

論文 鋳物質混和材の混入による硬化体組織形成過程の変化がセメントペーストの電気伝導特性に及ぼす影響

内藤 大輔*1・五十嵐 心一*2・柴山 舞*3・大地 正紘*4

要旨: 反射電子像の画像解析法に 2 点相関関数を導入し, 鋳物質混和材の混入によるセメントペースト硬化体組織の形成過程を定量評価し, 物質移動特性の改善メカニズムとの関連を微視的な観点から論じた。その結果, フライアッシュ混入ペーストは, 2 点相関関数の正の相関領域が普通セメントペーストに比べて大きく, さらに遠距離までの粗大毛細管空隙の連結性が高くなるため, 電気伝導率は大きくなることが示された。一方, 高炉スラグ混入ペーストでは, 結合材粒子と粗大毛細管空隙がより近傍に存在してその空隙経路の組織変化を継続して受けやすく, これが物質移動抵抗に影響を及ぼすと考えられる。

キーワード: 反射電子像, 鋳物質混和材, 電気伝導率, 2 点相関関数, 粗大毛細管空隙, 硬化体組織形成過程

1. 序論

鋳物質混和材はその使用により安価なコンクリートの作製が可能となると同時に, その性能を改善することができるため, 現代のコンクリート製造において欠かすことのできない主要な材料である。我が国においては, 安価で容易に入手できるフライアッシュや高炉スラグが主に用いられている。しかし, 用いる鋳物質混和材の種類によって, コンクリートの性能は変化しうる。

コンクリートの性能は, 水和反応あるいはポゾラン反応といった化学反応による内部組織形成に依存し, 鋳物質混和材混入系においても, 微視的な観点から巨視的性能の変化が論じられてきた。たとえば Hooton¹⁾は, フライアッシュや高炉スラグを混入することで, 無混和のものに比べて総細孔量が減少し, さらに, 水銀圧入曲線から得られる細孔径分布が小径側へと移動するため, 透水係数が小さくなることを指摘している。このように, 鋳物質混和材混入系においては, セメントの水和反応に加え, 混和材の反応も起こるため, 内部組織が緻密になり性能が改善すると考えられてきた。

一方, 用いる混和材の種類によって, その反応機構が相違するため, セメントペースト組織の形成過程は大きく変化すると考えられる。フライアッシュは, セメントの水和反応によって遊離した水酸化カルシウムとのポゾラン反応によって主に C-S-H ゲルを生成し, この過程の化学量論的な定式化もなされている²⁾。それに対して, 高炉スラグ微粉末の場合は, アルカリに刺激され, 高炉スラグ自体が水和反応を生じるが, その反応過程を単純な化学量論式にて表わすことは困難である。したがって, スラグ自体の反応にともなう組織形成を理解するにあつ

ては, 硬化体組織を直接観察し, マトリックス全体の特徴を把握することが, 高炉スラグ混入系での性能評価において, 最も直接的かつ簡便な方法と考えられる。

反射電子像の画像解析法は, 硬化体組織を直接観察, 評価でき, この手法に 2 次のステレオロジーパラメータである 2 点相関関数を導入すれば, コンクリートの性能に重大な影響を及ぼす粗大な毛細管空隙の幾何学的特徴を定量的に評価することができる³⁾。この手法を適用することによって, 鋳物質混和材の混入による諸性能の改善メカニズムを微視的構造の変化から, より詳細に論ずることが可能となると考えられる。

本研究では, 鋳物質混和材混入セメントペーストの粗大な毛細管空隙の特徴を, 反射電子像の画像解析によって定量評価する。さらに, 鋳物質混和材の混入による物質移動特性の変化を, 硬化体組織中の連続した物質移動経路の存在や, 物質移動抵抗と関連付けて論ぜられる電気伝導率の測定によって明らかにし⁴⁾, 物質移動経路としての粗大毛細管空隙の空間構造の影響を把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびセメントペーストの配合

セメントには普通ポルトランドセメント (密度 = 3.15g/cm³, 比表面積 = 3310cm²/g) を使用した。表-1 にセメントの化学組成を示す。また, 鋳物質混和材としては JIS 規格 II 種品に相当するフライアッシュ (密度 = 2.19g/cm³, 比表面積 = 3450cm²/g) および高炉スラグ微粉末 (密度 = 2.89g/cm³, 比表面積 = 4210cm²/g) を使用した。これらの材料を使用し, 水結合材比が 0.40 の鋳物質

*1 株式会社JFE エンジニアリング 修(工) (正会員)
 *2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)
 *3 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)
 *4 株式会社日本ハイウェイエンジニアリング名古屋 (正会員)

表-1 セメントの化学成分 (m/m%)

| CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | SO ₃ | Cl |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------------------|-------------------|-----------------|-------|
| 65.86 | 20.55 | 5.21 | 2.44 | 0.91 | 0.41 | 0.27 | 2.33 | 0.006 |

混和材混入セメントペーストを練り混ぜた。なお、混和材の置換率はフライアッシュの場合は15%、高炉スラグの場合は50%とした。直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を作製し、これを材齢1日にて脱型した後、所定材齢まで20℃の水中養生を行った。また、比較用として水セメント比が0.40の普通セメントペーストも作製した。

2.2 反射電子像観察試料の作製および画像解析

材齢1, 7, 28 および91日にて供試体中央部から試料を切り出し、これをエタノールに浸漬して水とエタノールとの置換を行った。さらに、エタノールとt-ブチルアルコールとの置換を行った後、凍結真空乾燥を行い、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、表面を耐水研磨紙を用いて注意深く研磨し、さらに、ダイヤモンドスラリーを用いた仕上げ研磨を施した。研磨後の試料に金-パラジウム蒸着を施し、反射電子像観察試料を得た。

走査型電子顕微鏡を用いて、観察倍率500倍にて、無作為に10断面の反射電子像をパーソナルコンピュータに取り込んだ(図-1(a))。1画像は1148×1000画素からなり、1画素は0.22μmに相当する。取得した反射電子像に対し、グレースケールに基づく2値化処理を行い、未水とセメント粒子および毛細管空隙(径0.22μm以上、以後これを粗大毛細管空隙と称す)を抽出した2値画像を得た(図-1(b))。なお、観察された反射電子像における未水とセメント粒子と高炉スラグのグレースケールはほぼ等しく、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。取得した未水とセメント粒子および未水と高炉スラグの面積率を計数し、対象材料のランダム性を仮定したモデルベースのステレオロジーの原理に従い、これを体積率に等しいとした。得られた体積率(VC_{BEI})および初期のセメント、高炉スラグの体積率(VC₀)から式(1)に基づき水と度α_{BEI}を算出した。

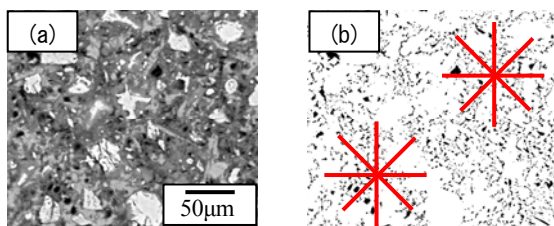


図-1 W/C=0.40、普通セメントペースト、材齢28日における反射電子像および粗大毛細管空隙上の放射線テンプレートの例 ((a): 反射電子像, (b): 粗大毛細管空隙の2値画像と放射線テンプレート)

$$\alpha_{BEI} = 1 - \frac{VC_{BEI}}{VC_0} \quad (1)$$

2.3 2点相関関数⁵⁾

(1) 定義

2点相関関数とは、画像にランダムに落とした線分の両端が同一相に載る確率関数である。今、着目相である粗大毛細管空隙相をPとし、任意の点(x₁=1,2)に関して次のような指示関数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∈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x₁, x₂が同一相に載るということは、同時確率P{I(x₁)=1, I(x₂)=1}で与えられ、これより2点相関関数S₂^(P)(r)は式(3)で定義される。

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

ここに、r = |x₂ - x₁|であり、<>は期待値を表わす。

また、2点相関関数は、線分の両端が同一相に載る確率を表わすが、これには両端の粒子が異なる場合(図-2(a))と同じ粒子領域内の場合(図-2(b))の両者を含む。しかし、両者では、領域の連結性が異なり、物質移動特性への関与も大きく異なると考えられる。そこで図-2(b)の同じ粒子(クラスター)に載る場合を別途評価し、これを2点クラスター相関関数S₂^{Cl(P)}(r)とした⁶⁾。

一方、2点相関関数を拡張し、線分の両端が未反応結合材相(B)と粗大毛細管空隙相(P)に載る確率を求めることができる。これを2点クロス相関関数C₂^(B,P)(r)と称すこととし、その定義は式(4)に示すとおりである。

$$\begin{aligned} C_2^{(B,P)}(r) &= \langle I^{(B)}(x_1) I^{(P)}(x_2) \rangle \\ &= P\{I^{(B)}(x_1), I^{(P)}(x_2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

(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、放射線テンプレートを用いた(図-1(b))。抽出した粗大毛細管空隙の2値画像に対し、任意の位置に所定の長さrを

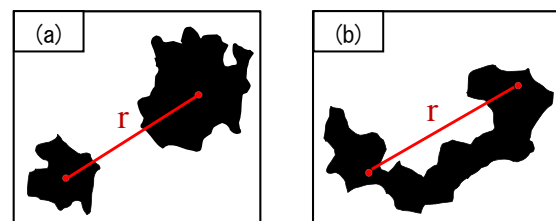


図-2 2点相関関数および2点クラスター相関関数の概略図 ((a, b): 2点相関関数 (b): 2点クラスター相関関数)

持ったテンプレートを載せ、原点と各方向の放射線の先端が同一相上に載るか否かを判定した。この操作を画像上の複数の箇所ですべて点検 10000 点となるまで繰り返した。放射線の長さを 0 から最大 350 画素まで変化させ、それぞれの距離に対応する 2 点相関関数を求めた。

2.4 強熱減量試験

2.1 と同様に作製、養生を行った供試体から所定材齢にて試料を採取し、110°C の炉乾燥を行った。乾燥終了後の試料を用いて、JIS R 5202 に準じて 1000°C で強熱し、式(5)により強熱減量 (IG) を求めた。

$$IG = (M_{110} - M_{1000}) / M_{110} \quad (5)$$

ここに、 M_{110} は 110°C 乾燥後の質量、 M_{1000} は 1000°C 強熱後の質量を表わす。

2.5 不溶残分試験

2.1 と同様に作製、養生を行った供試体から所定材齢にて試料を採取し、110°C の炉乾燥を行った。乾燥終了後の試料を用いて、JIS R 5202 に準じて、式(6)により不溶残分 (IS) を求めた。

$$IS = M_{insol} / M_{110} \quad (6)$$

ここに M_{insol} は残分の質量を表わす。

2.6 ポズラン反応度の推定^{7),8)}

ポズラン反応度は、初期のポズラン材質量に対する所定材齢までに消費したポズラン材質量で定義される。未反応ポズラン量を不溶残分試験から求め、不溶残分値を 2.4 で求めた強熱減量値で補正し、セメントペーストの固体分の質量に対する未反応ポズラン量を求めた。初期のポズラン材の質量との差から、式(7)によりポズラン反応度 (R) を求めた。

$$R = \left[\left(\frac{IS_0}{1-IG_0} \right) - \left(\frac{IS_t}{1-IG_t} \right) \right] / \left[\left(PE \cdot \frac{IS_{PO}}{1-IG_{PO}} \right) \right] \quad (7)$$

$$IS_0 = (1 - PE) \cdot IS_{CE} + PE \cdot IS_{PO} \quad (8)$$

$$IG_0 = (1 - PE) \cdot IG_{CE} + PE \cdot IG_{PO} \quad (9)$$

ここに、 IS_0 は初期のセメントペーストの不溶残分、 IS_t は材齢 t 日のセメントペーストの不溶残分、 IG_0 は初期のセメントペーストの強熱減量、 IG_t は材齢 t 日のセメントペーストの強熱減量、PE はポズラン材の置換率、 IS_{PO} はポズラン材の不溶残分、 IG_{PO} はポズラン材の強熱減量、 IS_{CE} はセメントの不溶残分、 IG_{CE} はセメントの強熱減量を表わす。

2.7 電気泳動法による電気伝導率の測定⁴⁾

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 JSCE-G571 および ASTM C 1202 に準じて行った。所定材齢前日にて、円柱供試体から直径 100mm×高さ 50mm 程度の円盤型試料を切り出し、供試体側面にエポキシ樹脂を塗布した。樹脂の硬化後、24 時間の真空飽水処理を行った。セル溶液として 0.3mol/L の水酸化ナトリウム溶液を使用し、直流電源により 30V の電圧を負荷した。通

表-2 推定した細孔溶液の電気伝導率 ($\times 10^{-4} \mu S/cm$)

| 配合 | 材齢 (日) | | | |
|---------------|--------|-------|-------|-------|
| | 1 | 7 | 28 | 91 |
| 普通セメントペースト | 6.320 | 7.566 | 8.134 | 8.572 |
| フライアッシュ混入ペースト | 6.073 | 7.656 | 7.767 | 6.204 |
| 高炉スラグ混入ペースト | 4.129 | 7.102 | 7.246 | 6.083 |

電開始直後に電流値は速やかに安定するので、Nokkenらの提案⁴⁾に基づき、通電開始 15 分後の電流値を用いて、式(10)により、所定材齢における電気伝導率 σ を算出した。ただし、材齢 1 日の試料に関しては、脱型後だけに樹脂を塗布し、毛細管空隙の完全飽和状態を仮定して、電気伝導率の測定を行った。

$$\text{電気伝導率 } \sigma (\mu S/cm) = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad (10)$$

ここに I は電流値 (amps)、L は供試体長さ (cm)、V は電圧値 (V)、A は供試体の投影面積 (cm^2) を表わす。

また、セメント系材料の電気伝導率は、細孔溶液の電気伝導率に強く依存することが知られている。本研究においては、Taylor⁹⁾のモデルを使用し、表-1 に示したセメントの化学組成を用いて細孔溶液中の K^+ および Na^+ イオンのモル量を算出した。その後、 K^+ および Na^+ イオンのモル量の和と OH^- イオンのモル濃度が等価であると仮定し、Snyder ら¹⁰⁾のモデルを使用し、細孔溶液の電気伝導率 σ_0 を推定した。なお、高炉スラグ混入ペーストに関しては、丸屋らの結果¹¹⁾に基づいて K^+ および Na^+ のモル量を引用し、細孔溶液の電気伝導率の算出を行った。推定した細孔溶液の電気伝導率を表-2 に示す。

3. 結果および考察

3.1 鉱物質混和材の混入による結合材の反応度の変化

図-3 は、材齢の進行にともなう水和水度の変化を示したものである。いずれのセメントペーストについても、材齢の進行にともなう水和水度は増加する。材齢 1 日における水和水度に着目すると、普通セメントペーストに比べて、

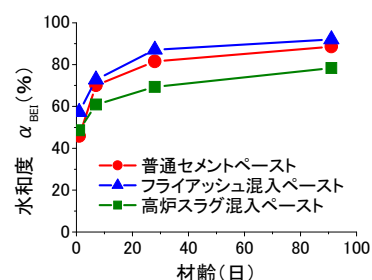


図-3 水和水度の経時変化

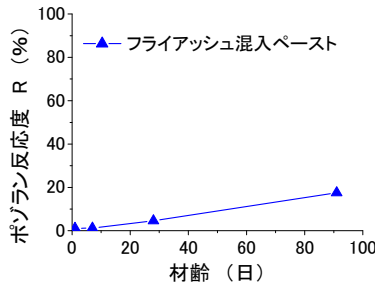


図-4 ポゾラン反応度の経時変化

フライアッシュ混入ペーストの方が水合度は大きいことがわかる。フライアッシュは、反応生成物析出の核となるため、これを混入したセメントペーストは材齢初期の水和反応が促進されることが知られており¹²⁾、反射電子像観察から得られる水合度にもその傾向が認められる。その後の材齢においても、フライアッシュ混入ペーストの方が普通セメントペーストに比べ、水合度は高いようである。一方、高炉スラグ混入ペーストの水合度は、高炉スラグの反応がセメントの反応に比べて遅いため、結合材全体としての反応度は、材齢91日までは普通セメントペーストに比べて低い。

図-4は、フライアッシュ混入ペーストのポゾラン反応度の経時変化を示したものである。フライアッシュは材齢7日までは、ほとんど反応していない。これ以後の材齢において、ポゾラン反応の進行が認められるが、材齢91日においても全体の20%程度しか反応していない。

3.2 セメントペースト硬化体組織の形成過程

図-5は、鉱物質混和材の有無による粗大毛細管空隙の2点相関関数の経時変化の相違を示したものである。フライアッシュ混入ペーストに着目すると、材齢1日において、粗大毛細管空隙率を表わす関数の初期値は普通セメントペーストに比べて大きい。また、粗大毛細管空隙構造を特徴付ける関数の収束距離に着目すると、フライアッシュ混入ペーストは7 μm 程度と、普通セメントペーストの5 μm 程度に比べて長い。2点相関関数の収束距離は、構成相としてのランダム性を反映すること、および図-4にて示したフライアッシュのポゾラン反応性を合わせて考えれば、フライアッシュ混入ペーストは、材齢

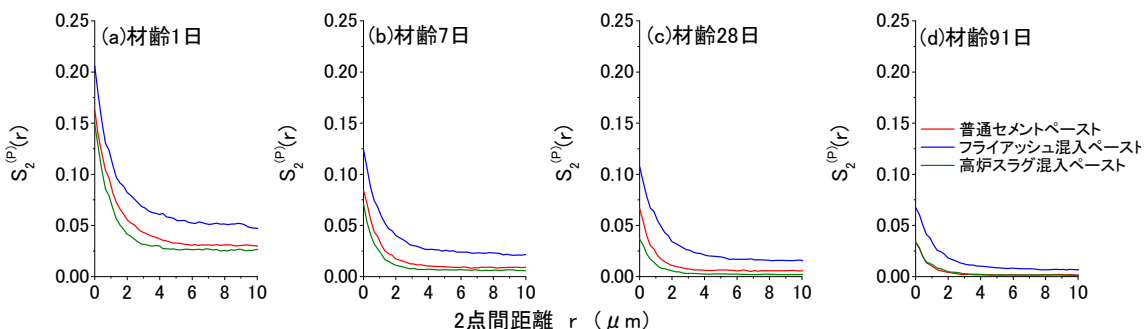


図-5 粗大毛細管空隙の2点相関関数の経時変化

1日において、普通セメントペーストに比べて、より粗大な毛細管空隙が存在するような不均質な粗大毛細管空隙構造を形成しているといえる。この傾向は、材齢91日においても認められており、たとえセメントの水和度が普通セメントペーストに比べて高くても、フライアッシュの反応率が小さいため、普通セメントペーストの方が粗大毛細管空隙構造が緻密になっている。

一方、高炉スラグ混入ペーストに着目すると、材齢1日において、高炉スラグの有無による粗大毛細管空隙率の相違は小さい。また、関数が収束するまでの距離は、高炉スラグ混入ペーストの方が短いようである。材齢7日および材齢28日においては、普通セメントペーストに比べて結合材反応度が小さいにも関わらず(図-3)、粗大毛細管空隙率は高炉スラグ混入ペーストの方が小さくなり、収束距離も明らかに短い。この収束距離は構成相としての粒子寸法も反映することを考慮すれば、反射電子像の画像解析にて識別される寸法の空隙においては、高炉スラグ微粉末を混入することで粗大毛細管空隙が小径化し、空間構造としては、より緻密になることがわかる。一方、材齢91日においては、高炉スラグの有無による粗大毛細管空隙構造の相違は全く認められない。

図-6は、鉱物質混和材の有無による粗大毛細管空隙の2点クラスター相関関数の経時変化の相違を示したものである。材齢1日において、フライアッシュ混入ペーストの収束距離は25 μm 程度であるのに対し、普通セメントペーストにおいては15 μm 程度と短い。すなわち、フライアッシュ混入ペーストにおいては、より遠距離まで粗大毛細管空隙の連結性が高いといえる。また、材齢91日においても、フライアッシュ混入ペーストは10 μm 程度の粗大毛細管空隙を有するが、普通セメントペーストにおいては、そのような空隙は存在しない。

一方、高炉スラグ混入ペーストの収束距離は、材齢28日までは、普通セメントペーストに比べて短いようであり、粗大毛細管空隙のクラスターサイズは小さくなるが、材齢91日における関数分布の相違は認められない。

図-7は、鉱物質混和材の有無による未水合セメント(未反応高炉スラグを含む)と粗大毛細管空隙間の2点

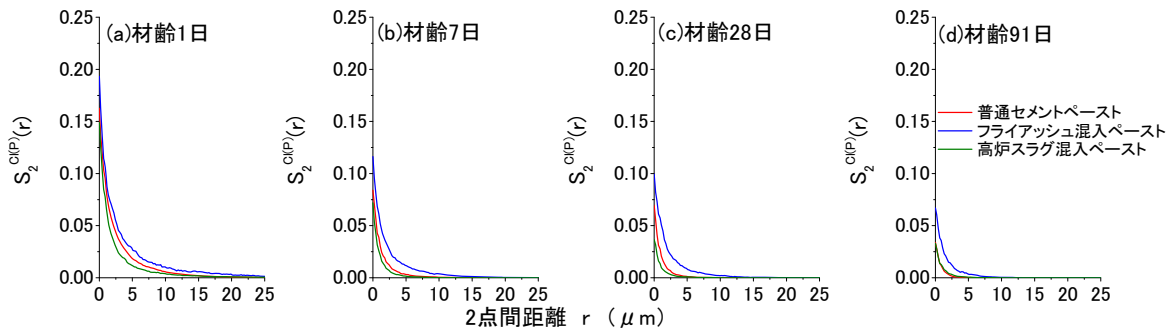


図-6 粗大毛細管空隙の2点クラスター相関関数の経時変化

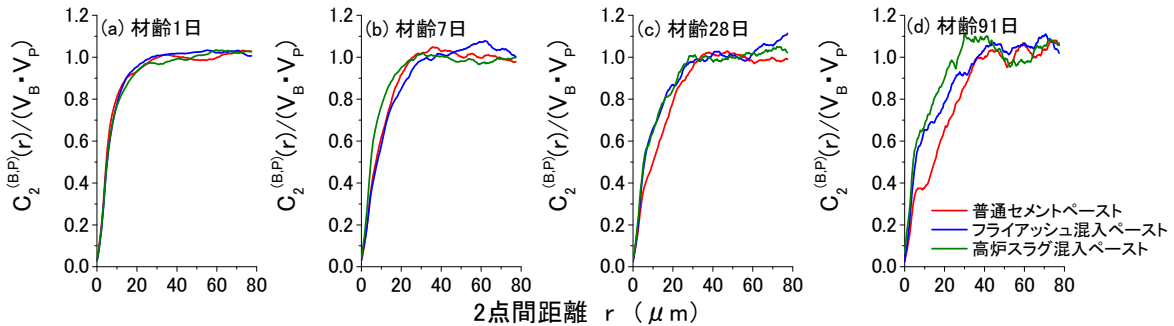


図-7 未水和セメント（未水和高炉スラグ）と粗大毛細管空隙間の2点クロス相関関数の経時変化

クロス相関関数をそれぞれの体積率 V_B と V_P の積で正規化して示したものである。フライアッシュ混入ペーストに着目すると、材齢7日までは、普通セメントペーストとの関数分布に相違は認められない。材齢28日および91日においては、関数の収束距離はほとんど相違ないが、 $30\mu\text{m}$ 以下の距離における関数値は、普通セメントペーストに比べて大きく、未水和セメントの近傍に粗大毛細管空隙が存在する。

一方、高炉スラグ混入ペーストの場合も、フライアッシュ混入ペーストと同様に、材齢1日における関数分布に相違は認められない。しかし、材齢7日以後においては $20\mu\text{m}$ 以下の距離における関数値が普通セメントペーストに比べて明らかに大きくなる。さらに材齢91日になると、高炉スラグ混入ペーストの収束距離は、普通セメントペーストのそれに比べて明らかに短くなる。すなわち、高炉スラグ混入ペーストにおいては、未水和結合材と粗大毛細管空隙の空間配置における相関性が完全ランダム分布であるポアソン分布に比べて小さい負の相関領域が縮小していることがわかる。

3.3 鉱物質混和材の混入にともなう電気伝導特性の変化のメカニズムと硬化体組織形成過程

図-8は、鉱物質混和材の有無による電気伝導率の経時変化の相違を示したものである。いずれのセメントペーストも材齢の進行とともに電気伝導率は減少し、物質移動抵抗が増大していることを意味する。フライアッシュ混入ペーストは、いずれの材齢においても、普通セメントペーストに比べて電気伝導率は大きく、より多くの連

続経路を有している。一方、高炉スラグ混入ペーストは、材齢1日においては、電気伝導率は大きくなるが、材齢7日以後になると普通セメントペーストに比べて電気伝導率は小さくなる。高炉スラグを混入することで、無混和のものに比べて物質移動抵抗が増すことが知られているが、電気伝導率変化の観点からもそのような傾向が示されたといえる。

著者ら¹³⁾は、前報にて、2点相関関数において粗大毛細管空隙相がポアソン分布に比べて強い正の相関を形成する領域の面積の増大にともない電気伝導率が増すことを指摘している。図-5にて示したように、フライアッシュ混入ペーストの正の相関領域の面積は、いずれの材齢においても普通セメントペーストのそれに比べて明らかに大きい。また、図-6より、フライアッシュ混入ペーストは、普通セメントペーストに比べて、必ずしも直線経路をたどらなくても、遠距離まで粗大毛細管空隙を通して物質が達するような連結性の高い空隙構造を有し、

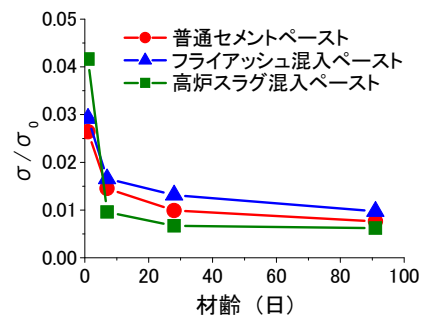


図-8 電気伝導率の経時変化

このことが電気伝導率の変化に現れていると考えられる。

一方、高炉スラグ混入ペーストは、結合材の反応率は普通セメントペーストに比べて小さいにもかかわらず(図-3) 2点相関関数の正の相関領域の面積は明らかに小さくなる(図-5)。また、粗大毛細管空隙の連結性を保持する距離もより短く変化しており(図-6)、これらの結果、電気伝導率は普通セメントペーストに比べて小さくなったものと考えられる。一方、材齢91日における粗大毛細管空隙に関する関数分布はほぼ一致しているが、この材齢における電気伝導率は高炉スラグ混入ペーストの方が若干小さい。前述のように、高炉スラグ混入ペーストは、未反応結合材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する(図-7)。すなわち、もともと連結性の高い高炉スラグ混入ペーストの粗大毛細管空隙構造に対して、未反応結合材との近接性のため、さらなる反応が生じた場合に、空隙の充填もしくは経路の遮断作用を受けやすいような幾何学的な特徴を有していることになる。その結果、より不連続な空隙構造が形成されやすいものと考えられる。

4. 結論

- (1) フライアッシュの混入による材齢初期の水和反応の促進が、反射電子像の画像解析により得られる水合度からも明らかになった。
- (2) フライアッシュ混入ペーストは、普通セメントペーストに比べて不均質な粗大毛細管空隙構造を有し、粗大毛細管空隙の連結性が大きい。
- (3) フライアッシュ混入ペーストは、普通セメントペーストに比べて、より粗大な空隙が多く、不均質に存在するため、物質移動抵抗は小さくなる。
- (4) 高炉スラグ混入ペーストは、材齢7日および28日において、普通セメントペーストに比べて緻密な粗大毛細管空隙構造を形成するが、材齢91日における関数分布はほぼ等しい。
- (5) 未反応結合材と粗大毛細管空隙の距離が小さくなることによって、空隙が水和生成物の充填を受けやすくなり、これが高炉スラグ混入ペーストにおける優れた物質移動抵抗性に寄与すると考えられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、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。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) Hooton, R.D.: Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, slag, and silica fume,

“Blended Cements”, ASTM STP 897 (G. Frohnsdorff, Ed.), American society for testing and materials, Philadelphia, pp.128-143, 1986

- 2) Young, J.F. and Hansen, W.: Volume relationships for CSH formation based on hydration stoichiometry, Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol.85, pp.313-332, 1987
- 3) 五十嵐心一, 米山義広, 渡辺暁央: 水和反応の進行にともなうセメントペースト構成相の空間分布構造の変化, 土木学会論文集, 部門E, No.3, pp.444-458, 2007
- 4) 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.
- 5) 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
- 6) Torquato, S., Beasley, J.D. and Chiew, Y.C.: Two-point cluster function for continuum percolation, Journal of Chemical Physics, Vol.80, No.10, pp.6540-6547, 1988
- 7) 小早川真, 黄光律, 羽原俊祐, 友澤史紀: 水比, 混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.121-126, 1999
- 8) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀: 反射電子像の画像解析による鉱物質混和材混入セメントペーストの細孔構造の解明, 土木学会論文集, No.781, V-66, pp.145-155, 2005
- 9) Taylor, H.F.W.: A method for predicting alkali ion concentrations in cement pore solutions, Advances in Cement Research, Vol.1, No.1, pp.5-17, 1987
- 10) Snyder, K.A. et al.: Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH^- , K^+ and Na^+ concentrations, Cement and Concrete Research, Vol.33, No.6, pp.793-798, 2003
- 11) 丸屋剛, 松岡康訓: 結合材の種類が細孔溶液中の各種イオン濃度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.633-638, 1991
- 12) Xu, A., Sarkar, S.L. and Nilsson, L.O.: Effect of fly ash on the microstructure of cement mortar, Materials and Structures, Vol.26, No.7, pp.414-424, 1993
- 13) 内藤大輔, 五十嵐心一, 柴山舞: セメントペーストの電気伝導率と粗大毛細管空隙空間構造の対応, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.901-906, 2009