吸引鐘を用いたコンクリートの簡易透気試験法に関する基礎的検討と スケーリング抵抗性評価への適用の試み

EXAMINATION OF RAPID AIR PERMEABILITY TEST WHICH USED VACUUM CHAMBER AND APPLICABILITY TO SCALING EVALUATION FOR CONCRETE

権代由範*, 月永洋一**, 阿波 稔***, 迫井裕樹****

*Yoshinori GONDAI, Yoichi TSUKINAGA, Minoru ABA
and Yuki SAKOI*

Rapid air permeability test using vacuum chamber was examined in testing conditions and the validity as the evaluation method of scaling resistance. The testing condition of rapid air permeability test was decided based on the outcome of an experiment. For the rapid air permeability test, the sealing width of 60mm was secured around the chamber and a distance of 150 mm was secured from the specimen edge to the center of the chamber. These test conditions reduced the coefficient of variation to 15% in the air permeability test. Rapid air permeability factor was found to be in good compatibility with Torrent air permeability factor. Also, this factor was found to be compatible with the amount of scaling by the ASTM C672 method. As a result, the usefulness of the rapid air permeability test method was proven.

Keywords : Concrete, Surface layer, Rapid air permeability test, Vacuum chamber, In-situ test, Scaling resistance

コンクリート, 表層部, 簡易透気試験, 吸引鐘, 現位置試験, スケーリング抵抗性

1. はじめに

コンクリート表層部は、水、CO²、塩化物イオン等の劣化外力に対して鉄筋を保護するという機能を有し、その品質の良否は構造物の耐久性を大きく左右する。実構造物コンクリートを対象とした場合、これら劣化外力の侵入・拡散の程度は、コンクリート組織の緻密性を間接的に表す透過性¹⁾から評価することが可能であり、コンクリート表層部の透過性を現位置で簡便に測定できる簡易試験法は、構造物の耐久性照査や維持管理において有用な情報の提供を可能とする。一方、コンクリートの凍害における劣化外力は、水の侵入と凍結融解の繰返ししが支配的であり、この劣化外力を作用させる試験として凍結融解試験(JIS A 1148)が広く用いられている。この試験法は、供試体の相対動弾性係数と質量減少率を評価指標としているが、これらの指標はコンクリート自体の耐凍害性を相対的に比較するものであり、実構造物コンクリートの耐凍害性を直接的に評価したり予測したりするものではない。このことから、実構造物コンクリートに適用可能な耐凍害性試験や評価指標の提案が求められている。ここで劣化外力としての水に着目すると、凍害は本質的に水の侵入がなければ生じないことから、コンクリートへの水の侵入の程度を指標とすることにより、耐凍害性を評価できるものと考えられる。

著者らは以上の観点から、コンクリート表層部の透過性に着目し、この透過性を指標とした耐凍害性評価手法、特に、スケーリング抵

抗性評価手法の確立を目的に、実構造物コンクリートに適用可能な Figg 法²⁾を応用した簡易透気試験や簡易吸水試験³⁾⁴⁾、独自開発した簡易透水試験⁵⁾⁸⁾について検討してきた。しかし、これらの方法はコンクリート表層に直径 10mm・深さ 30mm の削孔を設ける方法であり、試験の簡易性という点で課題を残していた。このことから、本研究では、純非破壊試験として実構造物に適用可能な、吸引鐘を設ける簡易型の透気試験法について検討を行っている⁹⁾。

2. 本研究の範囲と位置付け

実構造物を対象とした透気性試験に関する研究は古くから行われており、これらの成果は氏家によって 1994 年当時に紹介され¹⁰⁾、近年の現状については今本らにより報告されている¹¹⁾。多くの提案がなされている透気試験法であるが、試験方法の特性から、Figg 法に代表される削孔法とコンクリート表面に装置を設置する表面法に大別され、さらに表面法についてはシングルチャンバー法とダブルチャンバー法に分類される。本研究では純非破壊という観点から表面法に着目し、特に、吸引鐘を用いたシングルチャンバー法に関する検討を進めている。この Schönlin ら¹²⁾によって開発されたシングルチャンバー法は、試験時間や測定作業の簡易性に優れる反面、ブリーディングや表面仕上げ、早期脱型等によって形成される表層脆弱層が試験結果に大きな誤差をもたらす可能性のあることが報告さ

* 仙台高等専門学校建築デザイン学科 助教・博士(工学)

** 八戸工業大学工学部土木建築工学科 教授・博士(工学)

*** 八戸工業大学工学部土木建築工学科
准教授・博士(工学)

**** 八戸工業大学工学部土木建築工学科 講師・博士(工学)

Assistant Prof., Department of Architectural Design, National College of Technology, Dr. Eng.

Prof., Department of Civil Engineering and Architecture, Hachinohe Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Hachinohe Institute of Technology, Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Hachinohe Institute of Technology, Dr. Eng.

れている¹³⁾。国内においても、Schönlin ら¹²⁾の方法と同様の方法が、福島ら¹⁴⁾や今本ら¹⁵⁾により提案されている。吸引鐘を用いた透気試験に関しては、近年、今本らが気密性や含水率の影響評価といった観点から、試験室および実大壁レベルにおける試験法の適用性について検討を加えているが^{15),16)}、実際に実構造物へ適用する際に考慮しなければならない測定対象部材の寸法や測定位置などの適用条件に関する情報はまだ少ないように思われる。さらに、透気試験全般が抱える問題である含水率の影響を排除するためには、対象となる測定位置の含水率を任意に調整することは容易でないため、含水率の影響を予め定量的に把握した上で評価に反映させるか、或いは、適切な測定を可能とする適用条件(適用部材の寸法や測定位置の違いによる影響等)を明確に示す必要があるものと思われる。

一方、本研究において透気性からその抵抗性を評価しようとするスケーリングは、凍害による劣化形態の一種であり水分や塩化物の侵入・拡散により著しく促進されることが知られている¹⁷⁾。このスケーリングの抑制策については多くの研究がなされているが、透水型枠工法の適用¹⁸⁾や浸透性吸水防止剤の塗布¹⁹⁾に代表される表層組織の緻密化が有効であるとの報告がある。このことから、純非破壊試験の透気性試験によりコンクリートの緻密性を評価し、実構造物のスケーリング抵抗性の評価が可能となれば、耐久性照査や維持管理の観点から、有用な情報を提供することが可能となる。

本研究で提案する透気試験法は、原理的には Schönlin ら¹²⁾、福島ら¹⁴⁾、今本ら¹⁵⁾の試験法と同様の方法であるが、計測圧力範囲を限定せず、吸引鐘内が真空状態から大気圧に戻るまでの経時的な圧力変化を包括的に把握し、独自に設定した透気性指標値の算出方法を適用することで、より試験精度を向上させた試験法とすることを目的としている。ここで提案する方法を適用した場合、計測に時間を要するという課題が残されるが、本研究では、試験装置の作製や計測作業の容易さから本試験法を「簡易透気試験法」と定義する。

以上より本研究では、実験シリーズⅠとして、本研究で提案する透気性指標値の算定方法の妥当性を評価するとともに、実構造物への適用条件を明らかにするため、吸引鐘外周の試験面シール幅、吸引鐘設置位置と部材端部までの距離、コンクリート部材の厚さ、吸引鐘のサイズの違いが透気性試験の計測結果に及ぼす影響について、基礎的な検討を行った。また、適用実績に優れたトレント透気試験法²⁰⁾との相関性を評価することで簡易透気試験法の有用性について検討した。さらに、実験シリーズⅡとして、簡易透気試験法のスケーリング抵抗性評価手法としての適用の可能性を探るため、簡易透気試験により得られる透気性指標値と ASTM C672 法²¹⁾により得られるスケーリング量との相関性について、比較・検討を行った。

3. 本研究で実施した各透気試験方法の概要

3.1 簡易透気試験法⁹⁾

写真 1 に、本研究で作製した簡易透気試験装置と試験状況を示す。また、図 1 には透気試験装置各部の接続図を示す。本装置は、一般に市販される吸引鐘(材厚: 5mm, 内径: 100mm, 内容積: 1015cc, 材質: 硬質ガラス)、差圧計、デジタル・マルチメーター、真空ポンプ(排気速度: 5L/min)、耐圧ホース、パーソナルコンピュータにより構成される。本装置は、コストパフォーマンスに優れ、トレント透気試験装置(購入費)の 1/10 以下での製作が可能である。

写真 1 吸引鐘を用いた簡易透気試験装置と試験実施状況

図 1 簡易透気試験装置の接続図

コンクリートへの吸引鐘の設置材料は、気密性を十分に確保できること、着脱が容易で設置材料を取り除く際にも表面に損傷を与えないことの 2 点を満たすものとして、非硬化型のシリコンパテを選定した。このシリコンパテは、空調配管の間隙シール材として用いられるものであり、事前に行った予備実験から、エポキシ樹脂によるシールと同等の気密性を確保できることを確認している。

本装置を用いた簡易透気試験の測定手順を以下に示す。

- 1) 測定対象面をアセトン、エアコンプレッサーにより清浄な面とし、シリコンパテを用いて、空気漏れが生じないよう十分に配慮しながら、吸引鐘を測定対象面へ設置する。
- 2) 吸引鐘に接続した真空ポンプにより、吸引鐘内の圧力を大気圧との差が -97kPa となるまで減圧し、真空ポンプを停止させる。ここで、減圧に要する時間の違いが計測結果に及ぼす影響が懸念されるが、本実験での減圧時間は 25~30 秒の範囲に分布しており、調合等に起因する時間的な傾向は認められなかった。
- 3) -97kPa まで減圧した吸引鐘内の圧力が大気圧(測定開始時の圧力)に戻るまでの圧力変化時間と圧力変化量を、パーソナルコンピュータの自動計測プログラムにより計測する。なお、圧力変化量は、-97kPa を基点(0.00kPa)として記録する。

上記の測定により得られた吸引鐘内の圧力変化時間と変化量との関係から、簡易透気試験における透気性指標値を算出する。本試験法は、計測圧力範囲の拡大により計測に時間を要することとなったが、圧力変化時間および圧力変化量の自動計測化によって作業性は確保されており、また、後に述べるが、試験値の変動係数を小さくすることが可能であることを明らかにしている。

図 2 に、簡易透気試験における圧力変化時間と圧力変化量の計測結果の一例を示す。図 2 から、単位時間当たりの圧力変化量を求めることにより透気性指標値を得ることが可能であると考えられるが、両者は曲線関係にある。そこで、圧力変化時間を平方根として処理した場合の両者の関係を図 3 に示す。圧力変化時間を平方根とすることで、圧力変化量 25~60kPa の範囲(大気圧との差 -72~-37kPa に

図2 吸引室内の圧力変化時間と圧力変化量

図3 圧力変化時間の平方根と圧力変化量

図4 圧力変化量 25～60kPa の範囲における
圧力変化時間の平方根と圧力変化量

相当)において、両者の間に直線関係が認められる。図4は、上記の圧力範囲における両者の関係を抽出したものであるが、この範囲における両者の直線関係は極めて良好である。このことから、本研究では、圧力低下量 25～60kPa の範囲における圧力変化時間の平方根と圧力変化量の関係から求まる値を簡易透気係数 α とし、簡易透気試験における透気性指標値として扱うこととした。

簡易透気係数 α (kPa/sec^{1/2})は、式(1)により算出する。

$$\Delta P = \alpha \sqrt{T} \quad (1)$$

ここに、 ΔP ：圧力低下量 (kPa)、 T ：圧力低下時間 (Sec.)

3.2 今本らの透気試験法¹⁵⁾

今本らの方法は、著者らが検討している簡易透気試験法と原理的に大きな違いはないが、吸引鐘の設置方法や計測圧力範囲、透気性指標値の算出方法に相違点がある。

今本らが提案する試験方法の手順¹⁵⁾を以下に示す。

- 1) 試験位置において静電容量を測定する。
- 2) 2cm 幅のシリコンリング (内径 11.5cm) を酢酸ビニル樹脂により接着する。
- 3) シリコンリング上へ吸引鐘 (セパラブルカバー：内径 12.0cm) を装着する。
- 4) 吸引 (排気速度：20L/min) および 16.0～33.3kPa (大気圧との差に換算すると約-85kPa～-68kPa) の気圧変化に要する時間 T を測定し、透気指数 A.P.I. を式(2)により算出する。
- 5) 試験位置で静電容量を再度測定する。透気試験前後において含水率指示値に顕著な差がなければ、含水率の影響は無視する。

$$\text{A.P.I. (Air Permeability Index)} = \frac{33.3 - 16.0}{T} \quad (2)$$

ここに、 T ：33.3～16.0kPa における経過時間 (Sec.)

3.3 トレント透気試験法²⁰⁾

トレント透気試験は、図5に示すように、内部と外部に2つの室を持つチャンバーを用いるダブルチャンバー法に分類される。外部チャンバーと内部チャンバーの圧力バランスを等しく制御することにより、表層脆弱層を介して外部から内部チャンバーへ流入する空気流を物理的に排除し、内部チャンバー下において、室内試験と同様の一軸方向の透気経路を再現した方法である。透気性を評価するためのベンチマーク試験である RILEM-CEMBUREAU 法²²⁾とはほぼ一致する空気流を原位置試験で実現したとされる試験法である。

トレント透気係数 K_r (m²)は、チャンバー内部の圧力変化とその時間を測定することにより、理論式(3)によって算定される。

図5 トレント透気試験法の概要²⁰⁾

表1 コンクリートの調査

W/C (%)	Sl. (mm)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AWR ^{*1}
45	84	4.1	40.2	162	360	699	1181	2.12
55	81	4.2	42.3	160	291	761		1.72
65	72	4.1	43.4	160	246	797		1.45

*1 ARW: Air-entraining Water-Reducing agent.

$$K_r = 4 \left(\frac{V_c (dP_i / dt)}{A (P_a^2 - P_i^2)} \right)^2 \frac{\mu P_a}{\varepsilon} \int_{P_i}^{P_a} \left[1 - \left(\frac{P_i}{P_a} \right)^2 \right] dP_i \quad (3)$$

ここに、 V_c ：内部チャンバーと接続エレメント(ホース)の容積(m³)、 A ：内部チャンバー下で生じると仮定される一軸方向の空気流の断面積(m²)、 μ ：空気動粘度(Ns/m²)、 ε ：所与のコンクリート空隙量(m³/m³)、 P_i ：内部チャンバー内圧力(N/m²)、 P_a ：大気圧(N/m²)

4. 簡易透気試験法の基本特性と適用条件 (実験シリーズ I)

4.1 実験概要

(1) 使用材料および調査

使用材料として、普通ポルトランドセメント (密度：3.16g/cm³)、輝緑岩砕石 (Gmax：20mm、表乾密度：2.93g/cm³、実績率：57.0%)、石灰岩砕砂 (表乾密度：2.58g/cm³、F.M.：2.65) を使用した。練り混ぜ水は一般水道水とし、混和剤にはリグニンスルホン酸塩を主成分とする AE 減水剤を用いた。コンクリートの調査を表1に示す。水セメント比は 45%、55%および 65%の3水準とし、目標スランプおよび目標空気量は、それぞれ 80mm、4.5%とした。なお、実験シリーズ I では、供試体数が多く、大量のコンクリートを使用することから、レディーミクストコンクリートを用いることとした。

(2) 供試体作製および養生方法

表2に供試体寸法・数量および各検討項目における使用供試体を示す。供試体は全て円柱形状とし、その円形端部を簡易透気試験の測定対象面とした。コンクリートの透気性は、表層品質のばらつき

や欠陥の存在を敏感に反映するため、表面仕上げやブリーディングによる表層組織の不均質性による影響を考慮し、また、実構造物の一般的な壁面と対応するように、測定対象面となる円形端面は型枠に接する打設側面となるように作製した。図6に供試体の打設方法を示す。養生は材齢7日までの散水養生とし、養生終了後、材齢91日まで室内静置した。コンクリートの透気性は、測定対象面の含水状態に大きく影響されることが指摘されている⁷⁾。そこで、簡易透気試験の開始時期の決定にあたり、材齢14日以降、水セメント比毎に無作為に選定した3体の供試体を対象に、静電容量押し当て式水分計(計測可能範囲：水分率0～15%)を用いて表面水分率の測定を行った。図7に表面水分率の測定結果を示す。初期材齢では全般に高い値を示し、材齢の経過に伴い水分率は徐々に低下する傾向を示す。材齢70日以降、水分率の低下は緩慢となり4.0～4.5%の範囲

表2 供試体寸法・数量および各検計項目に対応する供試体(○印)

W/C (%)	寸法 (mm)		数量 (体)	測定条件に関する検計項目				トレント透気試験
	直径	厚さ		試験面シール幅	部材端からの距離	部材厚さ	吸引鐘サイズ	
45	300	100	6	—	—	○	—	○
		150	6	—	—	○	—	○
		200	6	—	—	○	—	○
		250	6	—	—	○	—	○
		300	6	○	—	○	○	○
55	300	100	6	—	—	○	—	○
		150	6	—	—	○	—	○
		200	6	—	—	○	—	○
		250	6	—	—	○	—	○
	250	6	6	○	○	○	○	○
		6	—	—	○	—	—	—
		200	6	—	○	—	—	—
		175	6	—	—	—	—	—
65	300	100	6	—	—	○	—	○
		150	6	—	—	○	—	○
		200	6	—	—	○	—	○
		250	6	—	—	○	—	○
		300	6	○	—	○	○	○

図6 供試体の打設方法(打設方向、締め固めおよび測定対象面)

図7 実験室内に静置した供試体の表面水分率の経時変化

ではほぼ定常状態となった。本研究ではこの結果を踏まえ、材齢91日以降、表面水分率が4.5%以下の状態で簡易透気試験を実施した。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 吸引鐘外周の試験面シール幅が透気性指標値に及ぼす影響

吸引鐘外周における試験面シールの幅の違いは、シール外周の透気経路に相違を生じさせ、透気性指標値に影響を及ぼすと考えられる。そこで、 $\phi 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ の供試体(表2参照)を対象に、シール幅を15, 30, 45, 60mmと段階的に変化させた透気試験を実施し、シール幅が透気性指標値に及ぼす影響について検討した。なお、今本らは透気試験前後における表面水分率の変化を指摘¹⁵⁾しているが、本実験においては、シール幅拡張後の測定が連続したものとならないよう計測間隔を開けるとともに、試験前に表面水分率を計測し、各々の計測時における差がないことを確認した後に試験を行った。

図8は、水セメント比45%、55%および65%における吸引鐘外周の試験面シール幅と簡易透気係数の関係を示したものである。いずれの水セメント比においても、シール幅の段階的な拡張により、簡易透気係数は低下する傾向を示す。これは、シール材として使用したシリコンパテ外周からの空気流入がシール幅の拡張により制限さ

図8 吸引鐘外周の試験面シール幅と簡易透気係数の関係

れたためと考えられる。また、水セメント比の増加に伴い簡易透気係数も増加傾向を示すが、これは、水セメント比によるコンクリート組織の緻密性に起因するものであり、表層部の品質や欠陥の有無を敏感に反映する透気試験の特徴を示す。しかし、本試験法と同様に吸引鐘を用いた透気試験法である今本らの方法では、シール幅(今本らの論文¹⁵⁾では[遮断幅]と定義)を20~30mm以上としても、透気指数に大きな変化は見られないとしている。ここで両者の計測圧力範囲に着目すると、今本らの方法は、吸引鐘内の圧力が大気圧との差で約-85~-68kPaの範囲において透気指標を算出しているのに対し、本試験法では-97kPa~0kPaまでの範囲で計測を行い、-72~-37kPaに相当する範囲で透気係数を算出している。吸引式の透気試験の場合、まず、吸引鐘直下からの空気流入が生じ、その後、吸引圧力や圧力回復に要する空気の総量に応じて段階的に透気領域を拡大していくと仮定すれば、本試験法は、今本らの方法と比較して約12kPa高い吸引圧力を作用させており、透気係数の算出領域も今本らのそれと比較して吸引鐘内の圧力が低い領域にある。また、使用する吸引鐘のサイズも異なり、吸引鐘内の圧力回復に要する空気量も異なる。これらの要因により、本試験法ではシール幅を20~30mm以上にした場合においても、透気係数の低下が見られたものと考えられる。この計測圧力範囲と透気領域の関係については、供試体に歪ゲージを埋設するなどして、今後詳細に検討を加える必要がある。

図9は、試験面シール幅と簡易透気係数の変動係数を示したものであるが、シール幅を拡張することにより変動係数は小さな値を示

図9 試験面シール幅の相違による簡易透気係数の変動係数

図10 試験面シール幅が透気経路および透気領域に及ぼす影響

した。これは、シール幅の拡張によりシールの確実性が増すことが要因の一つとして考えられるが、図10に示すように、シール幅が小さい場合にはシール外周の透気面積が少なくなり、極めて部分的な組織の粗さなどの欠陥による影響が反映されるために変動係数が大きくなり、シール幅が大きい場合にはシール外周の透気面積が増加するためにデータのばらつきが減少する可能性も考えられる。本実験の範囲ではシール幅60mmを採用することで、水セメント比65%においても簡易透気係数の変動係数は20%以下の値を示した。簡易法による透気性指標値の変動係数については、概ね30%程度であるとの報告^{7),15)}がある。これらの報告については、それぞれ標準養生(材齢28日水中養生)供試体の打設底面を対象とした場合および材齢4ヶ月の実大壁を対象とした場合の知見であり、本研究の実験条件とは異なる。しかし、養生条件や試験材齢等の一部条件については、本実験の方がより厳しい条件を設定しており、試験の信頼性の観点から、簡易透気試験法の有用性は認められるものと思われる。

本研究では、シール幅を60mm以上に設定した実験を行っていないため、さらにシール幅を拡張した場合の試験精度については未確認である。しかし、シール材の設置や除去といった試験の作業性や簡易性を考慮し、本実験の範囲で最も試験精度を確保できることが確認されたシール幅60mmを設定し、以降の測定に採用した。

4.2.2 部材端部から測定位置の距離が透気性指標値に及ぼす影響

図11に示すように、コンクリート部材端部から測定位置までの距離の相違は、簡易透気係数に影響を及ぼす可能性がある。そこで、部材厚さを300mm一定として、直径をφ175mm, 200mm, 250mm, 300mmと変化させた供試体(表2参照)について簡易透気試験を実施した。吸引鐘の設置位置は供試体円形端部の中心とし、これにより部材端部から吸引鐘中心までの距離は供試体直径の1/2となる。なお、試験面シール幅は原則60mmとするがφ300mm以外の供試体については、試験面が小さく吸引鐘外周から部材端部までの距離が60mm以下となるため、吸引鐘外周の試験対象面全面をシールした。

図11 部材端部から測定位置の距離が透気経路に及ぼす影響

図12 直径の異なる供試体の簡易透気係数とその変動係数

図 12 は、直径の異なる供試体について得た簡易透気係数とその変動係数を示したものである。φ175, 200, 250mm の供試体における簡易透気係数は、直径の増加に伴い減少傾向を示した。これらの供試体については、吸引鐘外周の試験対象面を全てシールしているため、空気の流入経路として考えられるのは供試体側面および底面からの流れである。供試体高さが統一されていることを考慮すると、部材端部からの距離の増加により供試体側面からの空気流入が抑制され、簡易透気係数を低下させたものと思われる。ここで、減少傾向を示したφ175～250mm について、簡易透気係数の減少が有意なものであるかを検証するため、それぞれの試験で得られた簡易透気係数を対象に t 検定を行った。その結果、φ175mm から 200mm に変化させた場合の簡易透気係数の減少については「 $t(9)=2.599, p<0.05$ 」で有意差が認められた。しかし、φ200mm から 250mm に変化させた場合については「 $t(9)=0.349, p>0.1$ 」となり、統計学的に有意な差は認められなかった。以上より、φ200mm(部材端部から測定位置までの距離：100mm)以上とすることで部材端部からの距離の影響を無視できるものと思われるが、φ300mm 供試体において簡易透気係数の増加が見られた。φ300mm 供試体については、試験面シール幅を 60mm としているため、供試体側面からの空気流入に加え、シール外周からの流れが加わり、簡易透気係数が増加したものと思われる。これは、シール幅を 60mm 以上に拡張することによる試験精度の向上を示唆するもので、今後、透気領域や計測圧力範囲との関連も含めた詳細な検討により明らかにする必要がある。

部材端部からの距離と簡易透気係数の変動係数の関係に着目した場合、距離の増加に伴い変動係数は減少する傾向を示し、φ300mm の供試体においては約 15%と、既往の研究成果^{7),15)}と比較しても、高い試験精度を有すると判断できる。これは、部材端部から測定位置までの距離を長くすることで空気の流入経路が限定され、特に、部材端部の欠陥を介した非定常な空気流入が抑制された結果と考えられ、部材端部からの距離を 150mm 以上とすることで試験精度を向上させることができる可能性を示唆する。

以上の結果より、簡易透気試験法の適用においては、試験精度を重要視し、部材端部から測定位置(吸引鐘中心)までの距離を 150mm 以上とすることが望ましいと思われる。

4.2.3 コンクリートの部材厚さが透気性指標値に及ぼす影響

部材厚さが簡易透気係数へ及ぼす影響について検討するため、直径を φ300mm 一定とし、部材厚さを 100, 150, 200, 250 および 300mm に変化させた供試体(表 2 参照)を対象に簡易透気試験を実施した。

図 13 は、部材厚さと簡易透気係数の関係を示したものである。当初、部材厚さの減少に伴い供試体底面からの空気流入が生じ、簡易透気係数は増加すると想定されたが、簡易透気係数は、部材厚さが薄いものほど減少する傾向を示した。なお、今本らの論文¹⁵⁾においても、本文における記述はないが、供試体が厚くなると透気指数は増加する傾向にあることが論文中の図 2¹⁵⁾に示されており、本実験と同様の結果が得られている。これらの要因として、供試体側面、或いは、シール外周からの空気流入による影響が考えられる。しかし、前述の通り、試験面におけるシール幅を 60mm とし、部材端部までの距離を 150mm 以上確保することで、変動係数が減少すること確認しており、これらの条件を満たす本実験では、変動係数の増加要因となる供試体側面およびシール外周からの非定常な空気流

図 13 部材厚さと簡易透気係数の関係 [側面シールなし]

図 14 部材厚さと簡易透気係数の関係 [側面シールあり]

図 15 部材厚さと簡易透気係数 [供試体側面・試験面シール]

入は抑制されているものと思われる。そこで、部材厚さと簡易透気係数の関係を明らかにするため、供試体側面をシリコンシーラントによりシールし、供試体側面からの空気流入を完全に遮断した状態で追加試験を実施した。

図 14 に追加試験の結果を示す。供試体側面からの空気流入を遮断しても、部材厚さの減少に伴い簡易透気係数が減少する傾向に変化は見られなかった。図 13 および図 14 を比較すると、簡易透気係数の全体的な増加が見られるが、この傾向は両実験の試験材齢が大きく異なることに起因するものと思われる。図 13 の実験については、本研究で実施した他の実験と同様に材齢 91 日以降に順次計測を開始したが、図 14 の実験については、追加試験という性格上、材齢約 9 ヶ月という時期に実施した。したがって、各供試体表面の平均水分率もそれぞれ 4.3%, 3.1%と大きく異なり、後者については、測定時期の違いに起因した季節的な気温変動や湿度変動によって、空気の密度や粘性に変化を生じたことも影響しているものと考えられる。このことから、本試験法の実構造物への適用にあたっては、外気温

*1 部材厚さにより、形成される脆弱層の厚さや脆弱度が異なると思われる。

図 16 部材厚さの違いによる透気経路および表層脆弱層の形成

や湿度等の環境要因による影響についても十分に検討する必要があるものと思われる。その他、図 14 における簡易透気係数の増加要因としては、供試体側面からの空気流入を遮断したことにより透気領域に変化が生じ、吸引圧力の及びやすい試験面シール外周からの空気流入が増加した可能性も考えられるが確認を要する。結果的に、本追加実験からは、部材厚さの違いに起因した傾向の要因を明らかにする情報は得られなかった。図 15 は、側面を完全にシールした上記の供試体に対し、さらに試験対象面(吸引鐘外周)全面をシールし、供試体底面のみが外気に露出した状態で実施した試験の結果である。供試体側面および試験対象面を完全にシールすることで、部材厚さに起因する試験値の変化は小さくなり、ほぼ一定の値を示した。このことから、簡易透気係数は、測定対象面からの空気流入による影響が卓越し、部材厚さの違いによる影響は極めて小さいと考えられる。しかし、図 14 および図 15 を比較すると、簡易透気係数は試験対象面を全面シールすることにより、部材厚さの小さいものでは増加、部材厚さの大きいものでは減少する様相が見られる。これは、部材の薄い場合では試験対象面における透気経路を遮断することにより透気領域が変化し、この透気領域の変化に伴い部材背面からの空気流入が生じて透気係数が増加した可能性が考えられる。また、部材の厚い場合においても同様の現象が生じるものと思われるが、部材背面までの透気経路が長いために部材背面からの空気流入は少なく、試験対象面からの空気流入を遮断したことによる影響が卓越して、結果的に、透気係数が低下した可能性が考えられる。

以上を総合的に判断すると、部材厚さの違いに起因する部材背面からの空気流入による影響は小さく、部材厚さの違いによる透気性の変化は、コンクリート表層に形成される脆弱層(図 16)を介したシール外周からの空気流入に依存するものと考えられる。この点について著者は、別途、部材厚さの相違が表層部脆弱層の形成に及ぼす影響として検討を進めている²³⁾。これらの検討から、部材厚さの増加に伴いブリーディング量が増加することや、その現象は型枠近傍において最も顕著となることを明らかにしており、コンクリート表層部に形成される脆弱層の厚さや脆弱度は、部材断面の厚さに起因する可能性があることを示している。

4.2.4 吸引鐘のサイズが透気性指標値に及ぼす影響

現位置で実施可能な透気試験には、簡易的であり、かつ迅速な評価が可能であることが要求される。簡易透気試験に用いる吸引鐘を小型化して吸引容積を少なくすることにより、減圧した吸引鐘内の圧力が大気圧に戻るために要する時間は短くなり、簡易透気試験法の迅速化が可能となるものと思われる。そこで、吸引鐘のサイズ変更が簡易透気係数に及ぼす影響について検討を行った。写真 2 にサ

写真 2 簡易透気試験に用いたサイズの異なる吸引鐘

図 17 吸引鐘を小型化した場合の水セメント比と簡易透気係数

図 18 各透気試験法における透気性指標値の変動係数

イズの異なる 3 種類の吸引鐘を示す。(a)は内径 100mm[内容積: 1015cc], (b)は内径 75mm[内容積: 295cc], (c)は内径 50mm[内容積: 135cc]の吸引鐘である。なお、対象供試体はφ 300mm×部材厚さ 300 mm の供試体(表 2 参照)とし、試験面シール幅は、吸引鐘のサイズに関わらず、全てのケースにおいて 60mm の一定とした。

図 17 に、内径φ 75mm, 50mm の小型吸引鐘を用いた場合の簡易透気係数と水セメント比の関係を、φ 100mm の吸引鐘を用いた場合を含めて示す。図 17 より、φ 100mm の吸引鐘を用いた場合と比較し、φ 75mm, φ 50mm に小型化した場合、簡易透気係数は増加傾向を示す。これは、吸引鐘の小型化に伴い吸引鐘の内容積が少なくなり、吸引圧力の回復時間が短くなるためと考えられる。ここで、吸引鐘の内容積に接続ホースの内容積(内径φ 8mm×700mm として概算)を加算し、圧力作用面積で除すことで得られる値を単位面積あたりの回復空気量(大気圧に戻るために必要な空気量)とすると、それぞれ 0.134(φ 100mm), 0.075(φ 75mm), 0.087(φ 50mm)となる。さらに、この回復空気量の逆数を取り、φ 100mm を 1 とした比率を示すと、それぞれ 1.78(φ 75mm), 1.54(φ 50mm)となる。簡易透気係数の増加率平均は、φ 100mm を 1 とした場合、それぞれ 1.44(φ 75mm), 1.68(φ 50mm)であり、この両者を比較すると、明確な対応は得られないものの、吸引鐘容積および圧力作用面積が透気係数の

増加に影響を及ぼしていることは明らかである。このことから、さらに透気領域や作用圧力の影響を加味することで、吸引鐘や接続要素の形状によらない一般値としての透気係数を算出できる可能性が示唆される。また、吸引鐘を小型化した場合の簡易透気係数と水セメント比との関係は、φ100mmの吸引鐘を用いたときに得られる傾向とほぼ等しく、各々の近似式の回帰係数は概ね0.023と同じ値を示す。このことから、吸引鐘サイズを変更しても、水セメント比の違いによる透気性を相対的に評価することが可能であると思われる。

吸引鐘を小型化した場合の計測時間については、φ100mmの吸引鐘を用いた場合と比較し、φ75mmの場合で約5割、φ50mmの場合で約3割まで短縮された。なお、簡易透気試験の試験時間は、試験装置のセッティング等を含むと約2～4時間程度(吸引鐘φ100mmの場合)を要するが、今本らの方法¹⁵⁾では5分程度、トレント法²⁰⁾では20～30分程度である。このことから、今本らやトレントの提案する方法は極めて簡易的な方法であると言える。本試験においても、吸引鐘の小型化や計測圧力範囲の限定により、試験時間の短縮を図ることは可能であるが、試験精度を優先した場合、計測する圧力範囲を限定せず包括的に採取した実験値を基に評価・判断することも重要と思われる。次に、簡易透気係数の変動係数について述べる。

図18に、吸引鐘サイズを変更した場合の簡易透気係数の変動係数を示す。また、試験精度に関する比較を行うため、トレント法²⁰⁾による透気性指標値の変動係数と本報で検討している簡易透気試験装置を用いて得た測定値を今本らの方法(式(2))¹⁵⁾で処理した透気指数の変動係数を併せて示した。ここで示す変動係数は、φ300mm、部材厚さ100、150、200、250、300mmの供試体各6体について算出した変動係数を、各水セメント比の平均として示したものである。なお、各試験法の変動係数を部材厚さ毎に比較した場合においても、序列関係はほぼ同様の傾向を示す。基準となるφ100mmの吸引鐘を用いた試験では変動係数11～14%という値が得られた。φ75mm、φ50mmと吸引鐘を小型化した試験における変動係数については、全体的に9～13%の範囲にあり、φ100mmの吸引鐘を用いた場合とほぼ同程度の値が得られた。これは、吸引鐘を小型化した場合においても試験精度を確保できることを示唆するものと考えられる。一方、比較対象として実施したトレント法では変動係数22～24%、今本らの方法により測定値を処理した場合では16～20%という値を得た。以上の結果から、本試験法は、簡易性の観点から試験時間に課題を残すものの、既存の試験法と比較して良好な試験精度を有するという点で、その有用性は認められるものと思われる。

4.2.5 トレント透気試験法による透気係数と簡易透気係数の関係

図19に、トレント透気係数と簡易透気係数の関係を示す。これは、φ300mm、部材厚さ100、150、200、250、300mmの5水準の供試体(表2参照)を対象に、トレント透気試験²⁰⁾および簡易透気試験を実施した結果を比較したものである。両試験法により得られた透気性指標値の関係からは約0.81という決定係数が得られ、両者は比較的良好に対応していると思われる。トレント透気試験法は、近年、簡易型の原位置透気試験法として適用実績が多く、さらに、RILEMが透気性評価のためのベンチマーク試験法として位置づけるRILEM-CEMBUREAU法²²⁾とほぼ一致する空気流を原位置試験において実現した試験法である。このことからトレント透気試験法との対応は、本研究で検討する簡易透気試験の有用性を示すものと思われる。

図19 トレント透気係数と簡易透気係数との関係

表3 コンクリートの調合

W/C (%)	Sl. (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				
			W	C	S	G	AE
45	86	38.6	167	371	696	1108	0.089
55	83	41.6		304	756	1106	0.045
65	78	44.6		257	848	1153	0.031

表4 コンクリートの圧縮強度および気泡特性

W/C (%)	材齢28日における 圧縮強度 (MPa)	空気量 (%)		気泡間隔係数 (μm)
		フレッシュ	硬化後	
45	45.2	4.3	3.9	281
55	39.0	3.9	3.5	318
65	28.6	4.1	3.6	297

図20 ASTM C672法の供試体および試験概要²¹⁾

5. 簡易透気試験法の耐凍害性評価への適用(実験シリーズⅡ)

5.1 実験概要

(1) 使用材料および調合

使用材料として、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)、石灰岩碎石(Gmax: 20mm、表乾密度: 2.69g/cm³、実積率: 59.2%)、石灰岩砕砂(表乾密度: 2.69g/cm³、F.M.: 2.59)を使用した。練混ぜ水は一般水道水とし、混和剤にはアニオン系界面活性剤を主成分とするAE剤を使用した。コンクリートの調合を表3に示す。水セメント比は45%、55%および65%の3水準とし、目標スランプ80mm、目標空気量4.0%とした。これらの調合による材齢28日の圧縮強度および気泡特性を表4に示す。

(2) 供試体作製および養生方法

供試体形状は、スケーリング抵抗性試験ASTM C672法²¹⁾に準じて220×220×80mmの平板形状とし、水セメント比毎にスケーリング試験用9体、簡易透気試験用9体を作製した。なお、供試体は440×220×80mmの型枠を用いて作製し、材齢14日に乾式切断機を用いて二分して両試験用に振り分けた。脱型は材齢1日で行い、材齢14日まで水中養生を行った。試験対象面は、ブリーディングや表面仕上げに起因する打設上面の不均質性を考慮し、打設側面を用いる

こととした。スケーリング試験用供試体は、水中養生後、材齢 28 日まで 20℃・60%R.H.の恒温恒湿室で気中養生を行った。材齢 21～26 日に、試験対象面の周囲 4 側面にシリコンシーラントを用いてブリキ板を接着し、図 20 に示すように、試験溶液を留めるための堤を作製した。簡易透気試験用供試体については、水中養生終了後、コンクリート表層部の含水状態の安定を図るため、材齢 91 日まで実験室内に静置した。簡易透気試験では、表面水分率による影響を考慮し、上記の試験材齢に設定したが、スケーリング試験はコンクリートの特性として、その抵抗性を評価するものであることから規格に準じた養生条件を採用することとした。両試験において養生方法および養生期間は異なるが、コンクリートの潜在的なスケーリング抵抗性の評価・比較は可能であると思われる。

(3) スケーリング試験「ASTM C672 法」の概要²¹⁾

材齢 28 日に、試験面から深さ 6mm となるよう NaCl 3%溶液を注ぎ入れ、ASTM C672 法で規定する凍結融解温度条件²¹⁾を満たすよう、人工気象室を用いた自動制御法^{24),25)}により凍結融解試験を行った。凍結融解 5 サイクル毎に試験面から剥離したスケーリング片をナイロンブラシで採取し、含有塩分を取り除くためイオン交換水により洗浄した。その後、100±5℃の乾燥機で 24 時間乾燥させ、スケーリング片の乾燥質量を測定し、その乾燥質量を試験面積で除して単位面積あたりのスケーリング量(kg/m²)として算出した。なお、スケーリング量の測定は、凍結融解 60 サイクルまで実施した。

5.2 実験結果および考察

図 21 は、ASTM C672 法により得られた凍結融解サイクル数と水セメント比毎のスケーリング量の関係を示したものである。各水セメント比におけるスケーリング発生量は、W/C:45%<W/C:55%<W/C:65%という序列関係を示し、水セメント比によるスケーリング抵抗性の相違を反映している。水セメント比が大きくなることにより、水和反応に寄与しない余剰水やブリーディングの発生が顕著となり、コンクリート表層には組織的に脆弱な層が形成され²³⁾、その結果、スケーリングの発生要因となる水や塩化物といった劣化外力の侵入・拡散に対する抵抗性が低下し、スケーリング量が増加したものと考えられる。これは、表層劣化であるスケーリングの進行が表層コンクリートの緻密性に大きく依存することを裏付ける。

図 22 は、簡易透気試験法により得られた簡易透気係数の水セメント比毎の平均値とその変動係数を示したものである。ASTM C672 法²¹⁾によるスケーリング量と同様に、水セメント比による簡易透気係数は、W/C:45%<W/C:55%<W/C:65%という序列関係を示し、水セメント比の異なるコンクリートの透過性の相違を反映している。また、各水セメント比における簡易透気係数の変動係数は、供試体 9 体における算定値として、W/C:45%では 8.0%、W/C:55%では 14.8%、W/C:65%では 14.3%となった。

図 23 は、簡易透気試験法により得られた簡易透気係数と凍結融解 60 サイクル時のスケーリング量との関係を示したものである。簡易透気係数の大きいコンクリートはスケーリング量も大きくなり、総合的に評価した場合、両者の間には決定係数 0.85 と比較的よい対応関係が認められる。しかし、高水セメント比では両者の相関は、若干低下するように思われる。そこで、W/C:55%および W/C:65%について、それぞれ決定係数を算出した結果、W/C:55%では 0.65、W/C:65%では 0.63 の値が得られた。総合的に評価した場合と比較し

図 21 凍結融解サイクル数とスケーリング量の関係

図 22 簡易透気係数 α の平均値と変動係数

図 23 簡易透気係数とスケーリング量との関係

相関性は低下するものの対応傾向にあるものと思われる。このことから、簡易透気係数はコンクリートのスケーリング抵抗性を反映するものと考えられ、コンクリートのスケーリング抵抗性評価手法として、簡易透気試験法を適用できる可能性が示唆された。スケーリングはコンクリートの緻密性に起因する表層劣化である。この緻密性を評価する原位置非破壊試験として、衝撃弾性波²⁶⁾や電気抵抗率²⁷⁾による間接的評価手法も検討されているが、本研究では、コンクリート表層を対象とした透過性の直接的評価が可能である透気性試験の適用性について検討し、その妥当性を示すことができたものと思われる。しかし、現段階においては、実験室レベルの検証にとどまり、実際に簡易透気試験法をスケーリング抵抗性評価手法として実構造物に適用しようとした場合、更なるデータの蓄積による検討が必要である。今後、簡易透気試験によるスケーリング抵抗性評価の適用性を明確にするため、コンクリートの含水状態や気泡特性および細孔構造などのミクロ的検討を踏まえ、コンクリート表層の組織構成と関連付けた透気機構を明らかにしていく必要がある。

6. まとめ

本研究では、吸引鐘を用いた簡易透気試験法の基礎特性や適用条件について検討するとともに、スケーリング抵抗性評価手法としての適用の可能性について実験的に検討を行った。本研究の範囲において、得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 簡易透気試験の適用条件として、吸引鐘外周における試験面シール幅を 60mm に設定することで、簡易透気係数の変動係数を 15%以下とすることが可能であり、試験面シール幅をさらに拡張することで試験精度を向上できる可能性が示唆された。
- 2) 簡易透気試験の適用条件として、部材端部から吸引鐘中心までの距離を 100mm 以上確保することで、部材端部からの空気流入による影響を排除できる可能性が示唆された。また、部材端部から吸引鐘中心までの距離を 150mm とすることで、試験値の変動係数を 15%以下とできる。
- 3) 測定対象部材の厚さが増すことにより、簡易透気係数は増加傾向を示す。これは、部材厚さの違いによって、その厚さや脆弱度に相違を生じる表層脆弱層を介して、シール外周から空気が流入することに起因するものと考えられる。したがって、対象とするコンクリート部材の厚さが 100mm 以上であれば、部材背面からの空気流入による影響は無視できるものと思われる。
- 4) 吸引鐘を小型化することで簡易透気係数は増加するが、コンクリートの透気性の違いを相対的に評価することは可能であり、吸引鐘の内径を $\phi 100\text{mm}$ から $\phi 50\text{mm}$ とすることで、試験時間を約 70%短縮することが可能である。
- 5) 簡易透気係数は、RILEM-CEMBUREAU 法(室内透気試験)と強度の相関性を持つトレント透気係数と決定係数 0.81 と比較的良好対応関係を示すことから、簡易型の原位置透気試験として、有用性が認められるものと思われる。
- 6) 簡易透気試験では、独自設定した透気係数の算出方法を採用しており計測時間の点で課題を残すが、試験値の変動係数は、トレントや今本らの方法と比較して小さな値を示し、試験精度の面から、他の方法と同様に有用性が認められるものと思われる。
- 7) 簡易透気係数は、ASTM C672 法により得られるスケーリング量との間で決定係数 0.85 という相関性を示し、簡易透気試験法により得られる透気性指標値を、スケーリング抵抗性を評価するための指標として、適用できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 長瀧重義, 氏家勲: コンクリートの透気性, セメント・コンクリート, No.455, pp.24-31, 1985.1
- 2) J.W.Figg: Methods of measuring the air and water permeability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.25, No.85, pp.213-219, 1973.12
- 3) 月永洋一, 庄谷征美, 杉田修一, 笠井芳夫: コンクリート表層部の品質評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.591-596, 1990.7
- 4) Y.Tsukinaga, M.Shoya, T.Sugawara: Studies of Methods to Assess the Quality of the Surface Layer of Concrete, ACI SP-128, Vol.1, pp.637-651, 1991.12
- 5) M.Shoya, Y.Tsukinaga, S.Sugita, T.Hara, K.Domon: On New In-Situ Test Method for Permeability of Concrete, Durability of Building Materials and Components 7, Vol.2, pp.919-928, 1996.5
- 6) 月永洋一, 庄谷征美, 杉田修一, 石橋学: 簡易試験による表層部コンクリートの透過性評価に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.290-295, 1996.12

- 7) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫, 土門勝司: 簡易試験による表層部コンクリートの透過性評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, pp.7-14, 1998.4
- 8) 庄谷征美, 月永洋一, 佐々木幹夫, 杉田修一: コンクリート表層部に着目した簡易透水試験法の開発に関する基礎的研究: 土木学会論文集, No.627, V-44, pp.133-145, 1999.8
- 9) 権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波稔, 菅原隆: チャンバー吸引セルを用いた簡易透気試験法の有用性に関する基礎的検討, シンポジウム・コンクリート構造物への非破壊検査の展開・論文集, Vol.2, pp.271-276, 2006.8
- 10) 氏家勲: 実構造物におけるかぶりコンクリートの吸水性, 透水性, 透気性の測定方法, コンクリート工学, Vol.32, No.12, pp.43-47, 1994
- 11) 今本啓一, 下澤和幸, 山崎順二, 二村誠二: 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
- 12) K.Schönlín and H.Hilsdorf: Evaluation of the effectiveness of curing of concrete structures, ACI SP-100, Concrete Durability. Katharine and Bryant Mather Intern. Confer., Vol.1, pp.207-226, Detroit, ACI, 1987
- 13) R.Torrent, L.Ebensperger: Studie über Methoden zur Messung und Beurteilung der Kennwerte des Überdeckungsbetons auf der Baustelle – Teil 1, p.119, Office Fédéral des Routes, Suisse, Zürich, Januar, 1993
- 14) 福島礼規, 浦野英男, 谷川恭雄: 構造体コンクリートの透気性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp.911-912, 1993.9
- 15) 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: 構造体コンクリートの表層透気性におけるシングルチャンバー法の適用性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 607 号, pp.31-38, 2006.9
- 16) 今本啓一, 山崎順二, 下澤和幸, 永山勝, 二村誠二: かぶりコンクリートの透気性に基づく RC 構造物の耐久性性能検証に向けた基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 638 号, pp.593-599, 2009.4
- 17) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12
- 18) 菅原隆, 木村陽子, 権代由範, 月永洋一: コンクリート製品の耐久性向上に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.472-477, 2009.2
- 19) 武田三弘, 大塚浩司: 浸透性吸水防止材によるコンクリートのスケーリング抑制効果に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.18, No.1, pp.1-9, 2007.1
- 20) R.Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, Vol.25, No.150, pp.358-365, 1992
- 21) American Society for Testing and Materials: Standard test method for scaling resistance of concrete surface exposed to de-icing chemicals, Annual Book of ASTM Standard, Vol.04.02, pp.344-346, 1998
- 22) RILEM TC 116-PCD: Recommendation of TC 116-PCD, Tests for gas permeability of concrete, B. Measurement of the permeability of concrete by the RILEM CEMBUREAU method, Materials & Structures, Vol.32, No.3, pp.176-179, 1999.4
- 23) 権代由範, 月永洋一, 庄谷征美, 阿波稔: コンクリート部材の断面厚さの相違が表層部脆弱層の形成に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.391-397, 2010.2
- 24) 権代由範, 庄谷征美, 月永洋一, 子田康弘: 塩化物環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 20, No. 1, pp. 59-70, 2009.1
- 25) 月永洋一, 庄谷征美, 笠井芳夫: 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 8, No.1, pp. 121-133, 1997.1
- 26) 岩野聡史, 森濱和正, 極壇邦夫, 境友昭: 鋼球接触時間の測定によるコンクリート表層部の品質評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, 2005
- 27) 榎原彩野, 皆川浩, 久田真: モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1, pp.789-793, 2008

(2011年8月10日原稿受理, 2012年4月18日採用決定)