

膨張材混入モルタルの粗大毛細管空隙の空間分布特性定量評価

Quantitative evaluation regarding spatial distribution of porosity in mortar involving expansive additive

苫小牧工業高等専門学校 ○学生員 山丸大雅 (Taiga Yamamaru)
 苫小牧工業高等専門学校 正員 渡辺暁央 (Akio Watanabe)
 苫小牧工業高等専門学校 正員 土門寛幸 (Hiroyuki Doman)

1. はじめに

コンクリートの劣化原因として、塩化物イオンによる塩害や二酸化炭素による中性化などが挙げられるが、これらの物質はコンクリートの内部組織のうち粗大な毛細管空隙を通り道として、様々な劣化を引き起こしている。この粗大毛細管空隙を適切に評価することはコンクリートの物性を把握する上で重要となる。Scrivenerらの研究¹⁾により、反射電子像の画像解析法を用いることでセメント系材料の内部組織を量的に評価する手法が提案された。この場合、2次元の断面における着目相の面積率は、3次元空間における体積率に等しいとするステレオロジーの原則に基づいて定量評価を行っており、電子顕微鏡の分解能以上かつコンクリートの物性に影響を及ぼすと考えられている粗大な毛細管空隙の量的な評価が可能となった。

しかし、コンクリートの物性には細孔径分布や空隙の幾何学的配置、連続性などが深く関わっており、物性把握において、粗大毛細管空隙の単純な総量を評価するのみでは不十分である。そこで、五十嵐ら²⁾は2次元の断面の特徴から3次元の幾何学的特徴を定量的に推定するステレオロジーにおいて、2次のパラメーターである2点相関関数を用いることにより、2次元の断面情報から3次元構造の幾何学的情報を定量的に得られることを示している。一方で、実際に施工されるコンクリートには様々な混和材が添加されており、混和材を混入したコンクリートの粗大毛細管空隙の空間分布特性に関する評価はあまりなされていない。

本研究では、コンクリートに添加される混和材のうち、膨張材を混入したモルタルの反射電子像に上述した2点相関関数を適用し、拘束の有無および養生温度の相違による粗大毛細管空隙の空間分布特性の変化を定量的に評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）およびセメント強さ試験用標準砂を使用した。膨張材は、一般工事の 20kg/m^3 添加用の製品であり、エトリングイト系膨張材の D 社製および石灰系膨張材の T 社製を使用した。JIS R5201 に従い、水/セメント比が 0.5、セメント/骨材比が 3.0 の標準モルタルに対して、膨張材をセメント質量の 10% 置換した配合とした（表-1）。膨張材の置換率は、JIS A6020 付属書 A において 20kg/m^3 添加用の製品（膨張材 20 型）で 6.7% となっているが、著者

表-1 配合表

水	セメント	膨張材	標準砂
225g	405g	45g	1350g



図-1 鋼製拘束型枠

らの他の研究との整合性を得るため 10% とした。また、既往の研究³⁾から、本研究で使用する鋼製拘束型枠において膨張材を混入しない供試体の圧縮強度と同等以上の強度を維持できる最大の置換率が 10% である。

2.2 拘束供試体の作製

図-1 に示す特注の鋼型枠を使用する。この型枠は RPC (Reactive Powder Concrete) を作製するにあたり、フレッシュコンクリートの余剰水除去を目的に 50N/mm^2 の耐荷力の性能を有しており⁴⁾、膨張材による膨張に対して変形を許さない構造となっている。この拘束円柱型枠に離型剤を塗り、モルタルを打込んだ。打込み後、拘束具をナットで固定した状態で材齢 7 日まで静置する。なお、この拘束型枠を 3 個用いて、供試体を 3 つ作製する。完成後の寸法は、直径 50mm × 高さ 100mm の円柱供試体となる。また、比較のため、直径 50mm × 高さ 100mm の鋼製軽量型枠（供試体数は 3 本）にも打込みラップで密封して同様に静置した。

2.3 反射電子像観察及び画像解析方法

拘束供試体から、 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 程度の試料を切り出し、エタノールに浸漬して水和反応を停止させた。エタノール浸漬後の試料は、真空樹脂含浸装置を用いて樹脂含浸を行った。樹脂の硬化後、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーによる鏡面研磨を行い観察用の試料を作製した。白金蒸着を施した後、反射電子検出器を備えた

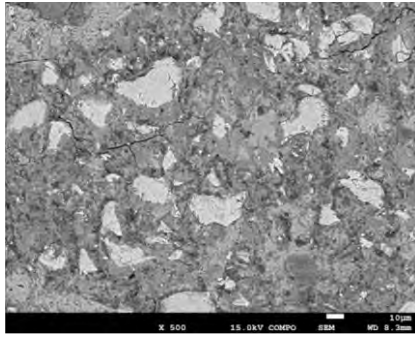


図-2 反射電子像の例

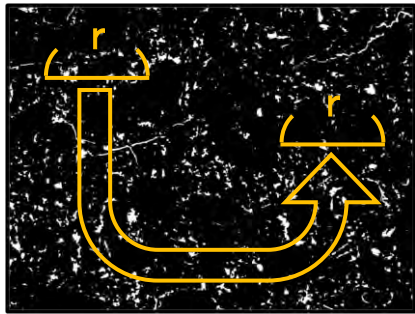


図-3 毛細管空隙の抽出画像と二点相関関数の求め方の模式図

電界放出型走査電子顕微鏡により、倍率 500 倍で電子像を取得した(図-2)。反射電子像の取得枚数は供試体の条件ごとに 10 枚ずつとした。また、この画像における 1 画素はおよそ $0.19 \times 0.19 \mu\text{m}$ に相当する。その後、汎用画像処理ソフトにより二値化処理を行い、毛細管空隙を抽出した。

2.4 2点相関関数

(1)定義

セメントペースト中に任意の座標系を考え、着目相を Y とする。またその空間において任意の点の位置を $x_i (i=1,2,\dots)$ とする。このとき、次のような指示関数 $I(x_i)$ を定義する。

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

点 x_i が着目相 Y 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_{i+r} が同じ相である同時確率 $P\{I(x_i)=1, I(x_{i+r})=1\}$ を用いて 2 点相関関数 $S_Y^{(2)}(r)$ は以下のように定義される⁵⁾。

$$S_Y^{(2)}(r) = \langle I(x_i), I(x_{i+r}) \rangle \\ = P\{I(x_i) = 1, I(x_{i+r}) = 1\}$$

ここで、 r は x_i, x_{i+r} 間の距離を表し、 $\langle \rangle$ は期待値を意味する。

(2)計算方法

本研究では、反射電子像から粗大毛細管空隙相を抽出した画像内の任意の点に線分を引いたとき、その線分の

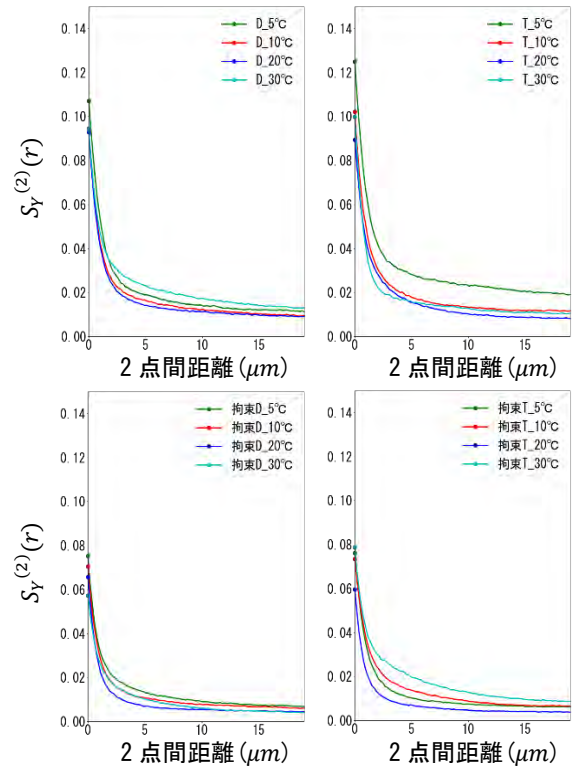


図-4 条件の変化に伴う 2 点相関関数の変化

両端部がどちらも空隙相上にある確率を求めることにより 2 点相関関数を計算した。

図-3 に空隙相を抽出した反射電子像および 2 点相関関数の求め方を模式的に示す。図のように空隙相を抽出した 2 値画像に対して、線分を引く。この線分の長さ r が 2 点間距離に相当し、両端部が空隙相に重なるか否かを判定する。その後、別の任意の座標に線分を移動させ同じ操作を繰り返した。この線分の長さは 0 から最大 100 画素まで変化させ、画像 1 枚につき、各 2 点間距離 r に対して総点数が 50000 点となるまで繰り返す。さらに、この一連の操作を供試体の条件ごとに取得した反射電子像 10 枚に対して行い、その平均値を 2 点相関関数 $S_Y^{(2)}(r)$ とした。

3. 実験結果および考察

図-4 は供試体の条件の変化に伴う 2 点相関関数の変化を示したものである。いずれのグラフも 2 点間距離 r が小さいほど、2 点相関関数は大きい値を示しており、2 点間距離が増大するほど低下している。どちらの膨張材を混入した場合においても軽量型枠供試体の 2 点相関関数値は拘束型枠供試体のものよりも高い値を示している。このことから、軽量型枠供試体では、2 点相関関数が高い値を示しており、任意の空隙の近傍に多数の空隙が存在している確率が高いといえる。また、供試体の拘束によりセメント内部組織の緻密化が進行し、粗大毛細管空隙相が少なくなったことを反映しているものと考えられる。

この図において $r=0$ のプロット(図中のマーカーの点)

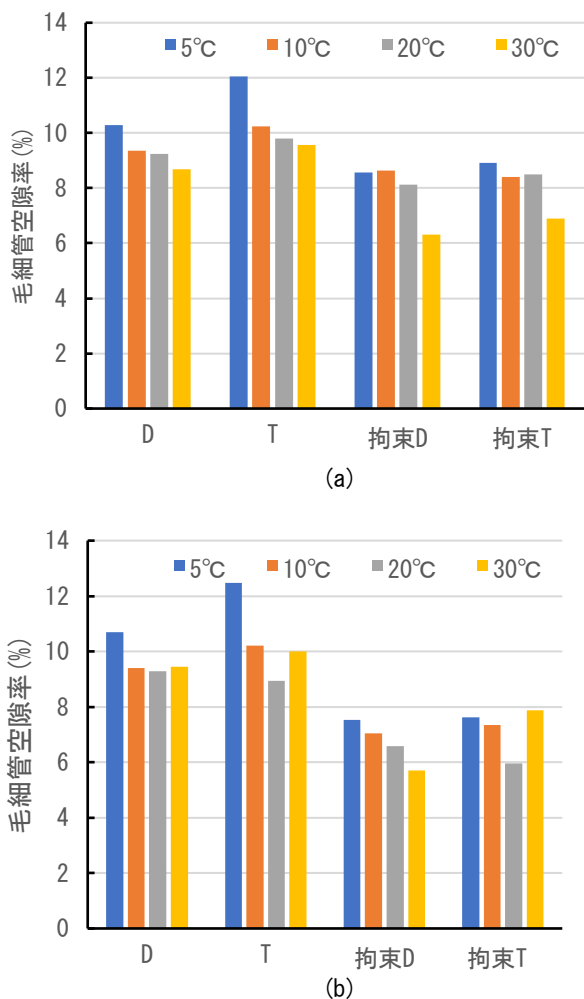


図-5 手法別の毛細管空隙率の比較

は、粗大毛細管の空隙率を表している。図-5に評価手法別の粗大毛細管空隙率を示す。図-5(a)は、反射電子像の画像解析により求めた粗大毛細管空隙率を表しており、図-5(b)は2点相関関数により求めた粗大毛細管空隙率を表している。これらの図を比較すると、2つの手法により求められる粗大毛細管空隙率はある程度一致していることがわかるが、養生温度30°Cにおいて、2点相関関数により求めた粗大毛細管空隙率は反射電子像の画像解析から求めたものよりも大きい値を示している。養生温度30°Cの反射電子像には10 μm 程度の大きな毛細管空隙が確認できるが、反射電子像の画像解析において空隙の大きさが毛細管空隙率を増大させることはなかった。一方で2点相関関数により求めた粗大毛細管空隙が高い値を示していることから、2点相関関数の値には、空隙の総量に限らず、その大きさによる影響があると推察することが出来る。

4.結論

本研究では、膨張材混入モルタルの粗大毛細管空隙画像に対して2点相関関数を適用することで、拘束の有無および養生温度の相違による空隙の空間分布特性の変化を定量評価することを目的とした。

得られた結果は以下の通りである。

- (1) 軽量型砕供試体の2点相関関数値は拘束型砕供試体のものよりも高い値を示しており、任意の空隙の近傍に多数の近傍が存在していることが推察された。
- (2) 供試体の拘束により、内部構造の緻密化が進行し、2点相関関数が低下した。
- (3) 反射電子像により求めた粗大毛細管空隙率と2点相関関数により求めたものとの間に相違がみられ、空隙の大きさは2点相関関数値に影響を及ぼすことが推察された。

参考文献

- 1) Scrivener, K.L.: Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification, *Cement and Concrete Composites*, Vol.26, No.8, pp.935-45,2004
- 2) 五十嵐心一, 米山義広, 渡辺暁央: 毛細管空隙の空間分布特性の定量評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.28, No.1, pp.593-598, 2006.
- 3) 土門寛幸, 渡辺暁央, 近藤崇: 拘束した膨張性モルタルの圧縮強度に及ぼす初期膨張特性および毛細管空隙率との対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.43, No.1, pp.329-334, 2021.7
- 4) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀: 加圧処理を施した繊維補強RPCの微視的構造と力学的特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp.309-314, 2004.7
- 5) Coker, D.A. and Torquato, S.: Extraction of morphological quantities from a digitized medium, *Journal of Applied Physics*, Vol.77, NO.12, pp6087-99,1995
- 6) 土門寛幸, 渡辺暁央, 近藤崇: 養生温度の相違による膨張材混入モルタルにて作成した拘束供試体の圧縮強度特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.44, No.1, pp.178-183, 2022.7