

低倍率のコンクリート画像のステレオロジー量の比較

金沢大学大学院 学生会員 ○横田 光一郎
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートの性能照査や維持管理、施工管理といった多くの場面に、コンクリート試料を採取したうえでの写真撮影が行われる。著者らはこれまでそのような一般的に取得される低倍率画像に対して RGB 情報に基づく画像処理を行い、骨材相もしくはその補集合としてのセメントペースト領域を抽出する方法を提案してきた¹⁾。骨材が安定である限り、微細ひび割れの発生や伝播はセメントペーストマトリックス領域にて生じ、また、物質移動経路もそのマトリックス領域である。よって、この部分の幾何学的特徴を明らかにすることは、コンクリートの力学特性や耐久性を理解する上で重要な情報となりうる。

本研究においては、最大骨材寸法の異なるコンクリートの低倍率の断面画像を解析し、骨材相とセメントペーストマトリックス相の分離抽出を行う。抽出された構成相に対して空間統計量を用いて評価を行い、骨材寸法による空間構造の相違について論ず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:2.61g/cm³, 吸水率:2.14%), Gmax=25mm(密度:2.58g/cm³, 吸水率:1.86%)および Gmax=10mm(密度:2.59g/cm³, 吸水率:2.12%)の川砂利を使用し、水セメント比 0.5 のコンクリート供試体(100mm×100mm×400mm)およびモルタル供試体(40mm×40mm×160mm)を作製した。モルタルの骨材量は C:S=1:1 および 1:2 とし、コンクリートは骨材体積率が等しくなるように配合を調整した。配合表を表-1 に示す。打設後 24 時間にて脱型し、材齢 14 日まで

表-1 コンクリートの示方配合

配合名	Gmax (mm)	W/C	s/a	Air (%)	単位量(kg/m ³)			
					W	C	S	G
M1	5	0.50	1.0	0	416	833	833	0
M2	5	0.50	1.0	0	316	631	1263	0
C1	10	0.50	0.40	5.0	150	300	736	1095
C2	25	0.50	0.40	5.0	150	300	736	1091

20℃の水中養生を行った。

2.2 試料作製および画像取得

養生終了後、各供試体から厚さ 10mm 程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。その後、スキャナーを用いて等倍の断面画像を取得した。このときの解像度は 1200dpi とし、1 画素は 21.2μm に相当する。この画像において骨材相とセメントペースト相の識別ににくい箇所が存在するため、試料断面に対して 1% フェノールフタレイン水溶液による呈色を行い、新たに断面画像を取得した。また、気泡や粗大な空隙を識別するために、同試料断面を黒色ペンで塗り潰し、乾燥後に澱粉を空隙に充填させた試料の断面画像を同様に取得した。取得した 3 枚の画像の座標位置を調節した後、それぞれの画像の RGB 成分を抽出し、重ね合わせることで相抽出のための画像を得た。

2.3 画像解析

2.2 にて取得した画像に対して明度および色度を設定することにより、各構成相の 2 値化画像を取得し、以下の手法を用いて評価を行った。

(1) 2 点相関関数

2 点相関関数 $S(r)$ とは、画像上にランダムに落とした線分の両端 x_i ($i=1,2$) が同一相上に載る確率関数である。画像上の点 x_i に関して式[1]のような指示関数を定義する。

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

点 x_i が着目相(P)上にある確率を $P\{I(x_i)=1\}$ とすると、任意の距離 r 離れた 2 点 x_1, x_2 が同一相上にあることにより、2 点相関関数は式[2]のように定義される。

$$S(r) = \langle I(x_1)I(x_2) \rangle \\ = P\{I(x_1)=1, I(x_2)=1\} \quad [2]$$

ここに $\langle \rangle$ は期待値を意味し、 $|x_1 - x_2| = r$ である。また、2 点相関関数の初期値は着目相の面積率を表し、初期勾配は比表面積と関係している。式[3]により骨材粒子の比表面積 S_v を求めた。

$$\left. \frac{d}{dr} S(r) \right|_{r=0} = -\frac{1}{4} S_v \quad [3]$$

さらに、骨材の体積率 V_s および比表面積 S_v を用いて、骨材粒子間距離である平均自由行程 λ を式[4]により求めた。

$$\lambda = 4(1 - V_s) / S_v \quad [4]$$

(2) 2 点間直線経路相関関数

画像上に落とした線分全体が同一相上に載る確率を求めた関数である。この関数は直線的な連続経路の有無とその距離を強く反映した関数であり、その定義は式[5]のように定義される。

$$L(r) = \left\langle I(x_1) \cdots I(x_j) \cdots I(x_n) \right\rangle \\ = P\{I(x_1) = 1, \cdots, I(x_j) = 1, \cdots, I(x_n) = 1\} \quad [5]$$

ここに、点 x_j は始点 x_1 、終点 x_n を結ぶ直線上の点であり、 $|x_n - x_1| = r$ である。

3. 結果および考察

図-1 は骨材の補集合であるセメントペースト領域の相関関数を示したものである。関数の初期値は、セメントペースト領域の体積率を示しており、配合値と比較すると M1 では 1% 程度、M2 および C1、C2 では 3~4% 程度の差が生じている。これは低倍率の画像であるために、微小な骨材粒子が検出されないこと、およびそれらが断面に現れる確率が低いことが関係していると考えられる。図中矢印にて示した 2 点相関関数の値がほぼ収束する距離を比較すると、モルタルは短距離にて無相関となり、骨材量の増加により短くなることが認められるが、その差は高々 1mm 程度でしかない。一方、C1 では 3mm 程度でモルタルのそれと大差はなく、C2 でも 4mm 程度の収束距離となっている。すなわち、ランダム場であるセメントペースト領域はそれを形成させる骨材粒子寸法が大きく異なっても、セメントペースト領域の空間配置は大きくは異ならないことを示している。換言すれば、一般的なコンクリートにおけるセメントペースト領域の特徴は、骨材寸法の相違ほどには変化しないといえる。

セメントペースト領域の 2 点間直線経路相関関数を図-1 (b) に示す。M1 が最も長い連続経路を有した空間配置をとり、骨材量が増加すると連続経路の存在確率は低下するのに対し、コンクリートでは関数値が重なり相違は認められない。よって、最大骨材寸法が異なる場合でも、セメントペースト領域が直線的に連続して存在する確率は変化しないといえる。

表-2 は骨材相の 2 値化画像から得た解析値および骨材粒子を球と仮定して配合量から算出した理論値をま

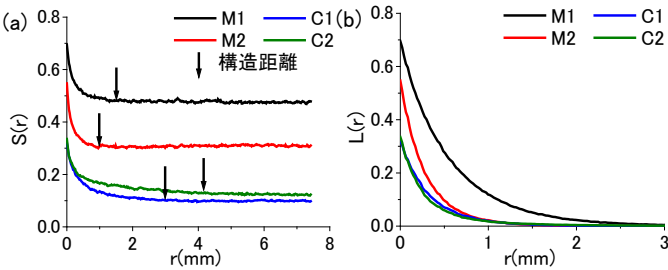


図-1 セメントペースト領域の相関関数
(a) 2 点相関関数、(b) 2 点間直線経路相関関数

表-2 モルタルおよびコンクリート中の骨材相の解析

	M1	M2	C1	C2
最大骨材寸法(mm)	5	5	10	25
比表面積(μm ² /μm ³)	0.0034 (0.0040)	0.0050 (0.0060)	0.0030 (0.0037)	0.0029 (0.0034)
平均自由行程(μm)	839 (688)	436 (344)	442 (323)	494 (346)

()内は球仮定により算出した理論値を示す

とめて示したものである。上述のように微小な骨材粒子が断面に現れにくいため理論値よりも比表面積および骨材率が小さくなり、結果として平均自由行程が大きくなっている。骨材粒子間の距離を表す平均自由行程を骨材量の異なるモルタル間で比較すると大きな差が生じているが、骨材寸法の異なるコンクリート間では相違が認められない。このことより、骨材量が同じであれば、最大骨材寸法がセメントペーストマトリックス領域の幾何学的な特徴に及ぼす影響は小さいといえる。また、骨材量の多いモルタル M2 とコンクリート C1、C2 の平均自由行程にも大きな差がない。このことは、最大骨材寸法の小さいモルタルであっても、骨材量が多くなれば、コンクリートと同様のセメントペーストマトリックス空間配置が再現されていることを示す。よって、セメントペーストと骨材粒子間の微視的構造を明らかにしようとする場合、骨材量の多いモルタルはコンクリートの構造を再現しうるモデル構造となっていると考えられる。

4. 結論

低倍画像の各相の幾何学的特徴量から骨材寸法が異なっても、骨材の補集合としてのセメントペースト領域の構造には大きな差はないことが明らかとなった。

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。

参考文献

1) 横田光一郎, 五十嵐心一: コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1759-1764, 2013