

# 論文 高炉スラグ混入セメントペーストにおける中性化が毛細管空隙構造の変化に及ぼす影響

石田 聡史\*1・五十嵐 心一\*2

**要旨:** 高炉スラグ混入ペーストを若材齢から中性化させた際の、電気伝導特性の変化と粗大毛細管空隙構造の対応を明らかにした。その結果、高炉スラグ混入ペーストの中性化領域では高炉スラグの反応が阻害され、粗大毛細管空隙率は非常に高い値を示した。しかし、そのような多孔質の中性化領域であっても、粗大毛細管空隙率の変化と電気伝導率の関係から、伝導経路が部分的に遮断されている可能性が示唆され、このことが電気伝導率によって示される物質透過性を低下させるようである。

**キーワード:** 中性化, 高炉スラグ, 反射電子像, 粗大毛細管空隙率, 電気伝導率

## 1. 序論

現在、環境保護、経済面の問題から高性能および長寿命なコンクリートが求められおり、その解決策の一つとして鉱物質混和材の使用が挙げられる。我が国では、安価で容易に入手できる高炉スラグやフライアッシュを利用している。それらを用いることで、安価で耐久性の高いコンクリートを作製することが肝要となっており、LCCの観点から耐久性を適切に評価する必要がある。例えばコンクリートの代表的な劣化現象である中性化に対して、耐久性を評価する指標として中性化速度係数を用いるのが一般的であり、この値は毛細管空隙構造に強く影響を受けることが知られている。

中性化を生じると、炭酸カルシウムを生成することで、毛細管空隙構造を変化させることが知られている。例えば佐伯ら<sup>1)</sup>は中性化促進試験を行った場合、全細孔量は経時的に減少し、細孔径分布は小さい径のほうへ移行し、中性化の進行を抑制する効果があると報告している。また、Vahidら<sup>2)</sup>は中性化による硬化体の空隙構造の変化に着目し、若材齢の普通セメントペーストに適切な条件下で中性化促進養生を行うことにより、通常の水和反応に比べて、より強固な微細組織を形成することを明らかにしており、一般に劣化現象として知られている中性化がセメントペーストの物性に好ましい現象をもたらすことを示している。また、自己治癒の観点からも、中性化は有用な治癒機構であることも知られている<sup>3)</sup>。

一方、鉱物質混和材の一つである高炉スラグを使用した場合、セメントの水和反応に加えて、高炉スラグが水酸化カルシウムや高炉スラグ自身が解放したアルカリ類と反応し、潜在水硬性を発揮することでC-S-Hを生成し、内部組織を緻密化する。これによって、セメントペーストの透過性は低下し、中性化は抑制される。しかし、養

生が適切でない場合、生成されている水酸化カルシウムが少ないため、空隙を充填する役割を果たす炭酸カルシウムが十分に生成されない。このことから、普通ポルトランドセメントのみを使用した場合に比べて、中性化深さは著しく大きくなることが知られている<sup>4)</sup>。また、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグによって置換することで中性化しやすいCa/Siの低いC-S-Hが生成されるため、中性化した際には空隙の粗大化や連続性の増加を生じることも指摘されている<sup>5)</sup>。

高炉スラグの反応や中性化による組織変化の特徴は一般に水銀圧入法や拡散係数の変化によって評価されてきた。しかし、それらの反応過程はいずれも複雑で、単純な空隙率の低下による緻密化だけでなく、空隙の連続性や遮断など空隙構造の変化として理解すべきと考えられる。したがって、空間構造の評価を目的とする場合、硬化体組織を直接観察することが簡便な方法であると考えられる。反射電子像による画像解析法は、硬化体組織を直接観察、評価することが可能であり、2次元断面から様々な幾何学的特徴を定量的に推察することができる。著者らはこれまで普通セメントペーストの中性化による組織変化について検討を行い、中性化によって小さな径の空隙が充填されやすいことを明らかにしてきた<sup>6)</sup>。しかし、中性化においても高炉スラグの反応においても画像解析法を用いて評価した例はまだ少ない。

本研究においては、高炉スラグを混入したセメントペーストを若材齢から中性化することによって生じる組織変化を、画像解析法を用いて評価する。さらに、電気伝導率の測定によって明らかにした物質移動特性を合わせて評価することで、電気伝導特性の変化に及ぼす粗大毛細管空隙構造の影響を評価することを目的とする。

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 金沢大学教授 フレスコ壁画研究センター 博(工) (正会員)

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント(以後 OPC と記す, 密度:  $3.15\text{g/cm}^3$ , 比表面積:  $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ), 鋳物質混和材として高炉スラグ微粉末(以後 SL と記す, 密度= $2.89\text{g/cm}^3$ , 比表面積= $4210\text{cm}^2/\text{g}$ )を使用した。これらの材料を JIS R 5201 に従って, 水結合材比が 0.50 のセメントペースト供試体(直径 100mm, 高さ 200mm)を製作した。なお, 高炉スラグの置換率は 50%とした。また比較用として水セメント比が 0.50 の普通セメントペースト供試体も製作した。

材齢 24 時間にて脱型し, 供試体中央から直径 100mm, 厚さ 50mm の円盤型供試体を切り出した。なお高水セメント比であっても, 試料採取位置に注意すればブリーディングの影響が少ないことを確認している<sup>7)</sup>。供試体側面に樹脂を塗布し, 硬化後, 所定の材齢まで水中養生(温度  $20^\circ\text{C}$ )および中性化促進養生(温度  $20\pm 2^\circ\text{C}$ , 湿度  $60\pm 5\%$ , 二酸化炭素濃度  $5\pm 0.2\%$ )を行った。

### 2.2 反射電子像観察および画像解析

所定材齢にて円盤供試体中央から底面に平行に約 10mm 四方, 厚さ数 mm の直方体状の試料を切り出した。また, 中性化促進養生を行った供試体は 1%フェノールフタレイン溶液を噴霧することで呈色状況を確認し, 供試体表面を中性化部として試料を採取した。薄片に対してエタノールを使用した溶媒置換法により内部水分を除去し, さらに t-ブチルアルコールによる溶媒置換を行い, 凍結真空乾燥を行った。その後, 真空樹脂含浸装置を用いて低粘度エポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後, 表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリー(仕上げ砥粒寸法:  $0.25\mu\text{m}$ )を使用して研磨し, 表面に金-パラジウム蒸着を施して, 反射電子像観察試料とした。

走査型電子顕微鏡を用い, 観察倍率 500 倍にて無作為に抽出した 15 断面以上の反射電子像を取得した。それぞれの像は 1 辺が  $0.22\mu\text{m}$  の画素  $1148\times 1000$  画素である。取り込んだ画像のグレーレベルヒストグラムに関して, 閾値近傍の注目値の両側でヒストグラムに接線を引き, その交点を閾値とするオーバーフロー法を用いて 2 値化を行い<sup>8)</sup>, 未水和セメント, 水酸化カルシウムおよび粗大毛細管空隙を抽出した。なお, 観察された反射電子像における未水和セメント粒子と高炉スラグ粒子のグレーレベルはほぼ等しく, 個々に識別することが困難であるため, 両者を結合材粒子として抽出した。対象とする組織が等方的でランダム, 統計的に均質であると仮定するモデルベースのステレオロジーの原則に基づき<sup>9)</sup>, 着目相の面積率を体積率に等しいとした。また, 残存未水和セメント体積率と初期のセメント, 高炉スラグの体積率から, 式(1)によって水和度  $\alpha$  を求めた。

$$\alpha = 1 - \frac{V_{t=i}}{V_{t=0}} \quad (1)$$

ここに,  $V_{t=i}$ : 任意材齢  $t=i$  における未水和セメント体積率,  $V_{t=0}$ : 配合上のセメント体積率である。

### 2.3 空間統計量の計算

#### (1) 2 点相関関数<sup>10)</sup>

ある一定の長さ  $r$  の線分をランダムに落としたときにその両端が空隙に載る確率を表わす。空隙を  $P$  とするとき, 任意の点  $x_i(i=1,2)$  に関して指示関数  $I(x_i)$  を定義する。

$$I = \begin{cases} 1 & (x_i \in P) \\ 0 & (x_i \notin P) \end{cases} \quad (2)$$

$x_i \in P$  である確率を  $P\{I(x_i)=1\}$  と書くことにすると, 任意の長さの線分  $r$  の両端  $x_1, x_2$  が同一相に載るということは, 同時確率  $P\{I(x_1)=1, I(x_2)=1\}$  で与えられ, これより 2 点相関関数  $S_2^{(P)}(r)$  は式(3)で定義される。

$$\begin{aligned} S_2^{(P)}(r) &= \langle I(x_1)I(x_2) \rangle \\ &= P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここに,  $r=|x_2-x_1|$  であり,  $\langle \rangle$  は期待値を意味する。

2 点相関関数の初期値  $S_2^{(P)}(0)$  は着目相の体積率  $V_v$  と等しい。一方, 関数値は 2 点間距離の増大とともに減少し, 理論上は体積率の自乗値に収束する。関数が最初に自乗値と交わるまでの距離はその空間構造を特徴づける距離(構造距離)を表わし, これは 2 点の相関性がポアソン分布より大きな正の相関を示す範囲でもある。しかし, 対象とする構造によっては, 統計的変動により収束するまでの距離を明確に決定することが困難な場合があり, 本研究では, 関数値がおおよそ収束したと判断される距離を構造距離とした<sup>11)</sup>。また, この関数の距離  $r=0$  での傾きは着目相の比表面積に関する情報を持ち, 勾配が大きいほど着目相の単位体積当たりの表面積が大きい。

また, 線分の両端だけでなく, 長さ  $r$  の線分全体が空隙に載る確率を 2 点間直線経路相関関数  $L_2^{(P)}(r)$  として求めた。この相関関数は, 空間における着目相が位相的に直線的に連結する確率を反映した確率関数と考えることができ, その定義は式(4)にて与えられる。

$$\begin{aligned} L_2^{(P)}(r) &= \langle I(x_i) \cdot I(x_j) \cdot I(x_n) \rangle \\ &= P\{I(x_i) = 1, \dots, I(x_j) = 1, \dots, I(x_n) = 1\} \end{aligned} \quad (4)$$

点  $x_j$  は始点  $x_i$  と終点  $x_n$  を結ぶ直線上の点である。

#### (2) 計算方法

本研究においては, 2 点相関関数を求めるために放射

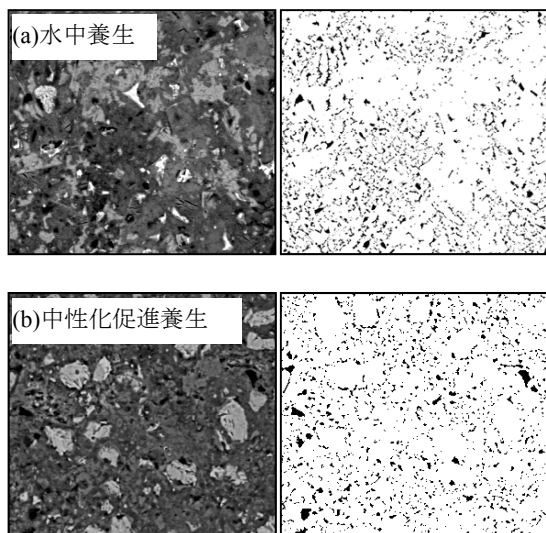


図-1 反射電子像の比較  
(普通セメントペースト)

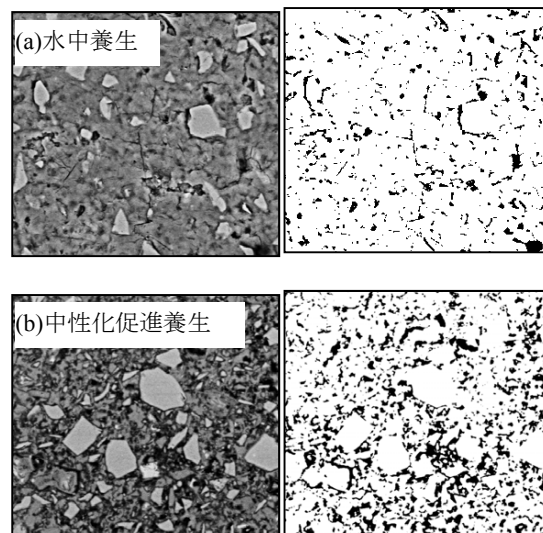


図-2 反射電子像の比較  
(高炉スラグ混入ペースト)

線テンプレートを用いた。空隙の抽出画像に対して、任意の位置に所定の長さの放射線テンプレートを載せた。このとき、原点と放射線の端点間の距離が2点間距離 $r$ であり、両端点が空隙相に載るか否かを判定した。この操作を総点数が10000点になるまで繰り返し、 $r$ を変化させて繰り返すことにより2点相関関数 $S_2^{(p)}(r)$ を求めた。

また、以上の試行において、線分全体が着目相に載るか否かを判定することによって、2点間直線経路相関関数 $L_2^{(p)}(r)$ を求めた。

#### 2.4 電気伝導率の測定<sup>12)</sup>

所定材齢にて、JSCE-G571およびASTM C 1202に準拠し、直流電源を用いた電気泳動法による電気伝導率の測定を行った。測定材齢前日にて、3時間の真空飽水処理を施し、さらに21時間飽水処理を行った。処理後の供試体に対して、直流電流により30Vの電圧を負荷した。このとき、電流値が安定したと考えられる通電開始15分後の電流値を測定して、式(5)より電気伝導率 $\sigma$ を算出した。

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (5)$$

ここに、I:電流値(amps), L:試料厚さ(cm), V:電圧(volt), A:試料の面積(cm<sup>2</sup>)である。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 高炉スラグの混入が中性化による組織形成に与える影響

図-1は材齢91日における普通セメントペーストの反射電子像と粗大毛細管空隙を抽出した2値画像の例を示したものである。水中養生を行った供試体(図-1(a))

と中性化促進養生(図-1(b))を行った供試体の空隙量には大きな差は見られない。しかし、中性化促進養生を行った供試体の空隙径は水中養生のものよりも大きく、粗大毛細管空隙の中でも大きな空隙が残存していることがわかる。また、水中養生の供試体には水酸化カルシウムを示す明灰色の部分が多く存在しているが、中性化促進養生を行った供試体には確認されなかった。

一方、図-2は材齢91日における高炉スラグ混入ペーストの反射電子像と粗大毛細管空隙を抽出した2値画像の例を示したものである。水中養生を行った供試体(図-2(a))は中性化促進養生を行った供試体(図-2(b))に比べ、視覚的に判断して、空隙量は少なく、その径も小さい。中性化促進養生を行った供試体は同じ養生を行った普通セメントペーストと比較しても明らかに空隙量が多く、視覚的にも異なる特徴を示す。また、水酸化カルシウムを示す明灰色は中性化促進養生のみならず水中養生を行った供試体においても確認されず、高炉スラグが反応する過程で消費されたと考えられる。

図-3は、材齢の進行にともなう結合材の水和度の変化を示したものである。普通セメントペーストの水和度は材齢14日まで大きく増加し、その後の変化は小さい。中性化部は材齢28日目までは水中養生とほぼ同程度の水和度を示し、水和反応が阻害されている様子は認められない。一方、高炉スラグ混入ペーストの水和度は材齢28日まで緩やかに増加し、その後の変化は小さい。また、高炉スラグセメントペーストの水和度は普通セメントペーストに比べて常に小さいことから、高炉スラグの反応がセメントの反応に比べて遅く、材齢91日目までは未反応の結合材が多数存在していることがわかる。中性化部は普通セメントペーストと同様、材齢28日目までは水中養生

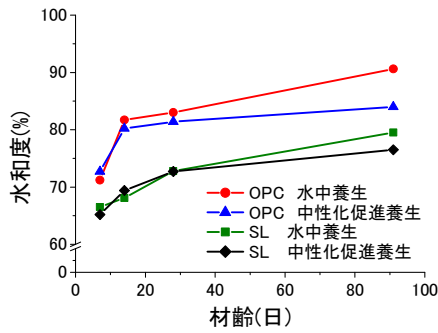


図-3 水和度の経時変化

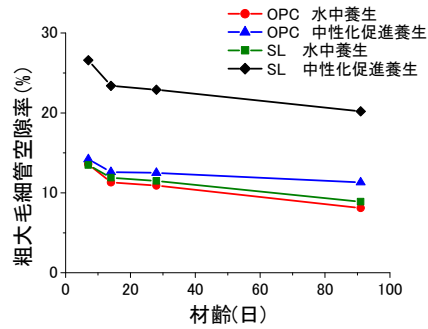


図-4 粗大毛細管空隙率の経時変化

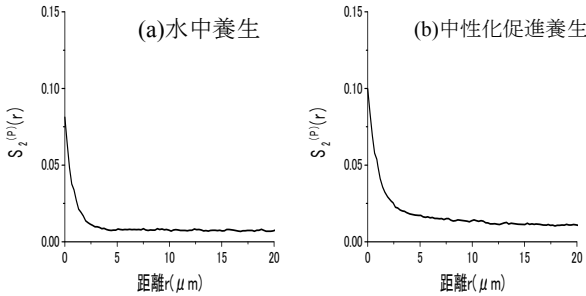


図-5 粗大毛細管空隙の2点相関関数  
(普通セメントペースト)

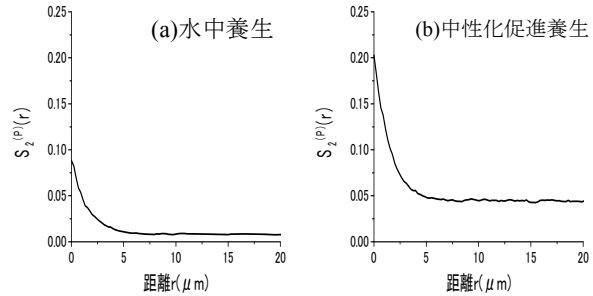


図-6 粗大毛細管空隙の2点相関関数  
(スラグ混入ペースト)

と同程度の値を示しており、水結合材比 0.50 の場合、材齢初期から乾燥の影響を受ける環境にて養生を行っても、水和反応が阻害され始めるのは材齢 28 日以降であると考えられる。しかし、その後は乾燥の影響とともに中性化によって水酸化カルシウムが消費され、高炉スラグの反応が阻害されたようであり、水和度は最も小さい。

図-4 は粗大毛細管空隙率の経時変化を示したものである。普通セメントペーストの中性化部は水中養生を行った供試体に比べ粗大毛細管空隙率は常に大きい。図-3 から材齢 91 日での水和度は水中養生を行った供試体よりも小さく、また中性化による炭酸カルシウムの空隙充填効果も粗大毛細管空隙レベルの空隙径の範囲では生じていないことがわかる。一方、水中養生を行った高炉スラグ混入ペースト供試体は普通セメントペーストとほぼ同じ値を示している。しかし、中性化部は反射電子像(図-2(b))からもわかるように、明らかに大きな値を示しており、乾燥による水和反応の阻害と多数の未反応結合材の残存、及び水和生成物の析出範囲の相違が影響していることが考えられる。

図-5 は材齢 91 日における普通セメントペーストの粗大毛細管空隙に関する 2 点相関関数を示したものである。空間分布を特徴づける構造距離は水中養生を行った供試体(図-5(a))は 3 $\mu\text{m}$  程度である。一方、若材齢から中性化促進養生を行った供試体(図-5(b))の構造距離は 7 $\mu\text{m}$  程度であった。構造距離は対象を集合と考えたとき、その空間における分布を記述するのに必要な要素数を反映し、これが大きいということはより多くの範囲を観察

しなければならないことを意味する。よって、構造距離の大きい中性化領域の組織はより不均質であるといえる。図-6 は材齢 91 日におけるスラグ混入ペーストの粗大毛細管空隙に関する 2 点相関関数を示したものである。構造距離はいずれも 7 $\mu\text{m}$  程度であり、その空間分布には差が見られないが、距離  $r=0$  における関数の傾きは中性化促進養生を行った供試体(図-6(b))では水中養生(図-6(a))に比べて大きくなっており、粗大毛細管空隙の比表面積が大きく、連続性が小さくなるような粗大毛細管空隙空間構造が形成されていることを示している。

図-7 は材齢 91 日における普通セメントペーストの粗大毛細管空隙に関する 2 点間直線経路相関関数を示したものである。水中養生を行った供試体(図-7(a))においては 6 $\mu\text{m}$  程度の直線的な連続性を持った粗大毛細管空隙が残存している。また、中性化促進養生を行った供試体(図-7(b))では、その収束距離は 12 $\mu\text{m}$  程度であり、水中養生を行った供試体と比べて大きな空隙が残存していることがわかる。図-8 は材齢 91 日におけるスラグ混入ペーストの粗大毛細管空隙に関する 2 点間直線経路相関関数を示したものである。水中養生を行った供試体(図-8(a))の収束距離は 8 $\mu\text{m}$  程度であり、粗大毛細管空隙の直線的な連続性は水中養生を行った普通セメントペーストとほとんど変わらない。一方、高炉スラグ混入ペーストの中性化部(図-8(b))は 12 $\mu\text{m}$  程度で収束しており、水中養生を行った供試体と比べて大きな空隙が残存しているが、普通セメントペーストの中性化部と同程度の収束距離である。したがって、中性化促進養生

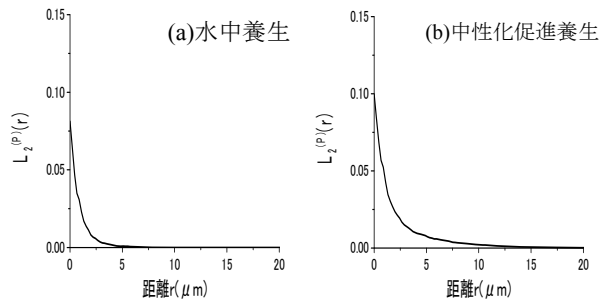


図-7 粗大毛細管空隙の2点間直線経路相関関数  
(普通セメントペースト)

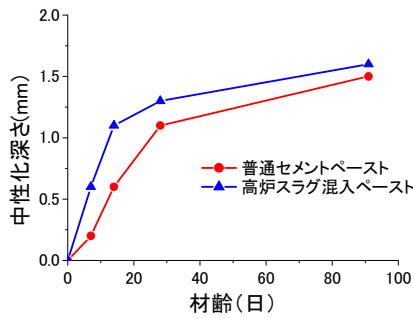


図-9 中性化深さの経時変化

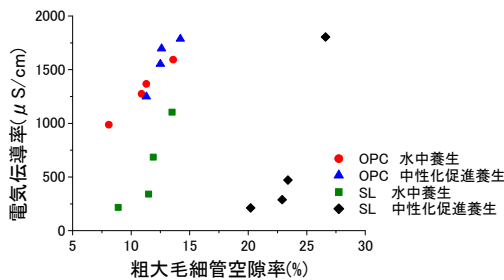


図-11 電気伝導率と粗大毛細管空隙率の関係

を行った高炉スラグ混入ペーストの粗大毛細管空隙率は普通セメントペーストの中性化部よりも非常に大きいにも関わらず、最大空隙径はほとんど変わらない。

このことから、中性化促進養生を行った供試体は水和反応が阻害され、粗大な空隙が残存する傾向にある。このことは水銀圧入法の結果に基づいて指摘されてきた中性化にともなう細孔径分布の変化傾向とも一致する<sup>5)13)</sup>。しかし、高炉スラグ混入ペーストの中性化部は粗大毛細管空隙レベルでの緻密化は見られなかった。

### 3.2 高炉スラグを混入したセメントペーストの中性化が電気伝導特性に及ぼす影響

図-9 は材齢初期から中性化促進養生を行った供試体の中性化深さの変化を示したものである。高炉スラグ混入ペーストの中性化深さは普通セメントペーストに比べ非常に大きい。高炉スラグ混入ペーストは粗大毛細管空隙率(図-4)からも普通セメントペーストに比べ、組織が粗な状態にある。これによって、普通セメントペーストに比べ二酸化炭素の拡散経路が多く、材齢初期から中性

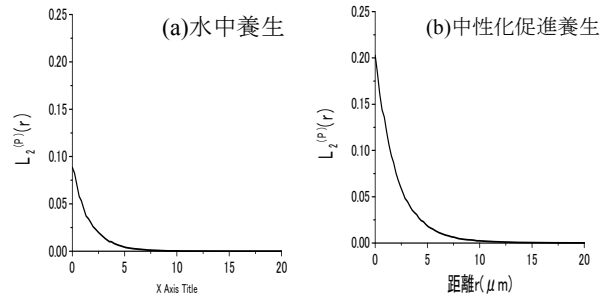


図-8 粗大毛細管空隙の2点間直線経路相関関数  
(スラグ混入ペースト)

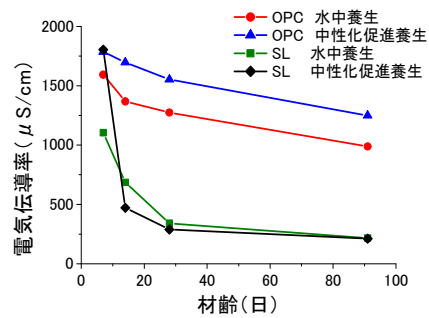


図-10 電気伝導率の経時変化

化の影響を強く受けたと考えられる。

図-10 は電気伝導率の経時変化を示したものである。いずれの供試体も材齢が経過することで電気伝導率は低下している。普通セメントペーストは水中養生を行った供試体のほうが中性化促進養生を行った供試体に比べ、常に小さな値を示している。粗大毛細管空隙率の関係からも水中養生を行った供試体のほうが緻密な組織を形成し、電気伝導を妨げていることがわかる。しかし、高炉スラグ混入ペーストは、若材齢では普通セメントペーストと同程度の値を示しているにも関わらず、その後電気伝導率値は大きく低下し、普通セメントペーストの5分の1程度の値を示している。また、中性化促進養生を行った供試体は粗大毛細管空隙率が大きく、粗な組織を形成しているにも関わらず、材齢14日以降は水中養生を行った供試体とほぼ同程度の値を示している。図-9における中性化深さの経時変化とは傾向が大きく異なり、内部組織の相違の影響が考えられる。

図-11 は粗大毛細管空隙率と電気伝導率の対応性を示したものである。水中養生を行った普通セメントペーストと高炉スラグ混入ペーストでは両者の間に直線関係が存在している。また、若材齢から中性化促進養生を行った普通セメントペーストも同様な傾向を示している。著者ら<sup>3)</sup>は普通セメントペーストの中性化による炭酸カルシウムの析出は、粗大な空隙レベルではあまり進行せず、本研究における画像観察レベル以下の微細な毛細管空隙レベルにて進行することを明らかにしている。普通セメントペーストを若材齢から中性化した場合、粗大な

空隙が残存するが、微細な空隙が充填されることで物質透過性が低下し、空隙充填機構が異なるにも関わらず、水中養生を行った供試体と同様な直線関係がみられた。一方、高炉スラグ混入ペーストは他の供試体と全く異なる傾向を示している。高炉スラグ混入ペーストの場合、残存高炉スラグ粒子の未反応核部分と粗大毛細管空隙が普通セメントペーストに比べて近接して存在している<sup>14)</sup>。これにより、高炉スラグペーストの中性化部では粗大な空隙が多数残存しているが、高炉スラグの反応による伝導経路の遮断作用は受けやすいと考えられる。また、高炉スラグの反応によって内部水が消費され、供試体内部が不飽和な状態であることが考えられる。よって、普通セメントペーストと同様な飽水処理でも飽水できない毛細管空隙が残存していた可能性がある<sup>15)</sup>。これによって、伝導経路が減少もしくは遮断され、空隙構造が変化し、電気伝導率が低下したと推測される。したがって、高炉スラグを混入した場合、若材齢から中性化の影響を受けると、粗大毛細管空隙は普通セメントペーストに比べて多数残存するが、電気伝導によって評価される物質透過性は水中養生と同程度まで低下したと考えられる。

#### 4. 結論

本研究においては、高炉スラグ混入ペーストに対して、反射電子像による画像解析を行い、粗大毛細管空隙の特徴と物質移動特性を電気伝導率の変化から考察した。本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 高炉スラグ混入ペーストの中性化部は乾燥の影響に加え、材齢 91 日では未反応結合材が多数存在し、水度は小さくなった。
- (2) 高炉スラグ混入ペーストの中性化部は粗大な空隙が多数残存する傾向にある。
- (3) 高炉スラグ混入ペーストは養生条件に関わらず、材齢の進行にともない普通セメントペーストよりも物質透過性が低下した。
- (4) 高炉スラグ混入ペーストは普通セメントペーストとは伝導経路の遮断機構が異なり、粗大な空隙が多数残存するが物質透過性は低下したと考えられる。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(c), 課題番号 21560482, 研究代表者: 五十嵐心一)の交付を受けた。ここに記して、謝意を記す。

#### 参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長滝重義: 中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, No.420,

V-13, pp.33-42, 1990

- 2) Vahid, R and Yixin, S and Andrew J.B and Zhen, H : Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing, Cement and Concrete Research, Vol.42, No.1, pp.186-193, 2012
- 3) セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究専門委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 2009
- 4) Neville, A.M. : Properties of concrete, Fourth edition, Longman, Harlow 1995
- 5) 石井祐輔, 半井健一郎, 李春鶴: 若材齢時の炭酸化によるセメント系硬化体の組成と空隙構造の変化が酸素拡散係数に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.617-622, 2010
- 6) 石田聡史, 五十嵐心一: 中性化の進行がセメントペーストの毛細管空隙構造に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.622-627, 2012
- 7) 五十嵐心一, 米山義広: 若材齢におけるセメントペーストの組織の特徴とその定量評価, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.115-122, 2008
- 8) Wong, H.S. and Head, M.K. and Buenfeld, N.R. : Pore segmentation of cement based material from backscattered electron images, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.6, pp.1083-1090, 2006
- 9) Russ, J.C. and Dehoff, R.T. : Practical stereology, Kluwer Academic/ Plenum Publishers, New York, 2000
- 10) Coker, D.A. and Torquato, S : Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No.12, pp.6087-6099, 1995
- 11) 内藤大輔, 五十嵐心一, Giang Hoang Dong: シリカフュームの混入による粗大毛細管空隙空間構造の変化, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.135-142, 2008
- 12) Nokken, M.R. and Hooton, R.D. : Electrical conductivity testing, A prequalification and quality assurance tool, Concrete International, Vol.28, No.10, pp.58-63, 2006
- 13) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.711-716, 2002
- 14) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: セメント硬化体中の毛細管空隙空間構造と電気伝導率の対応, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, pp.462-473, 2011
- 15) Chatterji, S. and Carl Bernhardsvej, Frederiksberg, C : An explanation for the unsaturated state of water stored concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.26, No.1, pp.75-79, 2004