骨材粒子がセメント粒子の分散性に及ぼす影響

金沢大学理工学域 学生会員 〇中川 卓磨 金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートの物性は水セメント比により決定され ることは周知であるが、これは換言すると初期のセメ ントペースト空間におけるセメント粒子と水の体積比 により決定されることを意味する.セメントが粉体で あることを考慮すると、結局はセメント粒子の初期配 置が物性を決定づけていることになるが、セメント粒 子の分散を定量的に評価した例は少ない。

本研究においては、モルタル中の未水和セメント粒 子の分散性および空間分布の特徴を点過程統計量によ り評価する.モルタル中のセメント粒子の分布を骨材 粒子による点過程の間引き過程と比較し、骨材の存在 がセメント粒子の分散性に及ぼす影響を明らかにする 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:2.61g/cm³) を使用し, 水セ メント比が0.3 および0.6 のセメントペーストおよびモルタ ルを練り混ぜた. モルタルのセメント:骨材=1:2 とした. 水セメント比 0.3 のセメントペーストおよびモルタルに対 しては, 混和剤としてポリカルボン酸エーテル系の高性能 減水剤をセメント質量に対して 1.0%使用し, 水セメント比 0.6 については, 水量に対して 0.6%の増粘剤を使用した. 直径 50mm, 高さ 100mm の円柱供試体を作製し, 材齢 1 日にて脱型した. 水セメント比が 0.6 の供試体のみ材齢 3 日まで水中養生を行った.

2.2 画像の取得および画像解析

材齢1日もしくは3日にて供試体から薄片試料を切り出 し、凍結真空乾燥によって試料内部水を除去し、樹脂含浸 を行った後、表面を研磨して反射電子像観察試料とした. 観察倍率60倍にて無作為に10枚以上の研磨面の反射電子 像を取得した.1画像は1148×1000画素からなり、1画素 は約1.85µmに相当する.取得した反射電子像に対し、グ レースケールに基づく2値化処理を施し、未水和セメント 粒子を抽出した2値画像を得た.図1に反射電子像の例を 示す.



図1 反射電子像の画像解析の例 (a)反射電子像(b)重心点位置画像

2.3 間引き過程としての解析方法 (1)2 点相関関数

2 点相関関数は、ある一定の長さrの線分をランダムに 画像上に落としたとき、その線分の両端が着目相上に載る 確率を表す.任意の長さrの線分の両端を x_1, x_2 とすると、 線分の両端がセメントペースト相に載る確率は同時確率 $P\{I(x_i) = 1, I(x_j) = 1\}$ で与えられ、これより2点相関関 数S(r)は式(1)にて定義される.

 $S(r) = \langle I(x_1)I(x_2) \rangle = P\{I(x_1) = 1, I(x_2) = 1\}$ (1) ここに、P はセメントペースト相であり、r = $|x_1 - x_2|$ は 2 点間距離を表す.また、〈〉は期待値を意味する. (2)K 関数¹⁾

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. 画像解析により、抽出された未水和セメ ントの中心点を求めこれを点過程 $\{X: x_i = 1, ..., n\}$ とした. 点 $x_i \in X$ を中心とする半径rの円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の点 $x_j \in X(i \neq j)$ 点が存在するか否かを判定し、K 関数を式(2) より計算した.

$$\widehat{K}(r) = \frac{1}{\widehat{\lambda}^2} \sum_{i \neq j} \frac{1(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| \le r)}{s(\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|)}$$
(2)

ここに、1(・)は()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、s(x)は式(3)により与えられるエッジ 補正係数であり、a、bは観察画像領域の辺長である.

 $s(x) = ab - x(2a + 2b - x)/\pi$ (3) (3)間引き過程の K 関数¹⁾

セメントペースト供試体を用いたときの未水和セメント 粒子の分布を点過程 Φ_bとして、その K 関数 K_bを求めた. また、モルタル中のセメントペースト相を P とし、そのセ メントペースト相中の未水和セメント粒子の分布を点過程
$$K_p(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r S(x) dK_b(x)$$
 (4)

ここに, p はモルタル供試体のセメントペーストマトリッ クス相の面積率を表す.

結果および考察

図2はモルタル中のセメントペースト領域の2点相 関関数を示したものである.2点相関関数における関 数の初期値S(0)はセメントペースト相の体積率を表し ており,水セメント比0.3で0.43,0.6で0.54程度であ る.この値は配合上の体積率とほぼ一致しており,画 像抽出過程において骨材相とセメントペースト相の分 離は適切になされている.

図3は、セメントペースト供試体中における未水和 セメント粒子の K 関数 K_bを示したものである.いず れの水セメント比も完全にランダムな分布であるポア ッソン分布の K 関数とほぼ一致している.

図4は、水セメント比0.3のモルタル中のセメント 粒子のK関数K_pを示したものである.ここに間引き 過程とはセメント粒子がセメントペースト供試体中の 分布特性(図3)を維持し、モルタル中でセメントペー ストマトリックスのランダム領域の部分だけが残存し た場合の分布を示す.図4に示すように、間引き過程 ではセメント粒子位置が制限されるため、セメント粒 子は凝集性の分布を示す.これに対して、実際のモル タル中の分布もほぼこの間引き過程としての分布と同 じ分布を示しており、骨材はセメント粒子の分布に間 引き以上の影響を及ぼしてはいない.

一方,図5は水セメント比0.6のモルタル中のK関数を示したものである.この場合も間引き過程ではランダム分布よりも大きな関数値を示し,凝集した配置である.しかし,実際のモルタル中のセメント粒子のK関数は距離の短い範囲では間引き過程と一致するが,距離が200µmを超えるぐらいからK関数はより凝集性が小さくなるような分布を示し,明らかに図4に示



した低水セメント比の場合とは傾向が異なる.

前述のように、骨材の存在が単にセメント粒子の存 在可能なセメントペーストマトリックスを減少させる だけであるならば、未水和セメント粒子の K_pと K_bは 一致し、骨材はセメント粒子に対して存在領域の制限 以上の影響を与えないことになる.しかし、水セメン ト比 0.6 では、セメント粒子の凝集性は改善されより ランダムに近い分布となっている.このような変化は、 練り混ぜ時に骨材粒子のせん断作用によってセメント 粒子のフロックを破壊し、分散させる働きによりもた らされたと考えられる.また、フロックの破壊のため には粒子を分散させる空間が必要であり、高水セメン ト比ではそのような空間が広く存在するため、よりラ ンダムな分布が得られたものと考えられる.

4. 結論

モルタル中の骨材は、低水セメント比ではセメント 粒子に間引き以上の影響を与えないのに対し、高水セ メント比ではセメント粒子をせん断作用により分散さ せる働きを持つことが K 関数により示された.

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

 Stoyan D., Kendall W.S.et al. : Stochastic Geometry and Its Applications, Wiley (1995)