骨材の混入によるセメントペースト相の空間構造の変化の定量評価

金沢大学　学生会員　○柴山　舞
金沢大学　正会員　五十嵐　心一
金沢大学　学生会員　内藤　大輔

1．まえがき

コンクリートやモルタルは，巨視的にとらえた場合骨材相とセメントペースト相から成り立つ 2 相材料と考えられる．このセメントペースト相はコンクリート中で唯一の連続した相であり，コンクリートの力学的性能にかかわる骨格構造の役割を果たし，また，その相中に連続経路を持つことからコンクリート中の物質移動特性といった性能を左右している．コンクリートの特性は水セメント比に依存することは周知であるが，同一水セメント比およびセメントペースト体積率であったとしても，ペーストマトリックス相の幾何学的特徴は異なりえて，これがコンクリートの特性に影響を及ぼしている側面もある．

本研究では，骨材の量および粒度を変化させたモルタルを対象に，セメントペースト相の幾何学的特徴を空間統計学に基づいて定量的に評価し，その特徴を物質移動への影響の観点から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

セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には石川県手取川産の川砂を用いた．使用した細骨材の粒度分布を**図 1** に示す．JIS R 5201 に基づき水セメント比が 0.50 のモルタル円柱供試体(直径 100mm，高さ 200mm)を作製した．本研究におけるモルタルの配合を**表 1** に示す．いずれの供試体も打設後 24 時間にて脱型し，材齢 28 日まで 20°C の水中養生を行った．

2．2　セメントペースト相の画像の取得

材齢 28 日において供試体中央部から 40mm×40mm×10mm 程度の試料を切り出し，耐水研磨紙を用いて表面を研磨し，デジタルカメラを用いて画像を取得した(観察倍率:2.6～2.7 倍，1 画素:11.61μm～12.22μm)．得られた 2 次元断面画像から骨材のエッジを抽出し，骨材部分の画像を再現した．この画像に対して，画像解析ソフトウェアの機能を用い，原画像から骨材の 2 値画像を減算し，セメントペースト相の 2 値画像を得た．

表 1　モルタルの配合表

種類	細骨材粒度		W/C (%)	セメント砂比 (C:S)	骨材体積率 (%)
	粒径範囲 (mm)	記号			
M1f	0～5	f	50	1:1	31.9
M2f				1:2	48.4
M3f				1:3	58.4
M2c	1.2～5	c		1:2	48.4
M2m	0.6～2.5	m			

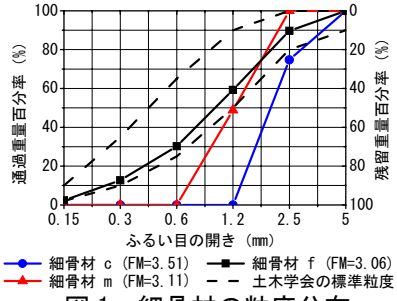


図 1　細骨材の粒度分布

2．2　2 点相関関数

2 点相関関数とは，ある長さ r の線分を画像上に落としたとき，その両端が同一相上に載る確率関数である．今，モルタル中の任意の点(x_i=1，2，…，i，…，n)に関して式(1)のような指示関数を定義する．

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

点 x_i がセメントペースト相(P)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 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 $S_2^{(P)}(r)$は式(2)のように定義される．

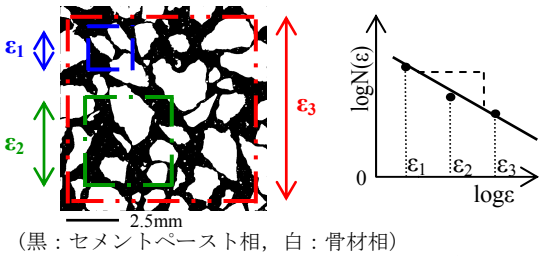
$$\begin{aligned}S_2^{(P)}(r)&=\langle I(x_1)I(x_2)\rangle\\&=P\{I(x_1)=1,I(x_2)=1\}\end{aligned} \tag{2}$$

一方，線分の両端だけではなく，線分全体が同一相に載る確率関数として 2 点間直線経路相関関数 $L_2^{(P)}(r)$を求めた．これは直線的な連続性の有無を強く反映した確率関数であり，式(3)のように定義される．

$$\begin{aligned}L_2^{(P)}(r)&=\langle I(x_1)\cdots I(x_i)\cdots I(x_n)\rangle\\&=P\{I(x_1)=1,\cdots I(x_i)=1,\cdots,I(x_n)=1\}\end{aligned} \tag{3}$$

ここに，点 x_i は点 x_1 と点 x_n を結ぶ直線上の点である．

キーワード　画像解析，空間構造，2 点相関関数，フラクタル次元
連絡先　〒920-0092　石川県金沢市角間町　金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻　ＴＥＬ076-264-6373



（黒：セメントペースト相，白：骨材相）

図 2　セメントペースト相の 2 値画像とボックスカウント法

なお，2 点間直線経路相関関数の 1 次モーメントに関するパラメータ G を式(4)により求めた．

$$G = \left(\int_0^{\infty} L_2^{(P)}(r) r dr\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

2．3　フラクタル次元

セメントペースト相の平面的な幾何学的形状の複雑さを表すことを目的として，ボックスカウント法によりフラクタル次元を求めた．セメントペースト相を抽出した 2 値画像に対して長さ ε の格子で区切り（図 2），格子内にセメントペースト相の一部を少しでも含む格子の数 N(ε)を計測した．ε の大きさを変化させながら N(ε)を順次求め，両対数グラフにプロットし，その直線の傾きからフラクタル次元 D を求めた（式(5)）．

$$D = \log N(\varepsilon) / \log \varepsilon \quad (5)$$

3．結果および考察

図 3(a)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および収束距離が短くなっている．関数が収束する距離は空間分布における構造単位としての意味を有し，骨材体積の増加に従い，より小さな領域の観察でセメントペースト相の特徴が理解できる．また，骨材粒度を変化させた場合は，骨材粒度が粗くなるほどセメントペースト相の構造単位は大きくなることから，骨材が粗くなり粒子個数が減少すると，セメントペースト相の特徴の評価にはより広範囲を観察する必要がある．

図 3(b)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．なお，凡例にはパラメータ G の値も併せて記した．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うる距離は縮小し，いずれのモルタルともセメントペースト相が直線的に 1mm 連続する確率はかなり低い．また，関数の代表値である G の変化は最大で高々70μm 程度である．これより，セメントペースト体積が約 62%程度にまで減少しても，セメントペースト相の直線性には大きな相違はないと判断される．一方，同一体積率を保ったまま骨材の粒

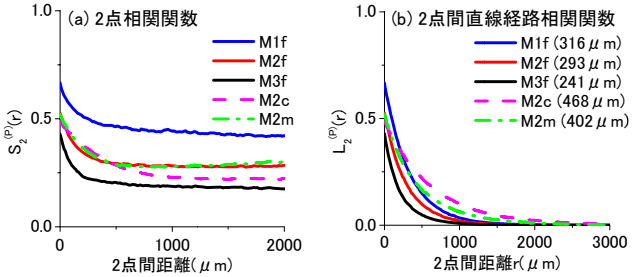


図 3　セメントペースト相の相関関数

表 2　セメントペースト相のフラクタル次元

種類	M1f	M2f	M3f	M2c	M2m
フラクタル次元	1.87	1.81	1.79	1.79	1.80

度を変化させた場合は，細かい骨材(M2f)を使用すると，セメントペーストが 1mm 程度の連続性を有する部分は微小であるのに対し，粗い骨材(M2c，M2m)を使用すると 2mm 程度にまで最大の連続性は拡大する．また，G の値も 180μm 程度増大し，骨材量が変化した場合よりも比較的大きな空間構造の変化が認められる．

表 2 はセメントペースト相のフラクタル次元を示したものである．一般にフラクタル次元が大きいことは，各格子サイズとその被覆格子数の変化率が大きく，複雑な形態であることを意味する．骨材量が増加するとフラクタル次元は減少し，セメントペースト相の形状の複雑さは小さくなる．一方，粒度を変化させるとフラクタル次元に差はなく，形状の複雑さの変化は小さく，骨材量を変化させた場合とは対照的な傾向を示す．

物質移動経路の観点からは，セメントペースト相の屈曲性の増大，すなわち直線性の低下は物質移動抵抗の増大を意味する．上述の結果は，骨材粒度の変化の方がセメントペースト相の直線性がより大きく変化することを示す．しかし，著者らはモルタルの電気伝導率の測定を行い，同一セメントペースト体積であれば，粒度の影響は小さいことを指摘している[1]．これらのことより，モルタルにおける物質移動においては，セメントペースト相の巨視的な屈曲性の影響は小さく，より微視的なレベルにおける移動経路の連続性を考慮する必要があるものと考えられる．

4．あとがき

セメントペースト相の空間構造を相関関数により評価した．セメントペースト相の直線的な連続性の変化は，セメントペースト体積を変化させるよりも，骨材粒度を変化させる方が大きいことが定量的に示された．

5．参考文献

1) 柴山舞，五十嵐心一，内藤大輔：コンクリート工学年次論文集，2009，投稿中