

論文 透気性試験における繰返し測定および試験機の検定に関する検討

山崎 順二*1・今本 啓一*2・田中 章夫*3・加藤 猛*4

要旨：コンクリート構造物の表層透気性を評価するために、ダブルチャンバー法およびシングルチャンバー法を用いて同一箇所を複数回繰り返して測定する場合における試験間の時間間隔が、透気性の試験値に及ぼす影響について、コンクリート内部の圧力変化を用いて検討した。その結果、連続または短い時間間隔で同一箇所を測定する場合は直前の測定による圧力がコンクリート内部に残存した状態となり、次の測定値に影響を与えること、残存した圧力の影響を受けないようにするためには測定時間の間隔を15分程度以上とすれば良いことが分かった。また試験機の検定については、試作した検定器を用いた手法の有効性が確認できた。

キーワード：透気性, ダブルチャンバー法, 測定時間間隔, 連続測定, 内部圧力, 機差検定器

1. はじめに

かぶりコンクリートの品質を非破壊もしくは微破壊で評価するための手法として、これまでに種々の表層透気性試験が研究開発¹⁾され、現在、土木構造物における表層コンクリートの施工中の品質評価のための試験として、ダブルチャンバー法などが適用されるようになってきた。

筆者らは、既報²⁾においてダブルチャンバー法による8台の試験機を用いて共通試験(ラウンドロビン・テスト)を実施し、測定値の変動とその要因、透気性の評価方法などについて検討した。

一方、かぶりコンクリートの品質評価のための透気性試験において同一箇所を繰り返して測定する場合、各試験間の時間間隔が透気性の測定値に及ぼす影響や、表層コンクリートの透気領域や深さについては、現時点ではあまり明確にされていないと考えられる。

そこで本論では、ダブルチャンバー法(DC(TPT)法)およびシングルチャンバー法(SCM法)による透気性試験を、同一箇所連続して測定した場合もしくは同一箇所での試験を時間間隔を変えて測定した場合を想定し、その際のコンクリート内部の圧力を計測することによって、それらが透気性の試験値に及ぼす影響を調査した。

また、透気試験機の検定方法を検討するため、新たな検定器を試作し、DC(TPT)法試験機と3台のドリル削孔法³⁾による試験機を用い、同一試験機における透気係数の測定精度や試験機の機差の確認方法について検討した。

2. 繰返し測定が透気性の試験結果に及ぼす影響

2.1 圧力計測の概要

(1) 圧力計測に供した試験体の概要

透気試験において表層コンクリートに作用する内部圧力を計測するため、一辺200mm角の直方体の表層(測

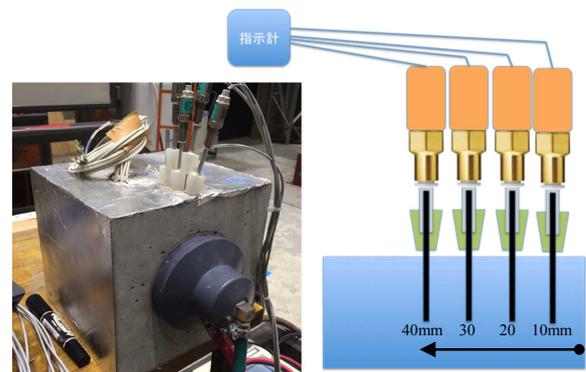


図-1 内部圧力の計測状況と圧力性設置イメージ

定面)中央部の深さ10mm, 20mm, 30mmおよび40mmの位置に真鍮パイプを設置し、その先端に圧力センサを取り付けて透気試験中の表層コンクリート内部の圧力分布を計測した。図-1に圧力計測に供した試験体とDC(TPT)法による試験状況の写真および真鍮パイプの設置位置のイメージ(断面)図を示す。

なお、試験体は、JIS工場で製造される呼び強度27(27-15-20N, W/C=53%, 単位水量175kg/m³, s/a=46.5%)の普通コンクリートを用いて作製したものである。

2.2 圧力計測に供した透気性試験

(1) ダブルチャンバー法(DC(TPT)法)

DC(TPT)法の測定原理を示す。DC(TPT)法は、図-2に示すように、内部チャンバーと外部チャンバーの二重セル構造のチャンバー、真空ポンプおよび制御装置から構成されており、測定位置での表層透気性は、内部チャンバーの圧力の変化時間から計算によって評価される。測定中の内部チャンバーと外部チャンバーの圧力が等しくなるように外部チャンバーの圧力を制御することによって内部チャンバー内への外部表層からの空気の流入が

*1 (株)浅沼組 技術研究所 材料研究グループ グループリーダー 工修 (正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*3 (株)八洋コンサルタント 工博 (正会員)

*4 東京理科大学 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

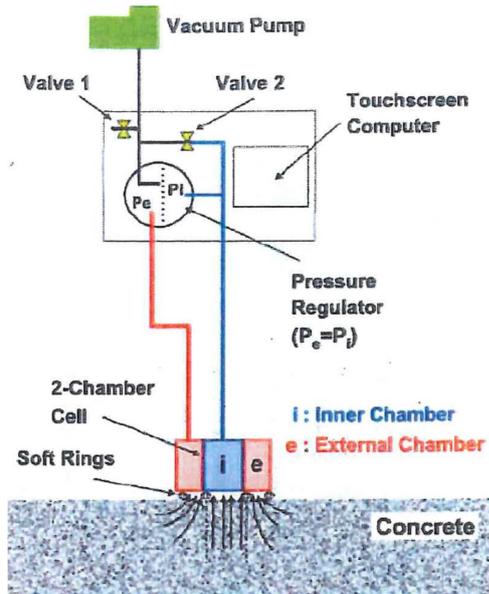


図-2 DC(TPT)法のレイアウト

$$kT = \left(\frac{V_c}{A}\right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left(\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P_{ieff}(t_f)}{P_a - \Delta P_{ieff}(t_f)}}{\sqrt{t_f} - \sqrt{t_0}}\right)^2 \quad (1)$$

$$L \approx 1000 \left\{ \frac{2kT P_a t_f}{\varepsilon \mu} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここに、

- kT : 空気透過度係数 (m^2)
- V_c : 内部セルシステムの容積 (m^3)
- A : 内部セルの断面積 (m^2)
- μ : 空気の粘性係数 ($=2.0 \times 10^{-5} Ns/m^2$)
- ε : かぶりコンクリートの空隙量 ($=0.15 m^3/m^3$)
- P_a : 大気圧 (N/m^2)
- ΔP_{ieff} : 試験終了時内部セルの有効圧力上昇 (N/m^2)
- t_f : 試験終了時間 (s)
- t_0 : 試験開始時間 ($=60s$)
- L : 試験により影響を受けた概略深さ (mm)

物理的に排除され、SCM法等で懸念されるコンクリート表層の脆弱部の影響を根本的に解決した試験方法である。DC(TPT)法では、図-2に示したような栓流がコンクリート内部に形成され、この流れは透気性試験のベンチマークとして位置付けられる RILEM TC 116-PCD によって提案された CEMBUREAU 法³⁾のそれと近い形態となる。

透気係数 kT ($\times 10^{-16} m^2$) は、測定された圧力変化から式(1)により得られる。併せて、式(1)から得られた kT を用いて、試験により影響を受けた概略深さ L (mm) が式(2)から算出される。なお、透気性の測定前には校正用のアクリルプレートを用い、セル内への漏気がない状態で12分間のキャリブレーションを行うことによって



写真-1 シングルチャンバー (内径 $\phi 5cm$)

チャンバー内に漏れる空気の量を測定し、コンクリート面での測定値から差し引いて透気係数 kT を算出している。

(2) シングルチャンバー法 (SCM 法)

SCM 法は、コンクリート表面に装着させたチャンバー内部を $21.3kPa$ 以下まで減圧した後、チャンバー内部の気圧が $25.3kPa$ に復圧するまでに要する時間を計測し、式(3)により透気指数を求める。本実験に供したシングルチャンバーは、吸引部の直径(内径)が $5cm$ のものと $10cm$ のものを用いた。写真-1に内径 $5cm$ のものを例示する。

$$A.P.I. = \frac{(x_2 - x_1)}{t} \quad (3)$$

ここに、

- $A.P.I.$: 透気指数 (kPa/sec)
- x_1 : 測定開始時のチャンバー内部の気圧 (kPa)
- x_2 : 測定終了時のチャンバー内部の気圧 (kPa)
- t : x_1 から x_2 に復圧するのに要する時間 (sec)

2.3 繰返し測定に関する実験結果および考察

(1) 連続測定による影響

DC(TPT)法または SCM 法 ($\phi 10cm$ および $\phi 5cm$) において、表層コンクリートの同一箇所を連続して測定した際に得られる透気性測定値が受ける影響を、表層コンクリート内部の圧力変化を計測することによって検討した。連続測定では、DC(TPT)法および SCM 法 ($\phi 10cm \cdot \phi 5cm$) とともに、表層コンクリートにチャンバーを装着した状態のまま5回繰り返して測定した。コンクリートの内部圧力の計測は、1回目の測定開始時から5回目の測定が終了するまで継続し、1Hzでサンプリングした。

図-3～図-5に、DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM 法 ($\phi 10cm \cdot \phi 5cm$) による透気指数 $A.P.I.$ を、連続で5回測定した結果をそれぞれ示す。

透気性の測定には、前述の呼び強度 27 の同一の試験体を用いているが、3つの試験方法の測定原理やチャンバー内径などが異なるため、透気性測定値はそれぞれ異なっている。しかし、DC(TPT)法では4回目以降、SCM 法ではチャンバー径によらず3回目以降の測定において、それぞれの方法ごとに同等の測定値が得られている。

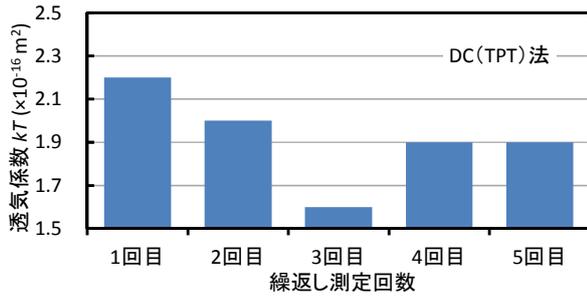


図-3 DC(TPT)法での連続測定時の透気係数

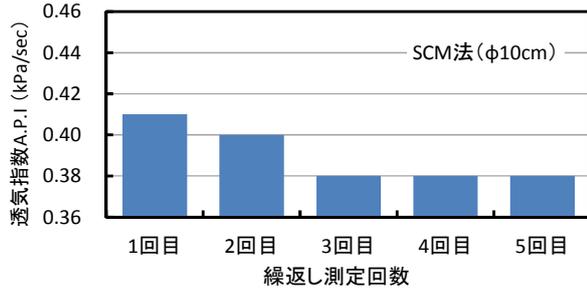


図-4 SCM法 (φ10cm)での連続測定時の透気指数

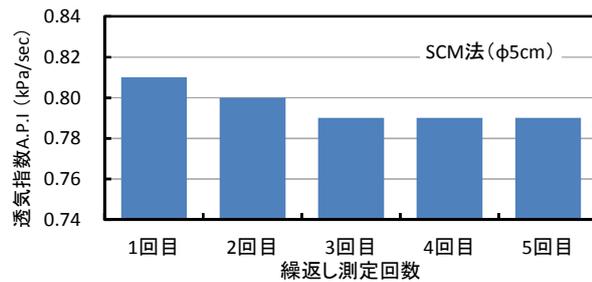


図-5 SCM法 (φ5cm)での連続測定時の透気指数

一方、ドリル削孔法³⁾においては、1回目の測定値のみが2回目以降と比較して透気性が高くなる傾向が認められており、この理由を空気の定常流に関与しない空気を取り込むことが影響しているとして、連続で4回測定した値の2回目~4回目の平均値をその測定位置における簡易透気速度として扱うこと⁴⁾とされている。

DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM法 (φ10cm・φ5cm) による透気指数 $A.P.I$ を、連続で5回測定した際の表層コンクリート内部の圧力について、図-1に示す試験体の測定面中央の表層から深さ10・20・30・40mmの位置での内部圧力の推移を図-6~図-8に示す。1回の透気性試験に要する時間が試験方法により異なるため、5回の測定が終了するまでの経過時間はDC(TPT)法が最も長く、SCM法(φ5cm)が最も短くなる。また圧力の大きさも試験により異なり、SCM法ではチャンバの内径が大きいφ10cmの方が内部圧力も大きくなっている。しかし、表層コンクリートの深さ40mmまでの位置において圧力の波形はいずれの試験方法とも類似しており、同一箇所連続測定した場合は、直前の測定時に

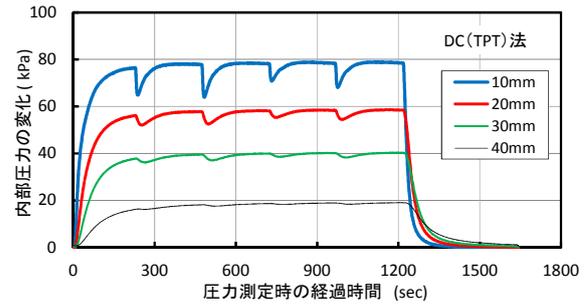


図-6 DC(TPT)法での連続測定時の内部圧力

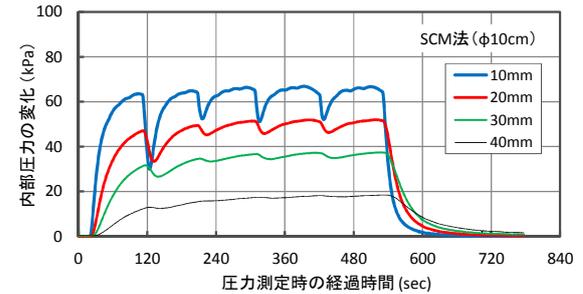


図-7 SCM法 (φ10cm)での連続測定時の内部圧力

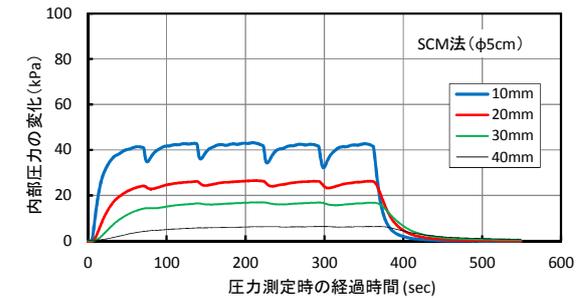


図-8 SCM法 (φ5cm)での連続測定時の内部圧力

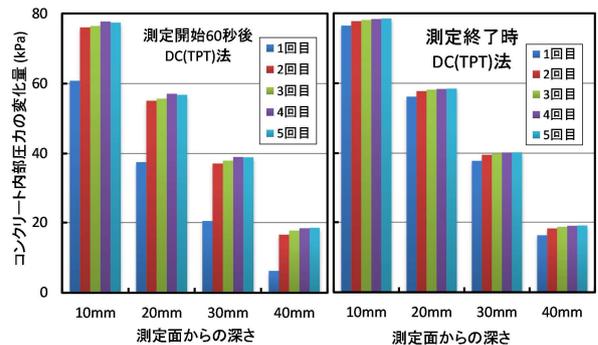


図-9 測定開始時と終了時の内部圧力 DC(TPT)法

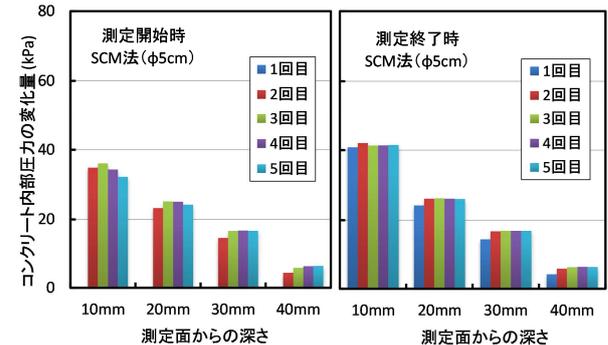


図-10 測定開始時と終了時の内部圧力 SCM法 (φ5cm)

作用した圧力がコンクリート内部に残存した状態で、次の測定に移行していることが分かる。また、DC(TPT)法および SCM 法(φ 10cm)における深さ 40mm の内部圧力は、連続測定の 3 回目終了時付近まで微増する傾向にあり、SCM 法(φ 5cm)においては深さ 30mm までの位置においてそれと同様の傾向が伺える。

ここで、DC(TPT)法と SCM 法(φ 5cm)について、測定開始時および測定終了時におけるコンクリートの内部圧力を図-9 および図-10 に示す。なお、DC(TPT)法については測定原理を考慮し、計測開始後 60 秒の時点での圧力を採用した。測定開始時の圧力は、1 回目と 2 回目以降の測定において差が大きく、3~5 回目においては深さ 40mm までの範囲で概ね同等の圧力となっている。また、測定終了時の圧力は、2~5 回目においてほぼ同等の圧力となっていることが分かる。

このことから、透気性の測定値は、直前の測定において表層コンクリート内部に残存した圧力(気圧)の影響を受けて 2 回目に透気性が低くなったように評価され、さらに 3 回目以降の測定では測定開始時の圧力と終了時

の内部圧力がほぼ安定するため、透気性の測定値が概ね同等の値を示すことになると考えられる。

(2) 測定時間の間隔による影響

これまでの結果から、同位置で連続して透気性試験を行った場合は、表層コンクリート内部に残存した圧力が 2 回目以降の透気性測定値に影響を与えていることが分かった。そこで、同一箇所における透気性の測定時に、直前の測定の影響を受けずにその位置の表層コンクリートの透気性を評価するために必要となる時間間隔(インターバル)を把握するための実験を行った。

ここでは、連続測定に供したのと同じ試験体を用いて実験を行った。試験の種類についても同様に DC(TPT)法および SCM 法(φ 10cm・φ 5cm)の 3 種類とした。各透気性試験における測定の時間間隔は、直前の測定終了から 15 分後・10 分後・5 分後・3 分後・1 分後および直後と、徐々に測定間の時間間隔を短くした。

DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM 法(φ 10cm・φ 5cm)による透気指数 $A.P.I.$ の時間間隔ごとの測定結果を図-11~図-13 に示す。またこれらの透気性の

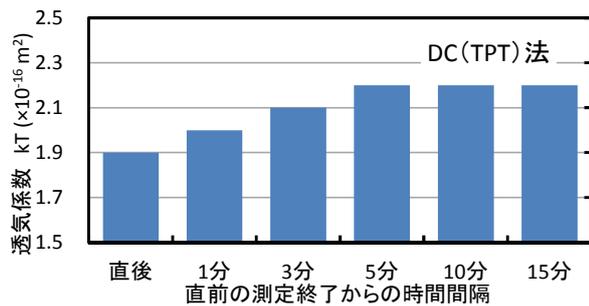


図-11 測定時間間隔と透気係数 DC(TPT)法

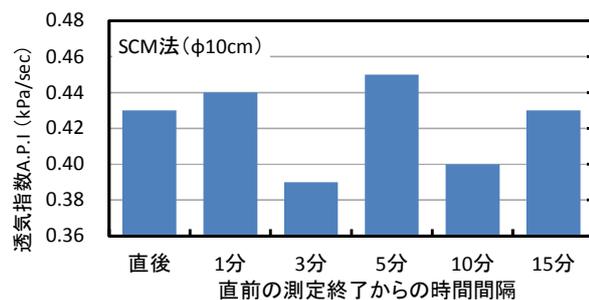


図-12 測定時間間隔と透気指数 SCM 法 (φ 10cm)

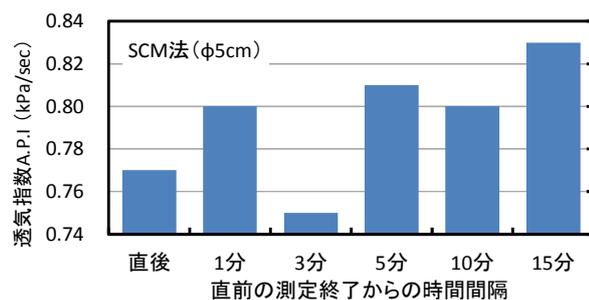


図-13 測定時間間隔と透気指数 SCM 法 (φ 5cm)

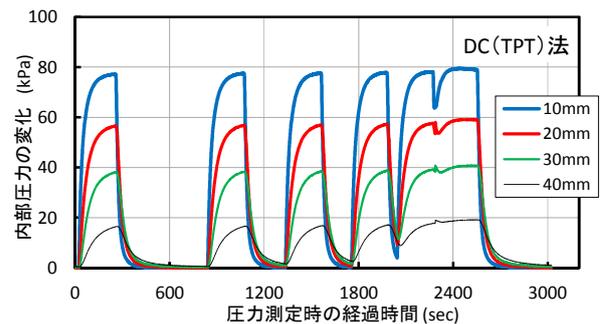


図-14 測定時間間隔と内部圧力 DC(TPT)法

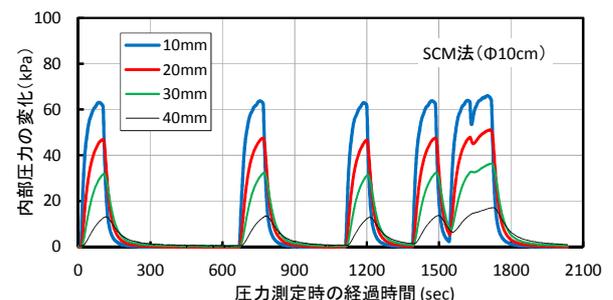


図-15 測定時間間隔と内部圧力 SCM 法 (φ 10cm)

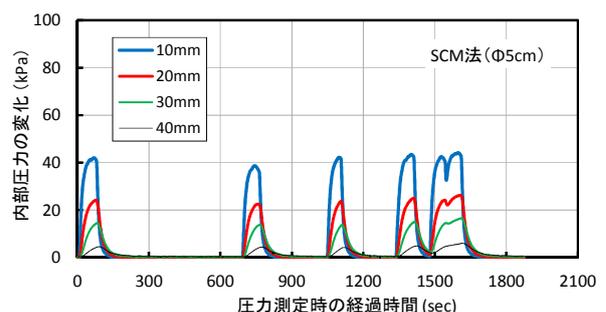


図-16 測定時間間隔と内部圧力 SCM 法 (φ 5cm)

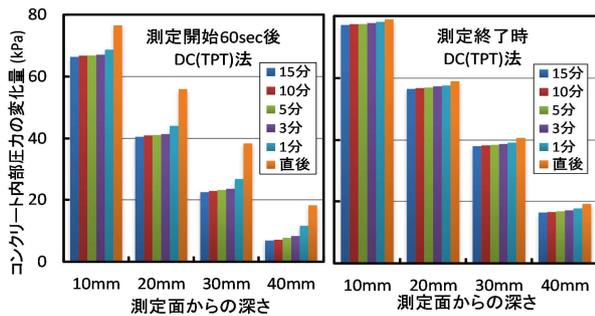


図-17 測定開始時と終了時の内部圧力 DC(TPT)法

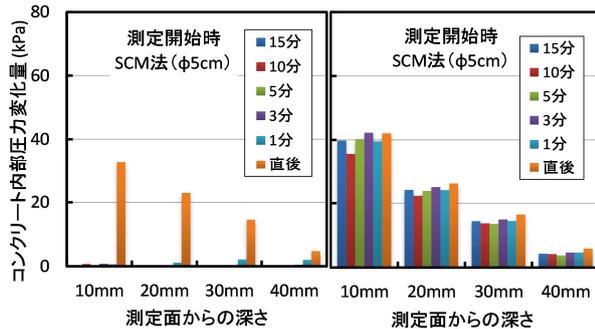


図-18 測定開始時と終了時の内部圧力 SCM法(φ5cm)

の測定と併せて、コンクリート内部の圧力を測定した結果を図-14～図-16に示す。各図の最左の波形が測定時間間隔が15分後の圧力測定結果であり、その右側に直前の測定終了から10分後、5・3・1分後、最右側に直後（連続測定と同条件）の波形が示されている。これらの圧力波形は連続測定の場合と同様に、透気性の測定値や表層コンクリート内部圧力の大きさはそれぞれの試験方法により異なるものの、波形の形状はいずれの試験方法においても類似していることが分かる。

図-17および図-18に、連続測定の場合と同様に、DC(TPT)法とSCM法(φ5cm)について、測定開始時および測定終了時におけるコンクリートの内部圧力を示す。

コンクリートの内部圧力に及ぼす時間間隔の影響は、測定開始時において、特にSCM法において顕著であり、連続測定の結果と同様に直後の測定条件において大きな影響を受けている。しかし、DC(TPT)法においては直前の測定終了から約10分、SCM法においては約5分の間に、表層コンクリートの深さ40mmの位置においてコンクリート内部に残存していた直前の測定による圧力がほぼ初期の状態に復圧している。この時間の差は、試験時に作用している圧力の大きさの違いによると考えられる。

以上の内容と図-11～図-13に示した透気性の測定値の両方を鑑みると、同一箇所において直前の測定の影響を受けずに表層コンクリートの透気性の評価を行うための測定終了からの時間間隔は、コンクリートの強度レベルによってやや差異が生じるもの推察されるが、概ね10分～15分以上が適切であると考えられる。

3. 透気試験機の検定方法に関する検討

3.1 試作した検定器の概要

試作した検定器の概要を図-19に示す。検定器はバルブ・アクリル板および圧力センサで構成される。使用した精密バルブは、流量とバルブ開放値に一定の線形性があり、適用範囲がバルブ開放値0.00～24.00(0.1-1000 ml/min, 100kPa, 窒素ガス)のものである⁵⁾。圧力センサは相対圧力(-100kPa, 分解能0.1kPa)を測定できるものとし、データロガーを用いて透気試験時におけるチャンバー内の圧力変化を計測した。DC(TPT)法の検定は、チャンバーを試験面であるアクリル板に装着し、内側のチャンバーへの流量のみを制御して計測した。またドリル削孔法³⁾の検定は、削孔形状を模擬したアクリル製の専用チャンバー(内径φ10mm×長さ50mm)を作製し、試験面にシリコングリスを用いてそれを固定して計測した。

3.2 試験方法

試作した検定器においてバルブ開放値を2.0から10.0まで順次増加させ、チャンバー内への空気の流入を制御することによって透気性を測定した。試験機の測定精度の確認については、DC(TPT)法による同一試験機を用いて10回連続して測定することにより実施した。また、機差の確認は、機器構成が若干異なる3台のドリル削孔法による試験機を用いて実施した。これらの結果を用いて、試作した検定器の適用性および有効性を検討した。

3.3 試験結果および考察

(1) DC(TPT)法における透気性測定精度に関する検討

各バルブ開放値において10回繰り返して測定した結果を図-20に示す。凡例の数値が測定回を示している。バルブ開放値を増加させることによってDC(TPT)法における内部チャンバー内への空気の流入量が増加し、それに伴い透気係数が徐々に大きくなることが認められる。

図-21に、10回の連続測定におけるバルブ開放値ごとの透気係数の変動係数を示す。変動係数の全平均は20%程度であるが、バルブ開放値5.5(透気係数では $0.26 \times 10^{-16} \text{m}^2$)以上においては変動係数が10%以下となっている。一方、バルブ開放値3.5～4.5の間の変動係数は、40%を超えている。これは、バルブ開放値3.0～4.0の範囲は、透気性測定中のチャンバー内の圧力変化が0.5kPa以下の微小な圧力変化領域であり、ポーズやパッキンの

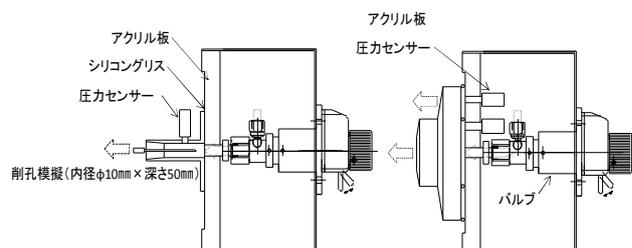


図-19 検定器の概要(左:ドリル削孔法・右:DC(TPT)法)

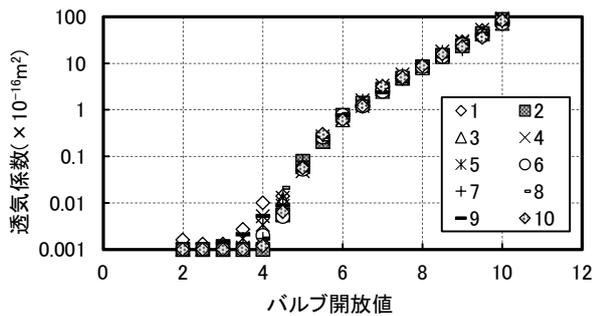


図-20 DC(TPT)法における同一試験機での測定結果

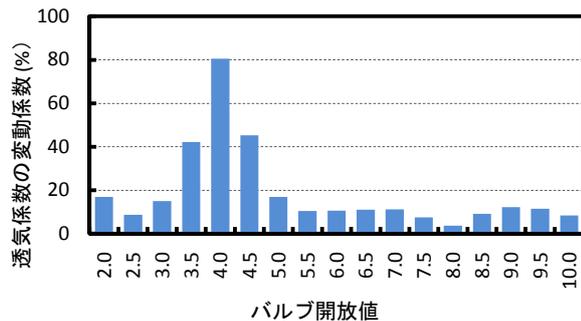


図-21 透気係数の変動係数とバルブ開放値の関係

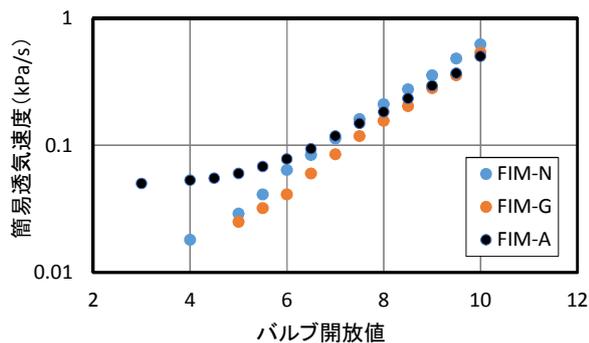


図-22 ドリル削孔法での簡易透気速度とバルブ開放値

接続状態や劣化状況に起因する若干の漏気が透気係数に大きく影響するためと考えられる。バルブ開放値 4.5 における透気係数の平均は概ね $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下であり、この値は一般的なコンクリートにおいて極めて緻密と評価⁹⁾される領域であることを考慮すると、この変動量は、DC(TPT)法を用いた透気性の評価には大きな影響を与えない範囲と考えられる。これより、DC(TPT)法による試験機の測定精度の検定については、透気係数が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以上に相当するバルブ開放値 5.0 程度以上の領域において実施することが有効な手法であると考えられる。

(2) ドリル削孔法における機差の検定

ドリル削孔法における 3 台の試験機を用いて、試作した検定器によってそれぞれ簡易透気速度を測定した結果を図-22 に示す。バルブ開放値と簡易透気速度には線形性が認められるが、FIM-A のみバルブ開放値 6.0 付近まで測定値が乖離している。この部分は透気性の低い領域であり、この乖離は試験機を構成するホース接続部など

からの漏気に起因する現象と考えられる。このことから、この検定器を用いることによって、試験機の漏気の有無や測定精度、さらには複数台の試験機の機差を定量的に把握することが可能になると考えられる。

4. まとめ

透気性試験における繰返し測定および試験機の検定方法に関する検討を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1) ダブルチャンバー法もしくはシングルチャンバー法において同一箇所でも繰返し測定を行う場合、透気性測定値が直前の試験による影響を受けないようにするためには、試験間の時間間隔を 10~15 分程度以上とすれば良い。
- (2) 試作した検定器を用いることによって、透気試験機の測定精度や、試験機内での漏気の有無、さらには試験機間の機差を把握することが可能となる。

今後、呼び強度の異なるコンクリートについても同様の試験を実施し、試験機の検定手法の確立に寄与したい。

謝辞

本論文は、(一社)日本非破壊検査協会に設置されている「表層透気性試験方法研究委員会」において実施した実験結果の一部をまとめたものである。研究委員会の関係各位にはここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 今本啓一：コンクリートの表層透気性試験方法の現状と課題，コンクリート工学，Vol.53, No.7, pp.606-613, 2015.7
- 2) 山崎順二，今本啓一，湯浅昇，下澤和幸：実大コンクリート壁におけるダブルチャンバー法を用いた表層透気性の評価に関する共通試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.1, pp.2013-2018, 2016.7
- 3) RILEM TC116-PCD, Recommendation of TC116-PCD, Tests for gas permeability of concrete. B. Measurement of gas permeability of concrete by RILEM-CEMBUREAU method, Mater. & Struct, Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- 4) 野中英・湯浅昇：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の提案，日本建築学会構造系論文集 第 79 巻第 700 号, pp.689-696, 2014 年 6 月
- 5) 前田 真人：10 万倍以上の流量範囲を微調節可能にした正三角形のスパイラル溝構造，日本工業出版「配管技術」Vol.51(日工 No.2009.1.08.50), (2009)
- 6) Roberto Torrent, Frank Jacobs : Swiss Standard SIA 262: 2003, A step towards performance-based specifications for durability, Concrete in Aggressive Aqueous Environments, Performance, Testing and Modeling, pp.532-539, Toulouse, France, 2009.6.