

# 論文 セメント硬化体の水分移動特性・水分保持特性に与える炭酸化の影響

中田 清史\*1・鹿毛 忠継\*2・松沢 晃一\*1・兼松 学\*3

**要旨:** セメント硬化体の炭酸化がその水分移動特性・水分保持特性に与える影響を明らかにすることを目的として実験を行った。普通セメント, 高炉セメントを用いて 5mm 厚の円盤試験体を作製し, 水分拡散係数, 平衡含水率, 空隙率, 比表面積等が炭酸化する前後でどのように変化するかを比較検討した。実験の結果, 平衡含水率曲線は十分に炭酸化させた場合, セメント種によらず同様の曲線形状を示した。また, 炭酸化には水分拡散係数の増加・低下両方の作用があり, 飽水状態から 85.1%RH 平衡状態までの脱水量等から定義される毛管空隙量を用いればセメント種や炭酸化度合いによらず同一の関係式で評価できることが示された。

**キーワード:** セメント硬化体, 炭酸化, 水分拡散係数, 平衡含水率, 空隙構造

## 1. はじめに

コンクリートの中酸化(炭酸化)に伴う鉄筋腐食は多くの鉄筋コンクリート造建築物に共通する劣化現象であり, その進行には鉄筋近傍の水分状態が大きな影響を及ぼす。ただし, この種の鉄筋腐食はかぶりコンクリートが炭酸化して以降生じると考えられることから, コンクリートが炭酸化して以降の水分移動特性・水分保持特性を適切に把握することが重要と考えられる。

セメント系材料の物質移動抵抗性は炭酸化に伴って変化することが知られている<sup>1),2)</sup>。しかし, 水分移動特性に与える炭酸化の影響については十分な研究がなされておらず<sup>3),4)</sup>, 水分移動速度を決定づける物性値(水分拡散係数や透湿度)がどのような条件で上昇, あるいは低下するかについて明確な見解は見られない。

水分移動特性の変化は, 炭酸化によってセメント硬化体内の相組成が変化し, 物質の拡散経路となる空隙が構造変化を起こすために生じると考えられる<sup>1),5),6)</sup>。従って, 水分移動特性に与える炭酸化の影響度合いを明らかにするとともに, これを空隙構造に基づいて評価可能となれば炭酸化後の水分移動特性の変化を予測することができるものと考えられる。

そこで本研究では, まず, セメント硬化体の炭酸化がその水分移動特性・水分保持特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。これと併せて, 空隙構造に関わる物性値等を取得し, これらに基づいて炭酸化に伴う水分移動特性変化を評価することを目的とする。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体作製

市販の普通ポルトランドセメント(OPC)および高炉スラグ微粉末(BFS)を用いてセメントペーストを作製

した。水粉体比および置換率は2×3水準とし, それぞれ調合と対応する記号は表-1に示す通りである。作製したペーストは練混ぜ後定期的に練返しを行い, ブリーディングが十分に少なくなった時点でプラスチック製型枠(φ50mm×100mm)に打込んだ。打込み後24時間経過した時点で脱型し, 材令103日となるまで20℃水中にて養生を行った。

養生後の円柱試験体を用いて5mm厚の円盤試験体を作製した。これは試験体を速やかに炭酸化させるためであり, 養生後の円柱試験体をファインカッターにて切断し研磨機で両切断面を研磨することで作製した。また, 円盤試験体の作製にあたっては, 打込み方向に生じるセメント硬化体品質の偏りを可能な限り排除することを目的として, 円柱上面及び底面からそれぞれ15mmの部分は切り落とし, 中央70mmの部分を用いることとした。

### 2.2 促進炭酸化・乾燥

円盤試験体は整形後, 促進中性化槽(CO<sub>2</sub>濃度5%, 温湿度20℃/60%RH)にて炭酸化させた(c試験体)。また, 炭酸化の影響を比較するため, 一部の試験体は炭酸化させずNaBr飽和水溶液(目標湿度59.1%RH)で調湿したデシケーター内で乾燥させた(nc試験体)。このデシケーターは恒温室(20℃)に静置しており, 乾燥過程で生じる炭酸化を防ぐためCO<sub>2</sub>吸収材(主成分:Ca(OH)<sub>2</sub>)を用いてデシケーター内のCO<sub>2</sub>を除去している。炭酸化・

表-1 調合(重量比)および記号<sup>注)</sup>

	N45	N60	BB45	BB60	BC45	BC60
水	0.45	0.60	0.45	0.60	0.45	0.60
OPC	1.00	1.00	0.55	0.55	0.35	0.35
BFS	0.00	0.00	0.45	0.45	0.65	0.65

注) 炭酸化させた試験体は末尾にc, 炭酸化させていない試験体は末尾にncと標記する。

\*1 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 工博 (正会員)

\*2 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ Ph.D. (正会員)

\*3 東京理科大学 工学部建築学科 工博 (正会員)

乾燥開始からそれぞれ 28 日間経過した時点ですべての試験体を取り出し次項の測定に供した。

### 2.3 測定項目

#### (1) 熱重量分析

試験体の炭酸化度合いを測定するため、熱重量分析を昇温速度 10°C/min.で行い、Ca(OH)<sub>2</sub>および CaCO<sub>3</sub>の含有量を測定した。ここで、それぞれの生成物の分解は 400~550°C、550~800°C付近で生じる dtg 曲線の変曲点から判断し、この間に生じた重量減少量から含有量を算出した。

分析用の試料は円盤試験体をメノウ乳鉢で粉末とし、63μm 目のふるいでふるったものを用いた。また、前処理として CO<sub>2</sub>を除去したデシケーター (20°C, 11%RH) 内で 1 週間乾燥させている。

#### (2) 空隙構造

空隙構造の変化を比較する指標として、飽水時の含水率および比表面積を測定した。飽水時の含水率は以下の式を用いて算出した。

$$w_m = (m_s - m_{105})/m_{105} \quad (1)$$

$$w_v = (m_s - m_{105})/\rho_w(m_s - m_w) \quad (2)$$

ここに、 $w_m$  : 質量含水率(g/g)、 $m_s$  : 真空脱気下で 4 時間吸水させた後の質量(g)、 $m_{105}$  : 105°C下で 24 時間乾燥させた後の質量(g)、 $w_v$  : 体積含水率(g/cm<sup>3</sup>)、 $\rho_w$  : 水の密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $m_w$  : 水中質量(g)。

比表面積は 11.3, 23.1, 33.1%RH における吸着量から BET 多点法により算出した。吸着量の測定には円盤試験体を砕いて粉末としたものを用い、105°C下で乾燥させた際の質量を基準とした。吸着の期間は 3 週間とし、試験に用いたデシケーターは予め CO<sub>2</sub>を除去したうえで飽和塩法により調湿した (表-2)。

また、上記と併せて平衡含水率曲線 (脱着等温線) も取得した。試験体は円盤を砕き 3~4g 程度 (2cm×2cm 程度) の小片としたものを用いた。これを真空脱気下で吸水させ、その後飽和塩法により (表-2) 調湿したデシケーター内で 3 週間静置し、その時点での質量含水率を 105°C乾燥質量を基準に算出した。ここで、乾燥期間については、過去の報告から薄板セメント硬化体 (厚さ 4~10mm) は 2~4 週程度で恒量に至ると考えられる (例えば<sup>7)</sup> ことから 3 週間としている。

#### (3) 水分拡散係数

水分拡散係数は非定常法<sup>8),9)</sup>により測定することとした。支配方程式は式(3)に示す一次元拡散方程式であり、

表-2 各飽和塩水溶液に対する湿度 (%RH)

塩化リチウム	酢酸カルシウム	塩化マグネシウム	酢酸カルシウム	臭化ナトリウム	ヨウ化カルシウム	塩化ナトリウム	塩化カルシウム
11.3	23.1	33.1	43.1	59.1	69.9	75.4	85.1

式(4)によって Boltzmann 変換を行う。式(5)の実験定数を後述する実験で求め、式(6)により各相対含水率における水分拡散係数を算出した。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D(R) \frac{\partial R}{\partial x} \quad (3)$$

$$\lambda = x/\sqrt{t} \quad (4)$$

$$R = 1 - a/(\lambda + b)^2 \quad (5)$$

$$D(R_1) = -\frac{1}{2} \cdot \int_{100}^{R_1} \lambda dR / \frac{dR}{d\lambda} \quad (6)$$

ここに、 $R$  : 相対含水率、 $t$  : 時間、 $x$  : 表面からの位置、 $D$  : 相対含水率を駆動力とする水分拡散係数、 $\lambda$  : Boltzmann 変数、 $R_1$  : 任意の相対含水率、 $a, b$  : 実験定数。

式(5)の実験定数  $a, b$  を求めるにあたっては、円盤試験体を重ね合わせた試験体を作製し一面乾燥試験を行った。この試験体は、真空脱気下で吸水させ飽水状態としておいた円盤試験体を 10 枚重ね合わせており、側面および底面をラップ、アルミテープでシールしている。この試験体を 20°C、60%RH に調整した恒温恒湿槽において 1, 3 週間乾燥させ、円盤試験体の含水率を測定することで各試験体の含水率分布を取得した。なお、 $a, b$  は試験で得られた含水率分布と最小二乗法を用いて算出した。また、含水率の測定は(2)項の方法によった。

## 3. 結果

### 3.1 炭酸化度合い

図-1 に炭酸化前後の Ca(OH)<sub>2</sub> 量を、図-2 に炭酸化後の CaCO<sub>3</sub> 量を示す。図-2 については、式(7)~(9)に基づいて初期 CaCO<sub>3</sub> 量 ( $n_{CC}^{initial}$ )、Ca(OH)<sub>2</sub> 由来の CaCO<sub>3</sub> 量 ( $n_{CC}^{CH}$ )、その他の相由来の CaCO<sub>3</sub> 量 ( $n_{CC}^{others}$ ) に分けて示している。

$$n_{CC}^{initial} = n_{CC,nc} \quad (7)$$

$$n_{CC}^{CH} = n_{CH,nc} - n_{CH,c} \quad (8)$$

$$n_{CC}^{others} = n_{CC,c} - n_{CC}^{CH} - n_{CC}^{initial} \quad (9)$$

ここに、 $n_{CC,nc}$  : nc 試験体における CaCO<sub>3</sub> 量(mmol/g)、 $n_{CH,nc}$  : nc 試験体における Ca(OH)<sub>2</sub> 量(mmol/g)、 $n_{CH,c}$  : c 試験体における Ca(OH)<sub>2</sub> 量(mmol/g)、 $n_{CC,c}$  : c 試験体における CaCO<sub>3</sub> 量(mmol/g)。

まず、Ca(OH)<sub>2</sub> 量については BC45 を除くすべての試験体で炭酸化によってその含有量は減少しているが完全に失われることはなく、炭酸化前に比して 50%以上が残存する結果となっている。一方、CaCO<sub>3</sub> 量を見ると初期値よりも炭酸化後の方が増加しており、その由来の多くは Ca(OH)<sub>2</sub> 以外の相であることが分かる。このことから、本研究の実験条件においては Ca(OH)<sub>2</sub> はほとんど炭酸化せず、代わりに CSH 等を含むその他の相の炭酸化が進んだと考えられる。

通常、セメント硬化体の炭酸化は Ca(OH)<sub>2</sub> の反応が先

に終息し、その後はその他の相のみが反応するものと考えられる<sup>10)</sup>。Ca(OH)<sub>2</sub>の反応が終息する際の反応率は、炭酸化時の外部湿度に強く依存し、低湿度ほどその値は小さくなる<sup>11)</sup>。本研究では試験体寸法が比較的小さく乾燥が進みやすかったためにCa(OH)<sub>2</sub>の炭酸化が進まなかったものと考えられる。一方、CSHが形成する微細な空隙中には乾燥後においても液水が存在すると考えられ、その結果、その他の相の炭酸化のみが進行したと考えられる。

また、上記のような炭酸化性状は通常の試験結果とは異なる(Ca(OH)<sub>2</sub>が多く残存している)ために、炭酸化後の水分移動特性や空隙構造も通常とは異なる傾向を示す可能性がある。しかしながら、本研究の主目的の一つである空隙構造変化と水分移動特性変化の関係を評価するという意味では炭酸化性状の違いは大きな影響を与えないと考えられ、通常のようにCa(OH)<sub>2</sub>が先行して炭酸化する場合も含めて水分移動特性の変化を予測することも可能であると考えられる。

### 3.2 含水率・比表面積

表-3、表-4、に nc, c 試験体の質量含水率、体積含水率をそれぞれ示す。いずれの試験体も炭酸化によって含水率が低下しており、これは炭酸化反応によって生成したCaCO<sub>3</sub>がセメント硬化体内の空隙に充填された結果と考えられる。

表-5 に nc, c 試験体の比表面積を示す。比表面積についても炭酸化に伴って低下し、十分に炭酸化が進行したと考えられる N や BB60, BC60 ではその値が半分程度にまで低下していることが分かる。この結果は既往の実験結果<sup>9)</sup>とも符合し、炭酸化に伴う空隙構造の粗大化を表しているものと考えられる。

### 3.3 平衡含水率・空隙構造

図-3 に等温脱着試験から得られた平衡含水率曲線を示す。図では質量含水率として示しており、nc 試験体についてはセメント種類ごとに同様の形状の曲線となっている。一方、炭酸化を受けると各湿度における平衡含水率は低下し、CaCO<sub>3</sub>量が比較的多かった N や BB60, BC60 についてはセメント種類によらず同様の形状を示していることが分かる。この点についても OPC を対象として炭酸化後の平衡含水率を測定した結果<sup>9)</sup>と同様である。

また、85.1%RH から 100%RH (飽水状態)までの高湿度域に着目すると、炭酸化後によってその勾配が大きくなっていることが分かる。このことは、Kelvin 半径数 nm 程度以上の毛管空隙の割合が増加していることを示唆するものであり、比表面積の結果と同様に炭酸化に伴って空隙構造の粗大化が生じているものと考えられる。

図-4 に固相および空隙の体積割合を示す。この図は先の平衡含水率曲線(図-3)と体積含水率(表-4)か

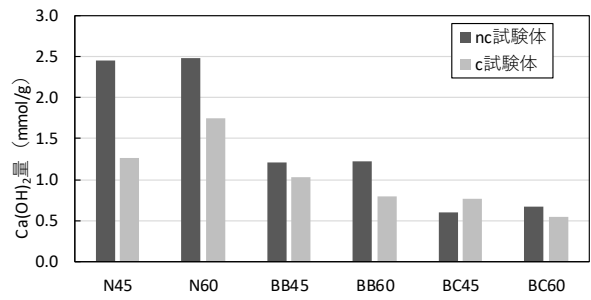


図-1 Ca(OH)<sub>2</sub>量の変化

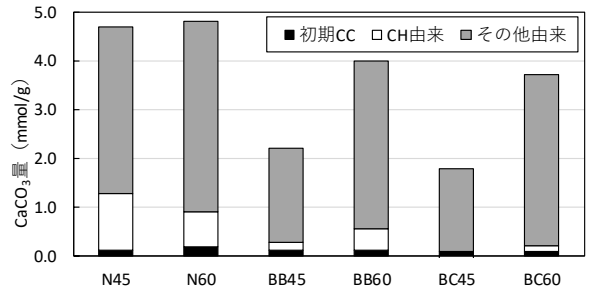


図-2 炭酸化後の CaCO<sub>3</sub>の割合 (初期 CC:  $n_{CC}^{initial}$ , CH 由来:  $n_{CC}^{CH}$ , その他由来:  $n_{CC}^{others}$ )

表-3 質量含水率の変化 (g/g)

	N45	N60	BB45	BB60	BC45	BC60
nc	0.298	0.339	0.327	0.364	0.334	0.395
c	0.185	0.224	0.268	0.229	0.279	0.244

表-4 体積含水率の変化 (g/cm<sup>3</sup>)

	N45	N60	BB45	BB60	BC45	BC60
nc	0.426	0.462	0.453	0.484	0.465	0.508
c	0.325	0.368	0.410	0.377	0.429	0.388

表-5 比表面積の変化 (cm<sup>2</sup>/g)

	N45	N60	BB45	BB60	BC45	BC60
nc	153	132	212	193	194	192
c	77	72	141	104	147	106

ら求めており、空隙率については飽水時の体積含水率とし、毛管空隙率 $\phi_{cap}$ については「飽水状態から 85.1%RH 平衡状態までに失われた液水の割合」と定義し<sup>1)</sup>、以下の式に基づいて算出した。

$$\phi_{cap} = w_V \cdot (w_V - w_{85.1}) / w_V \quad (10)$$

ここに、 $w_{85.1}$ : 85.1%RH における質量含水率(g/g)。

図からセメント硬化体の体積に占める全空隙の割合は低下しているものの、毛管空隙率は炭酸化に伴って増加していることが確認できる。既往の研究<sup>1)</sup>によれば OPC のみの系では空隙構造が小径化し BFS を用いた系では粗大化するとの報告がある。本研究の実験条件にお

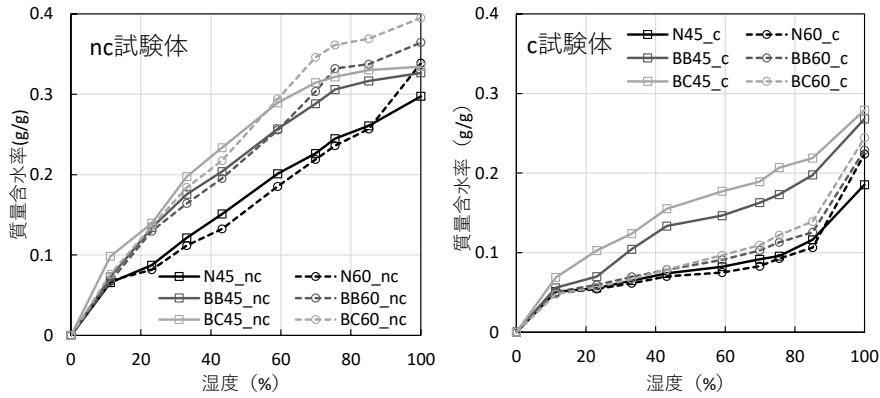


図-3 平衡含水率曲線に与える炭酸化の影響 (100%RH は飽水状態を表す。)

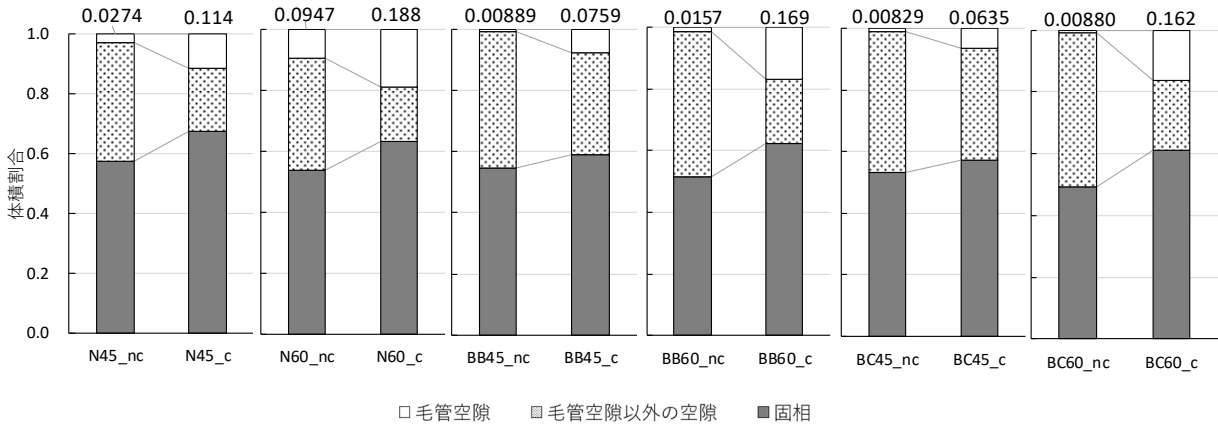


図-4 固相および空隙の体積割合の変化 (毛管空隙：飽水状態~85.1%RH までの脱水量から定義)

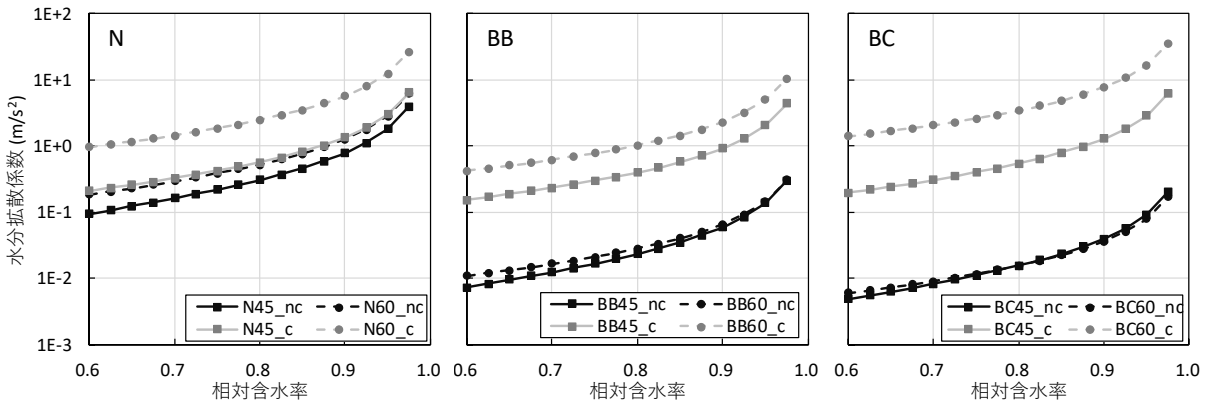


図-5 水分拡散係数に対する炭酸化の影響

いてはすべての調合において空隙構造が粗大化する結果となっているが、粗大化の程度はBFSを混和した系で顕著に表れていると考えられる。

### 3.4 水分拡散係数

図-5に水分拡散係数の算出結果を示す。また、表-6には得られた実験定数 a, b および決定係数を示す。nc 試験体の水分拡散係数はセメント種ごとに大きく異なり、BFSの置換率が増加するほど拡散係数が小さくなる傾向が確認できる。一方、c 試験体はいずれの調合においても nc 試験体より水分拡散係数が増大し 10~100 倍程度の

表-6 水分拡散係数に関する実験定数, 決定係数

	nc 試験体			c 試験体		
	a	b	R <sup>2</sup>	a	b	R <sup>2</sup>
N45	0.240	1.06	0.936	0.376	1.07	0.793
N60	0.361	1.12	0.709	1.52	1.91	0.869
BB45	0.0180	0.284	0.975	0.250	0.801	0.874
BB60	0.0176	0.210	0.970	0.587	1.01	0.943
BC45	0.0121	0.236	0.971	0.363	1.07	0.964
BC60	0.00979	0.159	0.980	1.97	1.88	0.707

値となっていることが分かる。上記のような変化は、**図-4**で炭酸化によって毛管空隙の割合が増加していることと対応しているものと考えられる。

また、上記の傾向を既往研究と比較すると、BFSを用いた系では炭酸化によって透湿度が増大することが報告されており<sup>3)</sup>、本研究の結果もこれに符合しているものと考えられる。一方、OPCのみの系では、炭酸化によって透湿度が低下することが報告されており<sup>3)</sup>この点は本研究とは相違している。ただし、乾燥の進行しやすい高水セメント比の調合の場合には透湿度や拡散係数が増大することも報告されている<sup>4)</sup>。本研究においては試験体の乾燥が進みやすくCa(OH)<sub>2</sub>は炭酸化せず、その他の相のみ炭酸化が進んだと考えられる(**図-2**)。この結果として空隙構造の粗大化が生じ拡散係数の増大につながったものと考えられる<sup>9)</sup>。この点については次章でさらに考察を加えることとする。

#### 4. 考察

##### 4.1 水分拡散係数と空隙構造変化

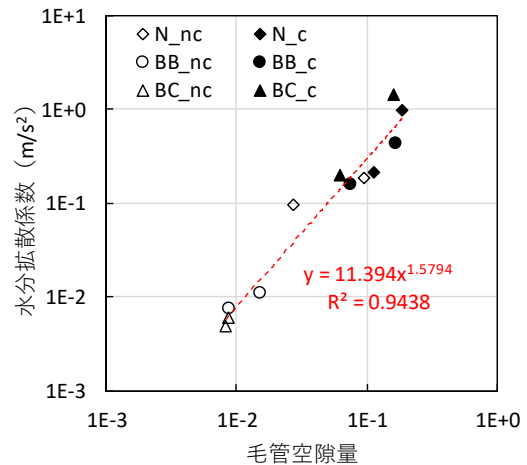
**図-5**でも示されているように水分拡散係数は相対含水率に対して相似形の曲線をとることが知られている。秋田ら<sup>8)</sup>は相対含水率100%における拡散係数を基準とした場合に、この曲線がおおむね同一の式で示せることを指摘している。また、丸山ら<sup>9)</sup>は相対含水率60%における拡散係数 $K_{60}$ (化学ポテンシャルを駆動力とする)を基準として同様の傾向を確認するとともに、 $K_{60}$ の大小関係を統計的吸着厚さ(質量含水率や比表面積を用いた指標)から評価する手法を提案している。

本研究では相対含水率60%における拡散係数の大小関係を空隙構造の観点から評価することを考える。セメント硬化体中の水分移動は乾燥過程を対象とした場合には水蒸気拡散によるものと考えられ、セメント硬化体内の水蒸気拡散はその体積に占める粗大な空隙の割合に支配的な影響を受けると考えられる。実際、本研究の実験結果においても試験体も炭酸化に伴って毛管空隙量 $\phi_{cap}$ が増加し、これに対応する形で水分拡散係数も増大する結果となっていた。そこで、以下では毛管空隙量を空隙構造を表す指標として採用し水分拡散係数を評価することとした。

**図-6**に毛管空隙量と水分拡散係数の関係を示す。図から両者には正の相関が見られ、その決定係数は極めて高いことが確認できる。また、その関係式はセメント種類や水粉体比、炭酸化に関係なく同一の式で表すことができると考えられる(式(11))。

$$D_{60} = 11.4\phi_{cap}^{1.58} \quad (11)$$

ここに、 $D_{60}$ :相対含水率60%における水分拡散係数。  
このことは、対象とするセメント硬化体の毛管空隙量を



**図-6** 毛管空隙量と相対含水率60%時の水分拡散係数

炭酸化過程、炭酸化終息後に渡って予測できる可能性を示しているものと考えられる。

##### 4.2 水和生成物の炭酸化と水分拡散係数

以下では、空隙構造変化に与える水和生成物の炭酸化の影響について整理するとともに、これが水分移動特性変化に与える影響について考察を加える。**図-4**でも示されている通り、セメント硬化体の炭酸化は全体の空隙率を減少させると同時に、粗大な空隙の割合を増加させると考えられ、このような作用の結果として炭酸化後のセメント硬化体の水分移動特性が決まると考えられる。

まず、空隙率が低下する作用については、炭酸化反応前よりも反応後の方が固相体積が大きいため生じると考えられる。理論上、Ca(OH)<sub>2</sub>の炭酸化がこれに寄与すると考えられ、近年ではCSH炭酸化の寄与も実験的に確認されている<sup>10)</sup>。空隙率の低下は物質移動抵抗性の向上につながると考えられることから、Ca(OH)<sub>2</sub>およびCSHを含むその他の相の炭酸化は水分拡散係数を低下させる作用があると言える。一方、空隙の粗大化については、セメント硬化体が有する微細な空隙が炭酸化によって失われることで生じると考えられる。この主たる要因はCSHがCa<sup>2+</sup>を失うことで生じる構造変化であり<sup>6)</sup>、拡散経路の減少等の結果として水分拡散係数は上昇すると考えられる。以上を踏まえると、Ca(OH)<sub>2</sub>の炭酸化は拡散係数の低下に寄与するが、その他の相の炭酸化は拡散係数の上昇と低下両方に寄与すると考えられる。本研究の実験結果は、Ca(OH)<sub>2</sub>が十分に炭酸化せず拡散係数を低下させる作用が働かなかったと考えられ(**図-1**)、**図-5**に示される測定値は既往の研究よりも大きい値になっていると考えられる。

また、**図-1**と**図-4**を比較すると、N45、N60、BB60、BC60についてはその他の相由来のCaCO<sub>3</sub>量がいずれも3.5mmol/g前後で同程度であるのに対し、空隙粗大化の程度はBBやBCにおいてより顕著に表れている。これ

はNとBB, BCとでは生成する水和物の種類やその組成が異なり, その結果として空隙構造変化への寄与率も異なる可能性を示唆するものである。特にCSHのCa/Si比はBFS混和の有無により大きく異なることから, CSHの初期Ca/Si比と炭酸化時の空隙構造変化への寄与率との関係については今後詳細な検討を要すると考えられる。

#### 4.3 実環境における炭酸化との関連性

実環境と促進環境とで大きく異なる点はCO<sub>2</sub>濃度にあると考えられる。Castelloteら<sup>12)</sup>はCO<sub>2</sub>濃度が高いほどCSHの分解が進むことを実験的に示しており, このことは促進環境下においては空隙構造の粗大化や物質移動抵抗性の低下が生じやすいことを示唆している。本研究においても上記の影響が毛管空隙量増加や水分拡散係数上昇として現れたものと考えられる。このことに加え, 前項で述べたようにBFSを含む系ではOPCに比べ空隙構造粗大化の影響を受けやすい可能性がある。促進環境においてBFSの耐久性を評価しようとする場合, 実環境において生じ得ない現象が顕著に表れやすいことは留意すべきであると考えられる。

上記のように外部環境に起因する水和生成物の炭酸化性状の違いは水分移動特性等の耐久性に関わる特性値に影響を及ぼす。本研究で示した式(11)に加えて, 水和生成物炭酸化と空隙構造変化の関係を明らかにできれば, 様々な環境におけるセメント系材料の長期的な耐久性評価に寄与すると考えられる。

#### 5. まとめ

セメント硬化体の水分移動特性・水分保持特性に与える炭酸化の影響を明らかにし, この影響の大きさを空隙構造に基づいて評価することを目的としてセメント硬化体(OPC, BFS)を用いた実験を行った。実験の結果得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究の実験条件においては, Ca(OH)<sub>2</sub>の炭酸化は最大でも50%程度しか進行せず, CSHを含むその他の相の炭酸化が進行した。これは乾燥後の水分の存在形態が関係しているものと考えられる。
- (2) いずれの試験体も全体の空隙量は減少したものの毛管空隙量(飽水状態から85.1%RH間の脱水量で定義される粗大な空隙の割合)は増加した。
- (3) 炭酸化によって比表面積は炭酸化前の50%程度まで低下した。また, 炭酸化後の平衡含水率曲線は炭酸化前よりも下側にシフトし調合によらず同様の形状となる可能性を示した。
- (4) 水分拡散係数は未炭酸化の場合はOPCのみよりもBFSを用いた方が小さくなる。一方, 炭酸化した場合にはいずれの試験体も炭酸化前に対して10~100倍程度大きくなる結果となった。また, 相対含水率60%に

における拡散係数の大小関係が, セメント種や炭酸化の有無に関係なく毛管空隙量によって評価できることを示した。

#### 参考文献

- 1) V. T. Ngala and C. L. Page: Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 27, No. 7, pp. 995–1007, 1997.
- 2) 白川敏夫, 島添洋治, 九谷和秀: モルタルを用いた場合の気体拡散性状への炭酸化の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 636, pp. 193–199, 2009.
- 3) M. Auroy *et al.*: Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 74, pp. 44–58, 2015
- 4) G. Villain and M. Thiery: Impact of carbonation on microstructure and transport properties of concrete,” in *10th International Conference on Building Materials and Components*, 2005, No. April.
- 5) Y. F. Houst and F. H. Wittmann: Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> through hydrated cement paste, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 24, No. 6, pp. 1165–1176, 1994.
- 6) 小島彩, 吉田泰崇, 佐伯竜彦, 斎藤豪: C-S-Hの炭酸化が物質移動性状に及ぼす影響の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol. 71, No. 1, pp. 133–139, 2017.
- 7) 近藤実: 硬化セメントペースト中の水の形態と水分の拡散を考慮した乾燥収縮の関係, セメント技術年報, Vol. 12, pp. 136–149, 1958.
- 8) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂 芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, Vol. 1994, No. 490, pp. 101–110, 1994
- 9) 丸山一平, 五十嵐豪, 岸直哉: セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 668, pp. 1737–1744, 2011
- 10) A. Morandea, M. Thierry, and P. Dangla: Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties, *Cem. Concr. Res.*, Vol. 56, pp. 153–170, 2014.
- 11) I. Galan, F. P. Glasser, D. Baza, C. Andrade: Assessment of the protective effect of carbonation on portlandite crystals, *Cem. Concr. Res.*, vol. 74, pp. 68–77, 2015.
- 12) M. Castellote, L. Fernandez, C. Andrade, and C. Alonso, “Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations,” *Mater. Struct.*, Vol. 42, No. 4, pp. 515–525, 2009.