

## モルタル中の骨材が気泡の空間分布のランダム性に与える影響

金沢大学院 学生会員 ○室谷 卓実  
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

## 1. 序論

気泡はコンクリートのフレッシュ特性、強度や物質透過性および凍結融解抵抗性など様々な物性に関わる重要な構成相のひとつである。よって、この構造を評価することは、コンクリートの物性を理解するうえで非常に重要である。気泡の空間構造を定量的に評価することに関しては、画像解析技術の発展とともに、少なからず検討されてきた。しかし、その多くが気泡間隔係数や耐久性指数に関連付けることを意図しており、気泡の空間構造自身に着目した研究例は少ないようである。

本研究においては、骨材の存在するモルタル中の気泡の空間構造を定量的に評価することを目的とする。特に、点過程理論における間引き処理を適用することによって、骨材の存在が気泡の空間分布に制限を与える効果を、ランダム特性の変化の観点から考察する。

## 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（密度  $3.15\text{g/cm}^3$ 、比表面積  $3310\text{cm}^2/\text{g}$ ）を使用し、骨材には川砂（密度： $2.60\text{g/cm}^3$ 、吸水率： $2.03\text{g/cm}^3$ ）を用い、水セメント比  $0.40$  のセメントペーストおよびモルタルを作製した。モルタルはセメント：砂= $1:2$ とし、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  $0.45\%$  使用した。また、混和剤にはリグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤および、アルキルエーテル系陰イオン活性剤を主成分とする AE 剤（以下 AE 助剤と称す）を用い、使用量を変化させることによって空気量を変化させた。JIS R 5201 に準じてセメントペーストおよびモルタルを練り混ぜ、小型エアメーターを用いて空気量を測定した。その後、 $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$  の角柱供試体を作製した。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生 ( $20^\circ\text{C}$ ) を行った。作製した試験体の名称、混和剤およびフレッシュ時の情報を表-1 に示す。

## 2.2 試料作製および画像取得

キーワード 気泡, 点過程統計量, 画像解析, 間引き過程,

連絡先

〒920-1192 金沢大学院自然科学研究科環境デザイン学専攻 TEL076-264-6373

表-1 各試験体名、混和剤およびフレッシュ時の情報

	高性能 名称	減水剤量 (C × %)	AE減水剤量 (C × %)	AE剤量 (C × %)	フロー値	空気量 (%)
セメント ペースト	C-Ref	-	-	-	195	1.0
	C-AE①	-	0.25	-	222	4.9
	C-AE②	-	0.25	0.01	228	6.0
モルタル	M-Ref	-	-	-	202	5.7
	M-AE①	0.45	-	0.02	217	8.6
	M-AE②	-	-	0.06	218	11

養生終了後、供試体から厚さ  $10\text{mm}$  程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。研磨終了後、スキャナを用いて等倍率の断面画像を  $10$  枚取得した。このときの解像度は  $1200\text{dpi}$  であり、 $1$  画素は  $21.2\mu\text{m}$  に相当する。なお、断面中央の  $30\text{mm}\times 30\text{mm}$  を観察領域 ( $W$ ) とした。試料断面に対して  $1\%$  フェノールフタレイン溶液噴霧による呈色を行い、セメントペーストの画像抽出が容易になるようにした。また、気泡を抽出するために同試料断面を黒色インクで塗り潰し、乾燥後に白色粉末（炭酸カルシウム微粉末、粒径範囲  $12\sim 13\mu\text{m}$ ）を気泡に充填し、画像を取得した。取得したそれぞれの画像の重ね合わせを行い、画像間の差分から骨材粒子を抽出した。

## 2.3 画像解析

画像解析ソフトウェアを用いて、2.2 にて抽出したセメントペーストマトリックス相および気泡の 2 値画像を取得し、以下の解析を行った。

## 2.4 間引き過程としての解析方法

## (1) セメントペーストマトリックス領域の特性化

モルタル中のセメントペーストマトリックス相をランダム場として取扱い、その共分散 (2 点相関関数) から、2 次元断面内での領域の分布特性を評価した。共分散  $C(r)$  とは、距離  $r$  離れた 2 点が同一相上に載る確率関数である。セメントペーストマトリックス相を  $P$  とし、2 点を  $\mathbf{u}$ ,  $\mathbf{u} + \mathbf{r}$  とすると、共分散  $C(r)$  は式 [1] のように定義される。

$$C(r) = Pr(\mathbf{u} \in P, \mathbf{u} + \mathbf{r} \in P) \quad [1]$$

## (2) 点密度

2.3 にて得た気泡の 2 値画像に対して、個々の気泡の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル  $\mathbf{x}_i$  とみなし

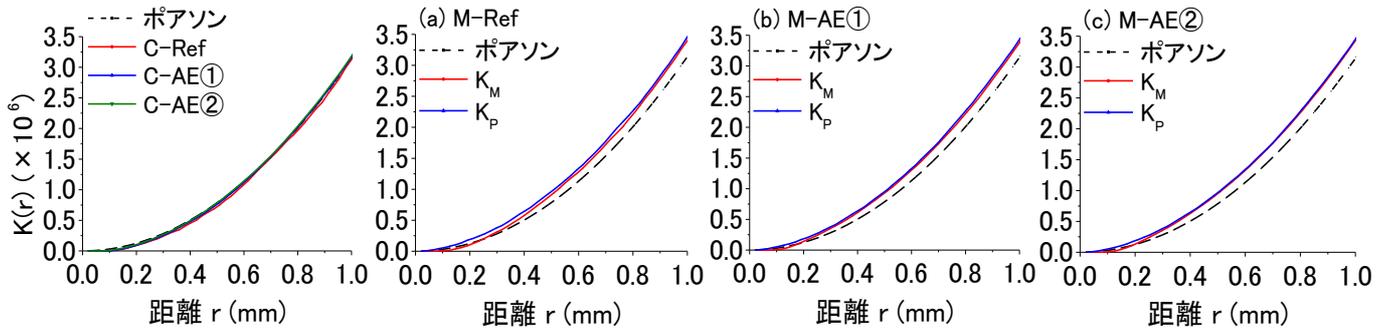


図-1 セメントペースト中の

図-2 モルタル中の気泡の K 関数

気泡の K 関数

$K_M$ : 実際のモルタル中の気泡の K 関数  $K_P$ : 間引き過程の K 関数

て点過程  $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$  とした. また, 観察領域  $W$  に分散している点  $x_i \in X$  に関して, 領域内にある点の個数  $N_p(W)$  を領域面積  $A(W)$  で除して点密度  $\hat{\lambda}_p$  を求めた.

相当する点過程をシミュレーションによってランダムに発生させることで基本点過程  $\Phi_b$  とし, その K 関数  $K_b$  を求めた.

(3) K 関数

図-2 に実際のモルタル中の気泡の K 関数  $K_M$  および基本点過程  $\Phi_b$  の間引き処理にて求めた K 関数  $K_P$  を示す. いずれもポアソン分布よりも大きい関数値を示しており, モルタル中の気泡は凝集側に分布している. これは, 骨材の存在により気泡の分布が制限されたためである. また, 距離の短い範囲にて, ランダム分布よりも関数値が低い値を示す範囲が認められる. これは, 気泡そのものが大きさをもつためであり, その範囲は径の大きいエントラップトエアのみが存在する M-Ref において一番大きくなっている.

K 関数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反映する. 点密度  $\hat{\lambda}_p$  で正規化されているため, 点の個数に関わらず凝集性の有無を判定することができる. K 関数は式 [2] で定義される.

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

ここに,  $s(x)$  はエッジ補正係数である.

(4) 間引き過程の K 関数

また, 関数  $K_P$  と実際のモルタル中の気泡の関数  $K_M$  はほぼ一致しており, 骨材は対応するセメントペースト中の基本過程  $\Phi_b$  に対して, 気泡のランダム間引き以上の影響を与えないと判断される. 換言すれば, モルタル中の気泡は骨材が存在しても, 気泡が存在できるセメントペーストマトリックス中ではランダムに分布しているといえる. このことは, 点過程として考えた場合, 気泡粒子間に相互作用は全くなく, モルタル中の気泡の分布は対応するセメントペーストマトリックス中の気泡の点過程の間引き処理によってその空間構造が再現可能であることを示している.

セメントペースト中の気泡の分布を点過程  $\Phi_b$  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マトリックス相を領域  $P$  とし, そのマトリックス中の気泡の分布を点過程  $\Phi_p$  とする. このとき, 基本とする点過程  $\Phi_b$  のうち骨材位置にある点が間引かれ, セメントペーストマトリックス相にある点が生き残った結果が  $\Phi_p$  であるならば,  $\Phi_p = \Phi_b \cap P$  と表される. このとき, 間引き後に残った点過程  $\Phi_p$  の K 関数  $\hat{K}_p(r)$  はセメントペーストマトリックス相の共分散  $C(r)$  を用いて式 [3] により求められる.

$$\hat{K}_p(r) = \frac{1}{p^2} \int_0^r C(x) d\hat{K}_b(x) \quad [3]$$

ここに,  $p$  はセメントペーストマトリックス相の面積率である.

4. 結論

3. 結果および考察

モルタル中の気泡は骨材の存在により凝集側の分布を示すが, 骨材はランダムな間引き以上の影響を与えず, セメントペーストマトリックス中ではランダムな分布を示すことが定量的に示された.

図-1 にセメントペースト中の気泡の K 関数を示す. いずれもポアソン分布と一致しており, 気泡はランダムに分布していると判断される. そこで, 本研究では (2) にて求めたモルタル中の気泡の点密度とセメントペーストマトリックスの面積率から, モルタル中のセメントペーストマトリックスにおける気泡の点密度を算出し, これに

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C), 課題番号: 24560564) の交付を受けたものである. ここに記して謝意を表す.