

## セメントペーストの電気伝導率と粗大毛細管空隙空間特性の関係

金沢大学 学生員 ○内藤 大輔  
金沢大学 正会員 五十嵐心一

## 1. まえがき

コンクリートのような多孔質材料の物性は、その材料の空隙構造に強く依存することが広く知られている。したがって、空隙構造を適切に評価することは、重大な意義を有する。空隙構造の評価には様々な手段が用いられるが、電気伝導率の測定は、空隙構造全体を物質移動特性に関係づける有力な手段である。

一方、著者らはこれまで、空間統計学の重要なパラメータである2次のステレオロジー量を反射電子像の評価に導入し、分解能以上の粗大な毛細管空隙の空隙構造を定量的に評価できることを示している。

本研究においては、2次のステレオロジーにより特性化されたセメントペーストの粗大毛細管空隙空間構造と、電気泳動法により求められるセメントペーストの電気伝導率の関係を明らかにすることを目的とする。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

セメントには、普通ポルトランドセメントを使用し、JIS R 5201 に従って、水セメント比が 0.4, 0.5 および 0.6 のセメントペーストを練り混ぜ、直径 100mm, 高さ 200mm の円柱供試体を作製した。材齢 1 日において脱型し、所定材齢まで 20°C の水中養生を行った。

## 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, 91 日において円柱供試体内部から試料を切り出し、エタノールに浸漬した。さらに、エタノールを t-ブチルアルコールにより置換し、凍結真空乾燥を行った。真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、試料表面を研磨し、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 倍にて反射電子像を取得し、グレースケールに基づく 2 値化を行い、抽出した空隙を粗大毛細管空隙とした。

## 2.3 2点相関関数

2点相関関数とは、ある長さ  $r$  を持った線分を画像

上に落した時、その両端が同一相上に載る確率関数である。任意の点  $(x_i=1,2,\dots)$  に関して式[1]のような指示関数  $I(x_i)$  を定義する。

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

点  $x_i$  が相 P 上にある確率を  $P\{I(x_i) = 1\}$  と書くことにすると、任意の距離  $r$  離れたセメントペースト中の 2 点  $x_i, x_j$  が同一相上にあることより、2点相関関数  $S_2^{(P)}(r)$  は式[2]のように定義される。

$$S_2^{(P)}(r) = \langle I^{(P)}(x_i)I^{(P)}(x_j) \rangle \\ = P\{I^{(P)}(x_i) = 1, I^{(P)}(x_j) = 1\} \quad [2]$$

ここに  $r=|x_j-x_i|$  であり、 $\langle \rangle$  は期待値を意味する。

2点相関関数からは以下の式のような、多孔質体の物質移動特性と関連付けられるような様々なパラメータ  $\lambda$  が定義されている<sup>1)</sup>。

$$\lambda_A = \int_0^\infty [S_2^{(P)}(r) - \{S_2^{(P)}(0)\}^2] dr \quad [3]$$

$$\lambda_B = \left( \int_0^\infty [S_2^{(P)}(r) - \{S_2^{(P)}(0)\}^2] r dr \right)^{\frac{1}{2}} \quad [4]$$

$$\lambda_C = \frac{\{S_2^{(P)}(0)\}^2}{\frac{d}{dr} S_2^{(P)}(r) \Big|_{r=0}} \quad [5]$$

これらに加え、関数値が最初に体積率の自乗値に交わるまでの距離 (構造距離) も空隙構造を特徴づけるパラメータであり、これを  $\lambda_D$  と表わすこととする。

2.4 電気泳動法<sup>2)</sup>

円柱供試体の中心部から直径 100mm, 高さ約 50mm の円盤型試料を切り出し、JSCE-G571 および ASTM C 1202 に準じて電気泳動法を実施した。直流電源によって 30V の電圧を負荷し、15 分後の電流値を測定して、式[6]より電気伝導率を求めた。

$$\text{電気伝導率 } \sigma \left( \frac{\mu S}{cm} \right) = \frac{I \cdot L}{V \cdot A} \quad [6]$$

ここに、 $I$  は測定した電流値 (amps),  $L$  は供試体の厚さ (cm),  $V$  は測定時の電圧 (V),  $A$  は試料の投影面積 ( $cm^2$ ) を表す。

キーワード 反射電子像, 画像解析, 粗大毛細管空隙, 2点相関関数, 電気伝導率

連絡先 〒920-0092 石川県金沢市角間町 金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻

T E L 076-264-6373

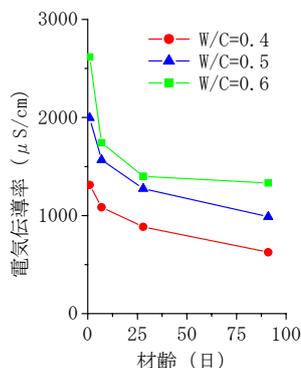


図1 材齢の進行にともなう電気伝導率の変化

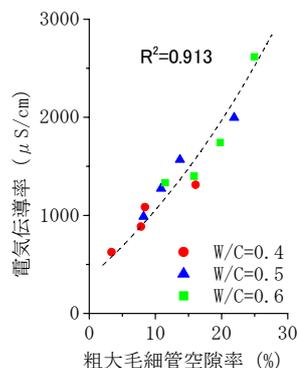


図2 電気伝導率と粗大毛細管空隙率の関係

また、セメント系材料の電気伝導率は、細孔溶液の伝導率に依存する。参考文献[2]に基づいて推定される細孔溶液の電気伝導率 $\sigma_0$ を測定された電気伝導率 $\sigma$ で除し、これを形成ファクター $F=\sigma_0/\sigma$ とした。

### 3. 結果および考察

図1は電気伝導率の変化を示したものである。いずれの水セメント比においても、材齢の進行にともない電気伝導率は減少する。一方、水セメント比が高くなるにつれて硬化体組織中の毛細管空隙量および連続性が增大し、電気伝導率が増加することがわかる。

図2は反射電子像の画像解析により取得した粗大毛細管空隙率と電気伝導率の関係を示したものである。両者の間には良好な相関性が認められる。図1からも推察されるように、電気伝導率は全毛細管空隙量に依存する。しかし、粗大毛細管空隙率とも相関性が存在することは、全毛細管空隙量が未知であっても、画像解析で検出されるような空隙構造を把握することで、物質移動特性を推定しうることを示すと考えられる<sup>3)</sup>。

図3はセメントペーストの電気伝導率と各パラメータ $\lambda$ の関係を示したものである。いずれのパラメータに関しても、両者の間には直線的な相関性が認められる。パラメータ $\lambda$ は、2点相関関数において、ポアソン分布より大きな相関性を示す空間構造の大きさを特徴づけるものである。すなわち、 $\lambda$ が大きいことは、粗大毛細管空隙の凝集範囲や空隙径が大きいことを意味しており、粗大毛細管空隙の空間構造のそのような特徴が物質移動に深く関係することがわかる。

図4は形成ファクター $F$ とパラメータ $\lambda$ の関係を示したものである。粗大毛細管空隙構造が変化し、 $\lambda$ がある値より小さくなると、 $F$ が急激に増大する傾向が

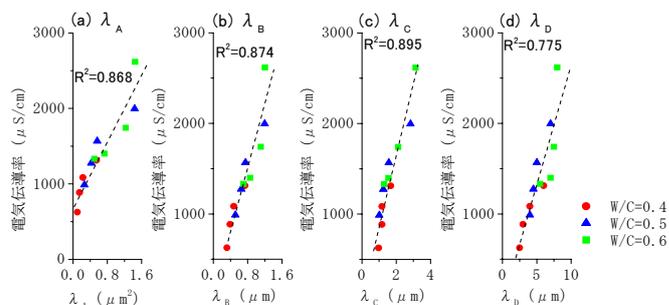


図3 電気伝導率とパラメータ $\lambda$ の関係

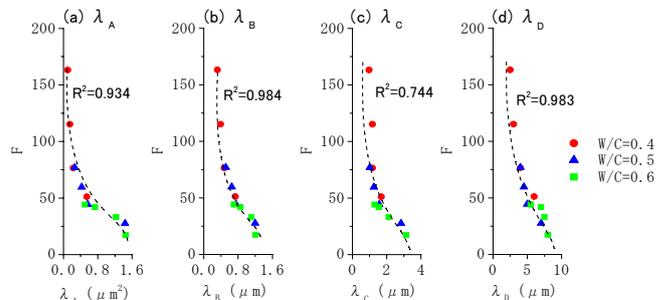


図4 形成ファクター $F$ とパラメータ $\lambda$ の関係

見られる。 $F$ は、セメントペースト中の物質移動に対する有効体積や経路を考えたとき、系全体の空隙率や比表面積、空隙の屈曲性や連続性の変化によって生ずる物質移動抵抗を反映したパラメータとみなすことができる。すなわち、材齢や $W/C$ の変化により、粗大毛細管空隙構造が緻密化してくると、分解能以下の毛細管空隙を含めて、あるところで系全体の空隙同士の連続性が急激に失われるため、このような傾向が現れたものと考えられる。以上のことから、2点相関関数から導かれるパラメータは、空隙構造全体の物質移動特性を反映しているといえる。

### 4. あとがき

粗大な毛細管空隙の空間構造と電気伝導率は密接に関係することが明らかとなった。また、この粗大毛細管空隙の2点相関関数から求められる空間構造のパラメータ $\lambda$ は、物質移動特性の有力なパラメータになると考えられる。

### 5. 参考文献

- 1) Coker, D.A. et al.: J. Geophysical Res., Vol.101, No.B8, pp.17497-17506, 1996
- 2) Nokken, M.R. and Hooton, R.D.: Mat.&Struc., Vol.41, pp.1-16, 2008
- 3) Wong, H.S. and Buenfeld, N.R.: Cem. Conc. Res., Vol.36, pp.1556-1566, 2006