

論文 高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の酸素の拡散性状に及ぼす乾燥湿度の影響に関する研究

須田 裕哉*1・河野 伊知郎*2・斎藤 豪*3・佐伯 竜彦*4

要旨: 本研究はセメント硬化体への気体の拡散性状に及ぼす乾燥湿度の影響について、水結合材比や高炉スラグ微粉末の置換率の異なる供試体を用いて酸素の拡散実験より検討を行った。その結果、各湿度で乾燥させた供試体の酸素の拡散係数は、高炉スラグ微粉末の置換によって小さくなった。また、酸素の拡散係数より、空隙構造特性である屈曲度を評価し水分が存在していない開放空隙率で整理した結果、開放空隙率の増加により屈曲度は小さくなった。一方で、高炉スラグ微粉末を置換した硬化体では、同一の開放空隙率において、無置換の供試体に比べ屈曲度は大きく、これは乾燥により水和物の構造変化が要因として示唆された。

キーワード: 乾燥湿度、酸素の拡散係数、空隙構造、屈曲度、高炉スラグ微粉末、水和物

1. はじめに

コンクリート構造物は、供用期間中に日射や風雨といった乾湿の影響を受けるため、コンクリートの空隙内部の含水状態は変化する。外来物質である塩化物イオンや二酸化炭素は、コンクリート内部の空隙を介して侵入、拡散するため、劣化要因であるイオンや気体の移動性状は、コンクリートの乾燥状態に大きく影響される。

また、循環型社会の実現の観点から、産業副産物である高炉スラグ微粉末の有効利用が進められている。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高い物質移動抵抗性を有しているものの、空隙構造の変化が物質移動性状にどのような影響を及ぼすのかは未だ明らかではない。

乾燥の影響を受けたセメント硬化体への物質移動性状の検討として白川ら¹⁾は、広範な湿度で乾燥させたセメント硬化体に対して酸素の拡散実験を行い、湿度領域の変化や水分量変化により酸素の拡散係数は大きく異なることを明らかにした。また、セメント硬化体への気体の拡散性状は、空隙の屈曲性や空隙の連続性などが影響することが報告されている^{2),3)}。しかし、高炉スラグ微粉末を使用し乾燥湿度の影響を受けたセメント硬化体の気体の拡散性状に関する検討は少なく、高炉スラグ微粉末を置換したセメント硬化体の酸素の拡散係数と空隙構造の関係に関する定量的な評価には至っていない。

そこで、本研究では高炉スラグ微粉末の置換率を変えたセメント硬化体を作製し、供試体を任意の湿度で乾燥させ酸素の拡散実験を行った。また、酸素の拡散実験の結果より空隙構造特性である屈曲度を評価し、高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の酸素の拡散性状に及ぼす空隙構造の影響を調査することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体の概要

(1) 使用材料および配合

セメント硬化体は、結合材として研究用普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末（石こう無混和）を用いた。表-1に普通ポルトランドセメント（OPC）、高炉スラグ微粉末（BFS）の物理的性質および化学成分を示す。高炉スラグ微粉末は、質量比で半水石膏を3.4%添加し、石こう有りの試料とした。普通ポルトランドセメントへの高炉スラグ微粉末（石こう混和）の置換率は、内割（質量比）で35%、50%、70%とした。配合は、水結合材比を35%、55%の2種類とし、水結合材比35%の供試体では、高炉スラグ微粉末の置換率を50%のみとした。なお、普通ポルトランドセメントの供試体をNC、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換した供試体をNBと表記する。

(2) 供試体の作製

水和試料はペーストとした。養生温度は20℃とし練混ぜ水には、イオン交換水を使用した。各種結合材および練混ぜ水を養生温度と同じ温度に調整後、3分間ペーストの練混ぜを行った。練混ぜ後、ブリーディングが確認されなくなるまで定期的にペーストの練返しを行った。ブリーディングが確認されなくなった後、練返し後のペーストは、30×40×5mmのアクリル型枠およびφ32×65mmのスチロール棒瓶に打設した。なお、30×40×5mmのアクリル型枠に打設した供試体は材齢7日に脱型シラップでシールした後、材齢28日まで密閉養生した。

(3) 供試体の乾燥条件

材齢28日において、30×40×5mmの供試体を水中に浸

*1 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 助教 博士（工学）（正会員）

*2 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 新潟大学 工学部 准教授 博士（工学）（正会員）

*4 新潟大学 工学部 教授 博士（工学）（正会員）

表-1 結合材の物理的性質と化学成分

結合材	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	Ig.loss (%)	化学成分 (%)							
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
OPC	3.16	3500	0.84	21.28	5.09	3.15	65.36	1.01	2.01	0.32	0.41
BFS	2.91	4180	0.09	34.60	14.84	-	42.66	5.65	-	0.23	0.29

漬させ、真空飽和を行い飽水状態とした。その後、供試体表面の水分を除去し表乾質量を測定した。測定後の供試体は、飽和塩類を用いて20℃環境下で調湿したデシケーター内にて、3カ月間静置した。デシケーター内には炭酸化防止のためソーダ石灰を入れた。表-2に調湿に用いた飽和塩類を示す。3カ月間静置後の供試体の乾燥質量と表乾質量の差を表乾質量で除すことで、各湿度における供試体の脱水量を求めた。また、各塩類を用いて湿度を調整したデシケーター内には、温湿度センサー(精度RH±3%)を入れ湿度を確認した。センサーの測定では、表-2に示される既往の値⁴⁾の±3%以内に収まっていることを確認した。したがって、本研究で用いた相対湿度は、表-2の本研究の値とした。なお、論文中では便宜上、括弧内の値で示す。

2.2 測定項目

(1) セメント硬化体の開放空隙率の測定

アルキメデス法より絶乾状態の空隙率を算出した。材齢28日でφ32×65mmのストレッチ棒瓶に詰めた封緘状態の供試体を鉄鉢にて約1cm角、1g程度に砕き、真空飽和により飽水状態にした後、20℃環境下で水中質量および表乾質量を測定した。その後、乾燥炉にて110℃で供試体の質量が恒量になるまで乾燥させ、空隙率および脱水量を算出した。また、空隙内に水分が存在していない空隙率(以下、開放空隙率)を、2.1.(3)節の供試体より得られる脱水量を用いて以下の式より算出した。

$$P_o = \frac{W_1 - W_{n\%RH}}{\rho_w \cdot W_1} \cdot \frac{\rho_w \cdot W_1'}{W_1' - W_2} \quad (1)$$

ここに、 P_o : 開放空隙率 (vol./vol.)、 W_1 : 2.1.(3)節の供試体の表乾質量、 $W_{n\%RH}$: 2.1.(3)節の供試体の乾燥質量、 W_1' : アルキメデス法での表乾質量、 W_2 : アルキメデス法での水中質量、 ρ_w : 水の密度 (g/cm³) である。

(2) セメント硬化体の酸素の拡散係数の測定

酸素の拡散実験は、白川ら¹⁾が提案した気体の拡散実験装置により行った。供試体は、30×40×5mmの硬化体を用いた。供試体を厚さ5mmの鋼製型枠(SUS303)にはめ込みシリコン系の接着剤で接着した。その後、型枠を二つの拡散セルで挟み、酸素ガスと窒素ガスを等圧等流量で流し、流出した窒素ガス中の酸素濃度を測定することで酸素の拡散係数を求めた。なお、酸素ガスおよび窒素ガスは表-2に示される飽和塩類の入った容器内を通して各湿度に調湿した。拡散実験はRH80%、

表-2 飽和塩類と調整湿度 (%)

飽和塩類	Greenspan	本研究
CH ₃ COOK	23.1	22.1 (22)
K ₂ CO ₃	43.2	43.6 (43)
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	54.4	56.2 (56)
NaCl	75.5	74.8 (75)
NH ₄ Cl	79.2	79.9 (80)
KNO ₃	94.2	93.1 (93)

75%、56%、43%、22%での乾燥供試体より行った。酸素の拡散係数は、以下の白川らの提案式より求めた。

$$D_{O_2} = \frac{R_N \cdot (C_N - C_b) \cdot (L + \delta_N + \delta_O)}{\left\{ 1 - \frac{R_N}{R_O} \cdot \left(\frac{M_O}{M_N} \right)^{0.5} \cdot (C_N - C_b) - C_N \right\} \cdot A_C} \quad (2)$$

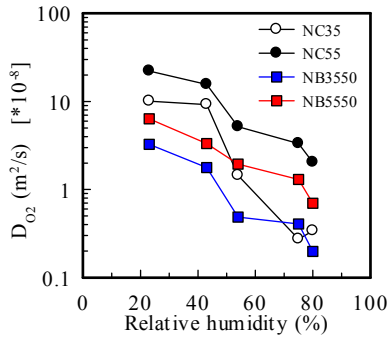
ここに、 D_{O_2} : 酸素の拡散係数 (m²/s)、 C_N : 窒素ガス中の酸素濃度 (%)、 C_b : 窒素ガスボンベ中の酸素濃度 (%)、 R_N , R_O : 窒素および酸素のガス流量 (m²/s)、 M_N , M_O : 窒素および酸素の分子量 (g/mol)、 L : 供試体厚さ(m)、 A_C : 供試体断面積 (m²)、 δ_N , δ_O : 窒素ガス側、酸素ガス側の境界膜厚さ (0.0021m) である。

3. 実験結果

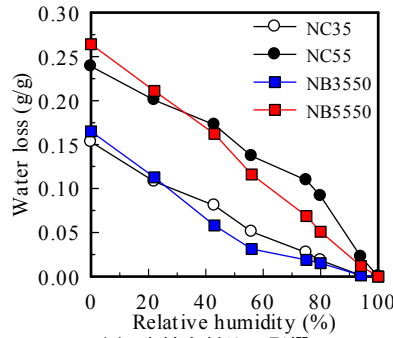
3.1 各相対湿度におけるセメント硬化体の酸素の拡散係数と開放空隙率の関係

各相対湿度で調湿したセメント硬化体の酸素の拡散係数を図-1に示す。図中の凡例に関して、結合材に続く二桁の数字を水結合材比、末尾二桁の数字を高炉スラグ微粉末の置換率として表記する。図より、相対湿度の低下によって、酸素の拡散係数は大きくなった。また、高炉スラグ微粉末の置換により酸素の拡散係数は小さくなり、本研究の範囲内では、いずれの相対湿度において置換率50%の供試体の酸素の拡散係数をもっとも小さくなった。図-2に各相対湿度における脱水量の変化を示す。脱水量の変化は高炉スラグ微粉末の置換の影響を受けており、RH43%以上では、高炉スラグ微粉末を置換させた供試体は無置換の供試体に比べ脱水量が減少した。

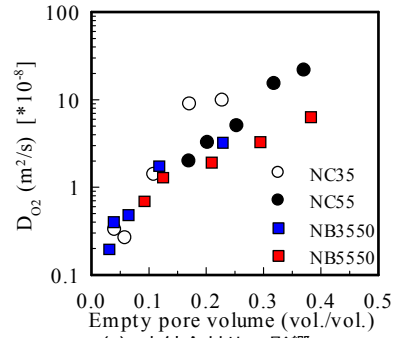
ここで、各相対湿度におけるセメント硬化体の開放空隙率の変化が酸素の拡散性状に影響を及ぼしていることが考えられるため、酸素の拡散係数と開放空隙率の関係を評価した。評価した結果を図-3に示す。図より、開放空隙率の値が小さい領域では、水結合材比や混和材の



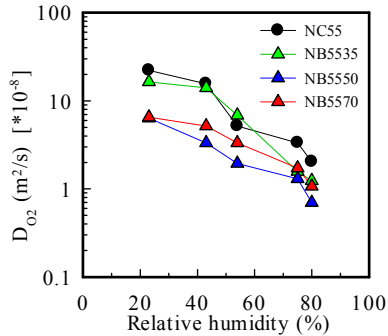
(a) 水結合材比の影響



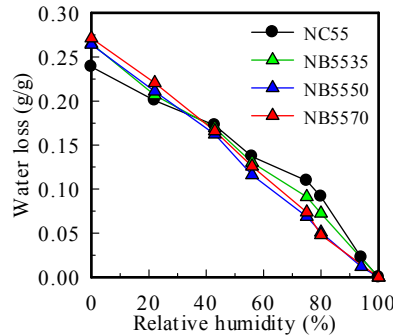
(a) 水結合材比の影響



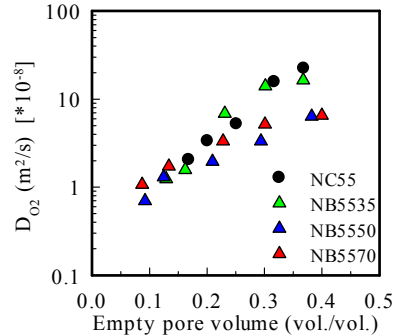
(a) 水結合材比の影響



(b) 高炉スラグ微粉末の置換率の影響



(b) 高炉スラグ微粉末の置換率の影響



(b) 高炉スラグ微粉末の置換率の影響

図-1 各相対湿度におけるセメント硬化体の酸素の拡散係数

図-2 各相対湿度におけるセメント硬化体の脱水量

図-3 酸素の拡散係数と開放空隙率の関係

置換率の違いによらず、概ね開放空隙率と酸素の拡散係数は同一の関係で示される。一方で、開放空隙率の値が大きい領域では、空隙率の値が同一でも高炉スラグ微粉末の置換によって酸素の拡散係数は小さくなった。

本研究では更なる検討として、図-2 に示される各相対湿度における脱水量を用いて、以下の Kelvin 式より空隙径分布を算出した。

$$r = -2\gamma V_m / RT \ln(p/p_0) \quad (3)$$

ここに、 r : 空隙半径 (m), γ : 水の表面張力 (72.75×10^{-3} N/m), V_m : 水のモル体積 (18.02×10^{-3} m³/mol), R : 気体定数 (8.3144 J/mol \cdot K), T : 絶対温度 (293K), p/p_0 : 相対湿度である。なお、図-2 の各湿度の脱水量は、以下の式より実験値に対して最小二乗法によるフィッティングを行い、実験では測定していない結果を補間した。

$$y = \frac{a + bx}{1 + cx + dx^2} \quad (4)$$

ここに、 y : 実験値の脱水量, x : 相対湿度, a, b, c, d : 実験定数である。フィッティングの結果、いずれの供試体とも相関係数は 0.998 以上であったため、式(4)によって実験結果の反映が可能と判断した。

図-4 に、空隙径分布の算定フローを示す。まず、図-2 の各湿度の脱水量を式(4)によって回帰し、実験では測定していない湿度域の脱水量を算定した。算定された脱水量を用いて、式(1)より各湿度における開放空隙率を求めた。また、各相対湿度より式(3)を用いて空隙径を求

め、各湿度と対応する開放空隙率と空隙径より空隙径分布を算定した。なお、低湿度域においては固体壁面と吸着質との相互作用により、吸着質の凝縮半径や密度等に影響を及ぼすことから Kelvin 式の適用は困難とされている⁹⁾。したがって、本研究で評価される空隙径分布はそれら影響が含まれているが、供試体間の相対評価は可能と判断し、図-4 の手法より空隙径分布を評価した。

図-5 に、高炉スラグ微粉末を置換したセメント硬化体の空隙径分布を示す。図中内の縦線は、式(3)より求まる各湿度に対応した空隙径を表し、図中の数字は湿度を示している。図-5(a)より、高炉スラグ微粉末の置換により、RH56%や RH80%における積算空隙率は無置換の供試体と比べ減少した。一方で、RH43%を境に RH22%では、高炉スラグ微粉末が高置換率の供試体ほど、積算空隙率が多くなった。また、図-5(b)より、高炉スラグ微粉末を置換した供試体の微分空隙率のピーク値は、無置換の供試体と比べ小径側で大きな値を示した。これは、高炉スラグ微粉末の置換により硬化体中に細かな空隙が増加したことを示している。

したがって、低湿度領域における酸素の拡散係数の変化は、空隙構造が要因と示唆され、本研究では、RH56%を境に酸素の拡散係数の傾向の変化が確認された RH56%-22%の特定領域の開放空隙率と酸素の拡散係数の関係を求めた。図-6 に、RH56%-22%領域の空隙率と RH22%時の酸素の拡散係数の関係を示す。RH56%-22%領域の空隙率は、22%時の開放空隙率から 56%時の開放

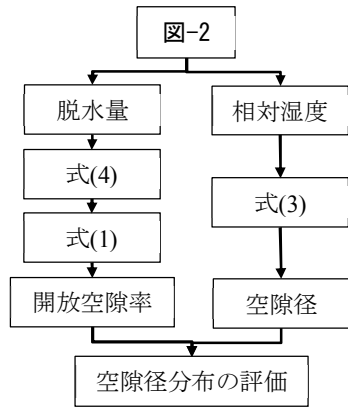


図-4 空隙径分布の算定フロー

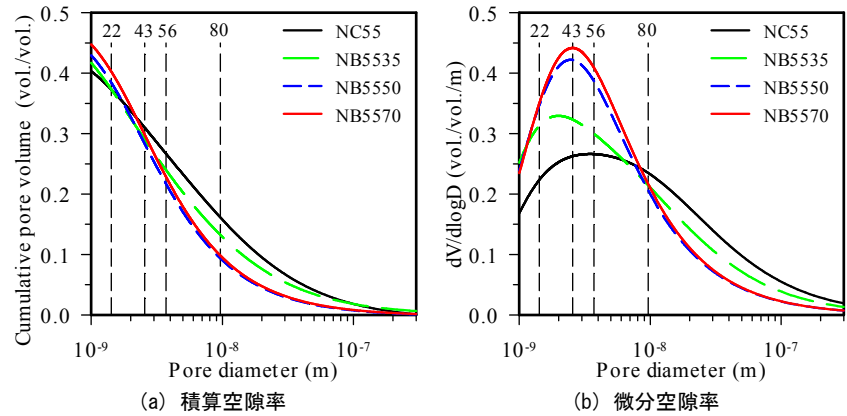


図-5 高炉スラグ微粉末を置換したセメント硬化体の空隙径分布

空隙率を差し引くことで算出した。図より、RH56%-22%の領域の開放空隙率が増加すると酸素の拡散係数は小さくなり、細かな空隙が増えることで気体の移動が抑制された。一方で、水結合材比の違いにより、両者の関係は異なる傾向を示した。菊地ら²⁾は、気体の移動経路となる空隙の屈曲性が結合材種類や配合によって異なることを報告しており、低湿度領域における拡散係数の変化は、空隙構造特性である屈曲度の変化が要因と考えられる。

3.2 各相対湿度における屈曲度の評価

酸素の拡散係数より、空隙構造特性である屈曲度を評価した。屈曲度は以下の式より求めた。

$$D_{O_2} = \frac{D}{\tau^2} \quad (5)$$

ここに、 D : 孔内有効拡散係数 (m^2/s)、 τ : 屈曲度である。菊地ら²⁾は、セメント硬化体の酸素の拡散実験より得られる酸素の拡散係数を用いて屈曲度の評価を行った。常温常圧における酸素の平均自由行程は約 50nm であるため、セメント硬化体中の 50nm 以上の空隙では分子拡散が支配的であり、50nm 以下では Knudsen 拡散が支配的であるとし、50nm 以上と以下の空隙径で酸素の拡散性状を分けて考えている。さらに、均一な径をもつ空隙が平行に配列し、拡散方向に対して屈曲した形状を仮定した平行孔モデルによって孔内有効拡散係数を水銀圧入法から得られる空隙径分布から評価している。孔内有効拡散係数を次式に示す。

$$D = \frac{\varepsilon_a}{\left(\frac{1}{D_{ka}} + \frac{1}{D_{ON}}\right)} + \frac{\varepsilon_i}{\left(\frac{1}{D_{ki}} + \frac{1}{D_{ON}}\right)} \quad (6)$$

ここに、 ε_a : 50nm 以上の空隙率、 ε_i : 50nm 以下の空隙率、 D_{ON} : 相互分子拡散係数 (m^2/s)、 D_{ka} : 50nm 以上の空隙における Knudsen 拡散係数 (m^2/s)、 D_{ki} : 50nm 以下の空隙における Knudsen 拡散係数 (m^2/s)である。また、ある空隙径範囲における Knudsen 拡散係数および相互分子拡散係数は、次式で表される。

$$D_k = 9700r(T/M_0)^{0.5} \quad (7)$$

$$D_{ON} = \frac{0.001858T^{1.5}(1/M_0 + 1/M_N)^{0.5}}{P\sigma_{ON}\phi} \quad (8)$$

ここに、 r : 着目する空隙径範囲における平均細孔半径 (m)、 T : 絶対温度 (K)、 M_0 : O_2 の分子量 (g/mol)、 M_N : N_2 の分子量 (g/mol)、 P : 圧力 (atm)、 σ_{ON} : 2分子間の分子衝突直径 (\AA)、 ϕ : 2分子間の相互作用エネルギー関数である。本研究では、菊地らの報告をもとに相互分子拡散係数は $0.202 \times 10^{-4} (m^2/s)$ とした。式(6), (7)より、50nm 以上および以下の空隙率と平均細孔径について、空隙率は図-5(a)の積算空隙率より、平均細孔径は以下の式より空隙率で重み付けした。

$$MV = \frac{\sum(V_i \cdot r_i)}{\sum(V_i)} \quad (9)$$

ここに、 MV : 体積平均径 (m)、 V_i : 任意の径における積算空隙率、 r_i : 空隙径 (m) である。

なお、本研究で扱う屈曲度は、平行孔モデルにより評価される拡散係数を実測の拡散係数に換算するための補正係数として算定される。したがって、複雑な空隙構造を有するセメント硬化体において、屈曲度は気体の移動経路の屈曲性に加え、空隙内の水の存在や閉塞空隙の存在による空隙の不連続性などの影響も含めた平均的な値として評価される。本研究の範囲内では、これら空隙構造個々の性質を定量的に評価することは困難である。しかし、各乾燥湿度において、結合材の種類の違いが空隙構造の複雑性に及ぼす影響について把握することは可能と判断し屈曲度を用いて検討を行った。

3.3 屈曲度と開放空隙率の関係

各相対湿度におけるセメント硬化体の屈曲度と開放空隙率の関係を図-7に示す。図より、各セメント硬化体の屈曲度は開放空隙率の増加によって小さくなった。これは空隙内に含まれる水分が多く、酸素が迂回しながら

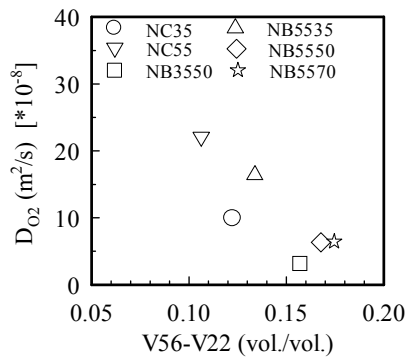
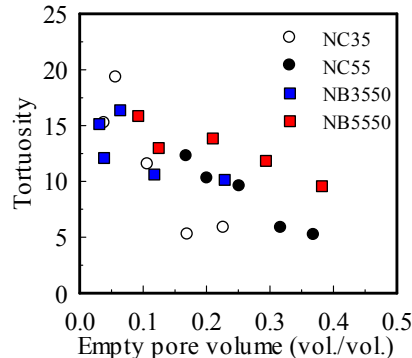
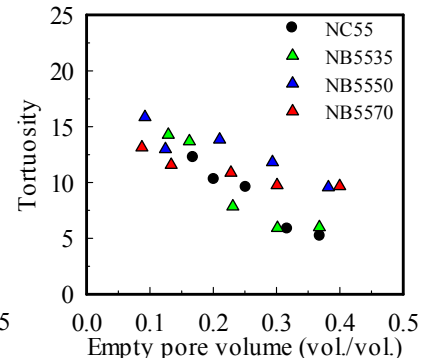


図-6 RH56%-22%領域の空隙率とRH22%の酸素の拡散係数の関係



(a) 水結合材比の影響



(b) 高炉スラグ微粉末の置換率の影響

図-7 屈曲度と開放空隙率の関係

進むため、酸素の移動距離が増加したことによる。また、開放空隙率の値が大きい場合では、空隙内の水分量が少なく、酸素の移動距離の減少によって屈曲度が小さくなった。一方で、高炉スラグ微粉末を置換した供試体や水結合材比が異なる供試体において、低湿度領域における開放空隙率が同一でも屈曲度は異なる傾向を示した。この傾向は、酸素の拡散係数の結果と同様の関係であり、気体の移動経路に対して、空隙率だけではなく空隙構造が影響しているものと考えられる。

そこで、本研究では、高湿度と低湿度の異なる領域で、屈曲度の変化に及ぼす支配要因が異なるものと考え、高湿度領域の開放空隙率と屈曲度の関係、低湿度領域の開放空隙率と屈曲度の関係の評価を行った。ここで、高湿度領域と低湿度領域は、図-7よりRH56%で高炉スラグ微粉末の置換によって屈曲度と開放空隙率の関係が大きく変化しているため、この湿度を基準とし検討を行った。

図-8に、高湿度領域における開放空隙率と酸素の屈曲度の関係を示す。乾燥時の湿度が低い供試体ほど両者の関係のばらつきが大きくなったものの、高湿度領域における開放空隙率と屈曲度の関係は、水結合材比や高炉スラグ微粉末の有無によらず屈曲度と開放空隙率の関係が負の直線関係を示した。屈曲度と空隙率が概ね線形によって整理できることは、この領域における屈曲度に対し、空隙内に占める水分量の違い、すなわち空隙量の違いが支配的な要因として挙げられる。

図-9に、RH56%-43%領域の開放空隙率とRH43%時の屈曲度の関係およびRH56%-22%領域の開放空隙率とRH22%時の屈曲度の関係を示す。図-9より、低湿度において、特定の湿度域における空隙率が増加すると屈曲度は大きくなった。特に、RH56%-22%領域の開放空隙率と酸素の屈曲度は高炉スラグ微粉末の置換率や水結合材比の違いによらず比例関係を示した。本研究では、特定の湿度域の空隙量で屈曲度を整理したが、低湿度域の気体の拡散性状に対し、高湿度域で逸散した空隙や後述するインクボトル空隙が影響を及ぼすことも考えられる。し

かし、図-9より湿度低下により、特定領域の開放空隙率と酸素の屈曲度の関係が高い相関を示したことは、低湿度ほど特定の領域における空隙量の変化が気体の拡散に対して支配的な要因となっていると推察される。

そこで、低湿度域における屈曲度の変化について空隙構造の観点から考察を行った。まず、図-5(b)のセメント硬化体の空隙径分布で示されるように高炉スラグ微粉末の置換によって、直径10nm以下の微少な領域(RH56%から22%)の空隙率が増加した。この増加の要因として、微少な空隙がボトルネックとなり、微少空隙の奥にある粗大な空隙を本来の空隙径より細かな空隙として測定した可能性が考えられる。また、吉田ら⁶⁾の検討により、高炉スラグ微粉末の置換によって直径10nm以下のインクボトル空隙が増加することが報告されており本研究結果の傾向と一致する。したがって、低湿度域のRH56%から22%の領域における空隙量はインクボトル空隙も含めた空隙と仮定し、低湿度域での屈曲度に及ぼすインクボトル空隙の影響について考察した。

まず、インクボトル空隙に多くの粗大な空隙が連結している場合、ボトルネックによって拘束された水分が逸散すると、その空隙が気体移動の最短経路となる。その結果、セメント硬化体内のインクボトル空隙は酸素の拡散係数を増加させ、屈曲度が小さくなる。しかし、図-6や図-9で示される本研究結果は、これらと異なる傾向を示した。もう一つの要因として、インクボトル空隙が空隙のネットワークを形成せず、入口が一つの閉じた空隙として存在していることが考えられる。これら空隙は物質移動に対して大きな影響を及ぼさないことが指摘されていることから⁷⁾、このようなインクボトル空隙が増加しても屈曲度は変化しないと推察される。本研究においても図-9で示されるように、RH43%から22%の湿度低下により屈曲度が大きく変化していない。したがって、セメント硬化体中でのインクボトル空隙の形成が気体の拡散性状に及ぼす影響は小さいと考えられる。

一方で、RH50%から25%領域の水分はC-S-H粒子間で

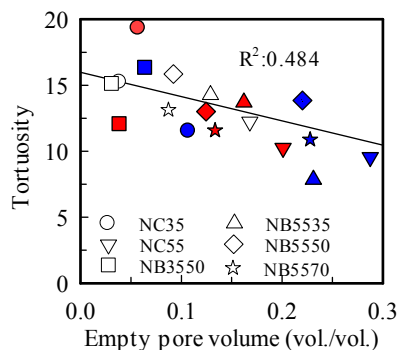


図-8 RH80%, 75%, 56%の屈曲度と開放空隙率の関係 (プロット白: 80%, 赤: 75%, 青: 56%)

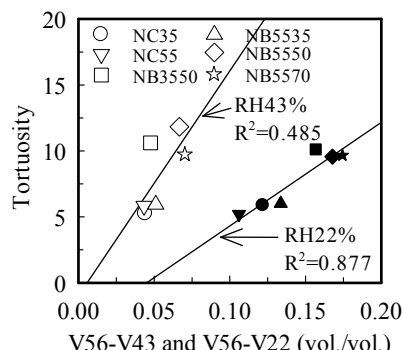


図-9 RH43%, 22%の屈曲度とRH56%-43%の領域, RH56%-22%の領域の開放空隙率の関係

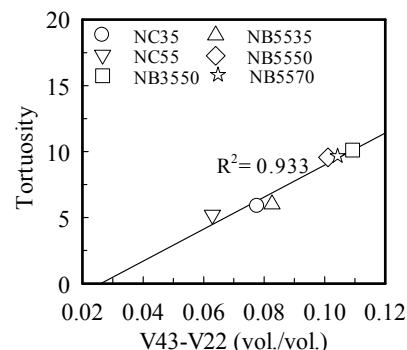


図-10 RH22%の屈曲度とRH43%-22%の領域における開放空隙率の関係

形成される Small gel pore 内に存在していることが Jennings ら⁸⁾の検討で報告されている。また、これら空隙内の水分逸散によって C-S-H 粒子が凝集し、構造を緻密化させることも指摘している。この影響を確認する目的で RH43%-22%領域の開放空隙率と RH22%時の酸素の屈曲度との関係性を評価した結果が図-10である。図より、両者は高い相関を示したことから、低湿度の屈曲度に対して、水和物の影響が大きいと言える。したがって、Small gel pore 内の水分が多いほど、乾燥により緻密化する組織の割合が多く、空隙構造の複雑性を増加させ、その結果、高炉スラグ微粉末の置換により屈曲度が大きくなったと考えられる。なお、Small gel pore がインクボトルとして振舞うこと、RH56%以上の乾燥でも水和物の構造が変化することも報告されていることから⁸⁾、今後、乾燥後の供試体の組織や物性変化も含めて検討が必要である。

4. まとめ

本研究は、セメント硬化体の気体の拡散性状に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響を調査する目的で、空隙構造の変化に着目し検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 各相対湿度で乾燥させたセメント硬化体の酸素の拡散係数は、高炉スラグ微粉末を置換させることでいずれの相対湿度においても小さくなった。
- (2) 酸素の拡散係数と開放空隙率の関係は、高炉スラグ微粉末を置換させた供試体において、無置換の供試体と異なる傾向を示した。
- (3) 空隙構造特性である屈曲度を評価した結果、高湿度で乾燥させた供試体の酸素の各実験から得られた屈曲度は、水結合材比や高炉スラグ微粉末の置換によらず空隙内の水分量の変化に依存する。
- (4) 低湿度で乾燥させた供試体の屈曲度は、水結合材比や高炉スラグ微粉末の置換によらず水和物間で形成される空隙率と比例関係を示した。これは、乾燥により空隙の複雑性の増加が要因として示唆された。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(課題番号: 26820181)および鉄鋼環境基金 研究助成により行ったものであることを付記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也: セメントペースト硬化体中の乾燥の程度と気体拡散係数の関係, 日本建築学会構造系論文集, No.524, pp.7-12, 1999.10
- 2) 菊地道生, 須田裕哉, 佐伯竜彦: 酸素および塩化物イオンの実効拡散係数によるセメント系硬化体におけるイオン移動性状の評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, pp.346-353, 2011.3
- 3) 氏家勲, 長瀧重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究, 土木学会論文集, No.396, pp.79-87, 1988.8
- 4) Greenspan Lewis: Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions, Journal of Research of the National Bureau of Standards- A. Physics and Chemistry, pp.89-96, Jan./Feb. 1977.
- 5) 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫: 吸着の科学, 丸善株式会社, 2011
- 6) 吉田亮, 岸利治: 水銀漸次繰返し圧入法によって観察される OPC・BFS ペースト硬化体の空隙構造の相違, 第 65 回セメント技術大会, pp.38-39, 2011.5
- 7) 野島省吾ほか: セメント系材料中の拡散現象に関する水銀圧入法を用いた空隙構造評価, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp. 853-854, 2010.9
- 8) Jennings, H. M., Kumar A. and Sant G.: Quantitative discrimination of the nano-pore-structure of cement paste during drying: New insights from water sorption isotherms, Cement and Concrete Research, Vol.76, pp.26-36, May, 2015