

フラクタル次元と2点相関関数から求めた毛細管空隙空間構造の一致性

金沢大学大学院 学生会員 ○山下 総司

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートの耐久性の問題において、有害物質の内部への侵入に関わる場合は多く、ゆえに、物質透過性を評価することは、コンクリートの性能評価において重要な役割を果たす。この場合、物質透過の主たる経路は毛細管空隙であることから、単純な空隙率の評価だけでは十分とは言えず、空隙の連続性や深部への到達性など、より詳細な構造が簡単に評価できることが望ましい。筆者らは空隙構造の評価に画像解析を適用し、量については面積率を、空間内の分布については空隙の2点相関関数を用いることを提案し、それらから求められる空隙構造の特性値が、セメントペーストの物質透過性と良好な相関を持つことを明らかにしてきた¹⁾。しかし、この空隙の分布の評価には、取得した画像に対して確率を求める試行の繰り返しを必要とし、評価の容易性という観点からの問題点となっていた。その一方にて、今日広く普及している画像解析ソフトの中には、フラクタル次元の取得が基本機能として備わるものがあり、これを用いれば単純な操作だけで2点相関関数の評価が可能と考えられる。

そこで本研究においては、材齢の進行にともなう空隙構造の変化を、簡単に求められるフラクタル次元と空隙量の変化だけで特性化する。そして、それらから決定した毛細管空隙の2点相関関数およびその関数の特性値と、画像上で実際に求めた相関関数との一致性について明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 供試体および反射電子像観察試料の作製

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、JIS-R5202 および JSCE-F506 に従い水セメント比が0.50の直径50mm, 高さ100mmのセメントペースト円柱供試体を作製した。打ち込み後24時間において脱型し、所定材齢まで20℃にて水中養生を行った。材齢1, 3, 7, 28, および91日において円柱供試体

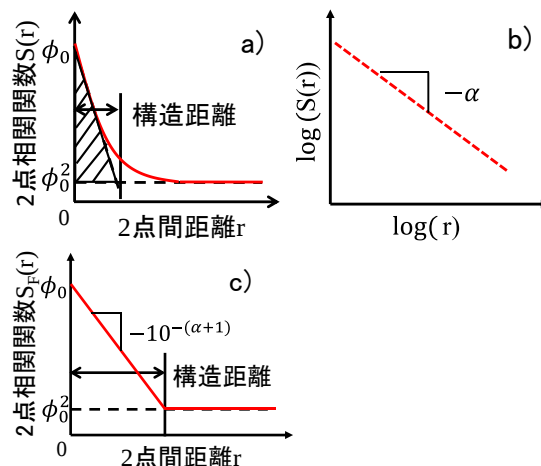


図-1 2点相関関数の模式図

の中心部から試料を切り出し、試料の凍結真空乾燥処理を行った後、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、表面を研磨し金-パラジウム蒸着処理を行って、反射電子像観察試料を得た。

2.2 反射電子像観察および画像解析

走査型電子顕微鏡を用いて反射電子像を観察倍率500倍にて取得した。取得した反射電子像の2値化処理を行い、粗大毛細管空隙相(P)を抽出した2値画像を取得し、その面積率を求めた。また、その2値画像を用いて以下の2点相関関数およびフラクタル次元D_Fを求めた。

2.3 2点相関関数(TPF)

ある長さrの線分を画像にランダムに落としたときに、その両端が着目相Pに載る確率を表す確率関数である。線分の両端の座標を $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2(r=|\mathbf{x}_1-\mathbf{x}_2|)$ とすると、2点相関関数 $S(r)$ は式(1)のように定義される。

$$S(r) = Pr\{1(\mathbf{x}_1 \in P), 1(\mathbf{x}_2 \in P)\} \quad (1)$$

2点相関関数値は $r=0$ のとき、着目相の面積率 ϕ_0 を示し、ある距離で ϕ_0^2 に収束する(図-1(a))。

2.4 フラクタル次元D_F

画像解析ソフトウェアの基本コマンドを用いて、ボックスカウント法による毛細管空隙のフラクタル次元を求めた。フラクタル次元D_Fの定義を式(2)に示す。

キーワード 毛細管空隙, フラクタル次元, 空間分布, 2点相関関数

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 TEL076-264-6373

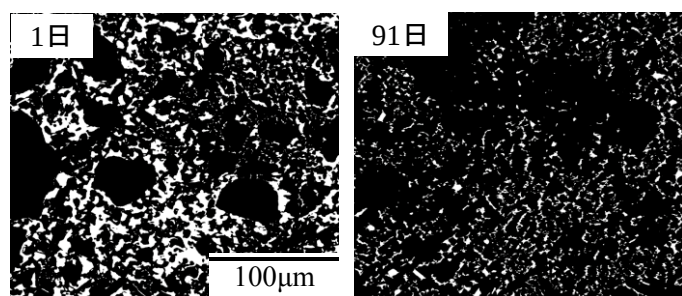


図-2 材齢進行に伴う空隙構造の変化

$$D_F = -\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad (2)$$

ε : ボックス寸法, $N(\varepsilon)$: 寸法 ε における被覆ボックス数

3. 結果および考察

図-2 に毛細管空隙の 2 値画像を示す。材齢の進行とともに毛細管空隙構造は細分化が進行し、初期には領域をネットワーク状に覆う部分も存在しているのに対して、長期材齢では空間内に点が分布するように変化している。このことを空隙率とフラクタル次元の関係として表すと図-3 のようになる。材齢の進行とともに面積率とフラクタル次元が減少し、その変化の傾向はほぼ同様である。フラクタル次元は、評価対象とする特徴の繋がりや凹凸、観察面の被覆性を反映した特性値という側面を持つ。よって、その低下は毛細管空隙が複雑な構造からより単純な構造に変化したことを示し、画像から得られる印象と矛盾しない。

また、フラクタル次元は 2 点相関関数とも関連づけられ、両対数表示した 2 点相関関数の傾き $-\alpha$ と式(3)で表される関係がある。

$$D_F = d - \alpha \quad (3)$$

ここに、 d : 空間次元

$-\alpha$: 両対数表示した 2 点相関関数の傾き

よって、フラクタル次元がソフトウェアから簡単に算出可能ならば、2 点相関関数の初期の直線部の傾きが自動的に決定され、面積率との組み合わせで 2 点相関関数が、2 直線で近似されることになる (図-1 b) および図-1 c)。

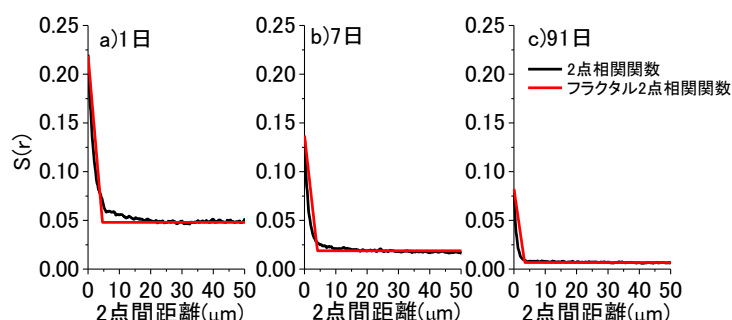


図-4 2 点相関関数とフラクタル次元 2 点相関関数の比較

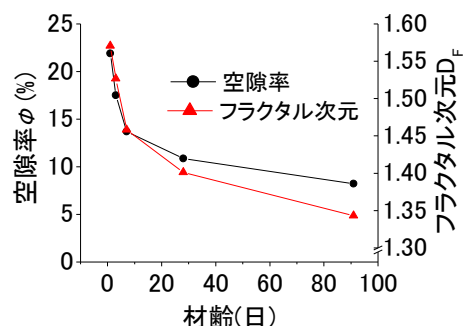


図-3 材齢進行に伴う空隙率とフラクタル次元の変化

図-4 に画像より直接求めた 2 点相関関数とフラクタル次元より求めた 2 点相関関数(以下、フラクタル 2 点相関関数 $S_F(r)$) を比較して示す。フラクタル 2 点相関関数は、実際の 2 点相関関数とよく一致しており、材齢の進行にともなう変化を適切に表している。2 点相関関数が一定値に収束するまでの距離は分布を特徴づける重要な特性値であり、この距離に至るまでの関数下の面積は物質透過性を反映する¹⁾(図-1 a)斜線部、式(4))。

$$\lambda = \int_0^\infty [S(r) - \{S(0)\}^2] dr \quad (4)$$

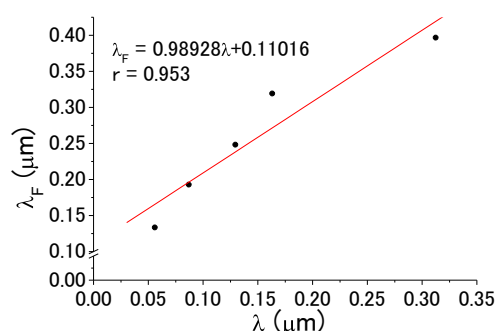
図-5 は実際に画像上で線分配置シミュレーションによって求めた 2 点相関関数のパラメータ λ とフラクタル 2 点相関関数のパラメータ λ_F を比較したものである。図-4 の結果からも推察されるように、両者には強い相関があるのは明らかである。すなわち、空隙のフラクタル次元を単純にソフトウェアの機能によって求め、それと面積率を組み合わせるだけ、空隙の空間分布に関してより詳細な情報が得られることになり、物質透過性の判断にも使えるものと考えられる。

結論

一般的な画像解析ツールによって容易に求められる空隙率とフラクタル次元との組み合わせで、物質透過性と関連する空隙空間分布構造が推定できることを示した。

4. 参考文献

- [1] 内藤ら, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.3, pp.462-473, 2011

図-5 パラメータ λ と λ_F の比較