

骨材界面におけるセメント粒子分布の点過程シミュレーション

金沢大学大学院 学生会員 ○吉川 峻生
金沢大学大学院 学生会員 内藤 大輔
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

コンクリートやモルタル中の骨材界面近傍には、一般的には骨材の壁効果によって遷移帯が存在すると考えられている。一方、Diamond¹⁾は、コンクリート中のセメントペースト相を骨材表面から 10μm 間隔の帯状領域に区切り各領域における空隙率を求め、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主張している。遷移帯は未水和セメント粒子の初期の充填不足に起因した領域である。このような、空間内での対象物の分布を評価する手段として点過程による取り扱いが挙げられ、これを用いれば界面領域の充填状況を定量的に評価できると考えられる。

本研究においては、空間点過程としてのコンクリート中のセメント粒子の分散の特徴を、完全ポアソン過程の分布と比較し、骨材の壁効果の影響を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/cm³, 比表面積:3310cm²/g)を使用し、骨材には川砂(密度:2.60g/cm³)と川砂利(密度:2.60g/cm³, G_{MAX}=25mm)を用いた。JIS R 5201に基づき、水セメント比 0.50 のコンクリートの円柱供試体(直径 100mm, 高さ 200mm)を作製した。配合を表 - 1 に示す。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。

2. 2 反射電子像取得および画像解析

観察倍率 200 倍にてコンクリートの反射電子像を取得した(図 - 1(a))。1 画像是 1148×1000 画素からなり、1 画素は約 0.55μm 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、セメント粒子および骨材の 2 値画像を得た。このとき、画像

表 - 1 コンクリートの配合

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

解析ソフトウェアによりセメント粒子の点密度λおよび重心点座標を算出し、それぞれの位置ベクトルx_iを点過程X_r={x_i; i=1, ..., n}とした(図 - 1(b))。

2. 3 セメント粒子の分散性評価

コンクリートのセメント粒子の分散性を評価するため、点過程X_rに対して、式(1)より L 関数を求めた。

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

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り、s(x)はエッジ補正係数である。

2. 4 シミュレーションによる分散性評価

抽出したコンクリート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、シミュレーションにより実際のコンクリート中の未水和セメント粒子とペーストマトリックス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た。発生さ

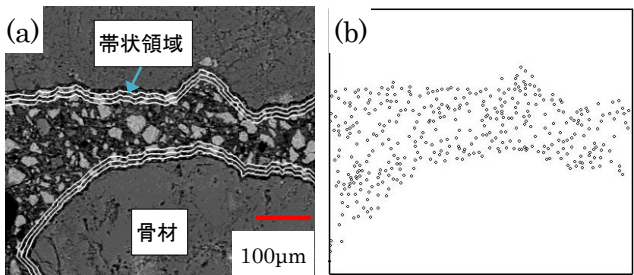


図 - 1 反射電子像における画像解析例
(a) 反射電子像 (b) 未水和セメントの点過程

表 - 2 帯状領域における未水和セメント粒子の点密度

骨材表面からの距離 (μ m)	10	20	30	40	50
点密度(個/μ m ²)	0.0032	0.0052	0.0045	0.0042	0.0040
変動係数(%)	17.6	10.8	11.7	14.2	15.1

キーワード 遷移帯, 壁効果, 未水和セメント, 点過程シミュレーション, 画像解析

連絡先 〒920-1192 石川県金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 TEL076-264-6373

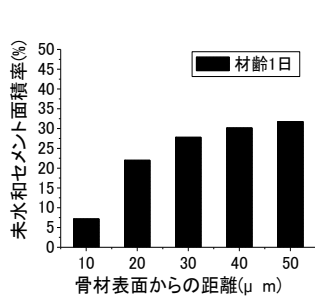


図 - 2 帯状領域における
未水和セメント粒子面積率

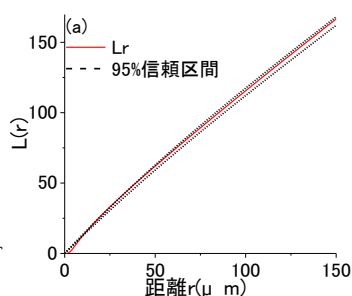
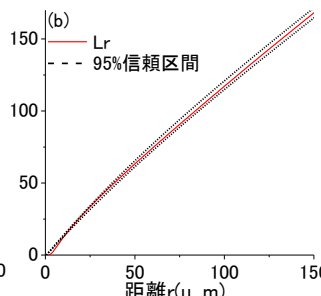
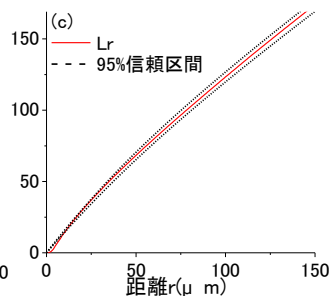


図 - 3 セメントペースト領域全体および縮退領域における L 関数 95%信頼区間

(a) ペースト領域全体



(b) 10 μm 縮退後の領域



(c) 20 μm 縮退後の領域

せた点をコンクリート中のシミュレーションによるセメント粒子の点過程 X_S とみなし、L 関数の 95%信頼区間を算出した。

2. 5 骨材界面領域におけるセメント粒子分布評価

図 - 1(a)のように、コンクリート中のセメントペーストマトリックスを骨材表面から幅 10μm の帯状領域に区切り、各領域における未水和セメント粒子の点密度 λ および面積率 p を求めた。また、骨材界面から厚さ 20μm までの範囲を遷移帯領域と仮定し、セメントペーストマトリックス領域を遷移帯相当分だけ 10μm ずつ縮退させた。この実際のコンクリート画像から縮退させた各領域内における未水和セメント粒子の L 関数 L_r を求め、さらに、シミュレーションにより L 関数の 95%信頼区間を算出した。

3. 結果および考察

表 - 2 に骨材表面から 10μm 間隔の各帯状領域における未水和セメント粒子の点密度を示す。点密度は、骨材粒子表面から距離 10μm の領域にて最小となるが、変動係数の値は最大であり、統計的にばらつきの生じやすい領域であると推察される。距離 20μm の領域にて最大値を示し、距離 30μm 以降の領域においては点密度に大きな変動は認められない。

図 - 2 に骨材表面から 10μm 間隔の帯状領域における未水和セメント粒子の面積率を示す。骨材粒子の表面近傍ほど未水和セメントの面積率は小さく、点密度に比べてもその差は大きい。界面からの距離の増大にともない未水和セメント粒子面積率は増大していき、距離 30μm 以上になると、点密度と同様に面積率の変化は小さくなることから、30μm 以降の範囲はバルクセメントペースト領域であると判断される。セメント粒子の平均径が 10~20μm 程度であることを考慮すると、表 - 2 および図 - 2 からはセメント粒子径程度の幅を持った遷移帯が存在するように見える²⁾。

図 - 3 はセメントペースト領域全体および遷移帯としてセメントペーストを 10μm、および 20μm の幅で縮退させコンクリート中の未水和セメント粒子の L 関数 L_r を、シミュレーションにより同じ点密度で同じ範囲にセメント粒子点を発生させたときの L 関数の 95%信頼区間と合わせて示したものである。セメントペーストマトリックス全体を対象とした場合もセメントペーストマトリックスを局所的に縮退させた場合も、セメント粒子の L 関数は 95%信頼区間内に入っている。すなわち、初期の粒子充填という観点からみれば、実コンクリートにて認められた界面における低いセメント粒子充填率は、想定される変動の範囲内ということになる。したがって、面積率が小さくても、必ずしも遷移帯の存在を示すとは限らないと判断される。つまり、骨材粒子近傍のセメントペーストマトリックスにおいて、骨材は壁効果により未水和セメント粒子の分散に局所的な影響を生じさせているように見えるが、界面付近における未水和セメント粒子の分布の特異性は、実際にはランダムな粒子配置の変動内であると考えられる。

4. 結論

骨材粒子の近傍ではセメント粒子充填の不均質性はバルクセメントペーストに比べて大きくなるが、統計的性質の強いものであり、点過程統計量による評価においては、粒子のランダム分布の範囲内にとどまる。

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.
- 2) Scrivener, K. et al.: Interface Science Vol.12, pp.411-421, 2004