

論文 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

河合慶有*1・國方翔太*2・氏家勲*3

要旨: 本論文はコンクリートの含水率と透気係数の関係に着目し、実部材サイズの供試体を用いて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、水セメント比及び養生条件が異なる供試体の透気係数と含水率の関係を把握し、透気試験によりコンクリートの密実性を適切に評価できることを示した。また、得られた透気係数と含水率の関係をを用いてコンクリートの耐久性能を推定する方法を促進試験により検討し、妥当性を確認した。さらに、実構造物のかぶりコンクリートにおいて測定された透気係数を用いて本手法の適用可能性を示した。

キーワード: 含水率, 透気係数, 物質移動抵抗性, 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及び耐久診断技術の確立が求められている。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を低下させる要因には、主に中性化や塩害が挙げられる。かぶりコンクリートに侵入した劣化因子に起因する中性化や塩害は、コンクリート中の鋼材腐食を引き起し、構造物の安全性と機能性を低下させる。また、かぶりコンクリートに水と酸素が十分に供給される場合には、鋼材腐食が電気化学的反応により促進される。以上のことから、かぶりコンクリートの耐久性能の適切な評価には、物質移動抵抗性を考慮することが極めて重要である。

現在、鉄筋コンクリート構造物のかぶりコンクリートにおける物質移動抵抗性を考慮した耐久性能評価手法として、透気試験の適用が試みられている¹⁾。非破壊試験である透気試験により評価されるかぶりコンクリートの透気性はコンクリートの密実性と相関を持つことが知られており、本試験によって得られる透気係数によって物質移動抵抗性を評価できると考えられている。しかしながら、透気試験はコンクリート内部の空隙構造のみならず、含水状態に大きく影響を受けることが指摘されている²⁾。特に、含水状態の異なる実構造物のかぶりコンクリートにおける耐久性能を評価するためには、本試験により算出される透気係数を適切に解釈する必要があると考えられる。

既往の研究²⁾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。

本手法は透気係数を算出する際に算出式あるいは透気領域に検討すべき仮定が設けられているが、試験方法が容易であることなどから測定実績が多く、特に実構造物調査に汎用されている。一方で、著者ら^{3),4)}が提案するシール法では、コンクリート構造物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。また、既往の実験結果を用いて、その精度及び妥当性はすでに検証されている。しかしながら、コンクリートの含水状態がシール法に及ぼす影響については十分な検証がされておらず、曝露環境によって含水状態が著しく異なる実構造コンクリートへ適用する上で、含水状態を考慮した透気試験の検討が急務となっている。

そこで本研究では、コンクリートの透気係数の含水依存性に着目し、コンクリートの含水率と透気係数の関係を明らかにすることを目的とした。さらに本実験により得られた透気係数と含水率の関係からコンクリートの密実性及び耐久性能を適切に推定する手法について検討を行った。また、愛媛県宇和島市内に供用されている橋梁のかぶりコンクリートを対象として本手法を適用し、測定された透気係数と含水率の関係からその耐久性能を推定する手法の適用可能性について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体配合

本研究では、愛媛県松山工場で生成されたレディーマイ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%及び65%の3水準とした。表-1に本研究で用いたコンクリートの示方配合表を示す。

*1 愛媛大学 大学院理工学研究科 助教 Ph.D. (正会員)

*2 愛媛大学 大学院理工学研究科 非会員

*3 愛媛大学 大学院理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの示方配合表

W/C (%)	G _{max} (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								
					水 W	セメント C	細骨材			粗骨材		混和剤	
							S1	S2	S3	G1	G2	AE 減水剤	高性能 AE 減水剤
65	20	10	4.0	49.7	165	254	469	281	187	519	424	2.29	-
50	20	10	4.0	47.5	165	330	433	260	173	523	428	2.97	-
40	20	10	4.0	44.5	165	413	390	234	156	532	435	-	3.10

S1：石灰砕砂 (F. M. 2. 88), S2：砕砂 (F. M. 2. 86), S3：砕砂 (F. M. 2. 66), G1：碎石 (F. M. 6. 3), G2：碎石 (F. M. 7. 0)

2.2 供試体の養生

本研究では、気中養生及び水中養生の供試体を作製した。気中養生の供試体は、打設後3日目に脱型した後、20℃の恒温室で養生を行った。水中養生の供試体は、打設後1日で脱型し、20℃の恒温室で材齢28日まで養生を行った。

2.3 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6体ずつ計18体作製し、3体を3日脱型気中養生屋内曝露、3体を1日脱型28日水中養生した。また試験は、気中養生した供試体は脱型時に、水中養生した供試体は材齢28日目にJIS A 1108に準じて実施した。

2.4 透気試験

供試体は実部材を模擬した40×40×40cmの無筋供試体を各水セメント比について2体ずつ計6体作製し、それぞれ気中養生または水中養生を行った。透気試験は、供試体を一定期間乾燥させた後に含水率を測定し、含水率が5.0%、4.5%、4.0%、及び3.5%に低下した際に実施した。なお、試験期間中に含水率が3.5%に低下しなかった供試体については、含水率が4.0%まで試験を行った。透気試験及び含水率測定試験は、供試体の同一側面の中央部にて実施した。なお、透気試験は各含水率の供試体において1回測定した。試験概要を以下に示す。

(1) トレント法

本研究では、エフティーエス (株) 製の Permea-TORR を使用した。Permea-TORR のスイス規格方式による測定結果では、耐久性能に関する物質移動抵抗性や水密性と相関があることなどが報告されている。空気の通り難さを示す透気係数は以下の式(1)より、また式(2)より影響深さを算出する。

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

$$L \approx 1000 \left(\frac{2kT P_a t_f}{\varepsilon \mu}\right)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 kT ：空気透過度係数(m²)、 V_C ：内部セルの容積(m³)、 A ：内部セルの断面積(m²)、 μ ：空気の粘性係数(=2.0×10⁻⁵N・sec/m²)、 ε ：かぶりの空隙量(=0.15)、 P_a ：大気圧(N/m²)、 L ：試験による影響深さ(mm)、 ΔP_{ieff} ：試験終了時内部セルの有効圧力上昇(N/m²)、 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、図-1 に示すように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の流入が発生し、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、透気領域をトレント法の内側チャンバーに近づけるために、内径 r_1 を10mm、外径 r_2 を50mm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透気係数を算出する。

コンクリートの透気係数を一定値 k (m²)と仮定すると、コンクリート中の空気の平均流速 v (m/s)を用いて、標座標形式で表現したダルシー側は以下の式(3)のようになる。

$$v = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dr} \quad (3)$$

ここで、 k ：透気係数(m²)、 v ：コンクリート中の空気の平均流速(m/s)、 P ：圧力(N/m²)、 η ：粘性係数(N・sec/m²)、 r ：吸い出し口中心からの距離である。

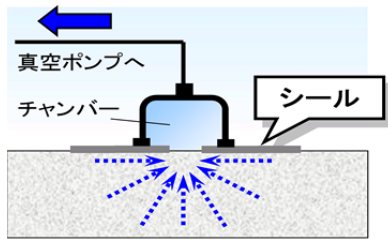


図-1 シール法概略図

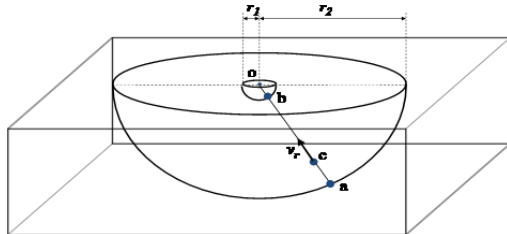


図-2 シール法における透気領域

さらに、吸い出し口中心からの任意の距離を r として、中心から r までの半球面(表面積 $2\pi r^2$)を通過する流量を Q (m^3/sec)とすると式(3)は以下の式(4)ようになる。

$$\frac{Q}{2\pi r^2} = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dr} \quad (4)$$

さらに、中心から $r = r_1$ (シールの内径 1.0cm) での圧力を P_1 (チャンバー内の圧力の測定値)、中心から $r = r_2$ (シールの外径 5.0cm) の圧力を P_2 (大気圧)、 $r = r_1$ での流量を Q として式(4)の両辺を r で積分後、変更を施すと、以下の透気係数を求める式(5)が得られる。

$$k = \frac{\eta P_2}{\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{\sqrt{2}}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) Q \quad (5)$$

ここで、 k : 透気係数(m^2)、 η : 粘性係数($\text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$)、 P_1 : チャンバー内の空気圧(N/m^2)、 P_2 : 大気圧(N/m^2)、 r_1 : シールの内径(m)、 r_2 : シールの外径(m)、 Q : 透気流量(m^3/s)である。実際の試験においては、チャンバー内圧力及び透気流量が定常となったときの各値を測定し、式(5)に基づいて透気係数を算出した。

2.5 含水率測定試験

本研究では、(株)ケツト科学研究所製のコンクリート・モルタル水分計 HI-520 (高周波容量式) を表面に設置して含水率を測定した。また、供試体の表面状態によって測定値が異なるため、供試体 1 体に対して 3 回測定を行った。

2.6 電気泳動による実効拡散係数測定試験

本研究では、JSCE-G 571-2007 に準じて電気泳動試験を実施し、試験には図-3 のような装置を用いた。供試体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を各水セメント比について 2 体ずつ計 6 体作製し、気中養生(屋内曝露)及び水中養生を 2.2 節に記載した条件で行った。また試験には、養生後にダイヤモンドカッターを用いて打設面から 2.5cm 下の位置から厚さ 5cm に切り出した円盤型供試体

を用いた。切り出した円盤型供試体は、円周面をエポキシ樹脂系接着剤で被覆し放置した。エポキシ樹脂系接着剤が乾燥した後、蒸留水を注入した真空デジケーターで 24 時間真空脱気し、供試体を飽和状態にした。陽極側溶液中の塩化物イオン濃度の経時変化が一定の傾きとなった状態を定常状態とし、得られた濃度勾配から塩化物イオン流束を以下の式(6)より算出した。

$$J_{cl} = \frac{V^H \Delta C^H_{cl}}{A \Delta t} \quad (6)$$

ここで、 J_{cl} : 定常状態における流束($\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{年})$)、 V^H : 陽極の溶液体積(L)、 A : 供試体断面積(cm^2)、 $\Delta C^H_{cl}/\Delta t$: 陽極側塩化物イオン濃度の増加割合($\text{mol}/\text{l}/\text{年}$)である。塩化物イオンの実効拡散係数は、式(7)より算出した。

$$D_e = \frac{J_{cl}RTL}{|Z_{cl}|FC_{cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 D_e : 実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 R : 気体定数($\text{mol} \cdot \text{K}$)、 T : 絶対温度測定値(K)、 Z_{cl} : 塩化物イオンの電荷、 F : ファラデー定数($96500\text{C}/\text{mol}$)、 C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値(mol/l)、 $\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位(V)、 L : 供試体厚さ(mm)であり、絶対温度、陰極側の塩化物イオン濃度、供試体表面間の測定電位は、定常状態で測定した平均値を使用した。

2.7 促進中性化試験

本研究では、JIS A 1153:2003 に準じて促進中性化試験を実施した。試験供試体には $15 \times 15 \times 20\text{cm}$ の角柱供試体を用いた。供試体は各水セメント比について 2 体ずつ計 6 体作製した。供試体の養生は、それぞれ気中養生または水中養生を 2.2 節に記載した条件で行った。促進中性化試験は、試験槽内を温度 20°C 、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5.0% に設定し実施した。供試体は、相対する $15 \times 20\text{cm}$ の 2 面以外をエポキシ樹脂系接着剤で被覆した。エポキシ樹脂系接着剤は、気中養生の供試体は脱型時に、水中養生の供試体は水中養生終了時に塗布した。また試験は、気中養生の供試体は脱型後 20°C の恒温室で 28 日間屋内曝露した後に開始した。水中養生の供試体は、水中養生後に気中養生の供試体と同様の条件で供試体を曝露した後に試験を開始した。

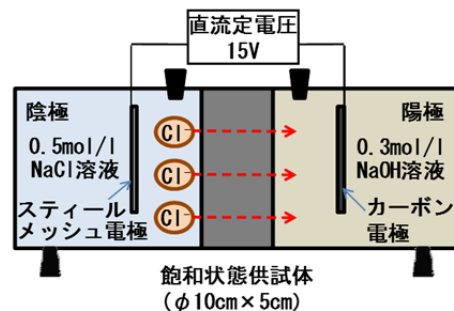


図-3 電気泳動装置

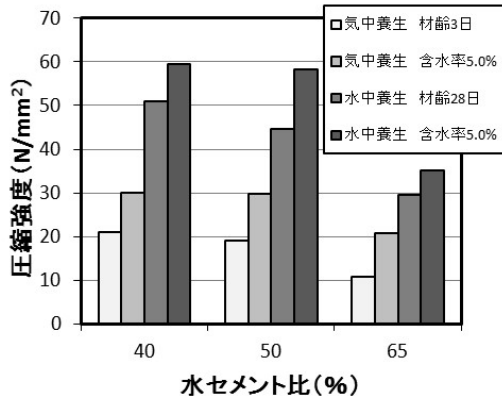


図-4 圧縮強度

中性化深さの測定は、JIS A 1152:2002 に準じて行った。中性化深さを6点測定し、それらの平均値を用いて中性化深さと促進期間の関係から促進中性化速度係数を算出した。中性化深さは促進期間が4, 8, 13, 26 週となった時に同一供試体を切断して測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度試験

本研究で得られた圧縮強度試験の結果を図-4 に示す。この図より、材齢28日まで水中養生した供試体の圧縮強度は、材齢3日に脱型した供試体に比べ、2.4倍から2.7倍程度高くなっていることがわかる。また、各供試体の含水率が5.0%になった材齢における圧縮強度は基準とした圧縮強度よりも1.2倍から1.9倍程度高いことを確認した。

3.2 透気試験及び含水率測定試験

図-5 及び図-6 に気中養生した供試体で測定された透気係数及び含水率、図-7 及び図-8 に水中養生した供試体における測定結果を示す。これらのグラフより、透気試験はコンクリートの水セメント比及びコンクリート中の含水状態に影響されることが認められる。特に、水セメント比が高い供試体ほど透気係数は大きく、含水率の低下に伴い透気係数は大きくなることが確認された。これらは、圧力勾配により吸引されたコンクリート中の空気が空隙内部及び空隙間に分布する水分に阻害されることがなくより大きな空隙中を流れたためと考えられる。なお、コンクリート供試体の透気係数と含水率の関係は含水率が3.5%から5.0%の範囲において線形になることがわかった。また、図中の含水率2.0~3.5%の範囲においては、実験室における測定結果に基づき直線関係が得られると仮定している。さらに、同関係の近似直線から得られる傾きは供試体の水セメント比及び養生条件によって異なり、コンクリートの密実性を示す良い指標となることが示唆された。

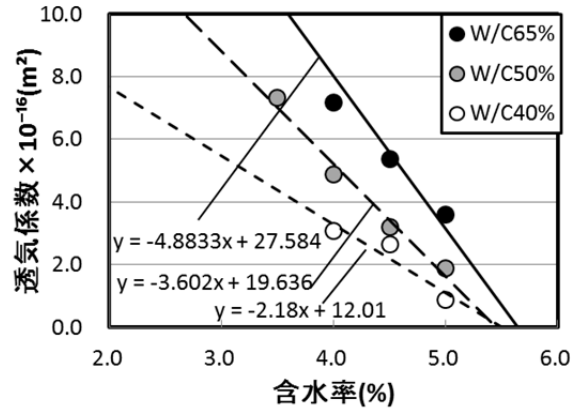


図-5 透気係数と含水率（気中養生、シール法）

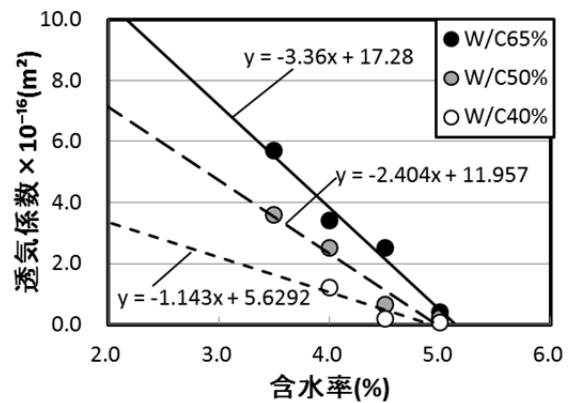


図-6 透気係数と含水率（気中養生、トレント法）

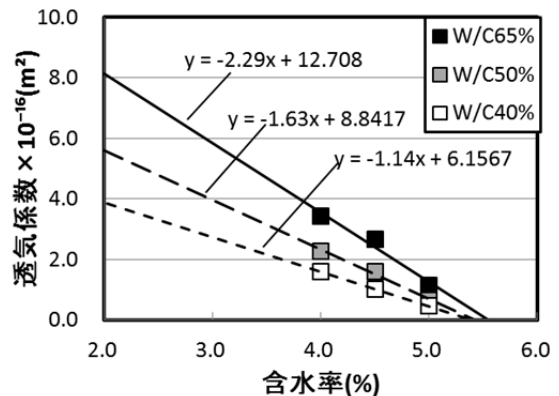


図-7 透気係数と含水率（水中養生、シール法）

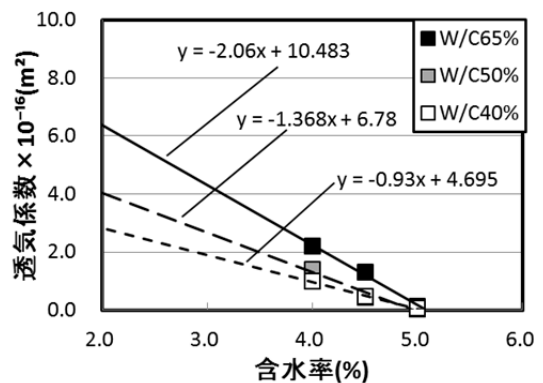


図-8 透気係数と含水率（水中養生、トレント法）

一方で、コンクリート中の含水率が高くなるほど透気係数は小さくなることが認められる。特に、トレント法を用いた場合、含水率が約 5%程度で透気係数が極めて小さくなることが確認された。図-9 にシール法及びトレント法により算出された透気係数の比較を示す。この図より、トレント法により算出された透気係数は、シール法と比較して小さい値となることが認められる。

既往の研究³⁾によりシール法では、シール外径が小さくなるほど測定される透気係数が大きくなることが確認されており、本研究で採用したシール外径(50mm)が透気係数に影響したと考えられ、シール法を適用するにはより大きな外径とする必要がある。しかしながら、水中養生した供試体と比較して気中養生したコンクリート供試体における透気係数の測定値は、特に水セメント比の高いケースにおいて測定方法の差が大きくなることが確認された。図-10 にトレント法により透気試験を行った際の影響深さを式(2)により算出した結果を示す。この図より、透気の影響深さは供試体の水セメント比、養生条件及び含水率によって異なることが認められる。特に、含水率が 5%程度における測定値は変動がより大きく、同試験方法により算出される透気係数は、より表層のコンクリートを透気領域とした測定結果を示していると考えられる。3.3 節では、透気試験により得られた透気係数とコンクリートの含水率を考慮してコンクリートの耐久性能を推定する方法について促進試験により検討を行った。

3.3 電気泳動試験及び促進中性化試験

本研究で得られた電気泳動試験及び促進中性化試験の結果と透気試験の結果を図-11 及び図-12 に示す。本検討では、シール法による透気試験の結果より得られた近似直線の傾きの絶対値を横軸として採用している。なお、紙面の都合上、トレント法の結果については割愛している。電気泳動試験は、異なる材齢(2ヶ月及び1年)の供試体を用いて実施した。これらの図より、水セメント比が高い供試体ほど実効拡散係数及び促進中性化速度係数は大きくなることが確認できる。特に、異なる水セメント比のコンクリートを水中養生または気中養生した供試体における促進中性化速度係数と透気試験の関係はほぼ直線になることが認められる。この直線関係を用いることにより、例えば、透気試験の結果に基づいて直線の傾きの絶対値が同程度であり物質移動抵抗性が同等であると考えられる W/C65%で水中養生された供試体と W/C40%で気中養生された供試体は、促進中性化速度係数が同程度であることから、中性化に対して同等程度の耐久性能を有することが推定される。

しかし、図-11 に示す透気試験の結果と実効拡散係数は、前者が物質移動抵抗性を示す指標である一方、後者

は電気泳動試験により評価された指標であるため、必ずしも同様の傾向を示さなかった。特に、気中養生を施した供試体における実効拡散係数は、材齢1年まで継続して屋内曝露された場合、乾燥収縮等による影響から測定値の変動が大きくなることが確認された。従って、透気係数と比較する上で実効拡散係数は物質移動抵抗性を適切に示す指標とならないことが指摘される。

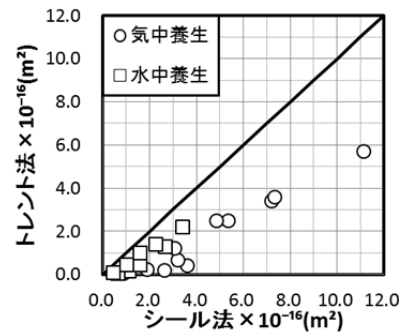


図-9 透気係数の比較 (シール法とトレント法)

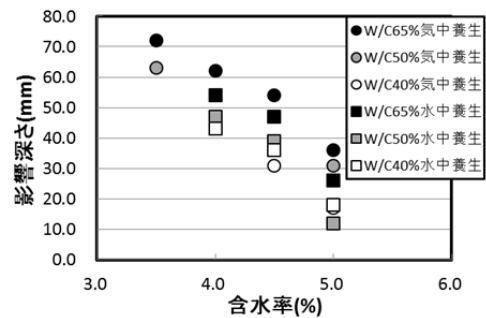


図-10 含水率と影響深さ (トレント法)

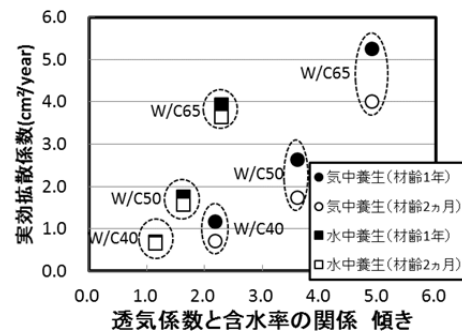


図-11 透気試験と実効拡散係数の関係

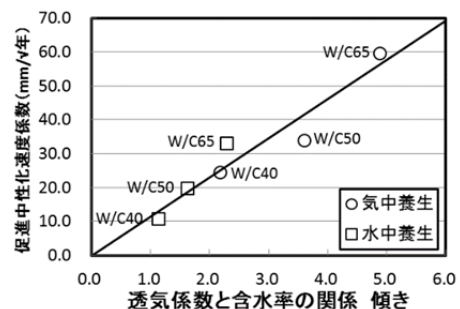


図-12 透気試験と促進中性化速度係数の関係

4. 実構造物における透気試験の適用例

3.2節及び3.3節で得られた透気係数と含水率の関係による耐久性能推定手法を実構造物へ適用するため、愛媛県宇和島市内の7橋梁17カ所を対象として透気試験を実施した。なお、試験方法はシール法とし、かぶりコンクリートの含水率を同時に測定した。表-2に各橋梁の測定結果及び竣工後の経過年数を示す。

表-2 宇和島市橋梁測定結果

橋脚名	含水率(%)	透気係数×10 ⁻¹⁶ (m ²)	経過年
A橋(アバット下)	2.60	7.04	20
B橋(桁内)	3.57	5.28	20
B橋(桁外)	3.70	5.87	20
C橋(桁内)	4.20	2.25	8
C橋(桁外)	4.63	2.65	8
D橋(桁内)	4.77	4.11	33
D橋(アバット上)	2.67	6.46	33
E橋(アバット上)	3.23	7.04	26
E橋(アバット下)	3.30	4.70	26
E橋(桁外)	4.50	2.93	26
E橋(桁内)	4.57	1.76	26
F橋(桁外)	4.20	2.25	24
F橋(桁内)	4.50	2.65	24
G橋(桁横・下流側)	4.39	2.94	25
G橋(桁裏・下流側)	4.36	0.98	25
G橋(桁横・上流側)	4.43	2.75	25
G橋(桁裏・上流側)	4.25	1.39	25

また、3.2節及び3.3節の試験結果に基づいて作製された、含水率とシール法により算出された透気係数及び耐久性指標の関係図(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図-13に示す。なお、図中の耐久性指標は促進中性化速度係数を示している。この図より、含水率が約2.6%から約4.8%の実構造物における透気係数は約 1.0×10^{-16} (m²)から 7.0×10^{-16} (m²)の範囲内であり、実部材サイズの供試体で測定された透気係数と同程度であった。また、含水率の低下に伴い透気係数が大きくなることが確認され実部材サイズの供試体を用いた実験結果と同様の傾向が確認された。

3.3節で述べたように、透気試験の結果に基づいて作製された品質評価図により、実構造物の含水率と透気係数の関係からそれぞれの橋梁のかぶりコンクリートにおける促進中性化速度係数を、養生条件に関わらず推定することができると考えられる。例えば、図中の黒い実線及び点線上にプロットされた8カ所の橋梁においては、40mm/√年程度の促進中性化速度係数と推定される。また、図中に表示されていない促進中性化速度係数に対応した評価線を挿入することで、線上にプロットされていない橋梁についても同様に耐久性能を推定することが可能である。なお、今後の検討課題としては、耐久性能の推定結果について妥当性を検証するために透気試験を実施した部材における中性化深さ等の測定データを収集していく予定である。

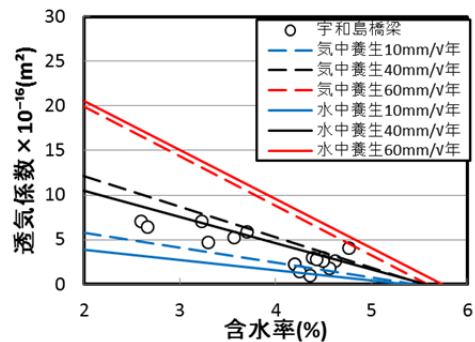


図-13 品質評価図 (促進中性化速度係数)

5. 結論

コンクリート中の含水率が透気試験により算出される透気係数に及ぼす影響について、実部材サイズの供試体を用いて検討を行った。その結果、試験方法、供試体の水セメント比及び養生条件に関わらず含水率の低下に伴い透気係数が大きくなることがわかった。また、含水率が3.5%から5.0%の範囲内で透気係数と含水率の線形関係が得られ、同関係を用いてコンクリートの耐久性能を推定できることが示唆された。以上のことから、含水率の異なる実構造物のかぶり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の適用可能性を示した。

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.: Performance-based specification and conformity control of durability, International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, 19-21 March 2006, Madrid, Spain.
- 2) 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.
- 3) 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
- 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