

# 論文 自然環境下の表層コンクリートに対する透気試験を用いた耐久性能推定手法の適用可能性

村上 賢晃\*1・氏家 勲\*2・河合 慶有\*3

**要旨:** 本論文は曝露環境によって変動するコンクリートの含水率と透気係数の関係に着目し、かぶりコンクリートの耐久性能を透気試験により推定する手法について検討した。その結果、屋内曝露環境下における透気試験により作製された品質評価指標が、屋外曝露環境下のコンクリート部材においても適用可能であることが示された。また、温度、湿度の変動、降雨や日射に曝される自然環境下のコンクリートにおいては、含水率の低下に伴う透気係数の増大と環境作用に起因するばらつきを峻別して耐久性評価を行う必要があることが示唆された。

**キーワード:** 透気係数, 環境作用, かぶりコンクリート, 耐久性能

## 1. はじめに

従来、鉄筋コンクリート構造物は十分な耐久性を有しているため、メンテナンスフリーであると考えられていた。しかし、近年では鉄筋コンクリート構造物の早期劣化や損傷の顕在化が深刻化しており、適切な維持管理手法および耐久性診断技術の確立が求められている。近年、かぶりコンクリートの表層透気性を用いて耐久性能を推定、評価する研究が多数報告されている<sup>1)2)</sup>。なかでも、ダブルチャンバー式のトレント法は、試験方法が容易であることなどから測定実績が多く、既設コンクリート構造物の調査に汎用されている。既往の研究<sup>3)</sup>では、トレント法によりかぶりコンクリートの透気性から品質評価を行う手法が提示されている。一方、著者ら<sup>2)4)</sup>が提案しているシール法では、**図-1**のようにコンクリートの表面に円形状のシールを施し気密処理することによりコンクリート内部の透気領域を明確化し、硬化コンクリートの透気係数を算出することを可能としている。さらに、脱型後に乾燥環境下に曝されたコンクリートの含水率の低下に伴い増大する透気係数の線形関係を指標として抽出し、耐久性能を推定する手法を提案している<sup>5)</sup>。

これらの透気試験に共通する技術的課題は、曝露環境によって変動するコンクリートの含水率あるいは含水分布を含めた測定結果にばらつきを与える透気領域内の影響要因について著者らの研究を除いて検討されていないことである。例えば、透気性は水セメント比や初期養生に関わらずコンクリート内部の空隙量、空隙径、ならびに連続空隙の存在を含めた空隙構造に大きく影響されることがわかっている。しかしながら、初期養生条件および曝露環境によって異なるコンクリートの空隙構造の変

状や微細ひび割れの存在は既設構造物を対象として測定された透気係数を解釈する上で非常に重要な要因となる。また、自然環境下においては乾燥または湿潤状態がそれぞれ卓越する環境や日射および降雨の影響を直接受ける構造部位などが存在し、これらの環境作用が表層コンクリートの透気性に与える影響を考察することは透気係数のばらつきの原因を理解するために必要不可欠である。

そこで、本研究では約3年間、屋内外に曝露されたコンクリート供試体における透気係数の経時変化について検討した。特に、本論文では既報<sup>5)</sup>で提案した約1年間の屋内曝露試験により透気係数と含水率の関係から品質評価指標を作製したコンクリート供試体における長期曝露試験の結果を用いて透気係数のばらつきに影響を与える要因について考察を述べる。また、屋外に曝露されたコンクリート供試体に対する耐久性能推定手法の適用可能性について検討を行った。最後に、日本非破壊検査協会「表層透気性試験方法研究委員会」によって実施された共通試験の結果を用いて、透気係数のばらつきを考慮した耐久性能推定手法について考察を述べる。



図-1 シール法による測定 (外径 75mm)

\*1 愛媛大学大学院 理工学研究科 (学生会員)  
 \*2 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 博(工) (正会員)  
 \*3 愛媛大学大学院 理工学研究科 助教 Ph.D. (正会員)

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
		W	C	S1	S2	S3	G1	G2	AE 減水剤	高性能AE 減水剤
65	49.7	165	254	469	281	187	519	424	2.29	-
50	47.5	165	330	433	260	173	523	428	2.97	-
40	44.5	165	413	390	234	156	532	435	-	3.1

2. 実験概要

2.1 供試体概要および使用材料

本研究では、レディーミクストコンクリートを用いて無筋供試体を作製した。水セメント比は 40%、50%および 65%の 3 水準とした。供試体寸法は 400×400×400mm とし各水セメント比について 2 体ずつ作製した。各供試体は打設後 3 日目に脱型した後、20℃の恒温室で材齢 28 日まで気中養生を行った。養生後の供試体は室温 20℃の恒温室または屋外に曝露した。表-1 に本研究で用いたコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）を使用した。細骨材には、S1（石灰砕砂、表乾密度：2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.31%）、S2（砂岩砕砂、表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.19%）、および S3（砂岩砕砂、表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.23%）の 3 種類を混合して使用した。また粗骨材には最大寸法 20mm の G1（砂岩砕石、表乾密度：2.62g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.06%）および G2（砂岩砕石、表乾密度：2.62g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.89%）の 2 種類を使用した。化学混和剤には、リグニンスルホン酸塩およびポリカリボン酸系 AE 減水剤、またポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。スランプおよび空気量はそれぞれ 10cm および 4%とした。

2.2 圧縮強度試験

供試体はφ10×20cmの円柱供試体を各水セメント比について9体ずつ計27体作製した。試験は、材齢28日（1日脱型、標準養生）、脱型時（3日脱型）および気中養生（3日脱型）後に含水率が5.0%まで低下した際にJIS A 1108に準じて実施した。

2.3 透気試験

透気試験は、各曝露環境に一定期間静置したコンクリート供試体を対象として実施した。なお、測定は各供試体の同一側面の中央部にて 1 回のみ実施した。試験方法はトレント法およびシール法の 2 種類である。試験概要および透気係数の算出方法を以下に記す。

(1)トレント法

本研究では、ダブルチャンバー式を用いて透気係数を式(1)により算出するトレント法を採用した。

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

ここに、 $kT$ ：空気透過度係数(m<sup>2</sup>)、 $V_C$ ：内部セルの容積(m<sup>3</sup>)、 $A$ ：内部セルの断面積(m<sup>2</sup>)、 $\mu$ ：空気粘性係数(=2.0×10<sup>-5</sup>N・sec/m<sup>2</sup>)、 $\varepsilon$ ：かぶりの空隙量(=0.15)、 $P_a$ ：大気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $\Delta P_{ieff}$ ：試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m<sup>2</sup>)、 $t_f$ ：試験終了時間(s)、 $t_0$ ：試験開始時間(s)(=60s)である。

(2)シール法

シール法とは、コンクリート表面にラテックス樹脂を用いて円形状のシールを施すことによりコンクリート表面を気密処理し、その中央に吸い出し位置での圧力測定のためのチャンバーを取り付け、真空ポンプを用いてコンクリート中の空気を吸い出す方法である。シール外縁から空気が流入し、図-2 に示すようにシール外縁の円周を一断面とする半球面上の大気圧境界が形成されることから、この半球面が透気領域となると仮定している。本実験では、内径 $r_1$ を 10mm、外径 $r_2$ を 50mm または 75mm とした。なお、シール法では、この領域を透気に関与する影響範囲と見なし、吸い出した空気の流量から式(2)により透気係数を算出する。

$$k_s = \frac{\eta P_2}{\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{\sqrt{2}}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) Q \quad (2)$$

ここに、 $k_s$ ：透気係数(m<sup>2</sup>)、 $\eta$ ：粘性係数(N・sec/m<sup>2</sup>)、 $P_1$ ：チャンバー内の空気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $P_2$ ：大気圧(N/m<sup>2</sup>)、 $r_1$ ：シールの内径(m)、 $r_2$ ：シールの外径(m)、 $Q$ ：透気流量(m<sup>3</sup>/s)である。なお、チャンバー内圧力および透気流量が定常となったときの各値を測定した。

2.4 含水率測定試験

本研究では、高周波容量式の含水率計を表面に設置して供試体表面の含水率を測定した。なお、供試体の表面状態によって測定値が異なるため各供試体に対して 3 回測定を行った。

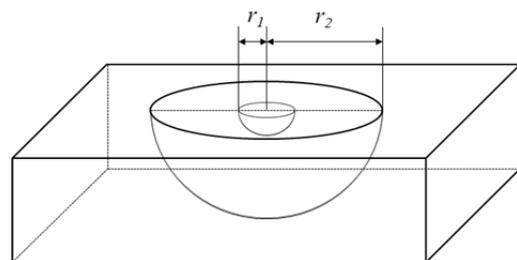


図-2 シール法の模式図

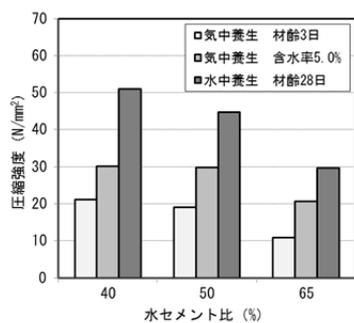


図-3 圧縮強度

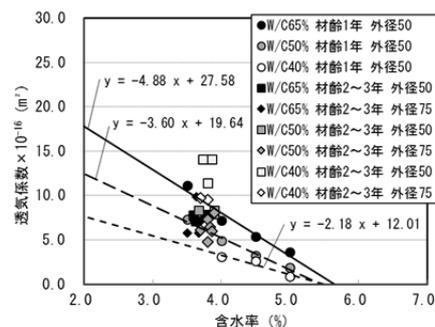
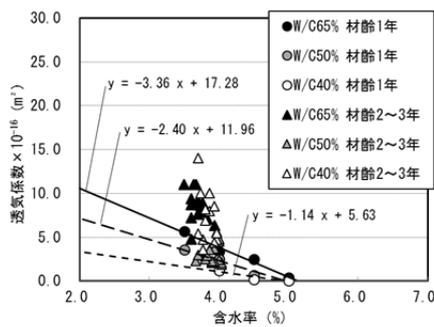


図-4 透気係数 (左：トレント法, 右：シール法)

## 2.5 テストハンマー強度試験

本試験は、N型シュミットハンマーを用いて JSCE-G 504-2007 に準じて実施した。測定は材齢約3年が経過した各供試体の側面において30mm間隔で20箇所行った。また、測定面は透気試験を実施している面を含めて2側面とした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮強度

本研究で得られた圧縮強度試験の結果を図-3に示す。この図より、材齢3日に脱型した供試体における圧縮強度と比較して、含水率が5%に低下した際の圧縮強度は約1.4~1.9倍高くなっていることが確認された。なお、脱型直後の含水率はそれぞれ、8.9% (W/C40%), 8.1% (W/C50%), 及び7.5% (W/C65%)であった。また、材齢28日の圧縮強度はそれぞれ、51.0N/mm<sup>2</sup> (W/C40%), 44.7N/mm<sup>2</sup> (W/C50%), および29.7N/mm<sup>2</sup> (W/C65%)であった。

### 3.2 屋内曝露供試体を用いた検討

図-4に屋内曝露した供試体で測定された透気係数および含水率の結果を示す。なお、参考のため材齢約1年までに測定された結果より算出した近似直線を掲載している。これらのグラフより、長期曝露試験の結果、材齢約1年までに推定された耐久性能と同程度の結果が得られるのはいずれの透気試験方法においてもW/C50%の供試体のみであった。また、W/C40%の供試体においては、いずれの試験方法においても材齢約2~3年の間に測定された透気係数は、著しく大きくなっていることが認められる。これらの供試体は、室内の乾燥環境に曝露されていたことから乾燥収縮等に起因する微細ひび割れが透気領域内に形成され、透気量が増大したものと考えられる。一方、W/C65%の供試体においては、特にトレント法によって測定された透気係数は増大していることが認められる。また、測定された透気係数はW/C40%の供試体において測定されたものと同程度の範囲に分布していることから、トレント法による評価では、両者は透気性に関連する長期耐久性は同程度と推定される可能性がある。この結果とは対照的に、シール法による測定結果で

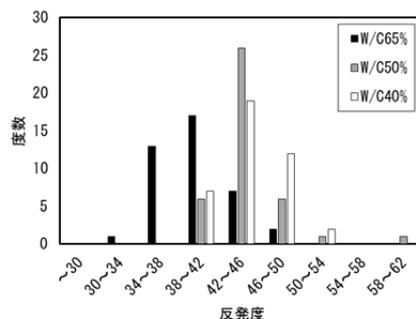


図-5 反発度のヒストグラム

はW/C65%の供試体における透気係数はW/C50%のものと同程度の範囲に分布している。これは、いずれのW/Cの供試体においてもシール外径を75mmと設定した結果のほうが透気係数は小さい値となっていることが一つの要因と考えられるが、より乾燥の進んでいるW/C65%の表層コンクリートにおいては乾燥状態によってシール法による透気係数は小さく算出される可能性が考えられる。

以上のことから、長期曝露供試体において透気試験を実施する際には、表層コンクリートの乾燥による影響を考慮する必要があるといえる。さらに、長期曝露試験の結果は材齢約1年までに測定された結果を用いて抽出した品質評価指標と異なる結果となる可能性があるため透気係数のばらつきに与える影響因子について考察を深める必要がある。

図-5にテストハンマー強度試験の結果を示す。各供試体において測定された反発度の平均値および変動係数はW/C40% (45.5, 6.7%), W/C50% (44.9, 7.5%) およびW/C65% (40.1, 8.4%)であった。これらの結果より、反発度が最も高く、ばらつきが最も小さい供試体はW/C40%であり、この結果は著しい増大が確認された透気係数による品質評価と必ずしも同様の結果となっていない。また、透気係数の測定結果において確認されたばらつきが比較的小さいW/C50%の供試体においては、複合材料であるコンクリートの不均一性ならびに含水率の低下に伴う透気係数の増大の複合的なばらつきと捉えることができる。3.3節では、屋外曝露試験の結果を用いて自然環境下における透気係数のばらつきに影響を与える要因について考察する。

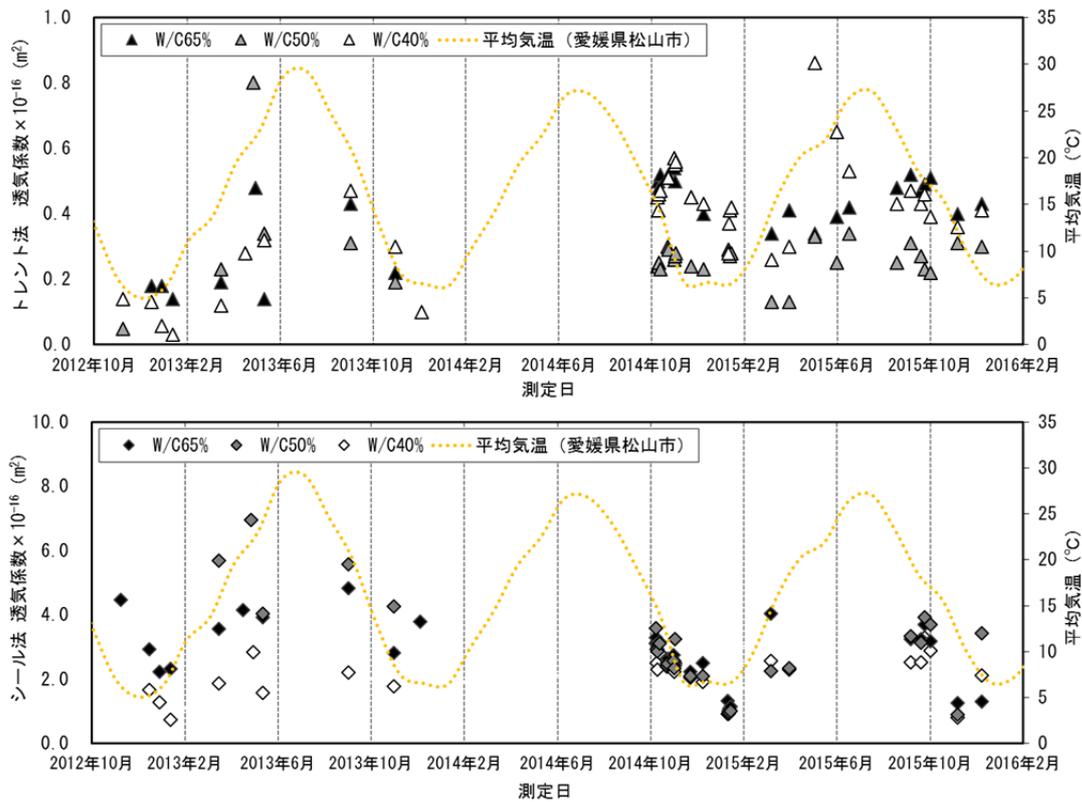


図-6 透気係数の経時変化（上：トレント法，下：シール法）

### 3.3 屋外曝露供試体を用いた検討

図-6 に約3年間の屋外曝露試験で測定された透気係数の経時変化を示す。なお、透気試験は基本的に降雨時から5日以内実施した結果となっている。これらの図より、屋外に曝露された供試体において測定された透気係数は屋内曝露の供試体における結果とは対照的に曝露開始時から低下していることが認められる。この傾向は1~2月の間に最小値を記録した後に増大する傾向を示し、7~8月の間に最大値を記録したものと推測される。これらの傾向は、図中に示した愛媛県松山市の平均気温<sup>6)</sup>の変化に類似して繰り返し認められることから、季節の変化に伴う外気温、湿度、降雨や日射に起因するものと推察される。したがって、屋内と比較して湿潤状態が長く続く屋外環境では、含水率の低下に伴う透気係数の増大は、環境作用に伴うコンクリートの変状により相対的に抽出することが難しくなると考えられる。

また、試験方法による違いに着目するとトレント法により測定された透気係数は $0.03 \sim 0.86 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 、またシール法では $0.74 \sim 6.97 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であり、シール法の方が透気係数の変動幅は大きいことが認められる。また、コンクリート供試体の含水率が比較的高いため、トレント法による測定では極めて小さい値となっている。しかしながら、繰り返し生じる変動の傾向は両者に顕著な差は無く、特にシール法の方が明確な変動を捉えることができているといえる。

次に、屋内曝露の検討と同様にテストハンマー試験の結果を図-7に示す。各供試体で測定された反発度の平均値および変動係数は、W/C40% (44.8, 9.5%)、W/C50%

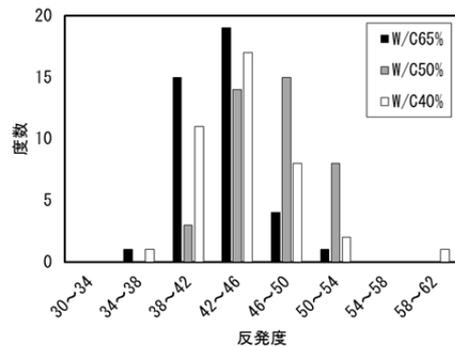


図-7 反発度のヒストグラム

(47.1, 7.1%)、また W/C65% (43.5, 6.4%) となっており、推定される強度には屋内曝露の供試体において確認された差が認められない。また、測定値の変動係数は曝露環境によらず10%より小さく、材料の不均一性に起因するばらつきは両者で同程度であると考えられる。3.4節では、以上の議論を踏まえて品質評価指標を用いて屋外曝露した供試体に対する耐久性能推定手法の適用可能性について検討する。

### 3.4 耐久性能推定手法の適用可能性

屋内試験により作製された品質評価図を屋外曝露した供試体に適用するためには、環境作用に伴うばらつきを除去する必要がある。そこで本研究では、愛媛県松山市の年間平均気温<sup>6)</sup>の変化を考慮し、屋内環境と類似している4月中旬から5月中旬および9月中旬から10月中旬までの結果を用いて検討を行うこととした。図-8に各水セメント比の供試体における透気係数と含水率の関係をプロットしたグラフを示す。また、屋内曝露供試体

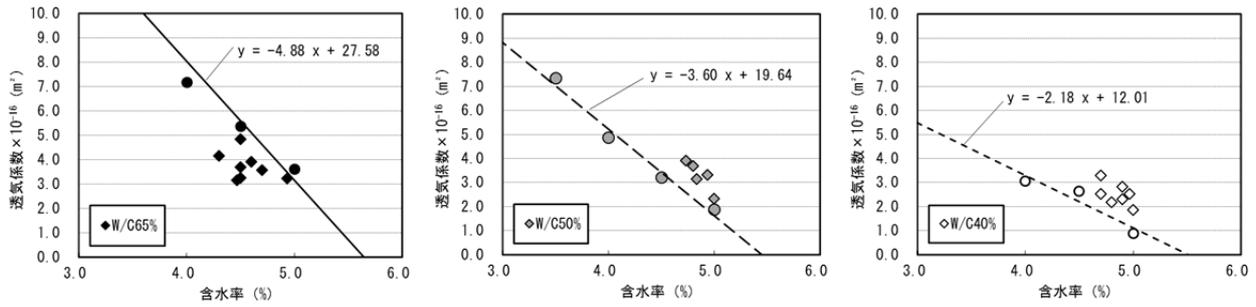


図-8 透気係数と含水率の関係（屋外曝露供試体，シール法）

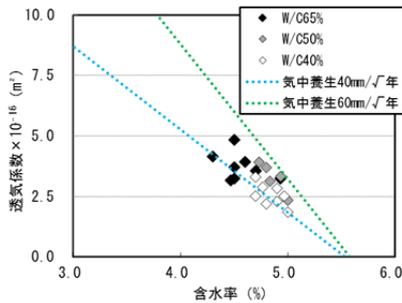


図-9 品質評価図（屋外曝露供試体）

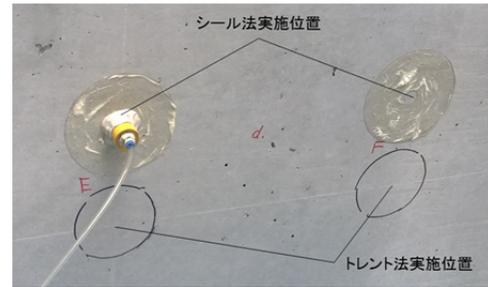


図-10 透気試験実施状況（共通試験）

における結果を用いて作製された近似直線もそれぞれ掲載している。これらのグラフより、W/C65%の供試体においては屋内曝露の供試体と比較して、透気係数は小さくなっていることが認められる。一方、W/C50%および40%の供試体においては、透気係数は比較的大きい値となっている。これらの結果は、特にW/C65%の供試体において反発度から推定される強度が他の2ケースとわずかな差しか認められないことを考慮すると妥当性の高い結果であるといえる。さらに特筆すべきは、環境作用に伴う透気係数の変動の影響を除いて抽出された透気係数は含水率の低下に伴い増大していることが明確に認められる。この傾向は、既設構造物など自然環境下に曝されている構造物を対象として耐久性能を精度良く推定するために必須となる。以上のことから、含水率の低下が屋内環境ほど顕著でない屋外環境であっても環境作用に起因するばらつきを考慮することで耐久性能推定手法を屋内曝露試験の結果に基づいて適用することは可能であるといえる。

図-9に透気係数と耐久性指標の関係図<sup>5)</sup>（以下、品質評価図と称す）にこれらの測定結果をプロットしたグラフを示す。この図より、屋外供試体における中性化速度係数は、促進環境で約40~60mm/√yearの範囲に分布していることが認められる。また、中性化速度は温度、相対湿度および降雨の頻度によって屋外の方が遅くなることが知られている。したがって、W/C65%の透気試験の結果より中性化深さを予測することは従来の知見に合致するものである。また、屋内の乾燥環境に約3年間曝

露された供試体において測定された透気係数のばらつきを考慮すると温度、湿度等の環境作用以外の要因による測定結果のばらつきは比較的小さいといえる。4章では、コンクリート部材内の透気係数のばらつきと含水率との相関を峻別して整理し、耐久性能推定手法の適用可能性について検討を行う。

## 4. 共通試験における透気試験結果

### 4.1 共通試験概要

2015年8月に開催された表層透気性を評価する共通試験では、呼び強度15, 27, 33, および40N/mm<sup>2</sup>の壁状供試体（部材寸法：1800×900×200mm）を用いて透気試験を実施した。供試体は、打設後7日目に脱型し、屋内に曝露されてから約3ヵ月が経過した表層コンクリートを対象とした。また試験方法は、2.3節に記載したトレント法およびシール法により実施した。測定は図-10に示すようにトレント法は部材中央で実施し、またシール法による実施位置は高さ方向に異なっている。測定は各供試体について指定された6箇所を含む複数の箇所で行った。また、同時に測定部位の含水率を測定した。

### 4.2 結果および考察

図-11に各供試体で測定された透気係数の結果を示す。この図より、呼び強度の高い供試体ほど透気係数は小さくなっていることが認められる。特に、この傾向はシール法による測定結果において明確に認められる一方、トレント法による結果においては、呼び強度15のケースを除いて、透気係数は同程度となっている。また、測定

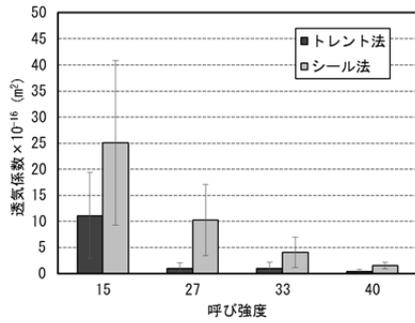


図-11 透気係数の結果

結果のばらつきは測定された透気係数が大きく、呼び強度の低い供試体において大きくなる傾向が認められる。特に、強度の低い供試体における測定値のばらつきは著しく大きいため、平均値を用いた透気性の評価は必ずしも精度の良い評価とならない可能性があることが指摘される。

次に、シール法の結果を用いて透気係数のばらつきに影響を与える要因について考察する。図-12に品質評価図に測定結果をプロットしたグラフを示す。これらのグラフより、含水率の低下に伴い透気係数は増大していることが認められる。また、透気係数ならびにそのばらつきに著しい増大が確認された呼び強度 15 および 27 の供試体は、本研究で作製された品質評価指標の対象範囲に収まっていない。一方、3章で検討した W/C50%~65% の供試体と同程度の強度を有する呼び強度 33, 40 の透気係数と含水率の関係は部分的に透気係数が増大しているケースもあるが、含水率が約 5.1~5.8%の範囲内において品質評価指標の対象となっている。この結果より、部材内の透気係数のばらつきはコンクリートの不均一性に起因するものと含水率の低下による増大を峻別して解釈する必要があるといえる。特に、部材中の含水状態のばらつきを考慮して透気試験を実施し品質評価を行うことで、表層コンクリートの耐久性能推定、評価は可能になることが示唆された。

## 5. 結論

本研究は、曝露環境によって変動するコンクリートの含水率と透気係数の関係に着目し、かぶりコンクリートの耐久性能を透気試験により推定する手法について検討した。本研究で得られた知見を以下に記す。

- 1) 温度、湿度の変動、降雨や日射に曝される自然環境下のコンクリートにおいて測定された透気係数は平均気温の変化に類似して、繰り返し変動することが確認された。
- 2) 自然環境下に曝される表層コンクリートにおいて、透気係数と含水率の関係を用いて耐久性能を推定する手法を適用する場合には、環境作用に伴う透気係

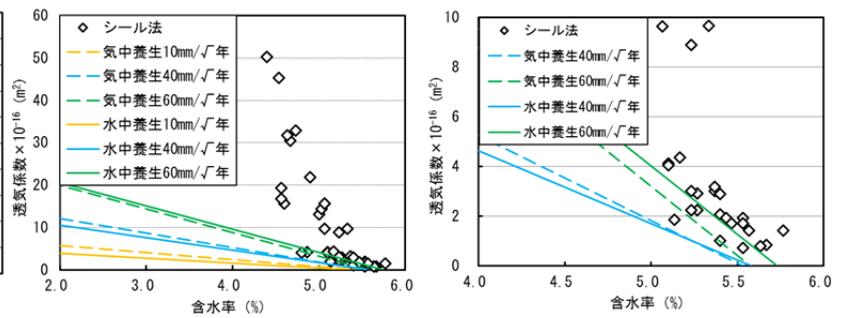


図-12 品質評価図(中性化)

数の変動の影響を考慮して耐久性評価を行う必要があることが示唆された。

- 3) 含水率の低下に伴う透気係数の増大を用いて品質評価を行うためには、透気係数のばらつきに影響を与える環境作用、乾燥の影響、およびコンクリートの不均一性を考慮する必要がある。
- 4) 部材中の含水状態のばらつきを考慮して透気試験を実施することで表層コンクリートの耐久性能推定、評価は可能になる。

## 謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究(B)(課題番号: 24360172)の助成を受けたものである。ここに深い謝意を表します。

## 参考文献

- 1) Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, pp.358-365, 1992.
- 2) 氏家勲, 土屋崇, 岡崎慎一郎: 実構造物でのコンクリートの透気係数の測定方法に関する検討, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.62, pp.197-204, セメント協会, 2008.
- 3) Torrent, R.J.: Performance-based specification and conformity control of durability, *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, pp.19-21, 2006.
- 4) 氏家勲, 岡崎慎一郎, 中村翼: コンクリート構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.63, pp.189-195, セメント協会, 2009.
- 5) 河合慶有, 國方翔太, 氏家勲: 現場透気試験によるかぶりコンクリートの耐久性能評価手法の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.36, No.1, pp.2140-2145, 2014.
- 6) 出典: 気象庁ホームページ