

論文 シリンダーを用いた簡易透気試験の検討および検定器による測定精度の評価

小谷 健太*1・渡辺 健*2・面矢 建次郎*3・関川 昌之*4

要旨：著者らは、シリンダーを用いた簡易透気試験を提案しているが、測定時にパテやシール材を用いるため測定の際に手間が生じていた。そこで今回は、アルミ製のアタッチメントを用いた簡易透気試験機を作製し、コンクリート試験体に対して測定した。その結果、パテを用いた手法と同様に配合間の緻密性の差異を評価出来た。また、透気量を一定に調整できる検定器に対して各種簡易透気試験を実施した結果、十分な測定精度を有することが確認出来た。また、検定器のバルブ開放値と流入空気容積の関係は市販のダブルチャンバー法の透気係数と類似した傾向が得られ、簡易透気試験による評価の有用性を示した。

キーワード：表層透気性、簡易透気試験、シングルチャンバー法、流入空気容積、検定器

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性と密接な関係にあるかぶりコンクリートの品質を確保する重要性が認識されている。具体的には、かぶりコンクリートの品質、特に物質移動抵抗性を評価することによって構造物の劣化リスクの評価や将来予測につながるとされている。そのため、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性を評価する手法として、近年様々な非破壊試験方法の開発やそれらの活用が進められている。

物質移動抵抗性を評価する指標の一つである表層透気性は、透気試験によって評価される。現場で適用可能である透気試験方法としてダブルチャンバー法(以下、Torrent 法と称す)が挙げられている¹⁾。また、著者らは以前から電源装置が不要なシリンダーを試験装置とした簡易透気試験を提案している^{2),3),4)}。

既往の研究では、簡易透気試験により養生条件(気中養生および水中養生)や水セメント比(45%, 55%, 65%)を変化させたコンクリート試験体を対象に実験的な測定を行った。その結果、コンクリートの配合条件の相違に伴う透気性の差異を相対的に評価することが可能であった^{3),4)}。また、簡易透気試験と Torrent 法との間には高い相関性が確認された。しかし、既往の簡易透気試験では測定を行う前後にシール材や配管パテを用いることが手間になることが問題であった。そこで、本研究では測定手順を省力化するためにシール材や配管パテを使用しないアルミ製でアタッチメント式の試験装置にシリンダーを装着させた簡易透気試験機(以下、Attachment 法と称す)を新たに作製し、従来の簡易透気試験および Torrent 法に対して比較検討を行った。また、各種簡易透気試験における

シリンダー内部の圧力を測定し、どの程度の負圧で空気を吸引しているか確認した。さらに各種簡易透気試験の測定精度および限界を評価するために検定器に対して繰返し測定を実施し、測定値の再現性の確認を行うことで測定精度を評価した。また、Torrent 法でも同様の試験を行い比較することで各種簡易透気試験の有用性を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリートの配合および使用材料を表-1、表-2にそれぞれ示す。配合は単位水量を一定とし、水セメント比を45%、55%、65%と変化させた3水準とした。また、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ に設定した。

(2) 試験体の形状

コンクリート試験体の寸法は、測定面の縦横方向に $200 \times 200\text{mm}$ 、深さ方向に 100mm の角柱試験体を用いた。また、測定面は打設時の型枠側面側の1面を対象とした。

(3) 養生条件

コンクリート試験体は、打設後 20°C の恒温室内に24時間静置させた後に脱型し養生を行った。この際、室内では一定の湿度管理は行っていない。また、養生条件は気中養生と水中養生の2水準とした。養生方法を以下に示す。気中養生は脱型後から所定の期間同室内に静置させ、養生を行った。また、水中養生は 20°C の水中で7日間養生を行った後に、同室内で所定の期間静置させた。今回用いた試験体は材齢が2年を経過している。それぞれの試験体は測定を行う前後で同様の環境下に静置させた。

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*4 (株)マルイ R&Dセンター 主任研究員 (正会員)

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)		SL (cm)	Air (%)
			W	C	S	G1	G2	Ad1	Ad2		
45	41		389	687			0.8	0.004	15.0	4.8	
55	43	20	318	745	395	592	0.7	0.005	12.0	3.6	
65	44		269	785			0.3	0.004	10.0	3.0	

表-2 使用材料

材料名：記号	物性など
普通ポルトランドセメント：C	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3340cm ² /g
阿波市産砕砂：S	表乾密度：2.57g/cm ³ FM:2.63 吸水率：1.77% 実積率：66.6%
鳴門市産5号砕石：G1	表乾密度：2.57g/cm ³ FM:7.08 吸水率：1.62% 実積率：57.6%
鳴門市産6号砕石：G2	表乾密度：2.57g/cm ³ FM:6.37 吸水率：1.60% 実積率：55.4%
水：W	上水道水
AE減水剤：Ad1	リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
AE剤：Ad2	アルキルエーテル系



パテ法用シリンダー 断面の様子

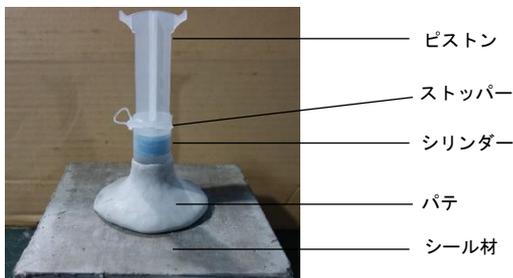


写真-1 試験装置および測定の様子

2.2 試験方法

(1) 従来の簡易透気試験(以下、パテ法と称す)

写真-1 に示すようにシリンダーの先端を切断したものを試験装置とし、測定の際には内径および容量が異なる2種類のシリンダーを使用した。具体的には内径30mmで容量40mlのものと、内径40mmで容量70mlのものをを用いた。測定対象は、各コンクリート試験体表面の1面とした。また、測定箇所は試験体表面の同一中心位置とし、パテ法を用い3回連続で測定した。試験手順を以下に示す。

まず、アセトンを染み込ませた綿で試験体表面の汚れや塵を拭き取った後、測定箇所周辺を除いた測定面の全面にシール材(ラテックス樹脂)をヘラで薄く引き伸ばしながら塗布した。そしてシール材が乾燥固化した後に、



写真-2 attachment 法用シリンダー形状、シリコンスリーブおよび測定の様子

エアコンの室外機用配管パテで試験装置の先端を被覆し、測定箇所密着させた。この際、既往の研究²⁾を参考にパテの半径は5.0cmとした。次に、シリンダーのピストンを引いた後にストッパーで固定させ、300秒経過後に固定を解除することでシリンダー内を復圧させた。そして、シリンダー先端からピストン先端までの距離をノギスで小数点以下2桁まで読み取った。本研究ではノギスで読み取った値に、シリンダーの断面積を乗じた値を流入空気容積と称し、透気性を評価する指標とした。また、測定を行う前に簡易的な漏気のチェックとして透気性の無いガラス板に対して測定を行い、ピストンが初期の位置まで下がることを確認してから測定を行った。

(2) Attachment 法

試験装置を写真-2 に示す。試験装置は外径φ100mmのシリコンスリーブ、アルミ製のアタッチメント、シリンダー、真空用ウレタンチューブで構成されている。Attachment 法は配管パテおよびシール材を取り付ける作業やノギスでシリンダーの目盛を計測する作業を簡略化した試験方法となっている。また、アルミ製の部品をシリコンスリーブに装着させることでφ30mmやφ40mmの透気径を調整可能とした。さらに使用したシリンダーは容量50mlのものと容量100mlのものをを用いた。測定

対象は、各コンクリート試験体表面の1面とした。また、測定箇所は試験体表面の同一中心位置とし、Attachment法を用い3回連続で測定した。測定手順を以下に示す。

まず、アセトンを染み込ませた綿で試験体表面の汚れや塵を拭き取った。そして、アルミ製のアタッチメントにシリコンスリーブを装着させ両面テープを用いて測定箇所に着させた。次に、真空用ウレタンチューブでシリンダーとアルミ製のアタッチメントを接続させた。そして、シリンダーのピストンを引きストッパーで固定させ、シリンダー内部に負圧を発生させた。この際を測定開始時間とし、300秒経過後にストッパーを解除し復圧させた。シリンダー内部に流入した空気量をシリンダーの目盛から0.5ml単位で目視により値を読み取った。読み取った値を前述で示したパテ法と同様に流入空気容積と称し、コンクリートの透気性を評価する指標とした。

(3) Torrent 法

本試験方法の妥当性を確認するためにTorrent法と比較検討した。測定対象は、各コンクリート試験体表面の1面とした。また、測定箇所は試験体表面の同一中心位置とし、Torrent法を用い3回連続で測定した。さらに、それぞれ算出された測定値に対して幾何平均したものを透気係数として導き出した。Torrent法での測定は、内部と外部チャンバー内を減圧し、減圧開始60秒以降の内部チャンバー直下からの栓流によるチャンバー内の圧力変化量と経過時間を測定し、式(1)により透気係数 $kT(\times 10^{-16} \text{m}^2)$ を算出した^{2),3)}。

$$kT = 4 \left(\frac{V_c(dp/dt)}{A(p_a^2 - p_i^2)} \right) \frac{\eta p_i}{\varepsilon} \int_{t_0}^t \left[1 - \left(\frac{p_i}{p_a} \right)^2 \right] dt \quad (1)$$

ここに V_c は内部チャンバーと接続要素(ホース等)の容積(m^3)、 ε はコンクリートの空隙量: $0.15(\text{m}^3/\text{m}^3)$ 、 p_a は大気圧(N/m^2)、 p_i は内部チャンバーの圧力(N/m^2)、 A は栓流の断面積(m^2)、 η は気体の粘性(Ns/m^2)をそれぞれ示す。

(4) 表面含水率の測定

コンクリート試験体に対して各種透気試験を行う直前に高周波容量式のもルタル・コンクリート水分計を用いて試験体の表面含水率を測定した。具体的には試験体の測定面を3等分(左, 中心, 右)し、それぞれの測定箇所です算出した値を算術平均することによって、その試験体の表面含水率を導き出した。今回の試験で使用した各試験体を対象に測定した結果、コンクリートの表面含水率は3.5~4.4%の範囲であった。透気試験において配合間における透気性の違いを確認するためには測定対象の表面含水率が低い方が望ましいとされている⁵⁾。また、既往の研究よりコンクリートの表面含水率が6%程度かそれを下回る場合には配合間における透気性の違いが明確になることが確認されている⁴⁾。そのため、今回の測定で用いた各試験体の表面含水率ではコンクリートの透

気性に与える影響は小さいものと考えられる。

(5) 各種簡易透気試験の圧力の計測

各種簡易透気試験を透気性の無いガラス板に対して実施し、それぞれの試験で使用したシリンダーの内部圧力を圧力センサで計測した。計測方法はガラス板に対して各種簡易透気試験を実施する際に、シリンダーのピストンを引きストッパーで固定した際を計測時間0秒とした。また、計測時間300秒経過後までの圧力の経時変化を圧力センサにより計測した。写真-3に測定時の様子を示す。圧力センサのシリンダーへの装着箇所はシリンダー底部に2.4mmの口径を加工し、加工部分に圧力センサを取り付けた。次に電源装置に圧力センサとデータロガーを取り付け、シリンダー内部における圧力の経時変化を測定した。



写真-3 圧力計測の様子

(6) 各種透気試験の測定精度の検討

検定器を写真-4に示す。検定器は精密バルブ、アクリル板で構成される。使用した精密バルブは空気流量とバルブ開放値に一定の線形性があり、空気流量の適用範囲はバルブ開放値0.00~24.00(0.1-1000ml/min)のものである⁶⁾。バルブ開放値を増加させる毎に、検定器から漏れ出す空気の流量が増加し、漏れ出す空気量とバルブ開放値の間には一定の線形性が確認されている。また、検定器に対する各種透気試験での測定は、検定器のバルブ開放値を2.00から10.00まで順次増加させ、検定器から漏れ出す空気の流量を制御し、それぞれ試験を実施した。さらに、各バルブ開放値で3回連続して測定を行うことで、各種透気試験装置の測定精度の確認を行った。今回実施した各種透気試験は、パテ法およびAttachment法、Torrent法の3種類の透気試験で測定を行った。



写真-4 検定器の概要と測定の様子

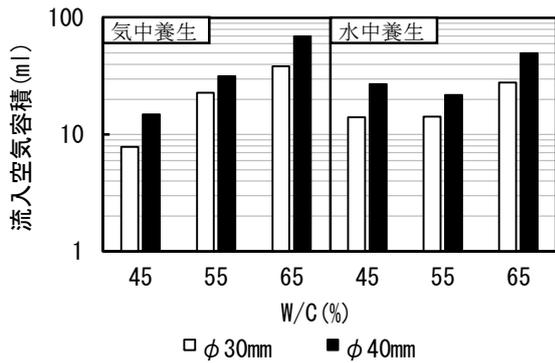


図-1 パテ法 φ30mm・シリンダー容量 40ml
φ40mm・シリンダー容量 70ml

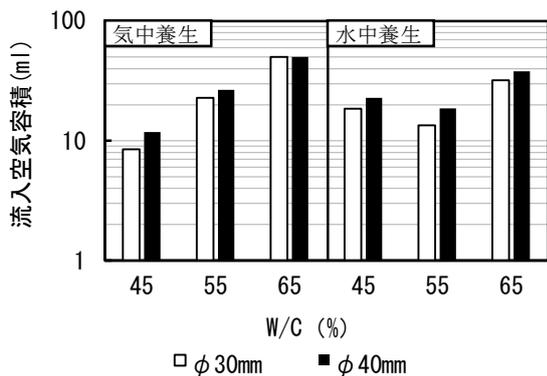


図-2 Attachment法 シリンダー容量 50ml

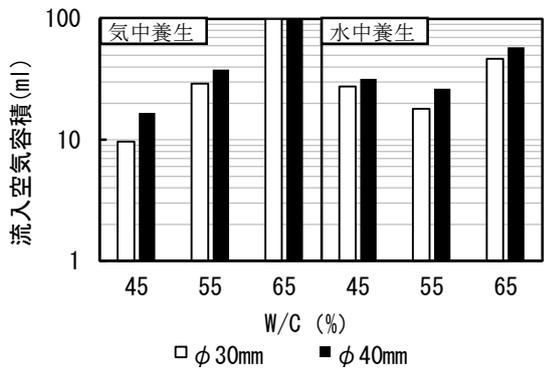


図-3 Attachment法 シリンダー容量 100ml

3. 実験結果および考察

3.1 配合および養生条件と流入空気容積の関係

コンクリート試験体に対するパテ法(シリンダー径 30mm)での測定結果を図-1に、Attachment法(シリンダー容量 50ml および 100ml)での測定結果を図-2 および 図-3 に示す。また、Torrent法での測定結果を図-4 に示す。加えて、各透気試験の3回計測間の変動係数を図-5 に示す。

それぞれの測定結果からコンクリート配合間のW/Cに着目すると、パテ法およびAttachment法さらにTorrent法ではW/Cが増加する毎に流入空気容積および透気係数が増加する傾向が確認出来た。しかし、図-4内に示したW/C65%(気中養生)の試験体についてはTorrent法による影響深さが試験体厚さを大幅に超えていたため測定不能となった。そのため、図内には示していない。また、コ

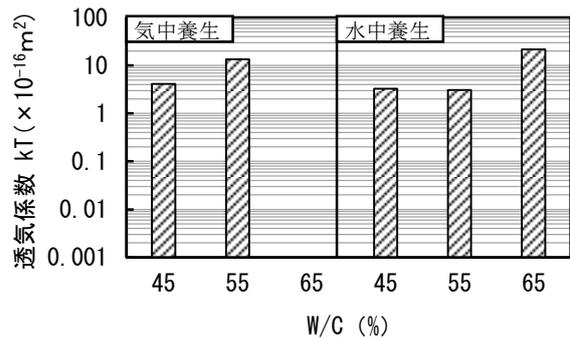


図-4 Torrent法

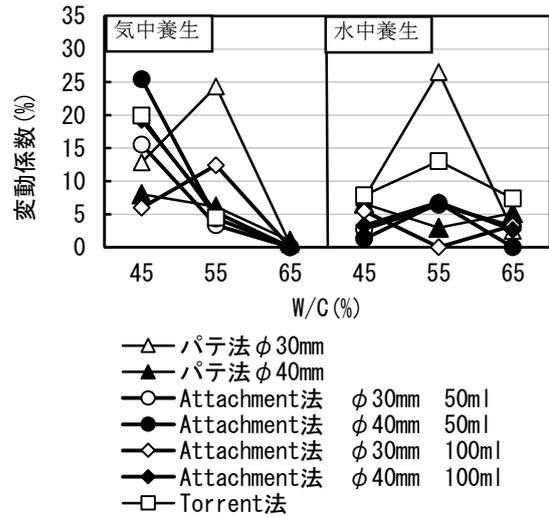


図-5 各種透気試験の変動係数

ンクリート試験体の養生条件に着目すると、気中養生を施した試験体に比べ、水中養生を施した試験体の方が流入空気容積および透気係数が低くなる傾向が確認出来た。これは、水中養生を実施したことによってセメントの水和反応が促進されコンクリートが緻密化したからであると考えられる。また、全測定結果で水中養生を施した試験体でW/C45%とW/C55%の透気性の関係が逆転(Torrent法では同等)している理由は明確ではないが、W/Cが低いと自己収縮が大きくなるため微細ひび割れが生じやすくなることや水中養生によりCa溶脱が促進され、表層部の脆弱化が進んだ可能性などが考えられる。また変動係数は、どの試験でも30%以下を示した。気中養生を施したW/C65%の試験体の変動係数が極端に低くなったのは、最も粗なコンクリートであったため、どの簡易透気試験方法でもシリンダー容量と同等の流入空気容積が得られたためであると考えられる。

3.2 圧力計測結果および検定器による測定精度の評価

ガラス板に対して、パテ法(シリンダー口径φ30mmとφ40mmのもの)およびAttachment法(シリンダー容量50mlと100mlのもの)で測定を行った際の圧力の経時変化を図-6に示す。結果より、パテ法のシリンダー口径φ30mmおよびφ40mmでは圧力が95kPa程度となった。一方、Attachment法におけるシリンダー容量50mlでは、

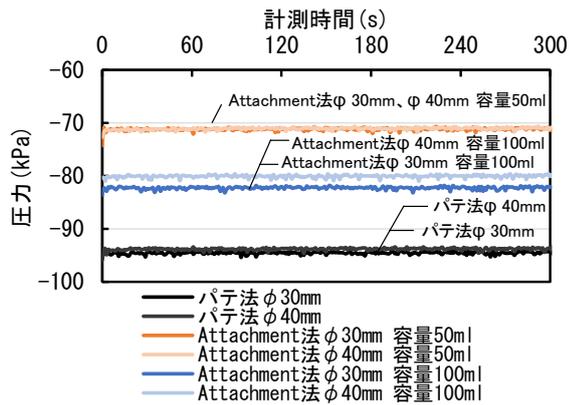


図-6 圧力計測結果

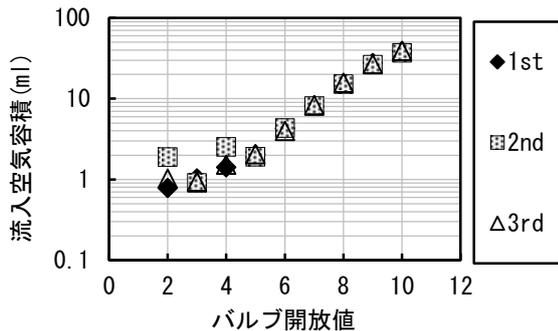


図-7 パテ法 ϕ 30mm シリンダー容量 40ml

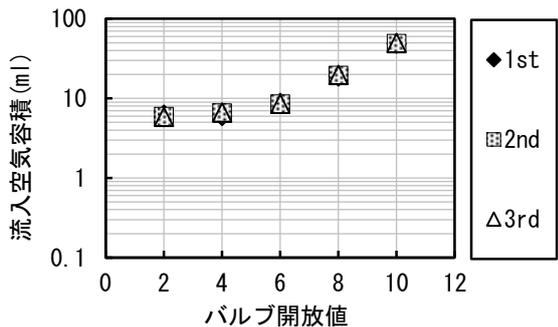


図-8 パテ法 ϕ 40mm シリンダー容量 70ml

シリコンスリーブの透気径の形状 (ϕ 30mm および ϕ 40mm) に関係なく圧力が -70kPa 程度となった。また、シリンダー容量 100ml を用いた場合には圧力が -80kPa 程度を示した。パテ法と比較して Attachment 法におけるシリンダー内部の圧力の絶対値が小さくなる要因としては、試験装置に装着されたチューブ内に存在する空気量が寄与していると考えている。また、各種簡易透気試験での圧力は経時変化が生じていないことから、パテやアタッチメントおよびシリンダーからシリンダー内部に流入する空気はほぼ無いものであると考察される。

図-7 および図-8 には、検定器を測定対象にパテ法 (シリンダー口径 ϕ 30mm と ϕ 40mm のもの) によって、繰返し測定を行った結果を示す。結果より、同一の各バルブ開放値のばらつきは図-7 に示した低バルブ開放値 (2~4) を除いて小さくなっていることが確認出来た。したがって、パテ法における測定値の再現性すなわち測定精度は低バルブ開放値 (2~4) を除いて十分なものであると考えられる。一方、 ϕ 30mm シリンダーによって検定器

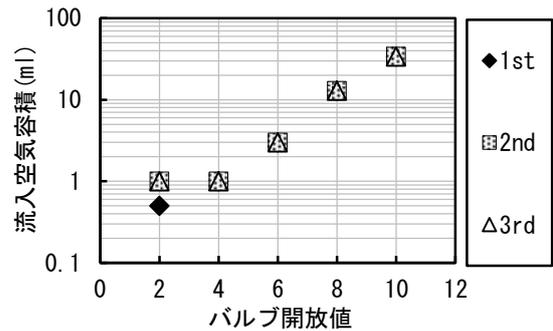


図-9 Attachment 法 ϕ 30mm シリンダー容量 50ml

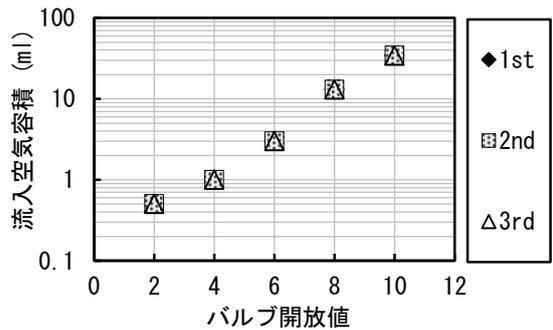


図-10 Attachment 法 ϕ 40mm シリンダー容量 50ml

の低バルブ開放値でばらつきが見られた要因は、低バルブ開放値 (2~4) では空気流入量が非常に小さいことが挙げられる。また、パテを装着させたシリンダーを測定面から取り外す際に、ピストンが若干動いたためであると考察される。

バルブ開放値と流入空気容積の関係に着目すると、 ϕ 30mm シリンダーによって算出された流入空気容積とバルブ開放値の間には一定の線形性を有することが確認出来た。しかし、 ϕ 40mm シリンダーでの流入空気容積とバルブ開放値の間には、低バルブ開放値 (2~4) において横ばい傾向を示していることから、一定の線形性を有することを確認できなかった。これは、 ϕ 40mm シリンダーのピストン先端の形状が微小ながら突出しているため、ピストンが完全に下がった状態であったとしても 5ml 程度空気が流入してしまうことが一要因として考えられる。

Attachment 法で検定器に対して繰返し測定を行った結果を図-9、図-10、図-11、図-12 に示す。シリンダー容量 50ml を用いた測定結果を図-9 および図-10 (順に透気径 ϕ 30mm, ϕ 40mm) に示し、シリンダー容量 100ml を用いた測定結果を図-11 および図-12 (順に透気径 ϕ 30mm, ϕ 40mm) に示す。上記に示した全ての結果より、同一の各バルブ開放値におけるばらつきは全体的に小さくなる傾向が確認出来た。そのため、Attachment 法では測定値の再現性すなわち十分な測定精度を有することが確認出来た。また、流入空気容積とバルブ開放値の間には一定の線形性がみられた。低バルブ開放値 (2~4) でのばらつきが小さくなった要因としては、パテ法では測定面から試験装置を取り外し、ノギスにて 0.01ml 単位の値

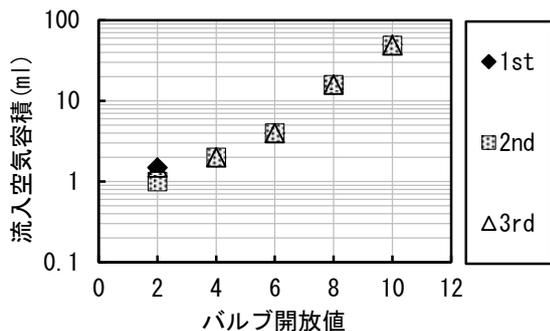


図-11 Attachment 法 φ30mm シリンダー容量 100ml

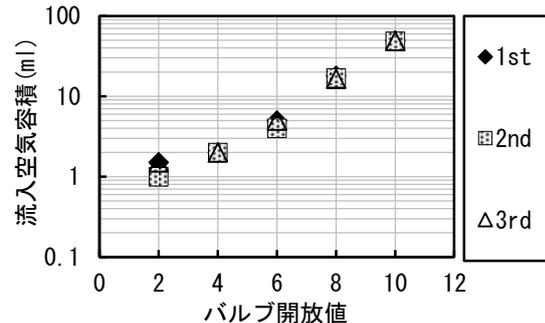


図-12 Attachment 法 φ40mm シリンダー容量 100ml

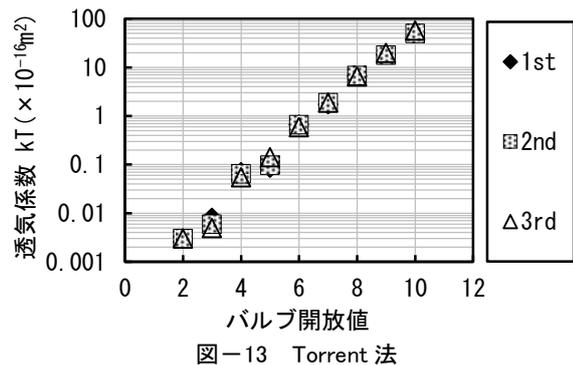


図-13 Torrent 法

を計測できるのに対して、Attachment 法では目視でシリンダーの目盛を 0.5ml 単位で読み取ることができるためであると考えられる。

透気径に着目すると透気径 φ30mm および φ40mm では、ほぼ同様の傾向を示した。一方、シリンダー容量に着目すると、シリンダー容量を増大したシリンダーの方が同一のバルブ開放値において微量ながら流入空気容積は大きくなった。これは、図-6 よりシリンダー容量を増大させることによってシリンダー内部の負圧が大きくなったことが影響していると考えられる。

Torrent 法で検定器に対して繰返し測定を行った結果を図-13 に示す。結果より同一の各バルブ開放値のばらつきは全体的に小さく、透気係数と各バルブ開放値の間には一定の線形性が確認された。

以上のことより、パテ法に関しては低バルブ開放値間において測定値がばらつき、相対的な測定値の差異の評価が困難であることが確認された。しかし Attachment 法は低バルブ開放値間の測定値のばらつきは小さく、相対的な測定値の差異の評価が可能であることが確認された。

また、バルブ開放値と Attachment 法での流入空気容積の間には一定の線形性が確認され、Torrent 法での透気係数との間にも類似した線形性が確認された。このことより、Attachment 法での流入空気容積で Torrent 法と同様にコンクリート表層の品質評価が可能であるといえる。

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) Attachment 法を用いてコンクリート試験体に対し、測定を実施した結果、パテ法および Torrent 法での測定結果と同様の傾向が得られた。
- (2) 各種透気試験で使用したシリンダー内部の負圧を測定した結果、シリンダー容量を増大させることにより大きな負圧を発生させることが可能であった。また、透気性の無いガラス板に対して、一定時間ほぼ同一の圧力変化を示したことからシリンダー内部に外部から侵入する空気量はほぼ無いものと考えられる。
- (3) Torrent 法では検定器のバルブ開放値で 2~10 まで定量化出来ている。Attachment 法でも同様に 2~10 までの差異を評価出来ており、実用的な透気試験としての有用性が明らかになった。

謝辞

本研究を行うにあたり日本非破壊検査協会「表層透気性試験方法研究委員会」の協力および、株式会社 八洋コンサルタントの田中氏から検定器を貸与して頂いた。ここに付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 今本啓一ほか：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.44, No.2, pp.31-38, 2006.2
- 2) 渡辺健ほか：シリンダーへの空気流入を利用した簡易透気試験に関する検討，第 15 回コンクリート構造物の補修，アップグレードシンポジウム，pp319-324, 2015.10
- 3) 面矢建次郎ほか：各種シリンダーを用いた簡易透気試験による表層透気性の評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp1975-1980, 2017
- 4) 三宅純平ほか：各種要因がシリンダーを用いた簡易透気試験に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38, No.1, pp1995-2000, 2016
- 5) 温品達也ほか：表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, 2012
- 6) 山崎順二ほか：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp1921-1926, 2017