

論文 シリンダー法の内部圧力計測による表層透気性評価手法の検討

渡辺 健*1・安井 直樹*2・寺井 正実*3・橋本 親典*4

要旨：コンクリートの表層透気試験としてシリンダー法についての検討を進めている。今回、測定時の内部の負圧を測定するために、無線接続にてパソコンと連携できる電池駆動式の圧力計を適用し、シリンダー内部の圧力を簡易に記録できる試験装置を構築した。その装置を用いて、W/C および養生条件を変更した供試体ならびに建設後 15～17 年経過した実構造物での測定を実施した。その結果、内部圧力の時間変化を示す透気速度と、空気流入量には高い相関があることが明らかとなった。また、透気速度の指標を用いることにより、現在 60 秒の測定時間であるシリンダー法による試験をさらに短縮できる可能性を示した。

キーワード：表層透気, 透気試験, シリンダー法, 透気速度, 内部圧力

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性にはコンクリートの表層付近の品質および物質移動抵抗性が重要であり、それらを原位置で評価できる手法の 1 つに表層透気試験がある。表層透気試験については国内外で研究が盛んであり、2020 年には日本非破壊検査協会により規格化が行われた¹⁾。また、試験方法の考慮すべきポイントや内容についてまとめたガイドラインが 2023 年に発刊された²⁾。

本研究室では、外部電源が不要で簡便な試験方法としてシリンダー法と名付けた試験方法について研究を進めている。本手法は、コンクリート表面に設置したシリンダー内部を負圧にして、一定時間経過後のシリンダー内部の空気流入量により評価を行うものである³⁾。既往の検討により、60 秒の測定時間で簡易に表層透気性の相对比较ができることを示した⁴⁾。また、過去にシリンダー内部の圧力測定についても実験的な検討を行っている⁵⁾。この際は、圧力センサ、アンプ、A/D 変換器、パソコンが有線接続することや外部電源を必要とするため、シリンダー法の簡便かつ現場での取り扱いやすさを損なっていた。

そこで今回、無線接続にてパソコンと連携できる電池駆動式の圧力計を適用し、測定装置の有線接続による接続の煩わしさならびに外部電源を必要とする欠点を解消し、測定装置の現場での機動性を改善することにした。また、内部圧力変化から算出される透気速度の有用性についての検討を実験室で作製した供試体に対して行った。また、実構造物レベルの試験体についても検討を行い、圧力測定による評価方法の検討ならびに従来の空気流入量との比較検討を行った。

2. 試験装置と透気速度

2.1 試験装置および圧力計について

シリンダー法は、シリコン製ガスケット(外径 100mm, 内径 40mm)、アタッチメントおよびシリンダーをセットした試験装置(写真-1)を試験面に押し当て、ピストンを引いてシリンダー内を負圧にした後、60 秒が経過した際にストッパーを解除し、復圧により流入する空気量(空気流入量と称する)をシリンダー目盛により読み取る方法である。

シリンダー法での測定時の内部の負圧を測定するために、市販の圧力計を用いて、無線で直接内部圧力をパソコンにて記録できる装置を構築した。圧力計は、電池駆動で作動し、無線にてパソコンと接続ができるものを使用した。圧力計の測定レンジは-100~100kPa であり、測定間隔を 1 秒ごとに測定を行った。圧力計の設置に際しては、アタッチメント部に圧力用の穴を設け、こちらに取り付け用のアダプタを介して圧力計を装着する様にし



写真-1 シリンダー法の試験装置

*1 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 研究教授 博(工) (正会員)

*2 (株) マルイ 大阪営業所

*3 ショーボンド建設 (株)

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)



写真-2 アタッチメントの加工および
圧力計の設置の様子

た。取り付け後の様子を写真-2に示す。

2.2 透気速度

圧力計で測定した試験装置の内部圧力の時系列データの一例を図-1に示す。試験は、2.1に示したように、試験装置を試験対象表面に設置した後にピストンを引いて内部を負圧にする。今回の圧力測定は、負圧をかけるのと同時に測定をスタートして測定を行っている。測定開始直後の負圧については、表層の品質によって若干異なるが、供試体レベルでの測定においては約85~90kPaを示した。初期の負圧力は時間の経過とともにコンクリート表面から流入する空気によって低下していく。

今回、圧力の時間変化の様子を表す指標として、初期負圧 P_1 (kPa) から一定時間経過後の圧力 P_2 (kPa) の変化 (ΔP) を測定時間 T (s) で除したものを透気速度 K_c (kPa/s) とし、式(1)により求めた。

$$K_c = \frac{P_2 - P_1}{T} \quad (1)$$

この透気速度 K_c は、シリンダー内部の負圧が復圧する過程での圧力変化の速度となる。今回の検討では、測定開始から10秒間もしくは30秒間での透気速度を求めた。

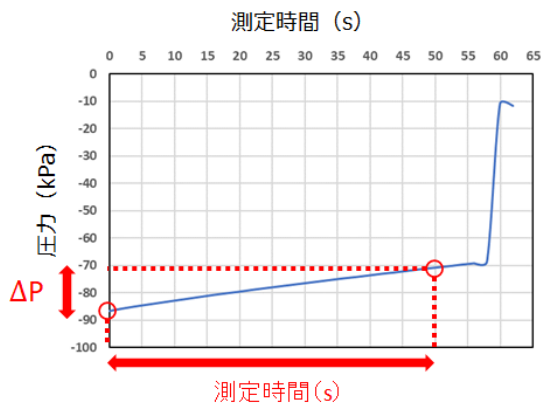


図-1 試験装置内部の圧力変化の一例

3. 供試体での検討

3.1 供試体概要

1辺200mmの立方体の供試体をW/Cを40%、50%、60%、70%の4水準で作製した。コンクリートの配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。供試体は脱型後20℃の水中で28日養生した水中養生と、脱型後空气中に20℃の恒温室に静置した空中養生を施した。供試体は、底面とその反対面以外の側面はエポキシ樹脂を塗布し側面からの空気流入を防いだ。

コンクリート供試体は、打設後の材齢が2年以上経過しており、測定前に水に24時間以上浸漬し、その後室内

表-1 配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							Air (%)
		W	C	S	G1	G2	Ad(C×%)		
							AE	AEA	
40	44.5	175	438	734	366	549	0.001	0.9	6
50	46.8	175	350	805	366	549	0.001	0.8	5.7
60	48.2	175	292	852	366	549	0.001	0.8	5.4
70	49.2	175	250	886	366	549	0.001	1	5.6

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
阿波市産砕砂：S	表乾密度：2.57 g/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：2.57 g/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：2.57 g/cm ³ FM:6.37 吸水率：1.60% 実積率：55.4%
水：W	上水道
AE剤：AE	アルキルエーテル系
AE減水剤：AEA	リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体

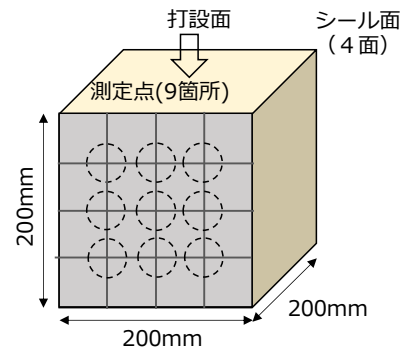


図-2 供試体と測定面

で気中乾燥をさせながらシリンダー法にて測定時間 60 秒として空気流入量を測定した。

図-2 に供試体と試験実施箇所の概要図を示す。測定は、コンクリート供試体表面の 9 箇所とし、シリンダー法による空気流入量と圧力の測定を行った。また、乾燥がある程度進んだ状態の同時期に、シリンダー法による 60 秒の測定と同時に圧力測定を実施した。その際の含水率の最小値は W/C70%の気中養生供試体で 3.9%，最大の値は W/C40%の水中養生供試体で 4.9%であった。コンクリートの含水率については、高周波静電容量式の水分析計を使って測定を行った。

3.2 実験結果および考察

シリンダー法で得られた空気流入量と表面含水率の関係を図-3 に示す。シリンダー法では、空気流入量が多いほど、コンクリート表面からシリンダー内に多くの空気が吸引されたことを示しており、コンクリート表層の緻密性が低いことを示している。図より、W/C40%の供試体では、同じ表面含水率の他の供試体と比べて空気流入量が低く、表層の緻密性が相対的に高い結果となった。また、W/C40%では、気中養生と水中養生の差異が明確には現れなかった。これは、単位セメント量が多い配合となっていること、および乾燥の進行が遅く表面含水率が今回の試験の範囲では 4.5%程度までしか進んでいないためだと考えられる。W/C ごとの違いに着目すると、W/C が大きくなるにつれて、乾燥の進行とともに空気流入量が大きくなっている。また、W/C が大きいほど、気中養生と水中養生との空気流入量の差が大きくなっており、W/C が大きいほど養生の効果が大きくなることがシリンダー法で評価できたと考えられる。

次に式(1)より求めた 10 秒後および 30 秒後の透気速度

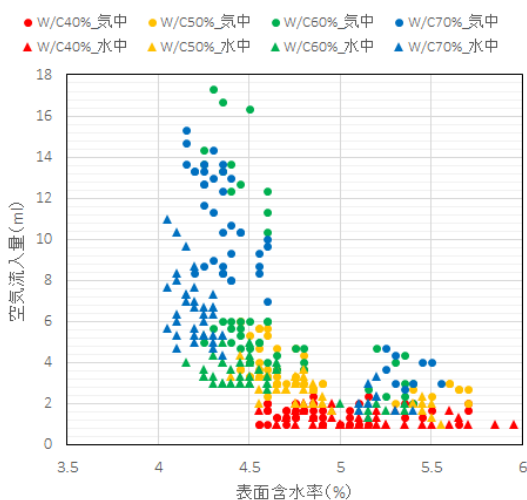


図-3 空気流入量と表面含水率の関係

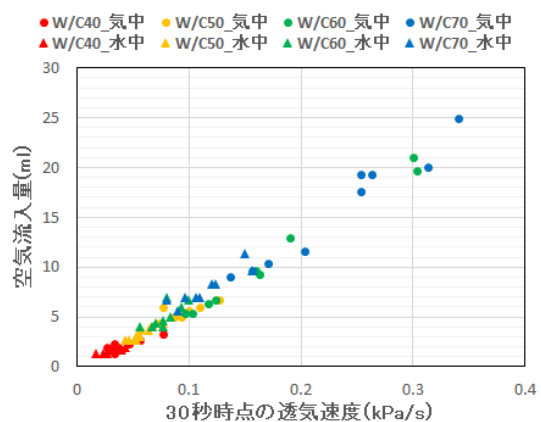
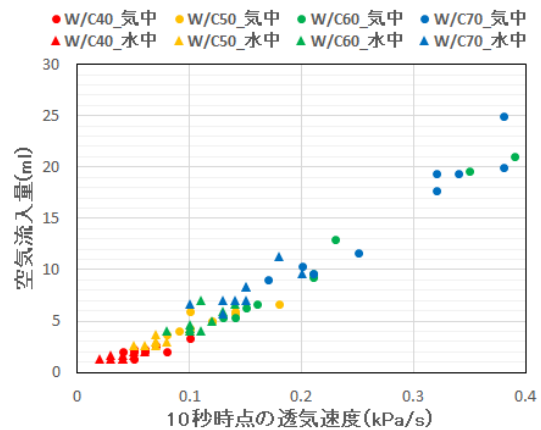


図-4 空気流入量と透気速度の関係

と空気流入量の関係を図-4 に示す。図より W/C が小さいほど、透気速度が遅いことが分かる。同一の W/C の供試体の養生の違いに着目すると、気中養生の透気速度が水中養生の供試体に比べて速くなる傾向があることが、10 秒時点および 30 秒時点での透気速度の両方で確認することができた。これにより、透気速度により W/C および養生条件による表層透気性の差を評価できることが明らかとなった。

また、空気流入量と透気速度の関係に着目すると、各 W/C や養生条件の違いにかかわらず、60 秒間に得られたシリンダー法の空気流入量と、10 秒時点および 30 秒時点の圧力測定より得られた透気速度には良好な線形関係があることが明らかとなった。

以上のことより、これまでのシリンダー法では、主に 60 秒での空気流入量で表層の緻密性を評価しているが、内部圧力の測定および透気速度の算出により、10 秒や 30 秒の短時間でコンクリート表層の緻密性を評価できる可能性があるといえる。

4. 実構造物での検討

4.1 構造物の諸元と測定項目

シリンダー法の試験を実施した実構造物の概要を表-3に示す。実施実大 RC 構造体は、レディーミクストコンクリートを用いている。実大 RC 構造体は呼び強度 27（以下、RC27 と称する）および 33（以下、RC33 と称する）の 2 種類であり、測定対象の壁は約 3000×3400mm、厚さ 200mm となっている。建設後のコンクリートの材齢は 15～17 年が経過している。

表-3 実構造物の概要

名称	実大 RC 構造体	
配合	27-18-20-N	33-18-20-N
製作年	2004 年	2007 年
写真		

シリンダー法による空気流入量および内部圧力の測定を、RC27 では A～H の 7 か所で 2 回、RC33 では 1～6 の 6 か所でそれぞれ 2 回行った。測定箇所は RC27 および RC33 のいずれにおいても、測定する高さの範囲を GL+600～1800mm として測定を行った。併せて高周波静電容量式のコンクリート含水率計による測定を行った。また、表層透気試験の有用性を確認するために、ダブルチャンバー法による測定を行い比較した。

4.2 実験結果および考察

透気試験の結果には含水率が大きく影響するが、今回の実構造物での測定では、含水率の範囲が 3.5～4.0%程度であった。これは、試験を屋内壁で実施したため、雨掛かりもほとんどなく、大きな含水率の違いが生じなかったと考えられる。ここでは、今回の含水率の差は、透気試験に与える影響は小さいものとして考察を進める。

シリンダー法によって得られた空気流入量とダブルチャンバーで得られた透気係数の比較を図-5に示す。図中の棒グラフがシリンダー法による空気流入量を、折れ線グラフがダブルチャンバー法による透気係数を示している。図より、空気流入量が大きい測定箇所では、透気係数も大きな値を示しており、空気流入量により表層透気性を評価できていることを確認した。

次に、空気流入量と透気係数の関係およびそれらを指数関数で近似したグラフを図-6に示す。図および近似直線の決定係数より、シリンダー法による空気流入量とダブルチャンバー法による透気係数の相関性があるといえる。これと同様の結果は、既往の研究でも得られており⁶⁾、今回試験を実施した実構造物でも空気流入量と透気係数の相関性が確認された。

RC27 および RC33 のシリンダー法による内部圧力の測定結果から算出した透気速度を図-7 および図-8 にそれぞれ示す。空気流入量と透気速度の関係に着目すると、RC27 および RC33 のいずれにおいても、60 秒間に得られたシリンダー法の空気流入量と、10 秒時点および 30 秒時点の圧力測定より得られた透気速度には良好な線形関係があることが明らかとなった。図-4 と比較すると W/C40～70%の供試体で得られた値よりも空気流入量は大きく、透気速度は早くなっている。一方で、線形

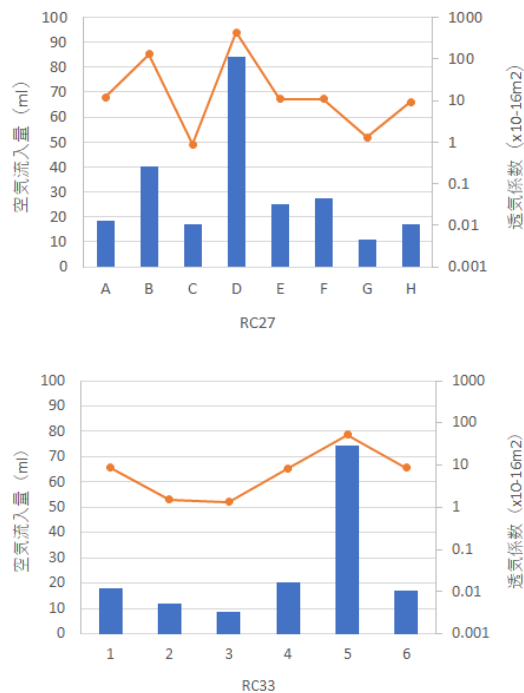


図-5 空気流入量と透気係数の比較

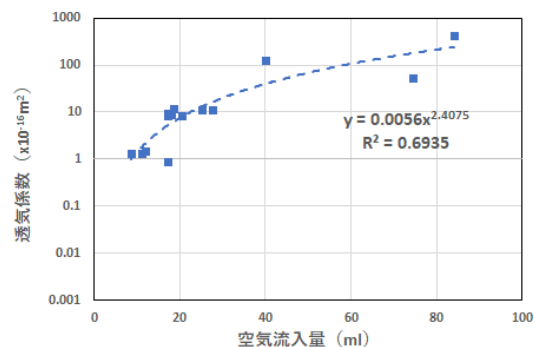


図-6 空気流入量と透気係数の関係

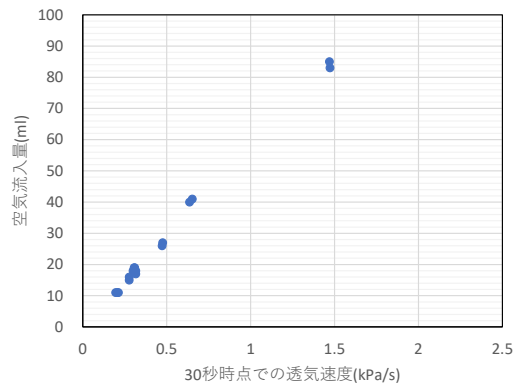
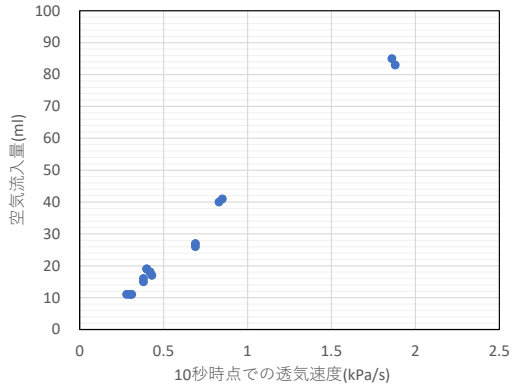


図-7 RC27 での空気流入量と透気速度の関係

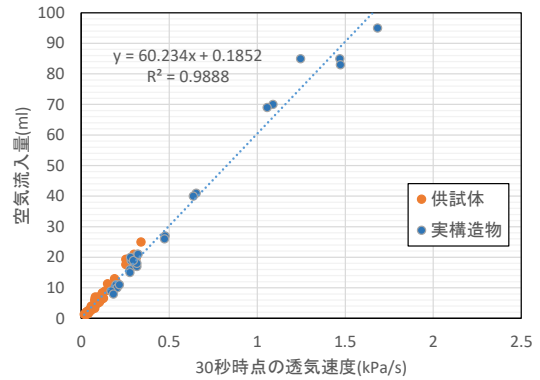
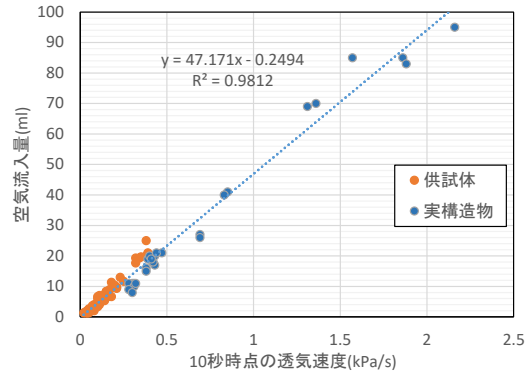


図-9 供試体+実構造物での空気流入量と透気速度の関係

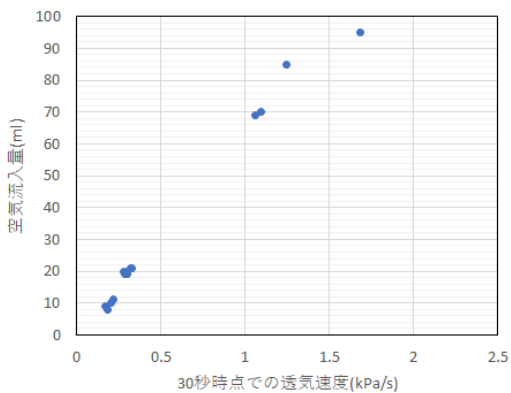
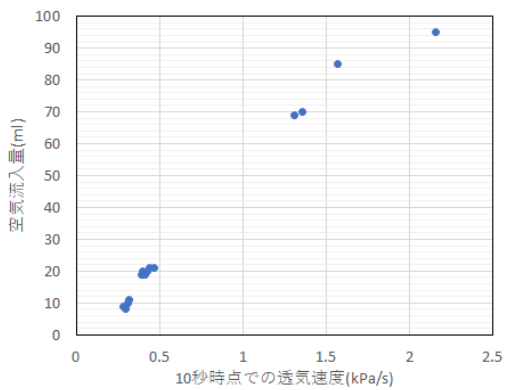


図-8 RC33 での空気流入量と透気速度の関係

関係が得られるのは同様であり、建築後 15~17 年経過した実構造物においてもその関係性が確認できた。

図-4 と図-8 で同様の傾向が得られたことを受けて、

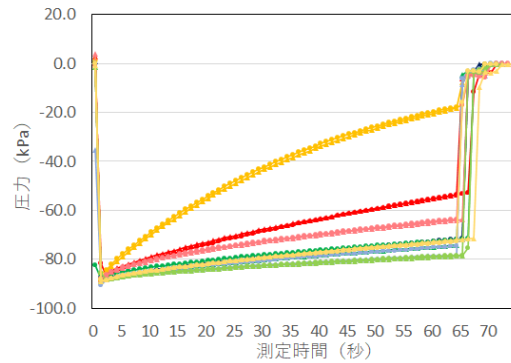


図-10 RC27 での圧力測定結果

供試体および実構造物での測定をプロットし、線形近似したグラフを図-9 に示す。図より、実構造物での透気速度および空気流入量は、供試体と一部重なりつつも広い範囲を示していた。供試体と実構造物で異なるコンクリートであるため直接比較することは難しいが、材齢や環境状態および部材寸法の違いなどによる影響と考えられる。次に、図中の近似直線の決定係数 R^2 に着目すると、空気流入量と 10 秒時点および 30 秒時点での透気速度には高い相関があるといえる。それぞれの近似直線の傾きに着目すると、10 秒時点での透気速度のほうがその傾きが小さいことが分かる。

この原因を考えるために図-10にRC27での圧力測定結果を示す。この図は、内部圧力の変化を示しており、測定時間に対して負圧が保たれているものは緻密であり、測定時間に対して負圧の変化が大きいものはコンクリート表層が緻密でなく疎な状態であるといえる。また、内部圧力は、測定開始から徐々に低下するが、その低下傾向は完全な直線ではない。図-10に示すように、表層の緻密性が低く、負圧の変化が大きい箇所の圧力変化のグラフで、直線にならず曲線となる傾向が顕著である。これは、シリンダー内部の負圧は空気の流入により徐々に低下し、コンクリート内部の空気を吸い上げる負圧が減少していくためである。

今回の研究では、透気速度を式(1)より求めており、内部圧力の時間変化が直線ではないため、10秒時点と30秒時点での透気速度の傾向は完全には一致しないが、シリンダー法で60秒間の空気流入量で評価している現在と比べて、更に短い時間でコンクリートの表層透気性の測定をできたといえる。

今後は、更なるデータの蓄積を進めることにより、シリンダー法および内部圧力計測による評価方法について検討を進め、物質移動抵抗性の定量的な評価や耐久性指標との結び付けられるように研究を進める予定である。

5. まとめ

以下に得られた知見をまとめる。

- (1) シリンダー法に無線でパソコンと接続可能な圧力計を組み込み、シリンダー内部の圧力を測定する測定装置を構築した。
- (2) 内部圧力の時間変化を示す透気速度の指標を提案した。10秒時点および30秒時点での透気速度と、60秒間で得られる空気流入量には高い相関があることを供試体ならびに実構造物での試験をより示すことができた。
- (3) 透気速度の指標を用いることにより、現在60秒の

測定時間であるシリンダー法による表層透気性の試験を、さらに短い時間で実施できることが明らかとなった。

謝辞

実構造物での検討については、(一社)日本非破壊検査協会「表層透気性試験方法研究委員会」および「コンクリートの含水率に関する試験方法研究委員会」における共通試験の一部として実施をしたものである。各委員会の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊試験—表層透気試験方法—第1部～第5部，2020.
- 2) 日本非破壊検査協会：コンクリート部材の表層透気性評価のためのガイドライン，2023.
- 3) 渡辺 健，山口喜堂，廣本達也，橋本親典，石丸啓輔：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，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.15，319-324，2015.
- 4) 岸 悠樹，渡辺 健，関川昌之，小谷健太：シリンダーを用いた簡易透気試験によるコンクリート表層透気性のスクリーニング手法に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，1672-1677，2020.
- 5) 面矢建次郎，渡辺 健，関川昌之，橋本親典：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.1，1975-1980，2017.
- 6) 渡辺 健，岸 悠樹，関川 昌之，橋本 親典：シリンダーを用いた簡易透気試験による実大壁試験体の表層透気性の評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.21，468-471，2021.