

# 論文 透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究

林 亮太\*<sup>1</sup>・樋原 弘貴\*<sup>2</sup>・添田 政司\*<sup>3</sup>・松本 涼\*<sup>1</sup>

**要旨**：透気係数によってコンクリートの劣化因子に対する物質移動抵抗性を評価することを目的として、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリートに対して加圧法により透気係数を測定し、配合や養生条件の違いが透気係数に及ぼす影響ならびに圧縮強度、中性化速度係数、塩化物イオンの拡散係数との関係性について検討した。その結果、透気係数の測定によってコンクリートの中性化や塩化物イオンの浸透に対する物質移動抵抗性評価が可能であることが示唆された。

**キーワード**：透気係数、圧縮強度、中性化速度係数、塩化物イオン

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物を適切に維持管理し長寿命化していくために、構造物の耐久性に重要な役割を担うかぶり部の品質を簡易かつ適切に評価できる指標が求められている。この指標による品質の評価が可能となれば、容易に竣工時点での耐久性予測、経過年数に応じた構造物の劣化および寿命予測、補修時期の立案等が容易となり<sup>1),2)</sup>、劣化に応じた適切な補修を行うことができる。一方で、構造物完成後のコンクリート品質の確認や断面修復後の施工状態評価として、構造物からコアが採取されており、これを用いて圧縮強度や断面修復材の施工厚等の調査がなされている。しかしながら、コンクリートの強度は構造性能にとって重要な指標の1つではあるが、鉄筋腐食の発生時期は、主に中性化や塩化物イオンの浸透、化学作用等のコンクリート中の物質移動抵抗性に依存するため、劣化の進行を詳細に予測して構造物の耐久性を担保していくことは難しい<sup>3),4)</sup>。土木学会では維持管理の評価方法として、鋼材の腐食開始の判定基準に中性化残り 10mm や腐食発生限界塩分濃度 1.2kg/m<sup>3</sup>と定めているものの、実際の構造物においては腐食が確認されない事例も少なくない。また、各種非破壊試験による試みもなされているものの、測定時の条件等の制約やバラツキ、誤差といった問題が指摘されている<sup>5)~9)</sup>。これらのことから、適切に物質移動抵抗性を評価できる指標の構築が必要である。

そこで著者らは、劣化調査の際に構造物から採取するコアを用いて、加圧法により透気係数を測定することに着目した。コアを用いて透気係数を測定する場合には、構造物中の鉄筋破断等の躯体コンクリートの損傷を最小限にすることや測定機器の軽量化、実構造物での簡易的な品質確認、ならびに断面修復後の施工状態評価等を前

提として、採取するコアを小径化する必要があるため、できる限りコア径を小さくしたφ75mmの円柱供試体を用いて評価した。この透気係数はコンクリートの物理的な空気の透過性を表すものであり、予め得られているセメント種類や配合、圧縮強度等の情報を加味することで劣化の予測に加えて、コンクリートの物質移動抵抗性を精度よく確認できる可能性がある。しかしながら、加圧法による透気係数の測定において、セメント種類や配合、養生条件の違いが透気係数に及ぼす影響や各種劣化因子の物質移動抵抗性との関係性についての情報は少なく、未だ十分な知見が得られていない。

そのため本研究は、セメント種類や配合、養生条件の違いが透気係数に及ぼす影響ならびに圧縮強度、中性化速度係数、塩化物イオンの拡散係数との関係性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

表-1には、使用材料および物性を示す。使用したセメントは、普通ポルトランドセメント(略号: OPC)および高炉セメント B 種(略号: BB)を使用し、細骨材と粗骨材には、それぞれ海砂(略号: S)と福岡県産砕石(略号: G)を使用した。表-2は、コンクリート配合を示す。作製した供試体の水結合材比は、45%、55%、65%の3水準とし、いずれの配合も目標スランプは8±1cm、目標空気量4.0±1%とした。

供試体作製後の養生方法は、温度20℃、湿度60%環境下で28日間の気中養生、28日間の水中養生、および7日間の水中養生後に21日間の気中養生の計3環境で、それぞれ養生を行った。

\*1 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 (学生会員)

\*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博士(工学) (正会員)

\*3 福岡大学大学院 工学研究科資源循環・環境工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料および物性

略語	材料	物理的性質
OPC	普通ポルトランドセメント	密度(3.16g/cm <sup>3</sup> )比表面積(3,280cm <sup>2</sup> /g)
BB	高炉セメントB種4000プレーン	密度(3.02g/cm <sup>3</sup> )比表面積(3,660cm <sup>2</sup> /g)
S	細骨材(海砂)	表乾密度(2.58g/cm <sup>3</sup> )吸水率(1.40%)
G	粗骨材(碎石)	表乾密度(2.67g/cm <sup>3</sup> )吸水率(1.14%)
AE減水剤	JIS A 6204 AE減水剤標準形(I種)	
AE剤	マイクロエア303A,785	

表-2 コンクリート配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							SL (cm)	Air (%)
			W	C	BB	S	G	AE減水剤	AE剤		
OPC	45	44	165	366	-	765	1007	5.4	1.5	8.0	3.5
	55	46		300	-	825	995	4.8	1.2	8.5	4.0
	65	48		255	-	877	984	3.9	1.0	8.0	3.5
BB	45	44		-	366	765	1007	5.6	1.5	8.0	4.0
	55	46		-	300	826	1003	4.6	1.1	8.0	5.0
	65	48		-	255	880	987	4.3	1.1	7.0	4.0

## 2.2 実験方法

### (1) 加圧法による透気係数の測定方法

透気係数の測定は、φ75×150mmの円柱供試体を用いて写真-1に示す試験機で行った。透気係数の測定方法は、供試体の打設面を研磨した後に、側面部からの空気の流れを防ぐために打設面と底面以外をアルミテープで被覆した後、図-1に示すメタル管の内部に供試体を設置し<sup>10)</sup>、メタル管と供試体の接触面の隙間をプチル製の両面テープでシールして行った。供試体の設置後は、コンプレッサから荷重圧力 P<sub>1</sub>=0.6MPa (kgf/cm<sup>2</sup>) の圧縮空気を注入して、水を張った容器とメスシリンダーを用いた水中置換法により透気量を1分間隔で測定していき、透気量の変動がなくなった時点で式(1)により、透気係数を算出した。また、透気係数の算出にあたっては、大気圧および気体の単位容積量は一定とし、それぞれ P<sub>2</sub>=1.0332MPa (kgf/cm<sup>2</sup>)、r=0.000001205 (kgf/cm<sup>2</sup>) を用いた。なお、28日間の水中養生を行った供試体のものは、測定時の含水率が他の養生法方法を経た供試体に比べて大きいため、養生終了後に温度20℃、湿度60%の環境下に7日間静置させて、透気係数の測定を行った。

$$K = \frac{2hP_2r}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

K:透気係数(cm/s) P<sub>1</sub>:荷重圧力(kgf/cm<sup>2</sup>)

P<sub>2</sub>:大気圧(kgf/cm<sup>2</sup>) h:試験体の厚さ(cm)

Q:透気量(cm<sup>3</sup>/sec) A:透気面積(cm<sup>2</sup>)

r:気体の単位容積量(kgf/cm<sup>2</sup>)



写真-1 透気量測定試験機

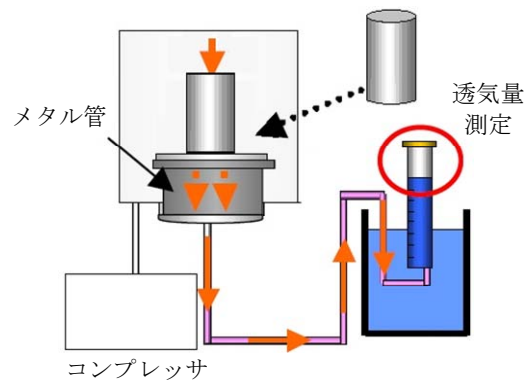


図-1 透気量の測定方法

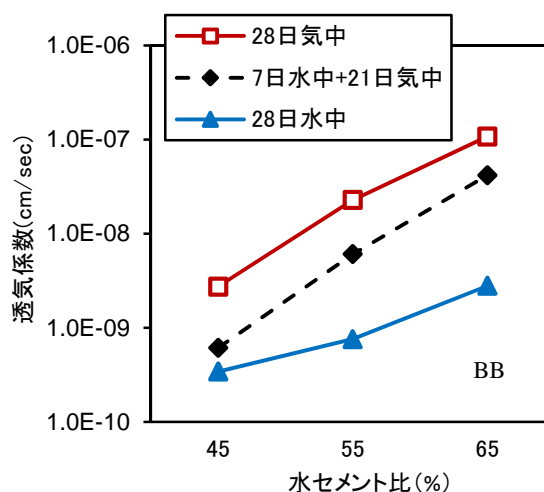
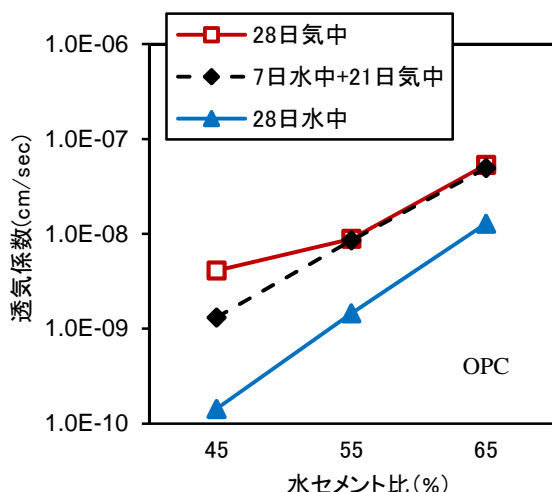


図-2 セメント種類における水結合材比ごとの透気係数

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、気中および水中養生を 28 日間行った  $\phi 75 \times 150\text{mm}$  の円柱供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。なお、供試体はいずれも配合ごとに 3 体作製しており、平均値を測定結果として表した。

(3) 中性化促進試験

中性化促進試験は、気中および水中養生を 28 日間行った  $\phi 75 \times 150\text{mm}$  の円柱コンクリートの打設底面を試験面として、それ以外をエポキシ樹脂で被覆したものを JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度  $5 \pm 0.2\%$  の環境で行った。その後、所定の促進期間として 30, 60, 90, 120, 150 日で供試体を割裂し、フェノールフタレイン液を噴霧して、呈色反応によって中性化深さを測定した。その後、中性化深さから  $\sqrt{t}$  則により中性化速度係数を算出した。

(4) 示差熱熱量 (TG-DTA) 分析

水酸化カルシウムの定量を測定するために、供試体の表面から 5mm 以降の粉末試料を採取した。その後、示差熱・熱重量同時測定装置(TG-DTA)を使用して測定を行った。水酸化カルシウムの含有率は、 $470 \sim 530^\circ\text{C}$  付近で脱水反応が発生するため、この範囲で DTA のピークから脱水反応域を読み取りその範囲の減量を求め、 $105^\circ\text{C}$  までの水分の脱水域を除いた総減量で除して算出した。

(5) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は、JIS A 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」および JSCE-G572「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの塩化物イオン拡散係数試験方法(案)」に準じて行った。供試体には、気中および水中養生を 28 日間行った  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を高さ 100mm 位置でカットし、切

断面以外をエポキシ樹脂で被覆したものを用いた。温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  環境下で 10%濃度の NaCl 溶液に 91 日間の浸漬を行い、その後はコンクリート用ドリルを用いて、試験面から深さ方向に 5mm 間隔で試料を 40mm 位置まで採取した。その試料を用いて電位差滴定装置により、全塩化物イオン量を測定し、表面から 10mm までの塩化物イオンを除いて、Fick の拡散方程式により見かけの塩化物イオン拡散係数を算出した。

(6) 電気泳動試験

電気泳動試験は、気中および水中養生を 28 日間行った  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の供試体を用いて、打設面から 100~150mm の部分を試験に使用した。円周面をエポキシ樹脂で被覆した後に、真空飽和处理を行い JSCE-G571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの塩化物イオン実効拡散係数試験方法」に準拠して行った。

3. 結果および考察

図-2 には、28 日間の気中養生および水中養生、水中養生 7 日間行った後に温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60% の環境下に 21 日間静置した各種供試体の水結合材比ごとの透気係数を示す。セメント種類に拘らず、いずれの養生条件においても水結合材比が大きくなるに従って、透気係数も大きくなる結果を示した。セメント種類の違いについてみると、OPC の透気係数は、28 日間の水中養生を行ったものが最も小さくなる結果を示した。7 日間の水中養生を行った後に 21 日間の気中養生を行ったものは、水結合材比 45% において、気中養生よりも小さくなっているが、水結合材比 55%、65% においては、明確な差は確認されなかった。一方、BB の透気係数は、養生条件ごとに差が明確に表れており、水中養生期間の長さの順で小さくなる結果を示した。また、水結合材比が大きくなるに従って、養生条件ごとの差が明確になる傾向を示している。

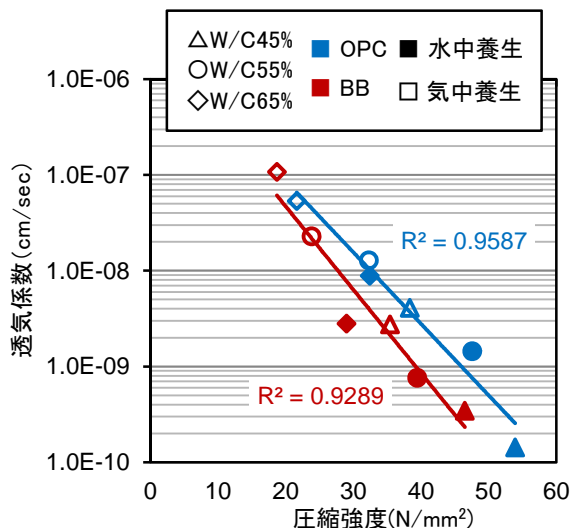


図-3 圧縮強度と透気係数との関係

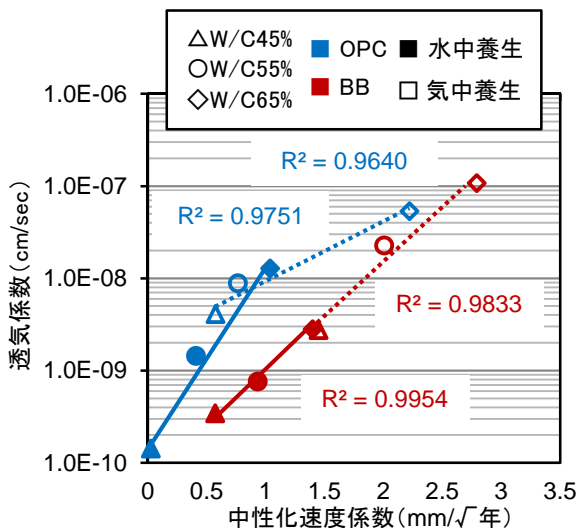


図-4 中性化速度係数と透気係数との関係

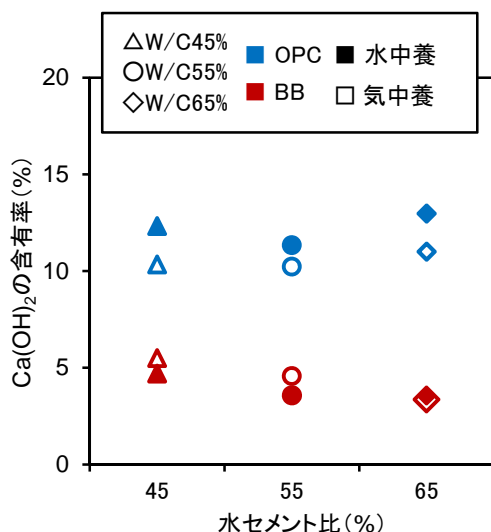


図-5 Ca(OH)<sub>2</sub>の含有率

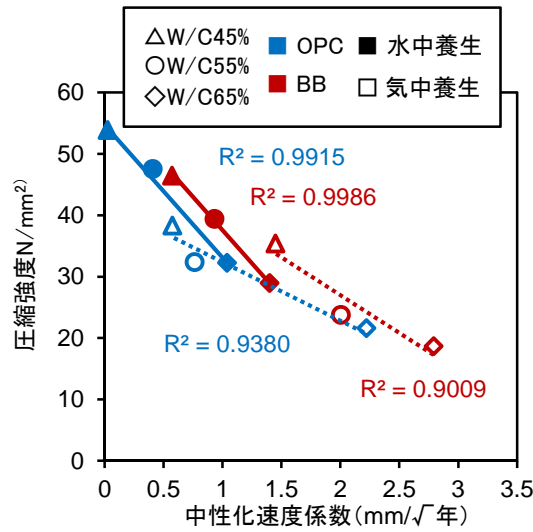


図-6 中性化速度係数と圧縮強度の関係

このことから、BBはOPCに比べると、同水結合材比における養生方法による透気係数の差が大きくなることが分かった。

図-3は、材齢28日における圧縮強度と透気係数との関係を示す。いずれのセメント種類においても透気係数は、養生条件や配合に拘らず、圧縮強度の増加に従って低下する結果を示した。透気係数と圧縮強度との関係性は、セメント種類ごとに見ると高い相関性が得られた。OPCの相関係数は、 $R^2=0.9587$ であったのに対し、BBの場合には、 $R^2=0.9289$ と幾分かOPCよりも小さかった。BBは、養生条件の違いによって、透気係数の差が明確になるため、この影響によって幾分かOPCよりも相関係数が小さくなったものと考えられる。

図-4は、中性化速度係数と透気係数の関係を示す。この結果、いずれのセメント種類においても透気係数が低下するに従って、中性化速度係数も低下している。ま

た、OPCとBBの透気係数が同等である場合には、OPCの中性化速度係数の方がBBに比べて、小さくなる結果を示している。これは、OPCの方がBBに比べて、セメントの絶対量が多いため、コンクリート内部に生成されたCa(OH)<sub>2</sub>量も多かったことが考えられる。セメント種類ごとに透気係数と中性化速度係数との関係性を見ると、OPCの場合には一律で相関性はなく、水中養生と気中養生ごとに、それぞれ相関性が確認されている。一方の、BBの場合には、養生の違いによって透気係数は、大きく変動するにも拘らず、一律で相関性が得られている。

そこで、図-5には、示差熱熱量分析によって測定したOPCおよびBBのCa(OH)<sub>2</sub>の含有率を示す。OPCのCa(OH)<sub>2</sub>の含有率は、養生条件の違いによって、いずれの水結合材においても2%程度の違いが見られた。これは、水中養生と気中養生とでは、水和の進行が大きく異なっているため、水和に伴って生成されるCa(OH)<sub>2</sub>の含

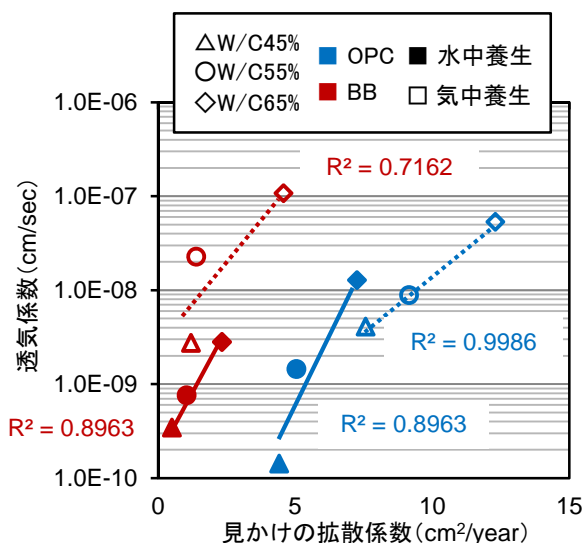


図-7 見かけの塩化物イオン拡散係数と透気係数の関係

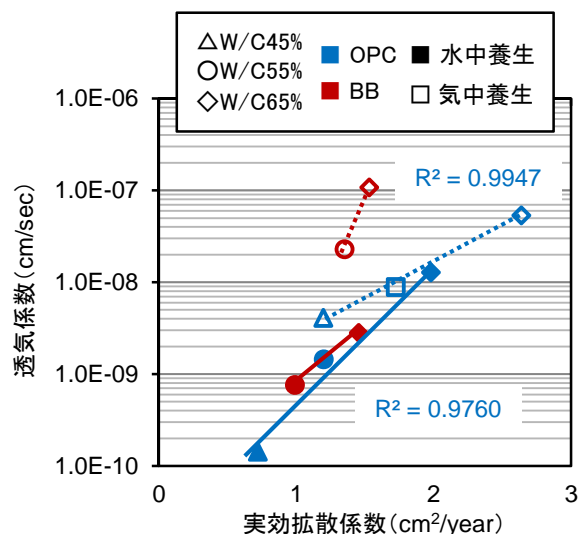


図-8 塩化物イオン実効拡散係数と透気係数の関係

有率に大きく差が生じたことによるものと考えられる。一方、BB の場合には、水結合材比や養生条件による  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の含有率の差は小さく、最大で 0.5% の違いであった。これは、OPC に比べるとセメント量が少ないことや、さらに潜在水硬性によってもコンクリート中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が消費されたものと考えられ、結果として、水結合材比や養生の違いに拘らず、透気係数と中性化速度係数との間に相関性が得られたものと考えられる。

図-6 には、中性化速度係数と圧縮強度の関係を示しているが、圧縮強度が高くなるに従って、中性化速度係数は小さくなる傾向を示しており、OPC、BB とも養生条件によって、その関係性は異なっている。図-4 に示した透気係数と中性化速度係数の関係性と比較すると、BB の中性化速度係数は、圧縮強度よりも透気係数の方が高い相関性が得られることが分かる。

以上のことから、透気係数によって中性化速度を推定する場合、OPC においては、養生条件やコンクリート中の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量等の影響を加味する必要があるが、BB の場合には、透気係数を測定することにより、配合や養生条件を考慮せずに中性化速度係数を推定できる可能性が示唆された。

図-7 は、見かけの塩化物イオン拡散係数と透気係数との関係を示す。いずれのセメント種類においても透気係数の低下に従って、見かけの塩化物イオン拡散係数も低下する結果を示した。OPC、BB とも同一の養生条件の場合には、相関性が確認された。また、BB の見かけの塩化物イオン拡散係数は特に小さく、気中養生を行った場合でも遮塩性は極めて高い。一方、BB の塩化物イオンの浸透は、物理的な移動よりも電荷的な塩化物イオンの吸着や固定化による化学的な要因が支配的であるこ

とが分かる。

以上のことから、透気係数によって見かけの塩化物イオン拡散係数を推定する場合には、少なくともセメントの種類や養生条件を考慮に入れる必要がある。

図-8 は、塩化物イオン実効拡散係数と透気係数との関係を示す。低水結合材比における BB の塩化物イオンに対する物質移動抵抗性は極めて高いため、試験を継続して行っているが、これまでのところ結果が得られていない。図-8 に示した結果の範囲において、セメント種類に拘らず、水中養生を行ったものは、透気係数とイオン実効拡散係数との間に高い相関性が確認されたのに対し、気中養生を行ったものは、セメント種類によって透気係数と塩化物イオン実効拡散係数の関係性は異なる傾向を示している。これは、乾燥状態から真空飽和处理を行う過程、あるいは、電気泳動試験の過程で未反応セメントに再水和が生じたことにより緻密化していると考えられ、電気泳動試験前後での透気係数が異なっている可能性が考えられる。そのため、気中養生を行ったものは、水中養生において認められた関係性よりも全体的に透気係数が大きいところで関係性が得られたものと考えられる。

今回の結果からは、透気係数によってセメント種類を考慮せずに塩化物イオン実効拡散係数を推定できる可能性が示唆されたが、この点についての明確な答えは未だなく、明らかにしていく予定である。

#### 4. まとめ

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリートに対して、加圧法により透気係数を測定し、セメント種類や配合、養生条件の違いが透気係

数に及ぼす影響や圧縮強度，中性化速度係数，塩化物イオンの拡散係数との関係性について検討した結果，以下のことが明らかとなった。

- (1) 透気係数と圧縮強度の関係性は，セメント種類ごとに見ると，相関性が確認された。
- (2) 透気係数と中性化速度係数との関係性は，OPC の場合には一律で相関性はなく，水中養生と気中養生ごとに，それぞれ相関性が確認された。一方の，BB の場合には養生の違いに拘らず，一律で相関性が確認された。
- (3) BB の中性化速度係数は，圧縮強度よりも透気係数を用いた方が，精度よく評価できる可能性が示唆された。
- (4) 透気係数と見かけの塩化物イオン拡散係数の関係性は，セメント種類や養生条件ごとに相関性が確認された。
- (5) 水中養生によって十分に水和が進行しているコンクリートに対しては，セメント種類に関係なく，透気係数と塩化物イオン実効拡散係数の間に相関性が確認され，透気係数によって塩化物イオン実効拡散係数を推定できる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 下澤 和幸・今本 啓一・山崎 順二・永山 勝：鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連についてコンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009.7
- 2) 山崎 順二・今本 啓一・下澤 和幸・永山 勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによるRC 構造体の耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009.7
- 3) 岡崎慎一郎・八木翼・岸利治・矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.60，pp.227-234，2006.7
- 4) 小野聖久・上東 泰：非破壊試験による密実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察，土木学会第60 回年次学術講演会，2006.9
- 5) 豊福俊泰・白川敏夫・佐藤武夫：構造物中コンクリートの耐久性の非破壊検査法に関する研究
- 6) 下澤 和幸・永山勝・今本啓一・山崎順二・二村誠二：かぶりコンクリートの耐久性性能評価に関する簡易試験法の開発，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 (2006)JSNDI
- 7) 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
- 8) 櫛原弘貴，武若耕司，山口明伸，添田政司，濱田秀則：けい酸塩系表面含浸材の表層品質改善効果が透気係数に与える影響に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集報告集，第11 巻，p329-336，2011.10
- 9) 伊代田岳史・檀康弘・川端雄一郎・濱田秀則：高炉コンクリートの耐久性における養生敏感性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008.7
- 10) 櫛原 弘貴，武若 耕司，山口 明伸，白澤 直：ケイ酸塩系表面含浸材塗布コンクリートの物質移動特性に関する基礎的研究，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，第9 巻，p139-144，2009.5