

論文 RGB情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究

横田 光一郎^{*1}・五十嵐 心一^{*2}

要旨：モルタル断面の等倍画像に対して RGB 情報に基づく抽出法を適用し、骨材相を精度よく抽出するための手順について検討した。その結果、身近なスキャナーで容易に取得できる画像でも、RGB 情報を利用した画像解析法を適用することにより、精度よく骨材相を抽出できることが示された。また、そのようにして抽出された骨材粒子の空間統計量から、骨材はランダムよりは凝集傾向を有した配置となることが示され、材料分離傾向も容易に定量的に評価できることが明らかとなった。

キーワード：画像解析, 骨材抽出, 空間分布, 2点相関関数, 材料分離

1. 序論

高度経済成長期に整備された道路や橋梁といったコンクリート構造物の多くが補修補強の時期を迎えており、適切な維持管理が必要となっている。コンクリート構造物の維持管理において、劣化予測や対策、耐用期間の設定等は点検作業の上に成り立つことから、点検作業によるコンクリートの診断が重要といえる。しかし、点検作業には経験や熟練の知識が必要となるため、点検者により評価が異なるという問題がある。そのような調査や点検においては、多くの写真が記録として取得される。近年ではデジタル画像を取得することがほとんどであり、これの画像解析によって、ひび割れの抽出^{1), 2)}や変状の検知が定量的に行えるようになっている。

一般に画像解析を行う目的は、画像内の様々な情報を用いて対象とするコンクリートの品質や性質を推定することにある。それがまだ固まらないコンクリートの材料分離性状の評価であったり、硬化コンクリートの水セメント比であったり、最終的に評価しようとする特性値は異なる。しかし、いずれの場合においても前提となる処理として、画像からの骨材相の抽出がある。画像解析による一般的な分離操作は、閾値を設定することにより行われる。しかし、コンクリートに使用される骨材色は様々であり、単純な2値化での抽出は困難とされている。Dangら³⁾はコンクリート断面のカラー画像から合理的に骨材を抽出する手法として、セメントペーストに着目してエッジ抽出に基づく手法を検討している。一方、永井ら⁴⁾はコンクリート断面のカラー画像から R 成分を抽出し、画像解析を行うことにより、骨材の2値化画像の取得が可能であることを示している。さらに、Karlら⁵⁾は硬化コンクリートの気泡間隔解析において、スキャナーにより取得した画像の RGB 情報を利用して検討を行っている。いずれの手法においてもカラー画像から骨材相を抽出

出しており、色情報を利用することにより、骨材相の分離は可能といえる。しかし、それぞれにおいて解析のアルゴリズムは異なり、必ずしも汎用的な手順が確立されているとはいえないようである。

本研究では、コンクリートやモルタル断面の画像取得に汎用的なスキャナーを用い、取得された低倍率のカラー画像に対して RGB 情報に基づく簡便な画像解析法を適用し、骨材相の抽出を行い、その抽出精度について論じる。さらに、そのようにして簡便に取得された骨材相およびセメントペースト相の評価を空間統計量により行い、その特徴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

普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm³, 比表面積: 3310cm²/g)および川砂(密度: 2.60 g/cm³, 吸水率: 2.14%)を使用し、JIS R 5201 に準じて 40mm×40mm×160mm の角柱モルタル供試体を作製した。水セメント比は 0.5 および 0.6 とし、セメント:骨材=1:1 および 1:2 の配合条件とした。打設後 24 時間で脱型し、所定材齢まで 20℃の水中養生を行った。

2.2 試料の作製および画像取得

材齢 28 日にて 1 つの供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を 10 枚切り出し、耐水研磨紙を用いて研磨を行った。研磨終了後、試料を 50℃の乾燥炉に入れ、10 分程度乾燥させた後、試料断面のカラー画像を取得した(図 - 1(a))。また、画像取得の解像度は 800dpi および 1200dpi とし、1 画素はそれぞれ 31.8μm, 21.2μm に相当する。セメントペースト相と同色の骨材を抽出するために、試料の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い、セメントペースト相のみの染色を行った。呈色後、斑ができないように余分な水分を布を用いて丁寧

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

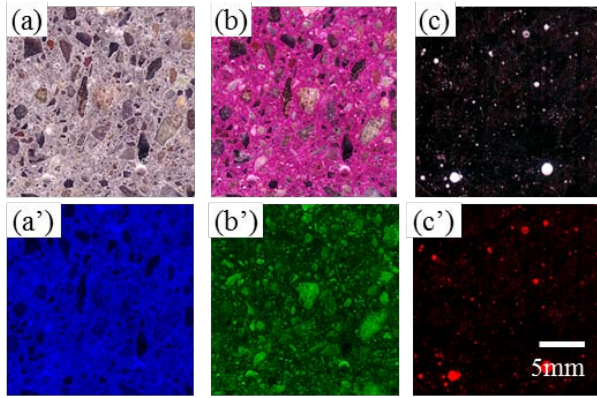


図 - 1 取得画像と RGB 成分抽出画像

に拭き取り、再び 10 分間程度乾燥させ、画像(図 - 1(b))を取得した。なお、試料の縁部では均一な呈色がなされない領域が存在すること、および空間統計量の計算におけるエッジ効果を避けるため、中心から 30mm×30mm の領域を解析することとした(マイナサンプリング)。画像を取得後、同試料の研磨面を黒色ペンで均一に塗り潰し、乾燥させた。その後、白色の粉末(本研究では澱粉を使用)を試料断面に広げ、スライドガラスを用いて上から押しつけることにより、試料の空隙を白色粉末で充填した。充填後、試料表面に残った余分な粉末を除去し、断面のカラー画像(図 - 1(c))を取得した。

2.3 画像解析

2.2 において取得した断面画像は骨材粒子や気泡の座標位置が一致していないため、画像解析ソフトを用いて、3 枚の画像の座標位置が一致するように調整した。その後、位置を調整した画像から青成分のみの情報を抽出した画像(図 - 1(a'))を得た。同様に断面画像から緑成分および赤成分を抽出した画像(図 - 1(b')), (c'))を取得した。なお、画像を構成する階調値は狭い範囲に集中しており、閾値の設定が困難であるため、あらかじめコントラストを調節し補正を行った。これらの R, G, B の情報をもつ画像を重ね合わせることにより、骨材相、セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像を得た。この重ね合わせた画像における骨材相とセメントペースト相の明度、色度の違いを利用して骨材相の抽出を行った。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため、明度および色度に対して閾値を設定することで単色であるセメントペースト相および気泡の 2 値画像を取得した後、画像演算によって目的とする骨材粒子の 2 値画像を得た。最終的に、目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の 2 値化画像とした。以上の解析手順を図 - 2 に示す。

2.4 点過程統計量^{6), 7)}

(1) 点密度

点過程統計量とは、観察領域 W においてランダムに分

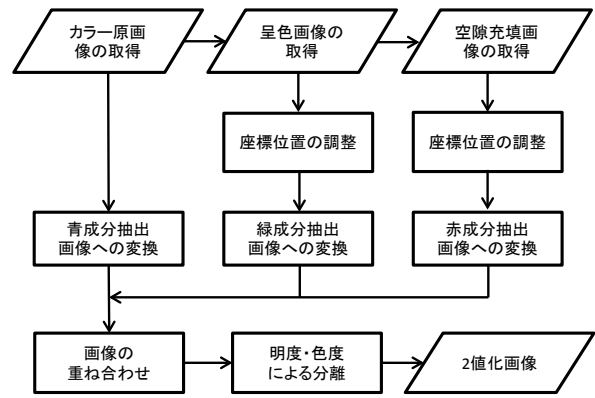


図 - 2 画像解析フロー

散している点 $x_i \in X$ に関して、距離変数としてその分布パターンを定量化し、点の分布特性を評価する確率関数である。その関数の計算において基本となるパラメータとして点密度がある。点密度は単位面積 $A(W)$ あたりの点の個数 $N_p(W)$ を表し、式(1)により定義される。

$$\hat{\lambda}_p = N_p(W)/A(W) \quad (1)$$

(2) K 関数^{6), 7)}

K 関数とは、任意の点から半径 r 以内に存在する他の点個数の期待値を表す。K 関数を用いることにより、分布している点がランダム分布に比べて、規則性や凝集性であるかを判定することができる。前述の点 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の重心点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在するか否かを判定し、K 関数を式(2)より計算した。

$$\hat{K}(r) = \frac{1}{\hat{\lambda}_p^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(|x_i - x_j| \leq r)}{s(x)} \quad (2)$$

ここに、 $1(\cdot)$ は (\cdot) 内が真であれば 1、偽であれば 0 を与える指示関数である。また、エッジ補正係数 $s(x)$ は式(3)にて与えられ、式中の a, b は観察画像領域の辺長を表す。

$$s(x) = ab - x(2a + 2b - x)/\pi \quad (3)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

2.5 2 点相関関数^{8), 9)}

2 点相関関数は、ある一定の長さ r の線分をランダムに落としたとき、その線分の両端が着目相に載る確率を表す。セメントペースト相を P とするとき、任意の点 $x_i (i=1, 2, \dots, j, \dots, n)$ に関して式(4)のような指示関数を定義する。

$$I(x_i) = \begin{cases} 1(x_i \in P) \\ 0(x_i \notin P) \end{cases} \quad (4)$$

$x_i \in P$ 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ことは、同時確率 $P\{I(x_i) = 1, I(x_n) = 1\}$ で与えられ、これより 2 点相関関数 $S(r)$ は式(5)にて定義される。

$$S(r) = \langle I(x_i)I(x_n) \rangle = P\{I(x_i) = 1, I(x_n) = 1\} \quad (5)$$

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。

2点相関関数の初期値はランダムに落とした点($r=0$)が着目相上に載る確率であり、着目相(セメントペースト相)の体積率を表す。一方、関数値は2点間距離の増大とともに減少し、理論上は体積率の自乗値に収束する性質を持つ。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(構造距離)を表し、これは2点の相関性がランダム分布より大きな正の相関を示す範囲(相関距離)でもある。

2点相関関数の計算を行うにあたって、本研究においては、放射線テンプレートを用いた。セメントペースト相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、両端点がセメントペースト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点相関関数を求めた。

2.6 2点間直線経路相関関数^{8), 9)}

上述の2点相関関数においては、線分の両端だけで算出した。それに対し、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として求めた。この関数は、空間における着目相が直線的に連結する確率を反映した確率関数と捉えることができ、その定義は式(6)にて与えられる。

$$L(r) = \langle I(x_i) \cdots I(x_j) \cdots I(x_n) \rangle \\ = P\{I(x_i) = 1, \cdots, I(x_j) = 1, \cdots, I(x_n) = 1\} \quad (6)$$

ここに、点 x_j は始点 x_1 と終点 x_n を結ぶ直線上の点である。

3. 結果および考察

3.1 骨材粒子の抽出および解析精度

図-3は、1200dpiの解像度で取得した水セメント比0.5, C:S=1:1および1:2のモルタル断面画像から骨材相を抽出した2値画像を示したものである。図-1にて示したRGB画像を重ね合わせた画像において、セメントペースト相はほぼ均一な青色、骨材は主に緑色、淡い青色および黒色で表示され、気泡に関しては赤色で表示されている。原画像と骨材の2値画像を比較すると、視覚的にも識別しにくく単純な2値化では抽出されにくい、セメントペースト相とほぼ同色の骨材粒子についても適切に抽出されていることが確認できる。

表-1に水セメント比0.5, C:S=1:1および1:2のモルタルの骨材2値画像から算出した骨材面積率および標準偏差を示す。また、モルタル中の気泡はわずかであることから、骨材率に影響はないと仮定して算出した。その結果、骨材量が増加することにより、抽出されにくい微小な骨材粒子が増加し、解析精度が低下することが予想されたが、C:S=1:2程度の骨材量の増加においては影響がほとんど認められなかった。また、解像度で比

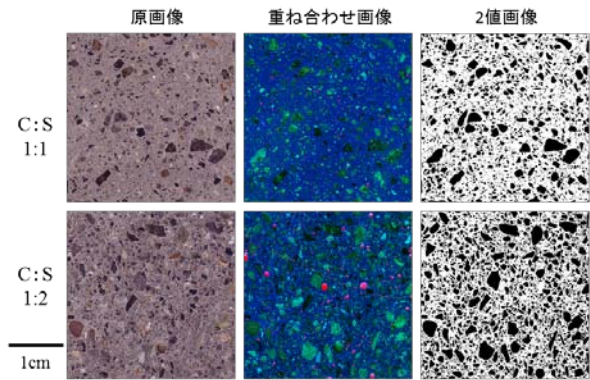


図-3 水セメント比0.5における画像解析結果

表-1 骨材の面積率

C:S	骨材面積率(%)			標準偏差(%)	
	配合値	800dpi	1200dpi	800dpi	1200dpi
1:1	31.9	27.8	30.5	2.43	1.60
1:2	47.9	42.7	45.2	2.48	1.26

較すると、1200dpiと解像度の高い画像を用いた方が、配合値に近い結果が得られるとともに、ばらつきも小さくなった。これは高解像度で取得したことにより、最小画素寸法が小さくなり、識別可能な粒子や領域が増加したことが関係しており、さらに解像度を上げることで高い精度が得られることを示唆する。しかし、本研究の画像範囲である30mm×30mmの画像をより高い解像度で取得すると、データ容量が大きくなるだけでなく、作業効率が著しく低下する。簡便な装置で短時間にて解析を行うという目的と実務的に行っていく場合の作業時間を考慮して、以後は解像度を1200dpiに設定し、画像解析を行うこととした。

図-4は、水セメント比0.5, C:S=1:1および1:2におけるモルタルの断面画像に対して、画像寸法を変化させて画像解析を行い、各観察領域における骨材面積率の平均値および標準偏差(標本の散らばり)を算出したものである。骨材量の多少および画像寸法の大小にかかわらず、10枚程度の画像枚数で解析を行うことにより、ばらつきが小さくなり、配合値ともほぼ等しい骨材率が得られている。これは、モルタルの空間構造全体の平均的な性質を反映する最小の構造単位である代表領域寸法よりも広い範囲の観察領域が確保されていたためと考えられ、10枚程度の画像を解析することにより、骨材量の変動は1%程度の標準誤差範囲になり、精度の高い評価が可能であると考えられる。また、実務上複数の断面を取得して研磨することは現実的ではない。本研究からモルタルの骨材相の抽出については、代表領域寸法が比較的小さく、かつエルゴード性の仮定が成立するようであ

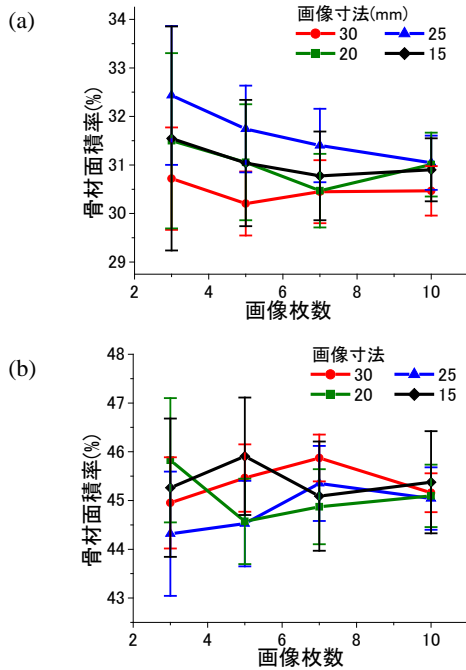


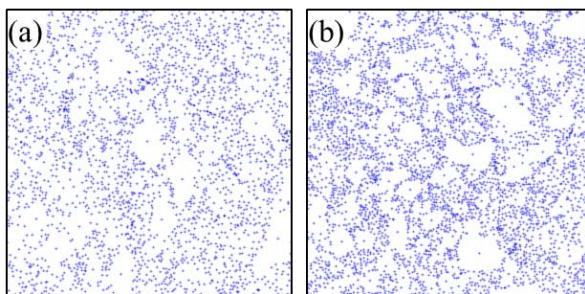
図 - 4 画像寸法と枚数による精度の比較
W/C=0.5, (a) C:S=1:1, (b) C:S=1:2

るため、1枚の断面画像だけで信頼性のある結果を得られることを示している¹⁰⁾。

3.2 骨材相の空間構造の評価

図 - 5 は 3.1 の手段によって抽出された骨材粒子の重心点位置を示したものである。骨材量が変化しても、比較的大きな骨材粒子の存在する領域を除き、観察領域全体に点が分布していることが理解できる。また、図 - 5(b)において、点個数が明らかに多くなっていることが認められる。両者の点密度は 8.5 および 11.5 であり、配合上では骨材体積率が 5 割程度増加しているのに対し、点密度は 3~4 割程度の増加となり比例しない。すなわち、断面に現れる粒子個数がステレオロジー量ではないことを示している。

図 - 6 は点密度の相違を消去して分布を比較しうる骨材粒子の K 関数を示したものである。図中の破線は、完全ランダム分布である 2 次元ポアソン過程($K(r) = \lambda \pi r^2$)に相当する K 関数を示している。いずれの配合に



(a) W/C=0.5, C:S=1:1 (b) W/C=0.5, C:S=1:2
図 - 5 骨材粒子の重心点分布の例 5mm

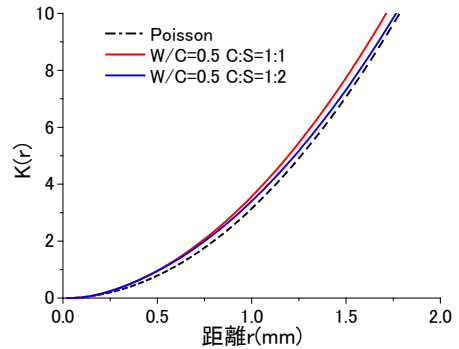


図 - 6 骨材相の K 関数

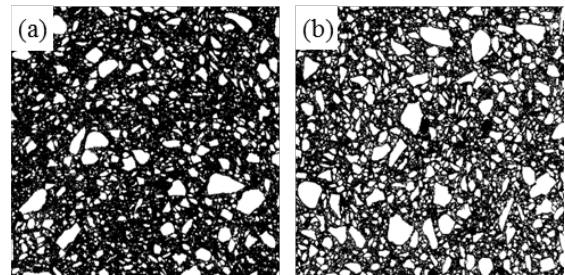


図 - 7 セメントペースト相の 2 値化画像
W/C=0.5, (a) C:S=1:1, (b) C:S=1:2

おいても、K 関数値はポアソン分布とほぼ同様の放物線を示しているが、値は若干それを上回る。これより、骨材粒子の空間配置は点過程としてみれば凝集傾向にあると考えられる。つまり、モルタルにおける骨材の空間配置は、比較的大きな骨材粒子の影響により、微小な骨材粒子の存在できる空間は限られるため、若干の凝集傾向を示したといえる。

3.3 セメントペースト相の空間構造の評価

図 - 7 は画像にて抽出された骨材粒子の補集合としてセメントペーストマトリックス領域を黒色にて示したものである。この部分はいわゆる物質移動経路となるため、その特徴の評価は耐久性評価の基礎物性となりうる相と考えられる。図 - 8 はセメントペースト相の 2 点相関関数を示したものである。骨材量の増加にともない、関数値の初期値であるセメントペースト相の体積率は小さくなり、配合値とほぼ一致する。また、関数値の収束距離についてはどちらも 1.5mm 程度であり、大きな相違は認

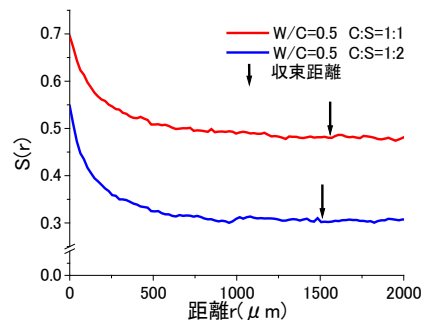


図 - 8 セメントペースト相の 2 点相関関数

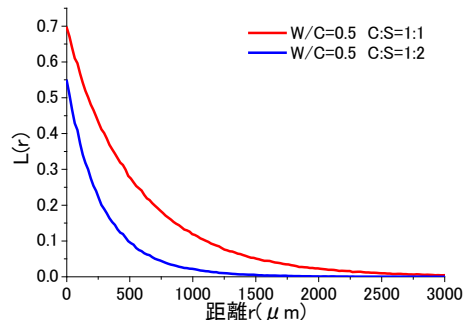


図 - 9 セメントペースト相の 2 点間直線経路相関関数

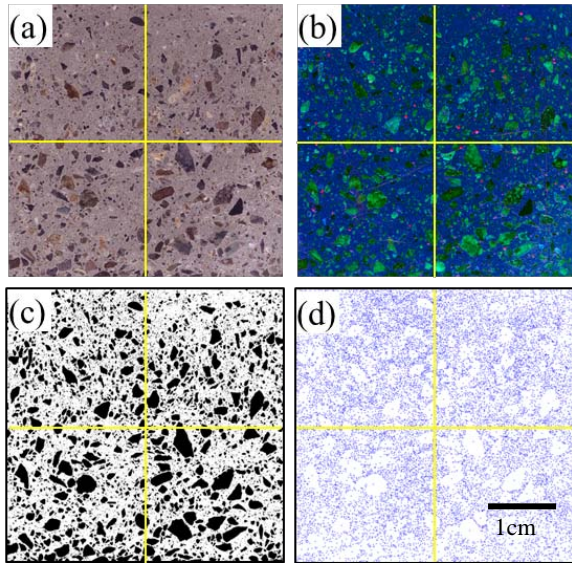


図 - 10 W/C=0.6, C:S=1:1 のモルタル画像

(a) 原画像, (b) 重ね合わせ画像,
(c) 2 値化画像, (d) 骨材粒子の重心点位置画像

められない。一般に収束距離は、空間分布における構造単位としての意味を有している。図 - 6 に示したように骨材量が増加しても、その空間分布特性に大差はない。よって、その補集合空間であるセメントペースト相の空間構造にも差を生じなかったことになる。このことは、さらに詳細な試料の分析を行おうとする場合、両者から採取すべき試料寸法は同程度でよいことを意味する。このとき、工学的には収束距離の 3~5 倍の距離範囲が代表領域と考えられるため、8mm×8mm 程度以上の観察領域があればよいことを示している。

図 - 9 はセメントペースト相の 2 点間直線経路相関関数を示したものである。骨材量の増加とともにセメントペースト相が直線的に連続し得る距離は短くなり、C:S=1:1 のモルタルでは直線的に 2mm 以上、C:S=1:2 のモルタルでは 1mm 程度以上セメントペーストが連続して存在する確率は 2,3% 以下とかなり低いことになる。

以上の結果より、RGB 情報を用いることによって、スキャナーのような簡便な装置で取得した画像であっても骨材は精度よく分離抽出され、骨材粒子やマトリックス領域も空間統計量によって定量的に評価できた。なお、

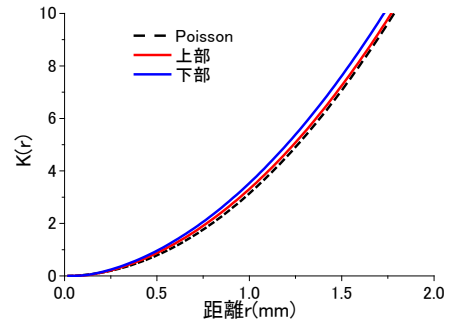


図 - 11 骨材相の K 関数 (W/C=0.6, C:S=1:1)

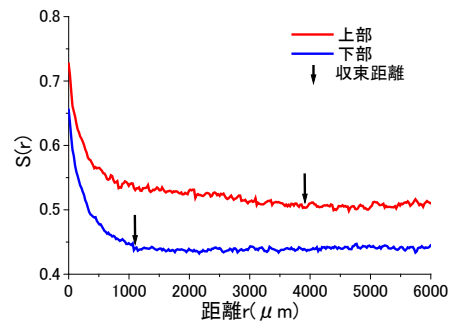


図 - 12 上部と下部におけるセメントペースト相の 2 点相関関数 (W/C=0.6, C:S=1:1)

本研究においては前述のように容易に使用できるスキャナーを用いることを基本としているが、画像処理等の手順はその他の高性能なデジタル画像取得装置を用いて得た画像にも適用し得るものである。このような手段を打ち込まれたコンクリートの品質管理の一手法として用いることは可能と期待される。

4. 評価例

図 - 10 は水セメント比 0.6, C:S=1:1 のモルタル断面画像例を示したものである。水セメント比が高いために材料分離を生じた例である。図より、上部では比較的大きな骨材粒子が少なく、微小な粒子が多く存在しており、明らかに骨材粒子の分布に偏りが生じている。一般にこのような材料分離は、コア表面や断面の目視により定性的な判断がなされる。これに対して、定量的な評価を行うために上述の手法を用いて骨材の抽出を行った。抽出の際は、取得した画像を図に示すように分割し、上部と下部におけるセメントペースト相の特徴を比較することとした。

図 - 11 はモルタル断面の上部と下部における骨材粒子の K 関数を示したものである。骨材粒子の空間配置は点過程としてみれば、打設面である上部においてはランダムに分布しているのに対し、下部においてはそれよりは凝集傾向にあるといえる。これは、上部と下部における比較的大きな骨材粒子の量が異なるために生じた差であると考えられる。

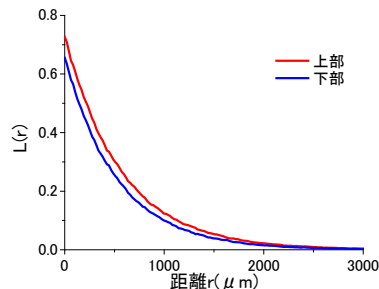


図 - 13 上部と下部におけるセメントペースト相の
2点間直線経路相関関数 (W/C=0.6, C:S=1:1)

図 - 12 はモルタル断面を上部と下部に分割し、セメントペースト相の2点相関関数を求めたものである。配合上のセメントペースト相の体積率は0.7程度であるのに対し、下部においては骨材量が多いため、セメントペースト相の体積率を示す関数の初期値は0.66と小さい。また、上部においては0.73程度であり、セメントペースト相の体積率は大きくなっている。一方、関数の収束距離は下部では1mm程度と短いのに対し、上部では4mm程度となり、空間構造単位が大きく異なっている。

図 - 13 はモルタル断面を上部と下部に分割し、セメントペースト相の2点間直線経路相関関数を求めたものである。2点相関関数と同様に、モルタル断面の下部においては関数の初期値は小さい。また、距離 r が長くなるとともにセメントペースト相が直線的に存在し得る確率の差は小さくなり、どちらも2mmを超えて連続する確率はかなり低くなっている。

図 - 12 および図 - 13 に示したように、図 - 10 で視覚的に認識された材料分離も合理的に骨材が抽出されるならば、セメントペースト相の特徴の相違として定量的に表すことができた。これより、材料分離の生じたモルタルにおいて、例えば詳細調査を行うとした場合には、採取すべき試料寸法が部位によって異なることを示している。

5. 結論

スキャナーにより取得したモルタル断面画像に対して、RGB情報に基づく骨材抽出法を適用し、解析精度を評価した。また、抽出された骨材相およびセメントペースト相の空間構造を関数により定量的に評価した。本研究にて得られた結果は以下の通りである。

- (1) RGB情報に基づく骨材抽出法を用いることにより、モルタル断面の骨材粒子を合理的に抽出することが可能である。
- (2) 画像の解像度は観察領域の大きさにより変化するが、30mm×30mmの領域であれば、作業性を考慮すると1200dpi程度が適している。
- (3) モルタル断面の代表領域は8mm程度であり、この

大きさを超える画像を10枚程度解析することにより、精度の高い情報が得られる。

- (4) モルタルにおける骨材粒子は比較的大きな粒子の存在により、微小な粒子が狭い範囲に密集するため、ランダムよりは凝集傾向を有した空間配置となる。
- (5) 提案法を用いれば、材料分離によるセメントペースト相の特徴の相違も容易に評価され、上部と下部では構造距離が4倍程度の差があることが示された。

謝辞

本研究の実施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)の交付を受けた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリートの高精度なひび割れ自動抽出, 土木学会論文集F, Vol.66, No.3, pp.459-470, 2010.9
- 2) 佐々木聡, 渡邊一悟, 小出博, 山本利生: デジタル画像によるコンクリート床板劣化判定システムの開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 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) 永井学志, 山田貴博, 和田章: 階層型デジタル画像に基づく粗骨材-モルタル界面を考慮したコンクリート材料の非線形有限要素解析手法, 日本建築学会構造系論文集, No. 528, pp.91-98, 2000
- 5) Karl W. Peterson et al.: Hardened Concrete Air Void Analysis with a Flatbed Scanner, Transportation Research Record 1775, No.01-3389, pp.36-43, 2001
- 6) Stoyan D., Kendall W. S., Mecke J.: Stochastic Geometry and Its Applications, Wiley, 1995
- 7) 島谷健一郎: 点過程による樹木分布地図の解析とモデリング, 日本生態学会誌 51, pp.87-106.2001
- 8) Torquado, S., Stell, G.: Microstructure of two-phase random media .I. the n-point probability function, Journal of Chemical Physics, Vol.77, No.4, pp.2071-2077, 1982
- 9) Cocker, D.A., Torquado, S.: Extraction of morphological quantities from a digitized medium, Journal of Applied Physics, Vol.77, No.12, pp.6087-6099, 1995
- 10) Stoyan, D and Stoyan, H: Fractals, Random Shapes and Point Fields, Methods of Geometrical Statistics, John Wiley and Sons, 1994