, pp.1769-
1774,2010.
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説、JASS 5
鉄筋コンクリート工事 JASS 5, pp.198-200, 2009.