

コンクリート中のセメント粒子のランダム性の評価

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

コンクリート中の骨材 - セメントペースト界面には、骨材の壁効果によりセメント粒子が十分に充填されない多孔質な領域（遷移帯）が存在するとされる。しかし、実際のコンクリート中の遷移帯の存在は確認されているわけではなく、逆にそのような領域は存在しないとする主張も強くなされている¹⁾。粒子を対象とした初期の分布の問題であることを考慮すると、2次元ランダム場での理論が体系化されている点過程理論を、セメント粒子へ適用すれば、空間分布の定量的な評価が可能となると期待される。

本研究においては、点過程理論により評価されたコンクリート中の未水和セメント粒子の空間配置におけるランダム性を、骨材の壁効果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 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/cm^3 ，比表面積： $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、骨材には川砂（密度： 2.60g/cm^3 ）と川砂利（密度： 2.60g/cm^3 ， $G_{\text{MAX}}=25\text{mm}$ ）を用いた。目標空気量は $4.5\pm 1.5\%$ ，目標スランプは $15\pm 2\text{cm}$ とした。コンクリートの配合を表 - 1 に示す。JIS R 5201 に基づき、水セメント比 0.50 のセメントペーストおよびコンクリートの円柱供試体（直径 100mm ，高さ 200mm ）を作製した。供試体から材齢 24 時間にて薄片試料を切り出し、凍結真空乾燥装置を用いて水分を除去し、樹脂含浸を行った後、表面を注意深く研磨した。その後、蒸着処理を施し、反射電子像観察試料を得た。

表 - 1 コンクリート示方配合

W/C	s/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	G (kg/m^3)	S (kg/m^3)	AE減水剤 (cc/m^3)	AE助剤 (cc/m^3)	Air (%)	Slump (cm)
0.5	41.9	175	350	1011	729	3500	1400	4.5 ± 1.5	15 ± 2

2.2 反射電子像取得および画像解析

観察倍率 200 倍にてセメントペーストおよびコンクリート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 $0.55\mu\text{m}$ に相当する。これを無作為に 30 枚取得し、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および骨材の 2 値画像を得た。図 - 1 に画像解析によるセメント粒子重心点画像の取得例を示す。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点の個数を領域面積で除すことで点密度 $\hat{\lambda}$ を算出した。

2.3 間引き過程としての解析方法

(1) セメントペースト相の特性化

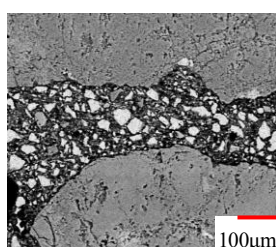
コンクリート中のセメントペースト領域をランダム領域と考え、その分布を 2 点相関関数 $S(r)$ により特性化した。ペースト領域を P ，距離 r 離れた 2 点を $\mathbf{x}_1$ ， $\mathbf{x}_2$ とするとき、 $S(r) = Pr\{\mathbf{x}_1 \in P, \mathbf{x}_2 \in P\}$ (1) と定義される。ここに、 $r = |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2|$ である。

(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 $\{X: \mathbf{x}_i = 1, \dots, n\}$ とし、K 関数を式 (2) より計算した。

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

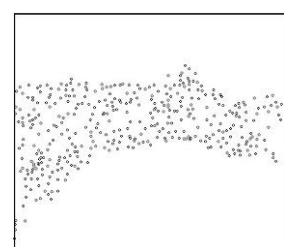
ここに、 $1(\cdot)$ は () 内が真であれば 1，偽であれば 0 を与える指示関数であり、 $s(x)$ はエッジ補正係数である。



(a)反射電子像



(b)セメント粒子 2 値画像



(c)重心点位置画像

図 - 1 反射電子像の画像解析例

(3) セメントペーストから間引かれた過程での K 関数

セメントペースト供試体の未水和セメント粒子の分布を点過程 X_b とし、その K 関数 K_b を求めた。また、コンクリート中のセメントペースト領域をPとし、領域Pにおける未水和セメント粒子の分布を点過程 X_p とした。ここで、点過程 X_p を元となる点過程 X_b より骨材位置にある点が間引かれ、ランダム領域であるPにある点が生き残った結果と定義すると、 $X_p = X_b \cap P$ と表される。このとき、生き残った点過程 X_p の K 関数 K_p は、セメントペースト領域Pの2点相関関数および面積率 p と、K 関数 K_b を用いて式(3)により求められる。

$$K_p(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r S(x) dK_b(x) \quad (3)$$

2.4 遷移帯を含まない領域での間引き過程

コンクリート供試体において骨材から厚さ $20\mu\text{m}$ および $50\mu\text{m}$ の範囲を遷移帯と仮定し、ペーストマトリックス領域を遷移帯領域分だけ縮退させた。この縮退領域内における未水和セメント粒子の K 関数および点密度をそれぞれ算出し、(3)と同様にセメントペースト供試体の未水和セメント粒子の点過程 X_b を用いて間引かれた過程としての K 関数を求めた。

3. 結果および考察

図-2 にセメントペースト供試体におけるセメント粒子の K 関数 K_b を示す。 K_b は完全なランダム分布であるポアソン分布の K 関数と完全に一致している。

図-3 にセメントペーストからの間引き過程として再現したコンクリート中の未水和セメント粒子の K 関数 K_p を実際の分布の K 関数 K_r と比較して示す。セメント粒子の分散領域が骨材により制限されるため、セメント粒子はランダム分布よりも大きな関数値を示し、凝集した配置にある。遷移帯の厚さ程度の数 $10\mu\text{m}$ の距離範囲においては、実際の分布と間引き過程は完全に一致している。距離 $100\mu\text{m}$ を超えると、実際のコンクリート中のセメント粒子の凝集性は緩和され、よりランダムな粒子配置を示している。

表-2 にコンクリート中のペーストマトリックスにおけるセメント粒子の点密度を示す。遷移帯として仮定した厚さ相当を縮退させてもセメント粒子の点密度に有意な差は認められない。

図-4 に遷移帯仮定領域を縮退させたペーストマトリックス領域におけるコンクリート中の未水和セメント粒子の K 関数 K_r および間引き過程での K 関数 K_p を

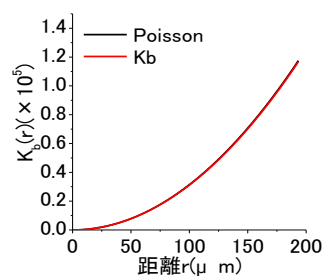
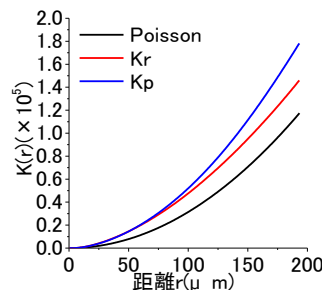


図-2 セメントペーストのセメント粒子の K 関数



(a) $20\mu\text{m}$ 縮退領域

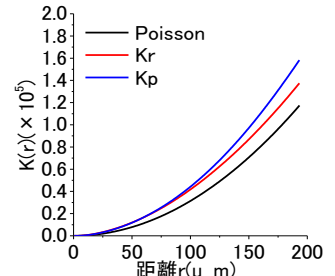
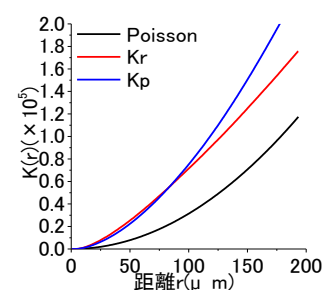


図-4 間引かれた過程としての K 関数



(b) $50\mu\text{m}$ 縮退領域

図-4 遷移帯を仮定した間引かれた過程としての K 関数

表-2 ペーストマトリックスにおけるセメント粒子点密度

	点密度(個/ μm^2)
ペースト領域全体	0.0042
遷移帯仮定 $20\mu\text{m}$ 縮退領域	0.0042
遷移帯仮定 $50\mu\text{m}$ 縮退領域	0.0041

示す。縮退領域のペーストマトリックスにおいても、実際のコンクリート中のセメント粒子の分布は間引き過程よりも凝集性の小さい分布を示し、また距離の小さい範囲において両者は一致している。すなわち、実コンクリート中のセメント粒子の分布は、ランダム過程からランダムに点を間引いた過程として再現され、遷移帯相当領域の有無にかかわらず、粒子の分布に特徴的な差異は存在しないと考えられる。

4. 結論

コンクリート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ており、骨材界面にて排他的な分布を示すような特徴は存在しない。

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 15K14013:五十嵐心一)の交付を受けた。

参考文献

- 1) Diamond, S.: Concrete Porosity Revisited, Materials Science of Concrete Special Volume, The Sidney Diamond Symposium, pp.3-23, 1998.