

セメントペースト中の気泡の空間構造を特徴づける距離の相関性

金沢大学 学生会員 ○吉川 峻生
金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

画像解析の発展により、コンクリート中の気泡組織の測定が従来の測定方法と比べて容易となった。画像中の気泡情報から気泡間隔係数を求めることに関心が向けられ、実際に画像取得と気泡解析を組み合わせたソフトウェアも販売されている。しかし、Powersの提案した気泡間隔係数は、気泡の仮想的な空間配置を仮定したものであり、実際の空間構造の特性値としての距離を与えてはいない。近年、画像解析手法の汎用化にともない、様々な粒子分散系の画像に対して、空間統計量を用いてその分布を評価する手法が確立されているが、これをコンクリート中の気泡に適用した例はほとんどない。

本研究においては、スキャナを用いて簡便に取得したセメントペーストの低倍率画像中の気泡の空間分布構造を相関性の観点から評価することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm^3 、比表面積 $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用した。セメントペーストの水セメント比は 0.4 および 0.45 とした。混和剤としてリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤を使用し、添加量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ、エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生 (20°C) を行った。

2.2 試料作製および画像取得

養生後に供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。研磨後、試料断面を黒色インクにより着色し、乾燥後に白色粉末(炭酸カルシウム微粉末、粒径範囲 $12 \sim 13\mu\text{m}$)を気泡に充填させた。その後、スキャナを用いて等倍の断面画像を 10 枚取得した。このときの解像度は 1200dpi とし、1 画素は $21.2\mu\text{m}$ に相当する。本研究においては、試料中央の $30 \times 30\text{mm}$ を観察領域とした。

2.3 画像解析

2.2 にて取得した画像に対して、グレースケールに基づく 2 値化処理によって気泡の 2 値画像を取得した。抽出した気泡の 2 値画像から気泡面積率を算出した。

(1) 気泡間隔係数

気泡間隔係数は 1949 年に Powers が提案した、気泡の平均的な分布状態を表す指標であり、一般的に式 [1] によって求まる。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad [1]$$

ここに、 α は気泡の比表面積、 P はセメントペースト割合、 A は空気量である。

本研究では、画像解析法を用いているので、空気量 A および比表面積 α は画像解析から求めたものを用いた。

(2) 2 点相関関数

2 点相関関数は、ある一定長さ r の線分をランダムに画像上に落としたとき、その線分の両端が着目相上に載る確率を表す関数である。着目相を P とし、任意の点 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ に関して式 [2] のような指示関数を定義する。

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

$x_i \in P$ である確率を $P\{I(x_i) = 1\}$ とすると、任意の長さの線分の両端 x_i, x_n がセメントペースト相に載る確率は、 $P\{I(x_i) = 1, I(x_n) = 1\}$ で与えられ、これより 2 点相関関数 $S(r)$ は式 [3] にて定義される。

$$S(r) = \langle I(x_i)I(x_n) \rangle = P\{I(x_i) = 1, I(x_n) = 1\} \quad [3]$$

ここに $r = |x_n - x_i|$ は 2 点間距離を表し、 $\langle \rangle$ は期待値を意味する。また、関数値の初期値は着目相の体積率を表し、初期勾配は比表面積を表す。

2 点間距離が大きくなるにしたがって、関数値は減少していき、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であり、この距離は構造距離と呼ばれる。

表-1 画像から得られた気泡の情報

水セメント比	0.40					0.45		
名称	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	Ref	AE0.25	AE0.50
空気量 (%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	3.5	4.9	6.2
気泡面積率 (%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	1.2	3.0	3.7
標準偏差 (%)	0.125	0.284	0.115	0.200	0.524	0.138	0.254	0.348
残存率 (%)	41.7	56.7	63.2	72.2	69.1	34.3	62.2	60.0
フロー値 (mm)	195	203	214	222	249	228	259	290

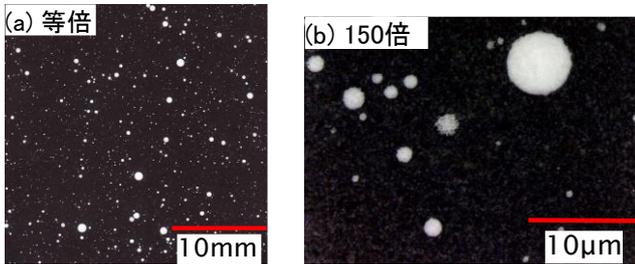


図-1 セメントペースト中の気泡の画像
W/C=0.40-AE0.50

3. 結果および考察

図-1 に取得したセメントペースト中の気泡画像を示す。これより、炭酸カルシウム微粉末が微細な気泡にも十分充填されていることが確認された。

表-1 に画像から得られた気泡の情報を示す。フレッシュ時における空気量と硬化後の気泡面積率には差が生じている。この要因としては、打設の際に気泡が損失したことや画像分解能以下の微細な気泡が存在していることが考えられる。また、高水セメント比のほうが気泡の残存率が比較的低く、気泡の損失にはフレッシュ特性が関係していることを示唆している。気泡面積率のばらつきはそれほど大きくなく、低倍率で画像を取得しても気泡に関して十分な情報が得られると考えられる。

図-2 に画像解析から求めた気泡の2点相関関数を示す。関数の初期値および初期勾配から、AE 減水剤を添加したことで空気量および比表面積が増加したことが示されている。また、構造距離(図中矢印)に関しては、統計的な変動のために明確に定めることは困難であるが、エントラップドエアのみ含まれる場合((a), (c))では、0.5~0.7mm 程度である。一方、エントレインドエアが連行されると構造距離は若干増大すると判断される。

図-3 に2点相関関数から得られた構造距離と画像解析から求めた気泡間隔係数の相関を示す。両者には負の相関がみられる。構造距離は空間内の対象物(ここでは気泡)の分布特性を表すのに必要な距離という意味を持ち、これが大きいということは、その分布を判断

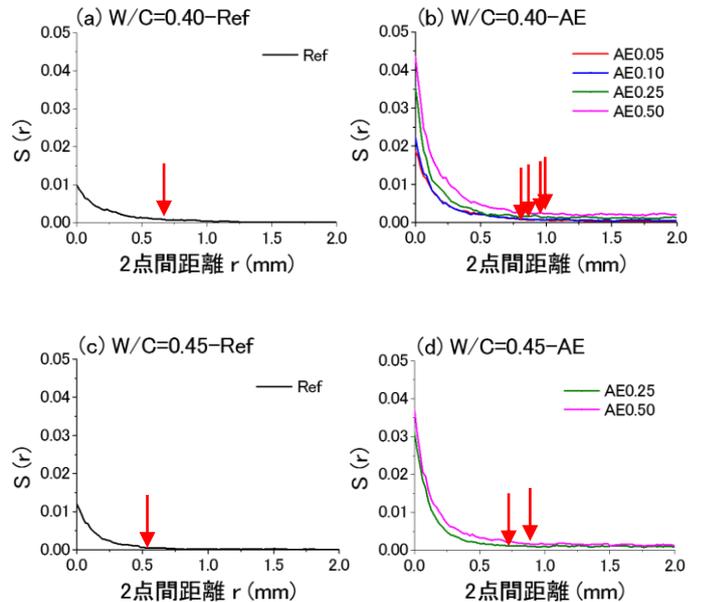


図-2 セメントペースト中の気泡の2点相関関数

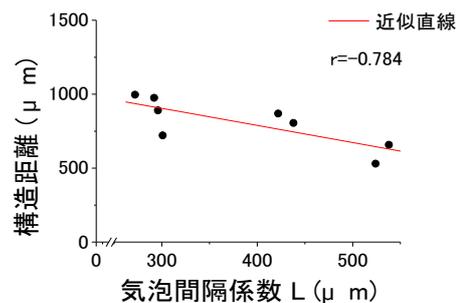


図-3 構造距離と気泡間隔係数の相関性

するのにより広い範囲を観察しなければならないことを意味する。よって、AE 減水剤によりセメントペースト中の気泡が増加すると、任意の位置から近距離にて気泡を見出せることになるが、分布には多様性が現れるようになり、より広い範囲を観察しなければならないことを示している。

4. 結論

エントレインドエアの連行により気泡の空間分布の構造単位は大きくなり、これを特性化するためには観察領域を大きく取る必要がある。

謝辞

本研究は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)の交付を受けた。