

1. 各種透気性試験における測定時間間隔および透気領域に関する検討

Study on the Interval of Measurement Time and the Air Permeability Area in Various Permeability Tests

山崎 順二^{*1}

加藤 猛^{*2}

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、測定ごと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直後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 10～15 分程度以上とすれば良いことが分かった。

キーワード：透気性、ダブルチャンバー法、シングルチャンバー法、測定時間間隔、内部圧力

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。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を同一箇所を繰り返して行う場合、測定ごとの時間間隔が透気性の試験値に及ぼす影響や、透気試験における表層コンクリートの透気領域については、現時点ではあまり明確にされていない。

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を連続して測定した場合もしくは時間間隔を変えて測定した場合に、透気性の測定値に与える影響について、供試体内部の圧力を計測することによって検討した。併せて、供試体内部の圧力変化から、透気性試験における透気領域についても検討した。

2. 測定時間間隔が透気性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

透気性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測定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物

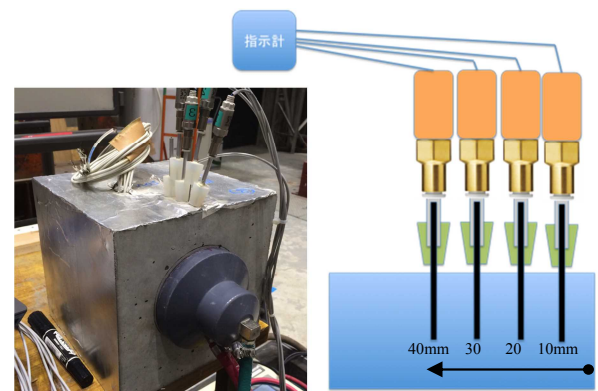


図-1 内部圧力の計測状況と圧力計設置イメージ

^{*1} 技術研究所 兼 大阪本店建築部品質管理室 ^{*2} 東京本店建築部

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²⁾のそれと近い形態となる。透気係数 $kT(\times 10^{-16} \text{m}^2)$ 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 $L(\text{mm})$ 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。

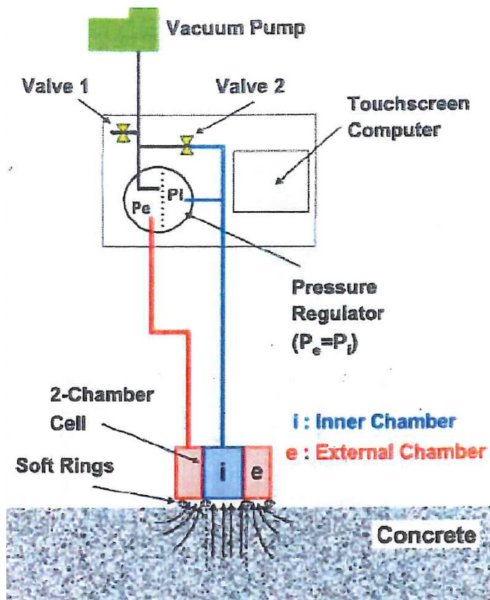


図-2 ダブルチャンバー法のレイアウト

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

$$L \approx 1000 \left\{ \frac{2kTP_a t_f}{\epsilon \mu} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

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 ($=2.0 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$)



写真-1 シングルチャンバー (内径 $\phi 5\text{cm}$)

ϵ : かぶりコンクリートの空隙量 ($=0.15 \text{m}^3/\text{m}^3$)

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 ($=60\text{s}$)

L : 試験により影響を受けた概略深さ (mm)

(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 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($\phi 10\text{cm}$ および $\phi 5\text{cm}$)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($\phi 10\text{cm}$ ・ $\phi 5\text{cm}$)とも、表層コンクリートにチャンバーを装着した状態のままで 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。

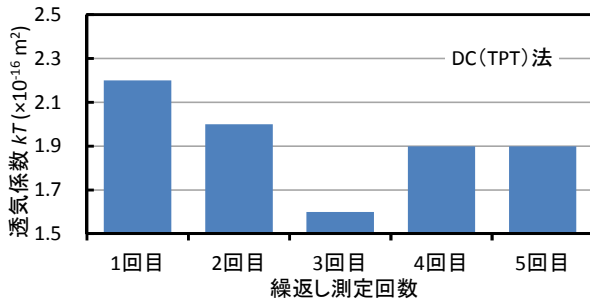


図-3 DC(TPT)法での連続測定時の透気係数

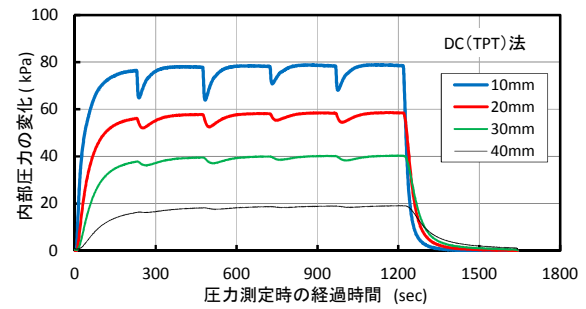


図-6 DC(TPT)法での連続測定時の内部圧力

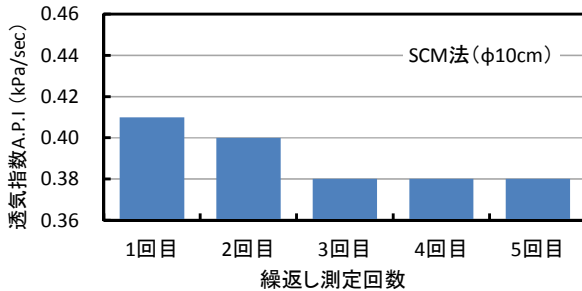


図-4 SCM法(φ10cm)での連続測定時の透気指数

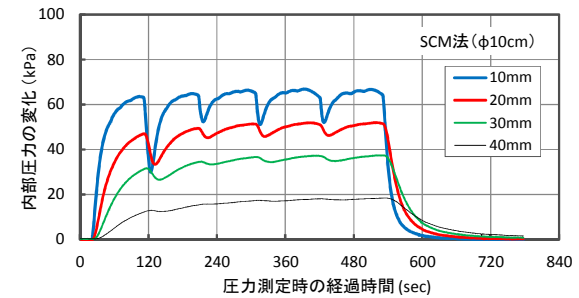


図-7 SCM法(φ10cm)での連続測定時の内部圧力

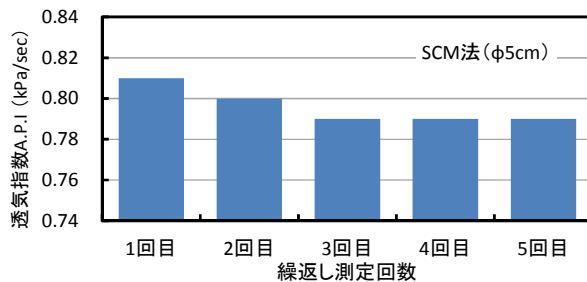


図-5 SCM法(φ5cm)での連続測定時の透気指数

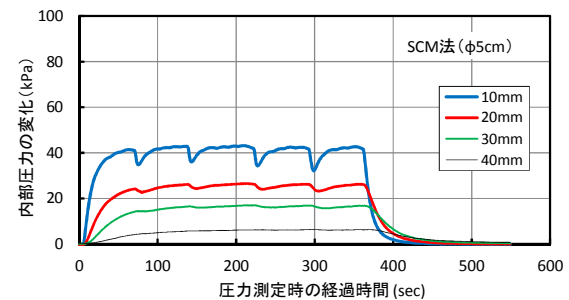


図-8 SCM法(φ5cm)での連続測定時の内部圧力

図-3～図-5に、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。

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法ではチャンバーの内径が大きい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(φ10cm)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(φ5cm)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。これらのことから、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

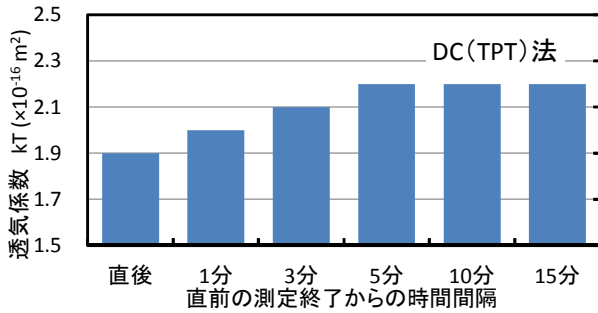


図-9 測定時間間隔と透気係数 DC(TPT)法

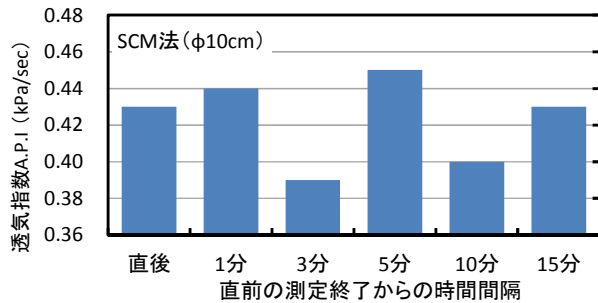


図-10 測定時間間隔と透気指数 SCM法 (φ10cm)

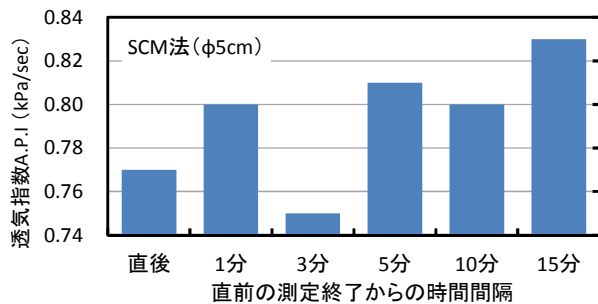


図-11 測定時間間隔と透気指数 SCM法 (φ5cm)

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、連続測定に供したものと同一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(φ10cm・φ5cm)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。

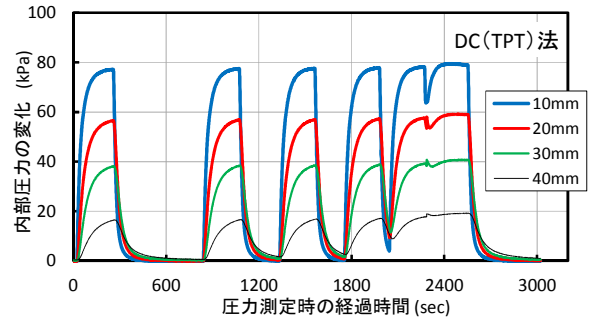


図-12 測定時間間隔と内部圧力 DC(TPT)法

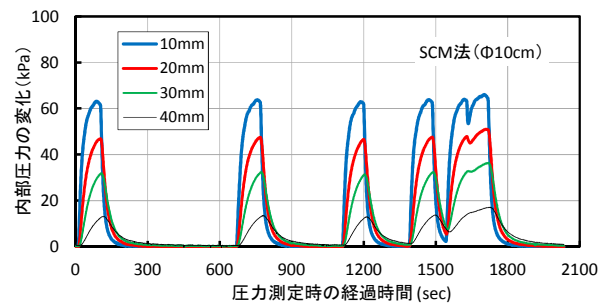


図-13 測定時間間隔と内部圧力 SCM法 (φ10cm)

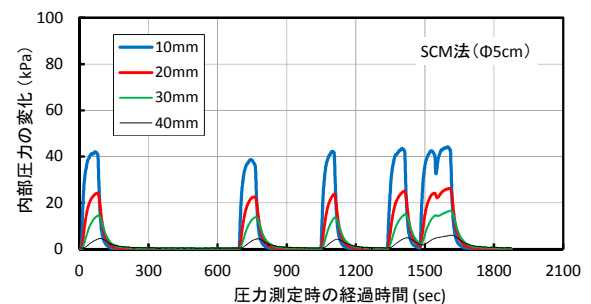


図-14 測定時間間隔と内部圧力 SCM法 (φ5cm)

DC(TPT)法による透気係数 kT および SCM法(φ10cm および φ5cm)による透気指数 A.P.I.の時間間隔ごとの測定結果を図-9～図-11に示す。またこれらの透気性の測定と併せて、コンクリート内部の圧力を測定した結果を図-12～図-14に示す。各図の最左の波形が測定時間間隔15分後の測定結果であり、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自体はそれぞれの試験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。

これらの測定結果から、コンクリートの内部圧力は、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

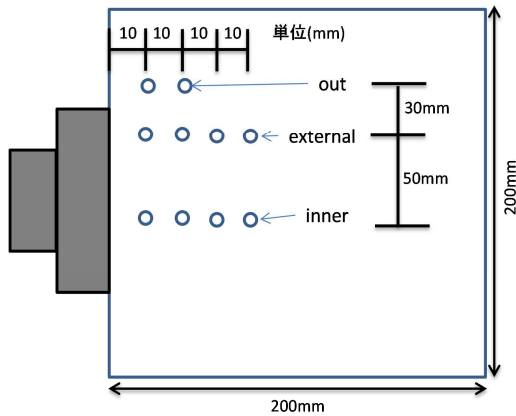


図-15 透気領域の検討に用いた供試体のイメージ

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。

以上のことから、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りやや差異が生じるものと推察されるが、概ね 10 分～15 分以上が適切であると考えられる。

3. 透気試験における透気領域の検討

3.1 供試体の概要

透気領域の検討に用いた供試体イメージを図-15に示す。供試体の寸法は一边が 200mm の立方体であり、図の左側の測定面(打込み側面)から、図中に○印で示す各位置に内径φ1mm 外径φ2mm のステンレスパイプを設置した。供試体には、表-1に示す水セメント比を 45%、55%、65% の 3 水準、単位水量を 172kg/m³ の一定とした AE 減水剤使用コンクリートを用いた。練り混ぜ後、5mm ふるいをを用いてウェットスクリーニングしたモルタルをそれぞれの供試体に打ち込んだ。打込み後、材齢 91 日まで封かん養生した。透気領域の検討は、ステンレスパイプの先端に圧力センサを取り付け、試験開始時からのコンクリートの内部圧力が大気圧に戻るまでの経時変化を、データロガーを用いて測定した。表-1に示した 3 種のコンクリートにおける DC(TPT)法による透気係数 kT と FIM 法による

表-1 供試体に使ったコンクリートの調合概要

No.	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G
			(kg/m ³)			
1	45	46.2	172	382	789	947
2	55	48.0	172	313	846	947
3	65	49.1	172	265	885	947

表-2 透気性試験の結果

W/C	W/C 45%	W/C 55%	W/C 65%
kT ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	0.40	1.90	0.87
P.V. (kPa/sec)	0.6	4.0	1.5

透気速度 P.V.¹⁾を参考として表-2に示す。供試体の透気性は、DC(TPT)法および FIM 法とも W/C55%の供試体が最も透気性が大きくなり、次いで W/C65%、W/C45%の順となった。

3.2 DC(TPT)法における透気領域の検討

DC(TPT)法による透気性試験時における、図-15に示した位置にチャンバーを設置した場合のコンクリート内部の圧力の経時変化を図-16に示す。図中の inner はダブルチャンバーの内部セルの位置の圧力を、external は外部セルの圧力の経時変化を示している。なお out はチ

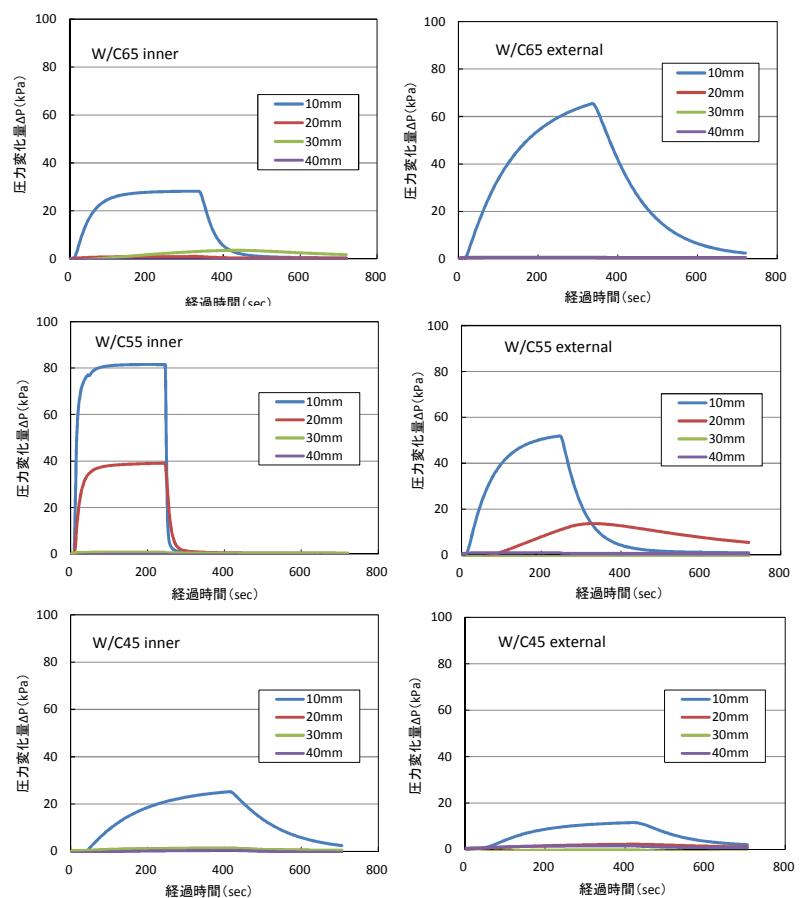


図-16 DC(TPT)法による供試体内部の圧力変化

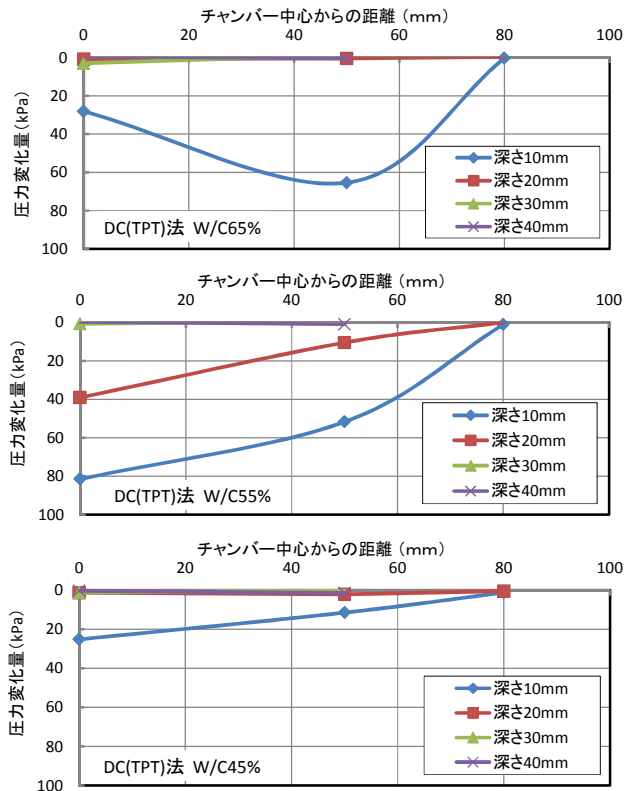


図-17 DC(TPT)法による圧力変化量

チャンバーの外の位置であり本実験では圧力変化が生じなかった。透気性が最も大きい W/C55%の供試体においては、内部セルおよび外部セルとも深さ 20mm の位置までの圧力変化が生じていることが分かる。

一方、透気性が W/C55%の供試体よりも低くなった W/C65%および W/C45%の供試体では、深さ 10mm までの圧力変化のみしか確認できなかった。図-17 に DC(TPT)法によるチャンバー中心からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量を示す。各図の原点の位置がチャンバーの中心位置であり、内部セルの圧力変化量を示しており、距離が 50mm の位置が外部セルの圧力変化量を二次元的に示している。図-16 にも示したように、W/C55%の供試体では内部セルおよび外部セルとも深さ 20mm の位置までの圧力変化が確認できた。また SCM 法においても DC(TPT)法と同様の傾向を示した。

3.3 SCM (φ10cm) 法における透気領域の検討

図-15 に示した供試体に φ10cm の SCM 法を適用した。DC(TPT)法と同じ位置にチャンバーを設置した場合のコンクリート内部の圧力の経時変化を図-18 に示す。SCM

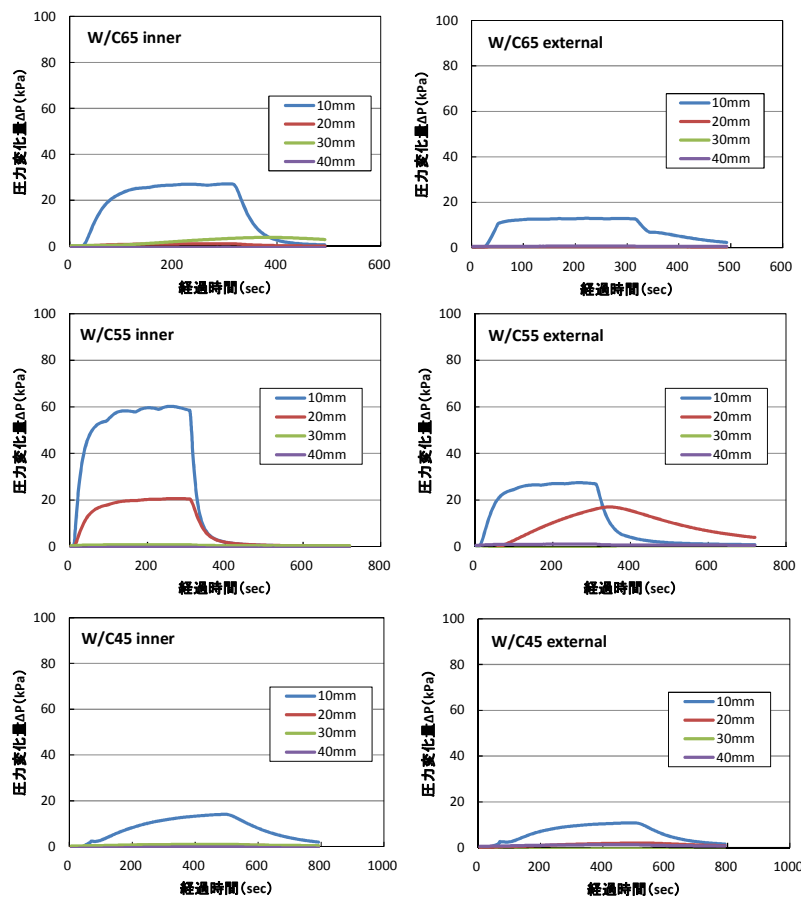


図-18 SCM 法による供試体内部の圧力変化

法において、inner はチャンバーの中心の位置の圧力を、external も同じチャンバー内の中心から 5cm の位置、out はチャンバーの外の位置の圧力となる。DC(TPT)法と同様の傾向であり、圧力変化の大きさは異なるものの深さ 20mm 程度までの圧力変化が認められた。図-19 に SCM(φ10cm)法におけるチャンバー中心からの距離とコンクリート表面からの深さ方向の圧力変化量をそれぞれ示す。特に W/C55%の供試体にみられるように、の圧力変化量はチャンバー中心部が最も大きく、外周部かつ深さ方向に徐々に小さくなっており、チャンバーがコンクリート表面に接する円に対して半球状に圧力変化が生

じていることが伺える。つまりこの領域が透気領域と考えられる。SCM 法では、表層コンクリートの密実さによって透気領域が異なり、透気係数 kT によって評価された供試体の透気性の大きさと、SCM 法による圧

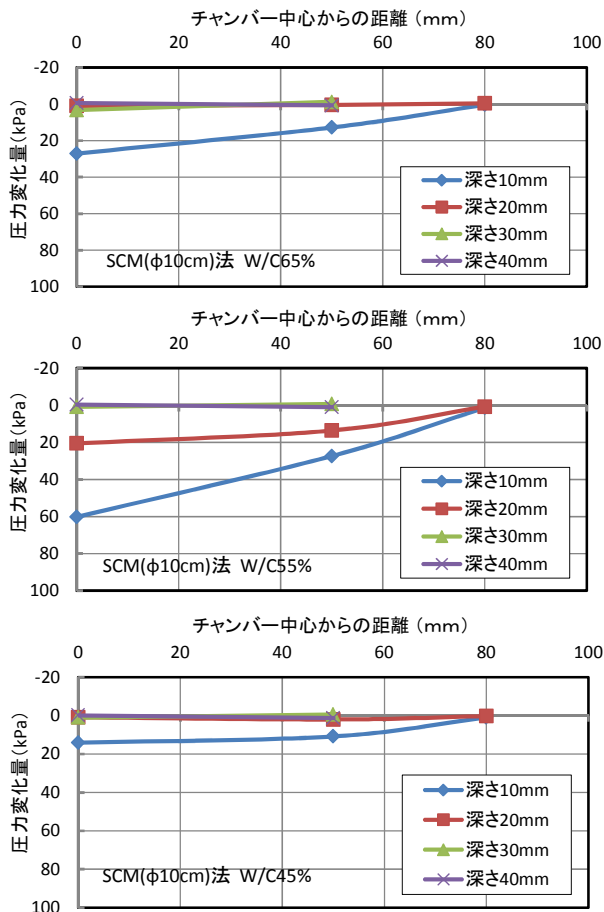


図-19 SCM 法による圧力変化量

力変化量との間に関連性がみられ、透気係数が大きいほど深い位置までの圧力変化が生じかつ圧力変化量も大きくなっている。

4. まとめ

透気性試験における測定時間間隔および透気領域に関する検討した結果、以下のことが分かった。

- (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を繰り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、測定ごとの時間間隔を 10～15 分程度以上とすれば良い。
- (2) DC(TPT)法では、表層コンクリートの表面から深さ 20mm 程度までの領域の透気性を評価している。
- (3) SCM 法の試験時の圧力変化の関係から、透気係数の大きさと圧力変化量には関連性がみられ、透気性が高くなるほど、表層コンクリートの深い位置までの領域の透気性を評価している。

今後、各種の透気性試験の結果を併せて検討を加え、各種の透気性試験方法の規格化、更には、表層透気性による RC 構造物の仕上材が施された部位での構造体コンクリートの耐久性評価手法の確立を目指したい。

【謝辞】

本論文は、(一社)日本非破壊検査協会に設置された「表層透気性試験方法研究委員会」において実施した試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) RILEM TC116-PCD, Recommendation of TC 116-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