

モルタル中の未水和セメント粒子の空間分布評価

金沢大学 学生会員 ○吉川 峻生

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートやモルタル中の骨材の周囲には、遷移帯と呼ばれる多孔質な領域が存在するとされている。一方で、従来の概念的に説明されるような遷移帯は存在しないとする主張もある。遷移帯は、練り混ぜ初期における未水和セメント粒子の充填、すなわち初期の粒子配置が形成要因であり、骨材の存在下での未水和セメント粒子の初期の空間分布の評価が重要である。このような評価に対しては、粒子を点で代表させる点過程の考え方が有効であり、早期材齢の未水和セメント粒子へ適用すれば、その空間分布の初期の特徴を定量的に評価することが可能と考えられる。また、点過程に関してはフリーの統計解析ソフト R が広く普及しており、高度な計算を簡単に行うことも可能である。

そこで、本研究においては、モルタル中の未水和セメント粒子の点過程特性値を R によって解析し、その空間分布構造の特徴を評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 供試体および反射電子像観察試料の作製

セメントには普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³, 比表面積:3310cm²/g)を使用し、骨材には粒径 600μm 以下の川砂(密度:2.6g/cm³)を用いた。JIS R 5201 に基づき、水セメント比 0.50 の C:S=1:1, 1:2 のモルタル(以後 CS1 モルタル, CS2 モルタルと称す)を練り混ぜ、小型円柱供試体(直径 15mm, 高さ 3mm)を作成し材齢 24 時間まで静置した。その後、試料をエタノールに浸漬し、さらに、t-ブチルアルコールを用いた凍結真空乾燥を行って水分を除去し、真空樹脂含浸装置により樹脂含浸を行った後に樹脂硬化後に表面を注意深く研磨し、反射電子像観察試料を得た。

2.2 反射電子像取得および画像解析

観察倍率 200 倍にてモルタル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

0.55μm に相当する。これ無作為に 30 枚取得し、画像より目視にて骨材の抽出を行った。その後、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の 2 値画像を得た。このとき、観察領域内のセメントペーストマトリックス中に分散しているセメント粒子の個数を領域面積で除すことで点密度 $\hat{\lambda}$ を算出した。また、抽出した未水和セメント粒子の面積率を、体積率とし、未水和セメント粒子体積率 VC と初期の未水和セメント体積率 VC₀ から、式(1)により水和度 α を算出した。

$$\alpha = 1 - (VC/VC_0) \quad (1)$$

2.3 未水和セメントの空間分布の評価

(1) 円相当径による粒度分布

未水和セメント粒子の単位セメントペースト領域当たりの粒度分布を円相当径により算出した。また、一般的なセメントの粒度分布より、練り混ぜ初期(水和度 0%)における未水和セメント粒子点密度を算出した。

(2) 未水和セメント粒子の分散性評価

画像解析により、抽出された未水和セメントの重心点を求めこれを点過程 $\{X: x_i = 1, \dots, n\}$ とし、K 関数 Kr を式(2)より計算した。

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

ここに、 $1(\cdot)$ 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り、 $s(x)$ はエッジ補正係数である。

(3) シミュレーションによる分散性評価

抽出したモルタル中の骨材画像を用いて、骨材の補集合空間であるセメントペースト領域に対し、R による点発生シミュレーションを行った。実際のモルタル中の未水和セメント粒子とセメントペースト領域における点密度が等しくなるよう点をランダムに発生させ、これをモルタルにおけるランダムな未水和セメント粒子点過程 X_S とみなし、その分布の K 関数 K_S を算出した。

表-1 未水和セメント粒子の画像解析結果

	骨材体積率(%)	初期のセメント粒子 体積率VC ₀ (%)	セメント粒子体積率 VC(%)	水和度(%)	点密度(個/μ m ²)
C:S=1:1	36.6	24.6	19.0	22.9	0.00316
C:S=1:2	47.3	20.5	14.8	27.5	0.00251

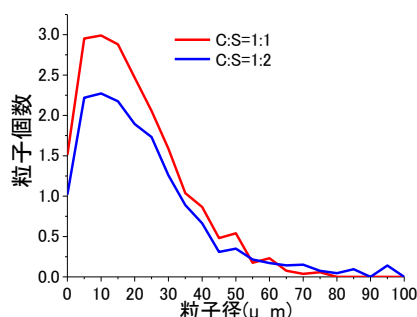


図-1 未水和セメント粒子の粒度分布

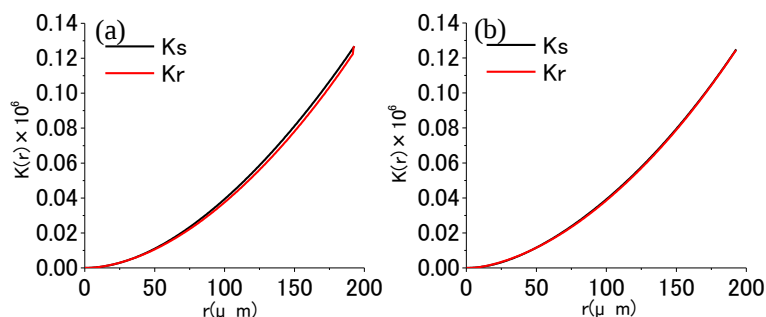


図-2 未水和セメント粒子のK関数 (a) C:S=1:1 (b) C:S=1:2

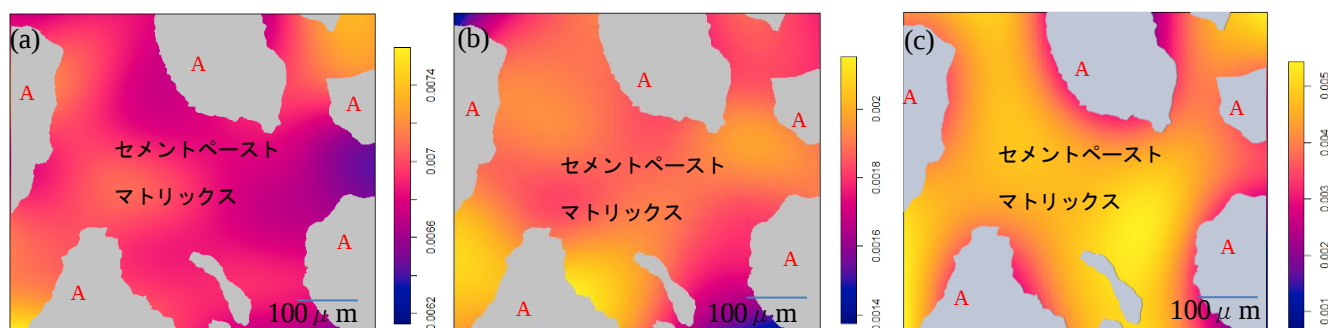


図-3 未水和セメント粒子の点密度マップ (C:S=1:1) (A:骨材)

(a) シミュレーション(水和度 0%) (b) シミュレーション(水和度 22.9%) (c) 実際のモルタル(水和度 22.9%)

(4) 点密度マップの作製

実際のモルタル中の未水和セメント粒子の点過程 X とシミュレーション点過程 X_s に対し, R を使用してセメントペースト領域における点密度のマッピングを行った. さらに, セメントペースト領域に対しシミュレーションにより点をランダムに発生させ, 水和度 0% における点密度 (0.0134 個/ μm^2) マップを作成した.

3. 結果および考察

表-1 に材齢 24 時間における水和度と点密度を示す. CS2 は CS1 に比べ水和度が大きい一方で, 点密度は CS1 よりも小さい.

図-1 に単位セメントペーストマトリックス当たりの未水和セメントの粒度分布を示す. CS2 は CS1 に比べ, 微細なセメント粒子数が小さい. 骨材量が多いほど骨材のせん断作用によるセメント粒子ブロックの破壊を生じやすい. よって, 練り混ぜ時に存在していた微細な未水和セメント粒子は, 水和の初期過程において消費されていたと考えられ, このことは, CS2 にて水和度が高いことも対応する.

図-2 にモルタル中の未水和セメント粒子の K 関数 K_r および K_s を示す. どちらの配合においても K_r は完全ランダム分布である K_s の関数値と一致している. 実際のモルタル中においても未水和セメント粒子は, セメントペーストマトリックス全体でランダムな空間分布配置を形成している.

図-3 に相対的な点密度マップを示す. 初期にて既にシミュレーションにおいても点密度が周囲に比べて低い領域は存在するが(図-3(a)), 全体として均質であり, ランダム充填の場合には(図-3(b)), Diamond²⁾ が指摘するようなセメントペースト領域に低密度な領域がパッチワークのように分布した構造を形成している. これより, 実際のモルタルにて見られる骨材周囲の点密度の低下は(図-3(c)), ランダムで一樣なセメント粒子初期配置から, 若材齢期に高水セメント比となる骨材周囲で微細なセメント粒子の水和反応が生じ, 消失した結果と考えられる. つまり, 実際のモルタル中の骨材近傍では, セメントの骨格構造が早期に形成された可能性を示す.

4. 結論

モルタル中のセメントペーストマトリックスにおいて, 未水和セメント粒子はランダムに分布し, 骨材の界面にて一樣に疎な粒子配置を形成してはいない.

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(課題番号 15K14013)の交付を受けた.

参考文献

- 1) 米山・五十嵐, コンクリート工学論文集, 19(2), 35-45, 2008.
- 2) Diamond, S. et al., Cem.Con.Com, 28(7), 606-612, 2006.