

報告 実コンクリート構造物から採取したコンクリートコア画像の空間統計学的調査

白上 新*1・石川 裕一*2・Dang Giang Hoang *3・五十嵐 心一*4

要旨: 供用 36 年を経て, 中性化の進行が確認された道路橋 RC 床版からコンクリートコアを採取した。その巨視的および微視的な組織の画像を取得し, それらに対して空間統計学の観点から, 幾何学的特徴の解析を行った。簡易な装置で取得した画像でも骨材の量および粒度分布の解析値は示方配合値と一致した。また, 粗大な空隙径範囲の空隙空間構造は, 中性化領域と健全部では明らかにその特徴が異なり, 粗大空隙径領域における緻密化と細径化も確認された。画像情報の空間統計学的調査は, 実コンクリート構造物のコアの詳細調査の一方法として有用であると考えられる。

キーワード: 床版, コア供試体, 中性化, Schwartz-Saltykov 法, 空間統計量, 2 点相関関数, L 関数

1. 序論

ライフサイクルマネジメントやサービスライフデザインといった用語が一般的に認識されるようになった今日, 喫緊の課題であるコンクリートの耐久性の問題への対処には, 2 つのアプローチがあるようである。一つは既に劣化を生じている構造物に関して, 適切な性能評価を行いその結果に基づいて合理的な維持管理計画の策定するための工学的手法を確立することであり, もう一つは事前に, コンクリート構造物に将来予測される性能劣化を考慮したうえでの耐久性設計法の確立である。いずれの場合もその基礎となるのは, 性能劣化を生じている現存の数多くのコンクリート構造物の調査を行い, 材料性能を詳細に調べて, 劣化の基本データを得ることである。その結果から, 例えばデータベース化などができれば, より簡便に合理的で信頼性のある維持管理計画策定や寿命予測を可能にすると考えられる。

現在, コンクリート構造物の調査・診断は, 日常点検や定期点検などにて目視を主体とした点検を行い, 構造物に変状の発生を認めた場合などに, 必要に応じてコンクリートコアの採取を行い, 詳細調査を行うこととされている¹⁾。その際には, 想定される劣化機構に応じて, 中性化深さ試験や塩化物イオン含有量など, 種々の試験を行うことになっている。しかし, それらの調査項目の中には, 特定の劣化機構を必ずしも想定しているわけではないが, 重要なデータの得られる項目として, 配合分析や細孔径分析などの項目, さらに熱分析や走査型電子顕微鏡観察など, 総合的で比較的高度な調査が含まれている。

配合分析や細孔径分析といえ一般的に用いられる手

法や分析技術はほぼ確立しており, 我が国では配合推定ではセメント協会法²⁾が, また細孔径分析に関しては水銀圧入法が用いられることが多い。しかし, セメント協会法による水セメント比推定は, 化学分析技術を必要とするため一般の実務者には実施しがたい面があり, また石灰岩質骨材を含むコンクリートには適用できない。また, 細孔径分布に関しても, 骨材を含む試料に対する水銀圧入法の結果には界面(遷移帯)の影響が含まれると考えねばならず, 結果の解釈は必ずしも容易ではない。

著者らは, 近年の IT 環境と画像解析技術の発展と普及を背景にして, 比較的簡便に取得できるコンクリートのスキャナー画像や, 研究機関に普及している一般的な電子顕微鏡画像から, コンクリートの配合や性能に関わる種々の情報を取得できることを示してきた³⁾。さらに, 近年では, デジタル画像における単純な画素量の情報だけでなく, 構成相の画素の空間配置にも着目することによって詳細な幾何学的情報が得られ, それらがセメント系材料の物性と密接に関係しうることも指摘している^{4),5)}。しかし, そのような解析は, これまでではどちらかと言えば研究室や実験室レベルでの供試体への適用であり, 実際の様々な環境にて劣化を生じているようなコンクリート構造物コア供試体への適用性については検討してこなかった。

本研究の目的は, 著者らがこれまで用いてきた種々の画像情報に基づく配合推定や細孔径分布, 空隙空間構造の特性化の手法を, 実際に供用され定期点検にて中性化の進行が疑われた道路橋 RC 床版から採取したコア供試体に適用することにある。巨視的なレベルの解析として, 骨材量の推定と 2 次元の粒度分布から実際の 3 次元の

*1 (株) 北電建設コンサルタント (正会員)

*2 中日本ハイウェイエンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 土木部構造技術課 (正会員)

*3 五洋建設株式会社 中国支店 (正会員)

*4 金沢大学理工学域環境デザイン学類 教授 博 (工) (正会員)

表-1 示方配合および中性化深さ試験結果

竣工年度	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					中和剤	中性化深さ (mm)
			W	C	S	G			
S48	50	36	150	320	663	1180	0.8	28	

骨材粒度の推定を行う³⁾。また、微視的なレベルの解析においては、反射電子像の画像解析を基本として、中性化の進行が比較的粗大な空隙構造におよぼす影響を明らかにする。単純なステレオロジー1次パラメーターである空隙率に加えて、2次のパラメーターである粒子過程としての相関関数や点過程統計量の評価を行い⁶⁾、中性化による組織変化を、粗大空隙空間構造の変化として論ずることを目的とする。さらに、残存する未水和セメントの寸法に着目して3次元での粒度分布を求め、それと仮定した使用セメントの初期粒度分布から、水セメント比を推定した結果についても言及する。

2. 調査方法

2.1 コア供試体の概要

供用後36年を経て現在も供用中の石川県内陸部の道路橋RC床版から、直径55mmのコアを採取した。本橋梁床版は、定期点検調査により中性化の進行が疑われたものである。施工時記録によるコンクリートの示方配合を表-1に示す。また、フェノールフタレインを噴霧したときのコアの呈色の様子を写真-1に示す。コア供試体の呈色状況から判定された中性化深さは28mmであった。

2.2 骨材量と粒度分布の評価

(1) 画像取得と骨材の抽出

写真-1の結果をもとに、中性化部中央部位と健全部位の断面を切り出し、耐水研磨紙を用いて注意深く研磨した。その後、スキャナーを使用して、研磨面のカラー画像を、解像度800dpiにて取得した。1画像は994×1889画素からなり、1画素は32μmに相当する。

カラー画像からの骨材粒子の抽出にはエッジ抽出法を用いた³⁾。本法では、セメントペースト相が画像内に最も単色に近く、色相が安定している点に着目している。最初にセメントペースト部分の色相範囲を画像解析によ



写真-1 中性化深さ試験

り求め、この範囲を除去することによって、画像内のセメントペースト相の空間的な補集合に相当する部分を抽出した。ゼロ交差法を用いてR,G,Bの3成分の色相勾配を求め、その極値から骨材のエッジを抽出した。エッジ抽出画像から骨材相を再現し、この画像と先に求めたセメントペースト相抽出画像を重ね合わせた。目視判断により未抽出部分のみ手動補正を行い、骨材の2値化抽出画像を得た。骨材を抽出した画像中の骨材画素を計数して全観察視野に対する面積率を求め、ステレオロジーの基本則であるDelesseの法則に従い、これを骨材体積率とした。

(2) 骨材粒度の計算

2次元断面像から粒子の粒度分布を計算するために、断面に現れた個々の粒子を面積の等価な円に置き換えた。等価な円の直径分布範囲を、不連続な大きさの範囲のいくつかの階級に分けて、その各階級範囲での粒子は同じ直径を持つことを仮定するSchwartz-Saltykov法⁷⁾を用いて、3次元空間における骨材粒度を計算した。

画像上で計測した骨材粒子を刻み幅 Δ ($\Delta = D_{max}/N$, D_{max} は画像上の骨材最大寸法)で円相当面積の大きい順にN個のグループに分けた。単位面積中におけるグループi(粒径: $i\Delta$)の粒子個数、単位体積中におけるグループj(粒径: $j\Delta$)の粒子個数をそれぞれ $N_A(i)$, $N_V(j)$ とし、グループjによって生じた単位面積中におけるグループi($i \neq j$)の粒子個数を $N_a(i, j)$ ($i \leq j$)とすれば、式(1)により $N_A(i)$ と $N_a(i, j)$ の関係が与えられる。

$$N_A(i) = \sum_{j=1}^N N_a(i, j) \quad (1)$$

一方、グループjの1つの粒子について、それがグループiに現れる確率は $2(h_{i-1} - h_i)$ を用いて表され(図-1)、断面に現れる確率とそれぞれの粒子個数 $N_V(j)$ と $N_a(i, j)$ の関係は以下の通りである。

$$N_a(i, j) = 2(h_{i-1} - h_i)N_V(j) \quad (2)$$

3平方の定理より、 h_{i-1} , h_i を求め、それを式(2)に代入すると、式(3)を得る。

$$N_a(i, j) = N_V(j) \frac{D_{max}}{N} \left(\sqrt{j^2 - (i-1)^2} - \sqrt{j^2 - i^2} \right) \quad (3)$$

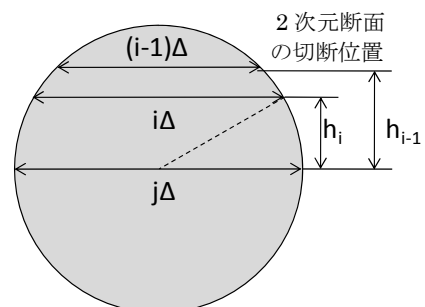


図-1 Schwartz-Saltykov法の考え方

$N_A(i)$ は既知であるため、式(1), (2), (3) を用いて3次元におけるグループ j の粒子個数 $N_V(j)$ が得られ、骨材粒度分布が計算される。

本研究においては、グループ数 N の値によって推定される粒度分布が大きく異なることを考慮し、2次元断面を利用し、推定された3次元空間における体積率が、骨材相の2値化画像から計測した面積率に等しくなるようにグループ分けを行った。なお、解析においては断面中の粒子の密度はすべて等しいと考え、骨材粒子の体積通過率を質量通過率として粒度分布曲線を求めた。

2.3 微視的構造の解析

(1) 反射電子像取得

2.2(1)と同様にして採取した試料を、エタノールを使用した傾斜溶媒置換法により内部水分を除去し、さらに t -ブチルアルコールによる傾斜置換を行った後に凍結真空乾燥を行った。その後、真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させ、エポキシ樹脂の硬化後、表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して注意深く研磨した。表面に金-パラジウム蒸着を行い、反射電子像観察試料とした。

走査型電子顕微鏡(加速電圧 25kV)を用い、観察倍率 500倍にて無作為に抽出した 10断面の反射電子像をコンピュータに取り込んだ。1画像は 1148×1000 画素(1画素は約 $0.22\mu\text{m}$)である。取り込んだ 10枚のグレースケール画像に対して、グレースケールおよび目視判断に基づいて骨材の除去を行った。残された画像に対して再びグレースケールに基づく2値化を行い、分解能($0.22\mu\text{m}$)以上の未水和セメント粒子および粗大な毛細管空隙を抽出した。

(2) 水セメント比の推定⁸⁾

残存未水和セメント粒子の円相当径を求め、2.2(2)にて述べた Schwartz-Saltykov 法をセメント粒子に適用して、3次元における粒度分布を求めた。その計算された粒度分布に対して質量中位径を求めた。一方、市販の普通ポルトランドセメントとエポキシ樹脂を練り混ぜて試料を作成し、切断面を研磨して同様にして粒度分布を求めこ

れを初期粒度分布とした。この初期粒度分布に対して一様に粒径を一定厚さだけ減少させながら、その都度質量中位径を計算し、質量中位径-反応厚さ関係を求めた(図-2)。その反応厚さに対応した体積減少から求めた水と度と質量中位径の関係を計算した(図-3)。残存セメントに対して求めた質量中位径をこれらの関係式にあてはめて、コア供試体コンクリート中のセメントの水と度を推定した。残存未水和セメント体積と推定した水と度から初期セメント体積を求め、セメントペーストマトリックス中のその他の空間はすべて練混ぜ水空間であると仮定して、初期水セメント比を推定した。

(3) 空間相関関数による評価⁴⁾

空隙の空間内での分布を評価するために2点相関関数を用いた。この関数は、ある一定の長さ r の線分をランダムに落としたときにその両端が空隙に載る確率を表わす。空隙を Y とするとき、任意の点 \mathbf{x}_i ($i=1,2,\dots,j,\dots,n$) に関して次のような指示関数を定義する。

$$I(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} 1 & (\mathbf{x}_i \in Y) \\ 0 & (\mathbf{x}_i \notin Y) \end{cases} \quad (4)$$

$\mathbf{x}_i \in Y$ である確率を $P\{I(\mathbf{x}_i) = 1\}$ と書くと、任意の長さの線分の両端 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_n$ が空隙に載ることは、同時確率 $P\{I(\mathbf{x}_i) = 1, I(\mathbf{x}_n) = 1\}$ で与えられ、これより2点相関関数 $S_2^{(Y)}(r)$ は式(5)にて定義される。

$$S_2^{(Y)}(r) = \langle I(\mathbf{x}_i)I(\mathbf{x}_n) \rangle = P\{I(\mathbf{x}_i) = 1, I(\mathbf{x}_n) = 1\} \quad (5)$$

ここに、 $r = |\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_i|$ は2点間距離を表し、 $\langle \rangle$ は期待値を意味する。なお、得られた2点相関関数を空隙の体積率の自乗で正規化し、体積率の影響を除いてから評価を行った。

線分の両端だけでなく、長さ r の線分全体が空隙に載る確率を2点間直線経路相関関数 $L_2^{(Y)}(r)$ として求めた。この相関関数は、空間における着目相が位相的に直線的に連結する確率を反映した確率関数と考えることができ、その定義は式(6)にて与えられる。

$$\begin{aligned} L_2^{(Y)}(r) &= \langle I(\mathbf{x}_1) \cdots I(\mathbf{x}_j) \cdots I(\mathbf{x}_n) \rangle \\ &= P\{I(\mathbf{x}_1) = 1, \dots, I(\mathbf{x}_j) = 1, \\ &\quad \dots, I(\mathbf{x}_n) = 1\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、点 \mathbf{x}_j は始点 \mathbf{x}_1 と終点 \mathbf{x}_n を結ぶ直線上の点であ

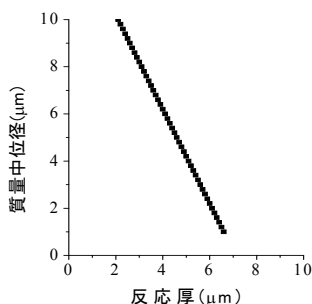


図-2 質量中位径-反応厚さ関係

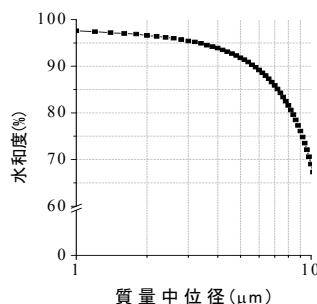


図-3 水と度-質量中位径関係

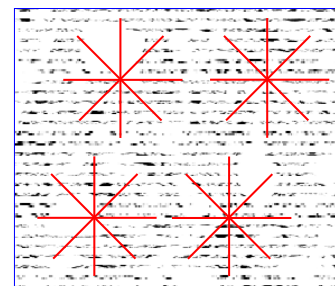


図-4 放射線テンプレートの模式図

る。

2点相関関数を求めるために放射線テンプレート(図-4)を用いた。空隙の抽出画像に対して、任意の位置に所定の長さの放射線テンプレートを載せる。このとき、原点と放射線の端点間の距離が2点間距離 r であり、線分全体が骨材相に載らないで、両端点が空隙相に載るか否かを判定した。この操作を総点数が10000点になるまで繰り返し2点相関関数 $S_2^{(N)}(r)$ を求めた。また、以上の試行において、線分全体が着目相に載るか否かを判定することにより、2点間直線経路相関関数 $L_2^{(N)}(r)$ を求めた。

(4) 点過程統計量L関数による評価⁹⁾

個々の空隙の重心位置($x_i: i=1,2,\dots$)を画像解析ソフトウェアの機能を用いて求め、それを点過程 $X=\{x_n\}$ とした。セメントペースト部分に存在する空隙は、骨材がなくて全視野を有効と仮定したときに得られる親点過程を、点位置を変数とする関数に基づいて間引きされた結果残された点過程であるとみなした。セメントペースト領域の面積率を p として、K関数を式(7)により求めた。

$$K(r) = \int_0^r \frac{S(x)dK_b(x)}{p^2} \quad (7)$$

ここに $K_b(x)$ は親点過程の既約二次モーメント関数である。このK関数を次式によりL関数に変換した。

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} \quad (8)$$

3. 結果および考察

3.1 骨材に関する特徴量の解析

表-2はスキャナーにより取得した画像にエッジ抽出法を適用して求めた骨材体積率を示したものである。表面付近(中性化部)と内部(健全部)にて求められた値には相違があるが、推定骨材体積率は実際の配合値と高々3~4%程度の差しかない。これより、等倍の画像であっても骨材量は推定することが可能であり、逆に画素寸法以下の微細な粒子が、推定値に及ぼす影響は大きくなかったものと考えられる。

図-5は抽出された骨材の2次元像から Schwartz-

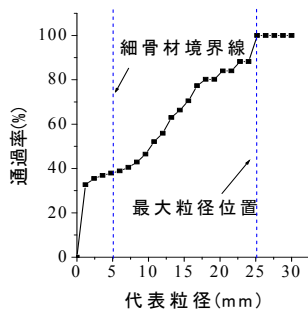


図-5 推定した骨材粒度分布曲線

表-2 骨材面積率(体積率)

	配合値(%)	面積率(%)	標準偏差(%)
表面付近	69.4	70.8	7.4
内部	69.4	66.0	4.7

Saltykov法を用いて骨材の粒度分布を推定した結果を示したものである。理想的な球形を仮定しているため、実際の骨材のふるい分け試験と画像から求めた本方法の粒径は一致するものではない。しかし、図-5の推定された粒度分布に対して、単純に5mmを細骨材と粗骨材の境界として細骨率を求めると、推定細骨材率は約38%となる。実際の工事記録の配合上の細骨材率は36%であり、その推定誤差はかなり小さいといえる。また、細骨材に相当する部分の推定粒度分布曲線からFM値を求めると2.46となり、この値は実際に使用された細骨材の工事記録値2.48ともほぼ一致した。

以上の結果より、本研究にて用いたエッジ抽出法と粒度分布の推定方法は、骨材分離抽出およびその幾何学的特徴量の計算において非常に有用な方法であると考えられる。画像からの骨材抽出は、コンクリートの品質管理を目的とした自動画像解析手順において非常に重要な過程であるにもかかわらず、骨材の多様な色相によりそれを行うことはかなり困難であるとされている¹⁰⁾。しかし、少なくとも骨材の巨視的な幾何学的特性の抽出が目的の場合は、本法を用いれば、簡易なスキャナーを使用したカラー画像取得により、それがほぼ可能であり、例えば、コンクリート中の骨材分布から材料分離傾向の定量的な判断にも応用できるものと期待される。

3.2 水セメント比の推定

図-6は残存未水和セメントに関して Schwartz-Saltykov法を適用して推定された粒度分布を示したものである。本分布から求められる質量中位径は $4.9\mu\text{m}$ であり、これを一般的な普通ポルトランドセメントの粒度分布に対して求めた質量中位径-反応厚さ関係(図-3)にあてはめると反応厚さは $4.65\mu\text{m}$ と評価される。この値をセメントの水和度-反応厚さ関係(図-2)に当てはめると水和度は約92%と推定される。この水和度と残存未水和セメ

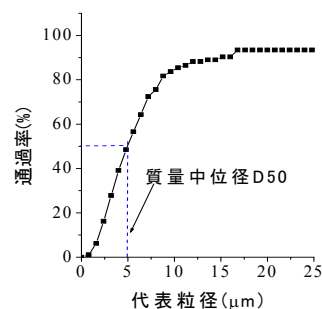


図-6 残存未水和セメントの粒度分布曲線

ント体積から、初期水セメント比は0.46と推定された。配合値とは4%の誤差を生じているが、同じく顕微鏡画像を使用するコンクリート薄片の蛍光顕微鏡観察法¹¹⁾の精度(±2.5%)に匹敵する結果が得られている。また、施工当時のセメントの粒度分布ではなく、現在市販のセメントの粒度を用いて推定した値であることも考えると、推定精度としては低くはないといえる。これより、残存セメント粒子の3次元粒度分布から水セメント比の概略値を推定することは、十分可能であると思われる。ただし、残存セメントの体積率がかなり小さかったこと、および残存未水とセメント粒子形状が間隙質相のみを残したような不規則形状のものも認められた。したがって、推定水セメント比の信頼性に関して、さらに多くのデータを蓄積する必要があることは明らかであり、これについては今後の課題である。

3.3 微視的空間構造の解析

図-7は健全部および中性化部から採取した試料の反射電子像とそれらから粗大な空隙を抽出した2値画像の例を示したものである。健全部においては大きな空隙から微細な空隙まで、様々な寸法の連続した粒径範囲で空隙が存在するようであり、また、そのような空隙が凝集部分を形成している様子がうかがえる。一方、中性化部では、全体として空隙が疎らに分散しており、視覚的な印象では、両者の分布パターンは明らかに異なる。表-3はこれらの画像から求めた空隙率を示したものである。個々の画像でセメントペーストマトリックス面積率が異なるため、表中の値はセメントペースト単位面積当りの空隙率を示している。中性化部分の空隙率は健全部より明らかに小さい。一般に、コンクリートに中性化を生じた場合、炭酸カルシウム結晶の析出により、細孔構造が変化し空隙率が低下することが報告されている¹²⁾。水銀

表-3 中性化部および健全部における空隙率の比較

	中性化部	健全部
空隙率	10.5%	15.7%

圧入法により報告されてきた空隙の低下は、本研究で対象とする粗大な毛細管空隙径範囲よりもずっと小さい。水銀圧入法のインクボトル効果も考慮すると、これまで水銀圧入法において報告されているようなより微細な空隙径範囲の空隙率の低下は、本研究にて示すような粗大空隙径領域における緻密化の影響を受けていることが考えられる。

図-8は空隙構造を粒子過程と考えたときの、中性化部と健全部の粗大な毛細管空隙の正規化された2点相関関数を示したものである。中性化部分と健全部分の関数分布は明らかに異なる。健全部では、約5 μm の距離離れた2点に空隙が存在するかどうかは全くランダムであり、両者には相関性はない。これに対して、中性化部では、収束距離は15 μm 付近まで拡大し、正の相関を示す距離が大きい。相関距離は粒子空間分布の構造単位としての意味を持つことから、中性化部分で空間特性を評価するためにはより大きな構造を観察する必要がある、また空隙率だけでなく空間構造そのものが異なることを示している。

図-9は2点間直線経路相関関数を示したものである。距離の小さい範囲にて、中性化部分の関数値は小さく、粗大な空隙の連続性は低下し、全体として空隙径が小さくなっているようである。しかし、空隙径の大きい範囲での関数値は、中性化部分も健全部分も同様であり、非常に粗大な空隙は両者ともに残存していることが表れている。

図-10は空隙構造を点過程と考えたときの点パターン

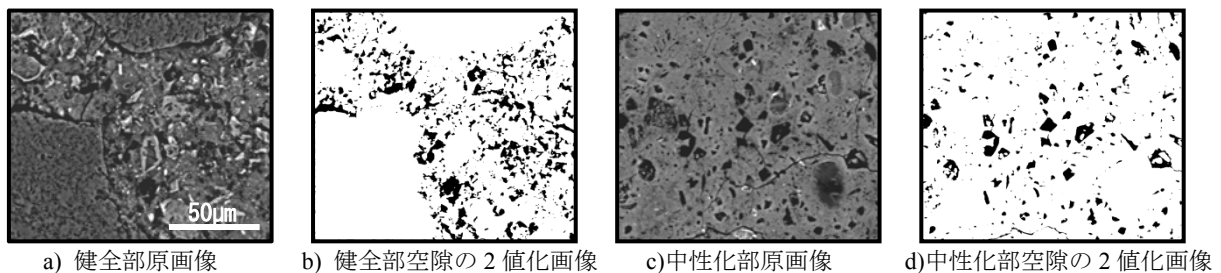


図-7 空隙構造相違の例

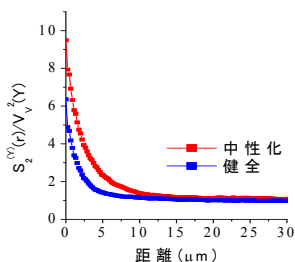


図-8 正規化した2点相関関数

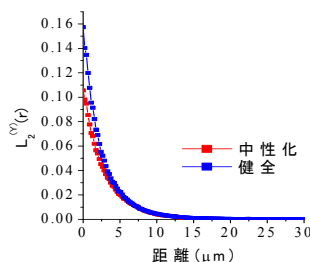


図-9 2点間直線経路相関関数

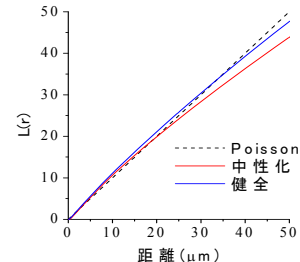


図-10 L関数

のL関数を比較したものである。距離の小さい範囲においては、中性化部も健全部分も空隙重心点はほぼポアソン分布をとる。距離の増大とともに、点はより規則性を持つ側へと、分布パターンは変化していく。この場合、ポアソン分布からの偏差は、健全部よりも中性化部の方が大きい。中性化による空隙構造の緻密化により、微細な空隙が消失していき、それにともない互いの空隙点が離れて存在するような規則性が現れてきたものと考えられる。

図-8~10の結果より、中性化の進行は粗大な毛細管空隙率の低下に加えて、空隙の空間分布状態を変化させるようであり、また図-7で視覚的に認識された画像の特徴の相違が関数の変化として表わされたことにもなる。著者らは、粗大な毛細管空隙の空間構造や正の相関範囲などが、セメントペーストの物質移動特性と対応することを指摘している⁹⁾。本研究にて明らかにされた毛細管空隙構造の変化より、実際のコンクリート床版においては、材料としての物質移動抵抗は増大していたものと推察される。

4. まとめ

実コンクリート構造物から採取したコア供試体の巨視的および微視的な画像情報に基づき、配合推定および中性化についての考察を行った。本研究にて得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) スキャナーから入力した研磨面の画像にエッジ抽出法を適用して抽出された骨材画像から、骨材量および骨材の粒度を精度よく推定することが可能であった。
- (2) 残存未水和セメントの3次元粒度分布の質量中位径から水和度を求め、これより推定した水セメント比と示方配合値の差は大きくなかった。しかし、その推定値の信頼性に関してはさらにデータを蓄積する必要がある。
- (3) 巨視的レベルにおいても微視的レベルにおいても、単純に球状粒子を仮定してはいるが、Schwartz-Saltykov法は有用な方法と考えられる。
- (4) 中性化による空隙率の低下は、粗大な毛細管空隙径の範囲においても生じている。また、このことは従来の水銀圧入法による結果が、より粗大な空隙径範囲における空隙率の低下の影響を受けたものであることを示唆する。
- (5) 中性化による空隙率の低下は、空間相関関数により空間構造の変化もともなうことが示された。これより、劣化構造物の調査を行うに当たり、空間相関に着目した空間統計学的調査は、健全部と劣化部を定量的に比較する一手段となりうると思われる。

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) コンクリート診断技術'03, 日本コンクリート工学協会, 2003
- 2) コンクリート専門委員会報告 F-18, 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, セメント協会, 1967
- 3) Dang Giang Hoang, 五十嵐心一, 内藤大輔: コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 2065-2070, 2009
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 小池祐輝, 五十嵐心一, Dang Giang Hoang: 点過程統計量による粗大毛細管空隙空間構造の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 721-726, 2009
- 7) Schwartz, H.A.: The metallographic determination of the size distribution of temper carbon nodules, Metals Alloys, Vol.5, pp.139, 1934
- 8) 五十嵐心一, 池崎由典, 渡辺暁央: 残存未水和セメント粒子の粒度分布の評価に基づく水和度と水セメント比の推定, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 1, pp. 87-95, 2005
- 9) Stoyan, D., Kendall, W.S. and Mecke, J.: Stochastic Geometry and its Applications, John Wiley & Sons, Chichester, 1985
- 10) Werner, A.M. and Lange, P.E.: Quantitative image analysis of masonry mortar microstructure, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol.13, No.2, pp.110-115, 1999
- 11) Concrete, hardened:water-cement ratio, Nordtest, NT Build 361, 1999
- 12) Ngara, V.T. and Page, C.L.: Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, Cement and Concrete Research, Vol.27, No.7, pp.995-1007, 2007