

論文 乾燥を受けた高炉セメント硬化体の気体の移動性状とミクロ、メソ、マクロの空隙構造の関係に関する研究

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、高炉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を把握することを目的として、高炉セメント硬化体の屈曲度と乾燥による微細構造の変化に着目し検討を行った。その結果、乾燥湿度の低下によって、メソスケール領域の空隙径分布は大径側へ移行し空隙は粗大化した。また、メソスケール空隙の表面フラクタルを解析し、酸素の拡散係数から得られる屈曲度との比較から、高炉セメント硬化体では、乾燥による C-S-H の凝集構造の発達が抑制されることが示唆された。さらに、気体の移動性状に対して乾燥によるミクロからメソ、マクロスケールの微細構造特性の変化が影響することを示した。

キーワード：乾燥湿度、気体拡散、空隙構造、比表面積、フラクタル次元、空隙率、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

コンクリート内部の含水状態は、コンクリート構造物の供用期間中の日射や風雨の影響により変化する。コンクリートの劣化因子となる塩化物イオンや酸素および二酸化炭素などのコンクリート内部への移動は空隙の含水状態に大きく左右される。したがって、物質の移動と空隙内部の含水状態の関係を明確にすることは、コンクリートの耐久性を評価する上で重要となる。

コンクリートの空隙構造は、水和反応によって生成される水和物により形成されることから、水和物の性質が空隙構造特性を決定する。特に、主要な水和物であるケイ酸カルシウム水和物（以下、C-S-H）は乾燥を受けることによって、粒子間の凝集性が高まることが示されている¹。また、乾燥による C-S-H の凝集構造の発展により、比表面積やゲル空隙（Small gel pore, Large gel pore）、毛細管空隙が変化することも報告されている^{2,3,4}。

このような観点から、著者ら⁵は乾燥湿度の違いによる酸素の拡散性状をその微細構造から検討を行い、気体の移動性状に対して、インクボトル空隙の存在に比べ C-S-H の構造変化に起因する凝集性の影響が大きいことを報告した。しかしながら、乾燥後のセメント硬化体の水和物の微細構造に関する検討は行っておらず、乾燥を受けたセメント硬化体の微細構造の変化と物質移動性状の関係に関する定量的な評価は不十分であった。

そこで、本研究では、乾燥による水和物の微細構造を調査することを目的とし、さらには、高炉スラグ微粉末の有無による微細構造の違いについても着目することで、乾燥を受けたセメント硬化体の気体の拡散性状と微細構造の関係を明らかに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 50% とし、水結合材比は 35%、55% の 2 種類とした。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 とし、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。

(2) 供試体の作製

供試体はペーストとした。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 琉球大学 工学部 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

表-2 飽和塩類と調整湿度

飽和塩類	湿度 (%)	酸素拡散	吸着試験
LiCl	11		○
CH ₃ COOK	22	○	○
MgCl · 6H ₂ O	33		○
K ₂ CO ₃	43	○	○
Mg(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	56	○	○
NaCl	75		○
NH ₄ Cl	80	○	
KCl	85		○
KNO ₃	93		○
K ₂ SO ₄	97		○

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 カ月間静置し乾燥させた。表-2 に乾燥に用いた飽和塩類を示す⁵⁾。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、各乾燥湿度における供試体の脱水量を求めた。なお、本研究における 3 カ月の調湿の間の水和の影響も考えられる。しかし、乾燥後の供試体の結合水量を測定した結果、異なる湿度で乾燥させた供試体間の標準偏差は最大でも 0.8% と小さく水和の影響は小さいものと考えられる。したがって、本研究では供試体を飽水状態とし 3 カ月間の調湿を行った後の供試体を乾燥供試体とした。

2.2 測定項目

(1) セメント硬化体の開放空隙率の測定

材齢 28 日で φ32×65mm のスチロール棒瓶に詰めた封緘状態の供試体を鉄乳鉢にて約 1cm 角、1g 程度に碎き、真空飽和により飽水状態にした後、水中質量および表乾質量を測定した。その後、110℃で供試体の質量が恒量になるまで静置し、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)節の供試体の脱水量より算定した。

(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⁶⁾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過させることで各湿度に調湿した。拡散実験は乾燥湿度 80%、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。

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

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) 水蒸気吸着等温線の測定

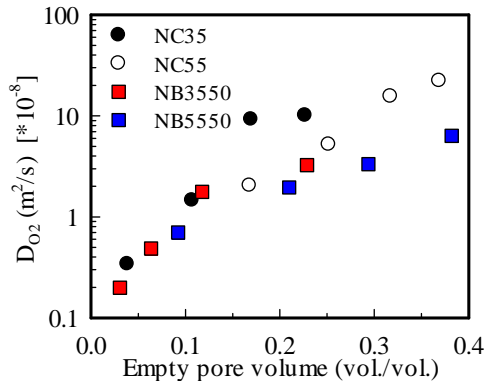
測定の前処理は、酸素拡散試験後の供試体を粗砕し 2.5mm~5.0mm に分級した。粗砕後の供試体を減圧環境下 (到達圧力 0.67Pa) で 110℃-12 時間の加熱を行った。本研究ではこの状態を相対湿度 0% と定義した。110℃加熱後の供試体は、各種飽和塩類を用いて 20℃環境下で調湿した真空デシケーター内にて、試料が恒量になるまで静置した。表-2 に調湿に用いた飽和塩類を示す。恒量の判定は 1 日の質量変化率が 0.05% 以下となった時点とし、3 カ月ほど静置させた。また、110℃加熱後の一部の供試体は、再度水中にて真空飽和を 24 時間行い、減圧下で 110℃加熱させ、含水量 (相対湿度 100% 時の水蒸気吸着量) を求めた。さらに、相対湿度 11%、22%、33% の吸着量より BET 理論を用いて比表面積を算定した。

3. 実験結果

3.1 酸素の拡散係数と開放空隙率の関係

各相対湿度で乾燥を行ったセメント硬化体の酸素の拡散係数と開放空隙率の関係を図-1 に示す。図より、開放空隙率が小さい領域では、水結合材比や高炉スラグ微粉末の有無によらず、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たが、開放空隙率が大きい領域では、空隙率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低下した。

本研究では、高炉スラグ微粉末を置換したセメント硬化体の酸素の移動性状は、空隙構造の違いが影響を及ぼすこと、またこれら空隙構造に乾燥による水和物の微細



図一 開放空隙率と酸素の拡散係数の関係

構造の変化が影響していることも考えられるため、水蒸気吸着等温線よりセメント硬化体の空隙構造を評価した。

3.2 乾燥後のセメント硬化体の空隙構造

(1) 水蒸気吸着等温線

図-2 に、各湿度で乾燥したセメント硬化体の水蒸気吸着等温線を示す。図より、いずれの供試体とも乾燥湿度が低いほど水蒸気吸着量は減少した。この結果は青野ら³⁾や Maruyama et al.⁴⁾と同様の傾向である。また、高炉スラグ微粉末の有無で比較すると同一水結合材比で高炉スラグ微粉末を置換した供試体では、相対湿度 0.4~0.9 の間で無置換の供試体と比べ水蒸気吸着量が増加した。

なお、前処理として、減圧環境下で 110°C 加熱を 12 時間行っており、この間の C-S-H の Si の重合による構造変化の影響が含まれる。また、吸着量取得の 3 ヶ月間の調湿による水和物の表面性状の回復といった影響も考えられる。しかし、乾燥湿度によって水蒸気吸着等温線に違いが確認される点や後述する表面フラクタルの変化が前処理を必要としない手法によって評価された結果と同様の傾向を示したことから、本研究の乾燥試料間における微細構造に関する相対的な比較は可能と判断した。

(2) 比表面積と各相対湿度での水蒸気吸着量の変化

セメント硬化体の空隙構造は乾燥によりマイクロからマクロスケールで変化することが明らかになっている。そこで、各湿度で乾燥させたセメント硬化体の比表面積の変化と水蒸気吸着等温線の各湿度領域での水蒸気吸着量の変化について検討した。ここで、各湿度領域の水蒸気吸着量は、湿度 0~0.40, 0.40~0.96, 0.96~1.00 の 3 種

類に分類した値を意味する。この湿度の境界は、Kelvin 式より求まる空隙径の大きさとして IUPAC の定めるミクロ孔 (>2nm), メソ孔 (2nm~50nm), マクロ孔 (50nm<) に分類される⁷⁾。また、実験では測定していない結果を補完する目的で図-2 の相対湿度 0.11~0.97 の結果に対して次式より最小二乗法によるフィッティングを行った。

$$y = a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x) + e \quad (2)$$

ここに、 y : 実験値の脱水量, x : 相対湿度, a, b, c, d, e : 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 0.995 以上であったため、式(2)によって実験結果の反映が可能と判断した。

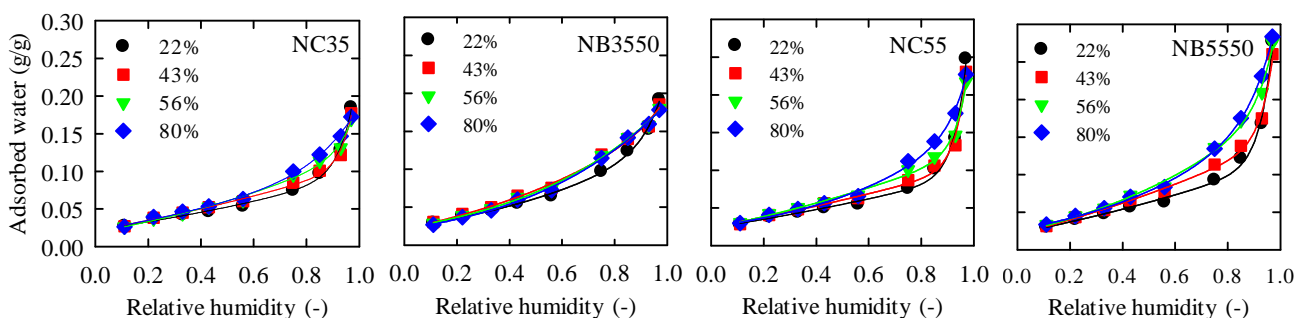
図-3 に、乾燥湿度における各相対湿度領域(マイクロ, メソ, マクロ)の水蒸気吸着量の変化と比表面積を示す。なお、水蒸気吸着量および比表面積は単位セメントペースト体積あたりとして評価した。したがって、各湿度領域の水蒸気吸着量はマイクロからマクロ領域の空隙率を意味する。図より、マイクロ, メソ, マクロの空隙率に関して、中湿度域 (56%, 43%) までの乾燥湿度の低下に伴いメソ空隙率は減少し、マクロ空隙率は増加した。また、乾燥湿度 43% から 22% の変化において、メソ空隙率は増加し、マクロ空隙率およびマイクロ空隙率は減少した。また、いずれの供試体とも乾燥湿度の低下に伴い比表面積は減少した。以上のことから、高炉スラグ微粉末を用いた場合においても、マイクロからメソ, マクロスケールの空隙率が変化した。特に、メソスケールの空隙率は、いずれの乾燥湿度において変化が確認できるため、メソスケールの構造に着目し、空隙径分布およびフラクタル次元を用いた評価より更なる検討を行った。

(3) メソスケール空隙の空隙径分布

本研究では、水蒸気吸着等温線より空隙径分布を評価するため、図-2 に示される各相対湿度における水蒸気吸着量を式(2)によって回帰した結果を用いて、以下の Kelvin 式よりメソスケールの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



図二 乾燥湿度の異なるセメント硬化体の水蒸気吸着等温線 (図中の実線は回帰曲線を表す)

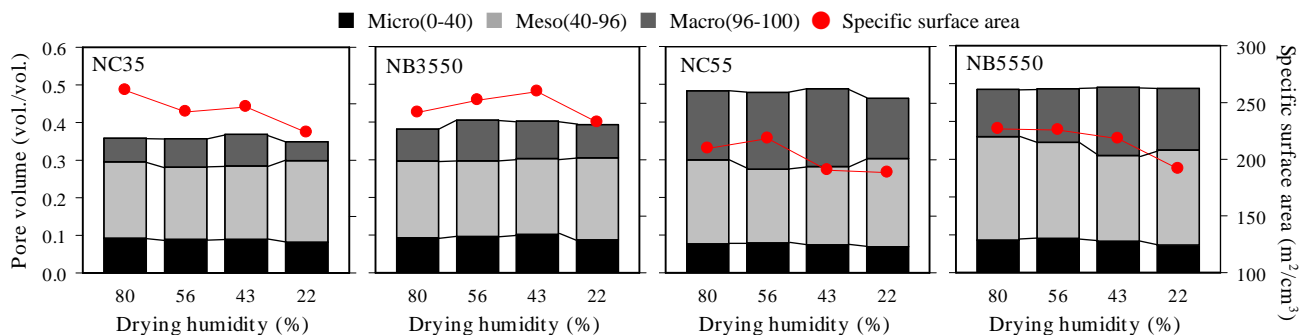


図-3 ミクロ、メソ、マクロ空隙率と比表面積の乾燥湿度による変化

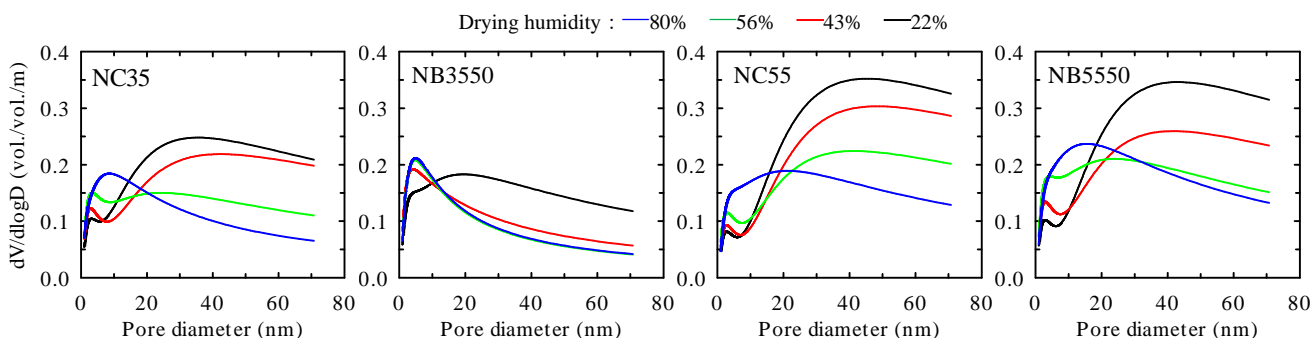


図-4 乾燥湿度によるメソスケールの空隙径分布の変化

定数 (8.3144 J/mol・K), T : 絶対温度 (293K), p/p_0 : 相対湿度である。したがって, Kelvin 式より, 各相対湿度を空隙径に変換し, 水蒸気吸着量から空隙率を求め, 両者の関係からメソスケールの空隙径分布を評価した。

図-4 に, 乾燥湿度によるメソスケールの空隙径分布の変化を示す。なお, 図中の 10nm 以上の空隙は, 式(3)より湿度 80%以上の点数の少ない領域の回帰結果であるため, 絶対値に対する精度は検証が必要であるが, 回帰式は図-2 の乾燥による吸着量低下の傾向は捉えており, 空隙径分布の相対的な変化に対する比較は可能と判断した。図より, 乾燥湿度の低下により 10nm 付近のピークが減少し, 2nm 付近のピークと 20nm~60nm の幅の広いピークの二つが確認された。高炉スラグ微粉末の有無で比較すると, 高炉スラグ微粉末を置換することで W/B : 35%の供試体では空隙が緻密化した。一方で, W/B : 55%の供試体では空隙構造に大きな変化は確認されなかった。

以上のことから, メソスケール領域の空隙径分布は乾燥湿度の低下によって粗大化することが確認された。青野ら³⁾は, 乾燥によって変化する空隙構造の解析手法として, 多田ら⁸⁾の提案した有効比表面積に基づく表面フラクタル解析が有効であることを示している。フラクタル次元は, 空隙壁面の複雑性を表す指標として扱われており, セメント硬化体では, 2.5~3.0 の値を取ることが報告されている⁸⁾。また, 図-1 より, 酸素の拡散係数の変化が空隙率では単純に評価できないことから, 空隙率の変化に加え, 空隙構造の複雑性を表す屈曲性や連続性が気体の拡散性状に影響を及ぼしている。このような

点から, 既報⁵⁾で検討した酸素の拡散係数から得られる屈曲度とフラクタル次元の比較を行うことで, 微細構造の変化が気体の移動性状に及ぼす影響について検討した。

(4) 有効比表面積とフラクタル次元

多田ら⁸⁾は, 界面の熱力学的状態に基づきセメント硬化体における固体-気体, 液体-気体の界面の面積を含めた以下に示される有効比表面積を提案している。

$$RT \ln(p/p_0) / v = \frac{\Phi}{V_w / (A_{sg} \cos \theta + A_{lg})} \quad (4)$$

ここで, R : 気体定数 (J/mol・K), T : 絶対温度 (K), p/p_0 : 相対圧, v : 水の比容積 (m³/mol), Φ : 水の界面エネルギー (J/m³), V_w : 吸着水の体積 (g/g), A_{sg} : 固相と気体の界面の面積 (m²/g), A_{lg} : 液体と気体の界面の面積 (m²/g) である。また, 有効比表面積 A は, $A_{sg} \cos \theta$ と A_{lg} の和で表される。式(4)より有効比表面積は, 吸着の進行により求めることができるため, 各相対圧に応じた固体-液体界面, 液体-気体界面の変化の取得が可能である。また, 多田らは, 有効比表面積 (A) と水理半径 (RH) より, 相対圧 0.35 以上を対象としたフラクタル次元 (D) の解析手法を次式で提案している。

$$A \propto RH^{(2-D)} \quad (5)$$

水理半径は相対湿度より, 次式で与えられる。

$$RH = (72.75 \times 10^{-3} \times 10^{-3}) / RT \ln(p/p_0) \quad (6)$$

相対湿度から水理半径を, 水蒸気吸着量から有効比表面積を求め両者の関係を式(5)によりフィッティングすることで空隙表面のフラクタル次元を求めることができる。

したがって、有効比表面積と水理半径の関係から各乾燥供試体のフラクタル次元を求めた。なお、メソスケール空隙のフラクタル次元を解析することを目的として、相対湿度0.40~0.96の範囲を式(5)によるフィッティングの対象とした。セメント硬化体の表面フラクタル次元の解析結果を図-5に示す。いずれの供試体とも乾燥湿度43%までの低下によって、表面フラクタル次元は増加し、乾燥湿度22%へ変化すると表面フラクタル次元は低下した。中湿度域で表面フラクタル次元が最大値を示す傾向は Thomas et al. の中性子小角散乱の結果⁹⁾と同様である。また、高炉スラグ微粉末を置換した供試体のフラクタル次元は無置換よりも低い値を示した。

3.3 セメント硬化体の屈曲度

屈曲度の算定は、既報⁵⁾と同様の方法で行ったが、既報では、乾燥前の供試体の空隙径分布を用いており、乾燥後の供試体の空隙径分布は考慮していなかった。したがって、本研究では図-4の空隙径分布の平均径を用いて屈曲度を再計算した。図-6に、各種セメント硬化体の屈曲度の変化を示す。屈曲度は、いずれの供試体とも乾燥湿度が低くなるほど低下した。また、高炉スラグ微粉末の置換によって、屈曲度は増加した。

4. 考察

4.1 屈曲度とフラクタル次元の関係

図-5, 6に示される乾燥湿度による表面フラクタル次元と屈曲度の変化を比較すると、乾燥湿度が43%までは、表面フラクタル次元が高いほど屈曲度は小さく、両者の関係は反比例の傾向を示した。表面フラクタル次元の増加は、乾燥によって水和物表面が平面的な構造から立体的な構造へ変化していることを表している。Thomas et al. は中性子小角散乱によって、乾燥によるC-S-H粒子間の再配列とゲルの圧密によって、表面フラクタルが増加することを報告しており⁹⁾、本研究の表面フラクタル次元の増加は、C-S-H粒子の凝集構造の発達によるものと推察される。また、高炉スラグ微粉末を使用した硬化体において、表面フラクタル次元は無置換よりも低い値であるため、乾燥による凝集構造の発達が抑制された結果、微細構造の変化が小さく屈曲度が高い値を示したと考えられる。高炉スラグ微粉末の置換は、同一脱水量における乾燥収縮ひずみを低減するといった報告もあり¹⁰⁾、本研究結果に基づくと高炉スラグ微粉末の置換により微細構造の変化が抑制された結果、ひずみが低減したと考えられる。ただし、乾燥収縮ひずみは高炉スラグ微粉末の置換率や反応程度によって傾向が逆転することも報告されており¹⁰⁾、これらに関する詳細な検討が必要である。一方、乾燥湿度が43%から22%の変化では、屈曲度はほぼ一定であるがフラクタル次元は低下しており、乾燥湿

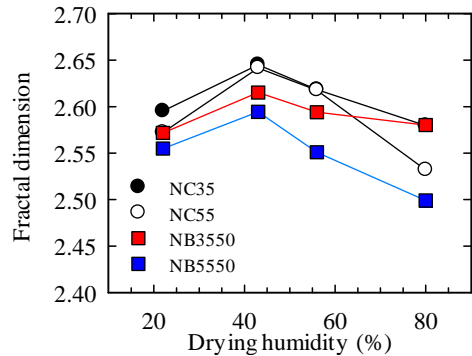


図-5 乾燥湿度による表面フラクタル次元の変化

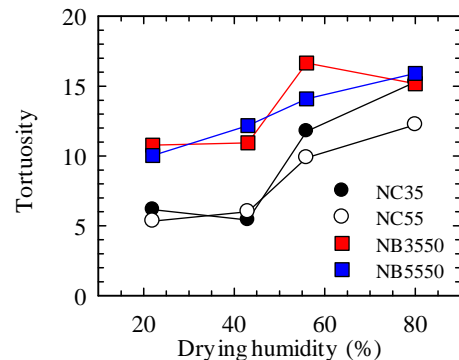


図-6 乾燥湿度による屈曲度の変化

度域で異なる傾向を示した。これらは、メソスケールの構造変化に加え、マイクロやマクロスケールの空隙構造が影響していると考えられる。

4.2 屈曲度とマイクロからマクロスケールの空隙の関係

図-3より、水和物のマイクロな微細構造特性を表す比表面積は、乾燥湿度の低下によって減少しており、特に43%から22%の比表面積の変化は大きい。また、乾燥湿度が43%から22%の変化でマクロ空隙率は増加している。したがって、比表面積やマクロ空隙率の変化も屈曲度に影響を及ぼしていると考えられる。

以上のことから、本研究では、乾燥に伴うセメント硬化体の屈曲度の変化を比表面積、フラクタル次元、マクロ空隙率から重回帰分析によって評価した。また、重回帰分析による評価では、乾燥湿度80%、56%と乾燥湿度43%、22%の2つの領域に分け解析した。なお、屈曲度の算定は、空隙径分布を用いて算定しており、屈曲度の評価ではすでに空隙径分布の影響が反映されている。しかし、具体的な屈曲度の算定では平均空隙径を使用しており分布全体の影響を加味していない。また、今回の検討で用いる比表面積やフラクタル次元は表面の幾何構造の特徴を表していることから、空隙径分布とは異なる影響と判断した。表-3に解析結果を示す。それぞれの係数のt値は、係数(a~d)を標準偏差で除した値であり、各変数(X₁~X₃)の影響の程度を意味する。ここで、切片dを除く、比表面積、フラクタル次元、マクロ空隙率のt値を百分率で表し、それぞれの影響度を評価した結

表-3 重回帰分析によって得られた各係数と t 値 ($Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \cdot X_3 + d$)

乾燥湿度域	X ₁ : 比表面積		X ₂ : フラクタル次元		X ₃ : マクロ空隙率		切片		R ²
	a	t	b	t	c	t	d	t	
80%-56%	0.1547	2.324	-46.71	-3.422	13.64	0.633	95.96	3.202	0.836
43%-22%	0.1461	4.110	-77.54	-3.791	55.10	3.413	170.74	3.482	0.840

果が図-7である。なお、t 値は絶対値を考慮した。図より、乾燥湿度 80%-56%の領域において、マクロ空隙率は比表面積やフラクタル次元と比較して屈曲度に及ぼす影響は小さい。一方で乾燥湿度 43%-22%の領域では、屈曲度に及ぼすマクロ空隙率の影響が増加しフラクタル次元の影響が低下した。このことは、ミクロからマクロスケールの微細構造の変化が乾燥後のセメント硬化体の気体の移動性状に影響を及ぼしていることを示唆する結果であり、その影響は乾燥湿度領域で異なることが示された。ただし、切片の t 値は空隙構造の影響を相対評価するため比較から除外したが切片の影響も大きい。これらは本研究では考慮していない要因（固体側の3次元的な変化や連続性）によるものと考えられ、今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたセメント硬化体の乾燥湿度の違いによる気体の移動性状を、乾燥後の空隙構造から評価した。以下に得られた結果を示す。

- (1) メソからマクロスケールの空隙率は乾燥湿度の違いにより変化した。また、メソスケールの空隙率は、高炉スラグ微粉末を置換することで減少しメソスケール空隙の緻密化が認められた。
- (2) メソスケール空隙のフラクタル次元は、乾燥湿度の低下により増加し、C-S-Hの凝集構造の発達が示された。一方で、高炉スラグ微粉末のフラクタル次元は無置換の供試体よりも低く、凝集の抑制が示唆された。
- (3) 乾燥湿度の違いによる屈曲度の変化は、ミクロからメソ、マクロ領域の空隙構造の変化が影響を及ぼし、その影響の程度は、乾燥湿度によって異なる。

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) Jennings, H. M.: Refinements to colloid model of C-S-H in cement: CM-II, Cement and Concrete Research, Vol. 38, pp.275-289, Mar.2008
- 2) Jennings, H. M. et al.: A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste, Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp.329-336, Mar.2007

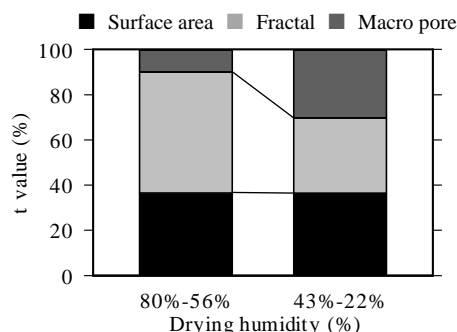


図-7 乾燥湿度域における各種特性の変化

- 3) 青野義道, 松下文明, 柴田純夫, 濱幸雄: ガス吸着等温線による硬化セメントペースト中の C-S-H の構造解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.739-744, 2009.7
- 4) Maruyama et al.: Microstructural and bulk property changes in hardened cement paste during the first drying process, Cement and Concrete Research, Vol. 58, pp.20-34, Apr.2014
- 5) 須田裕哉, 河野伊知郎, 斎藤豪, 佐伯竜彦: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.633-638, 2016.7
- 6) 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
- 7) Thommes M. et al.; Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report), Pure Appl. Chem. Vol. 87(9-10), pp.1051-1069, Oct.2015.
- 8) 多田眞作, 内海秀幸: セメント系材料の有効比表面積, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp. 115-120, 2002.3
- 9) Thomas, J. J., Allen, A. J., Jennings, H. M.: Structural changes to the calcium-silicate-hydrate gel phase of hydrated cement with age, drying, and resaturation, Journal of the American Ceramic Society, Vol.91, Issue 10, pp.3362-3369, Oct.2008
- 10) 李長江, 依田彰彦, 横室隆: 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No.2, pp. 187-192, 1998.