

コンクリート中の気泡の空間分布の定量評価に関する研究

大成建設(株) 正会員 ○室谷 卓実
金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

耐凍害性評価の指標である気泡間隔係数は気泡観察によって求められ、多大な労力を要した測定も現在では高価な機器や専門のソフトウェアがあれば簡便に求めることが可能となっている。しかし、気泡間隔係数は同一寸法の気泡が規則的な立方体格子点に配置された状態を仮定しており、実際の気泡分布の距離のパラメーターではない。そのため、気泡間隔係数だけではなく実際のコンクリート中の気泡分布の特徴を評価することも耐凍害性評価において重要な意義を有すると考えられる。現在では対象物の空間分布を定量評価できる点過程統計量の計算やグラフ化を簡便に行えるパッケージ¹⁾が統計解析ソフト「R」にて提供されており、これを用いれば高度な計算を要する点過程統計量も簡単に求めることができる。

本研究においては、点過程統計量とシミュレーションを用いてコンクリート中の気泡の空間分布を明らかにすることを目的とする。また、実際の分布から得られる距離に関する特性値と気泡間隔係数の関連付けを試みる。

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、川砂利（最大骨材寸法：25mm）、川砂を材料として使用した。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を用いた。水セメント比は 0.55 とした。示方配合と得られた空気量を表-1 に示す。100mm×100mm×400mm の型枠に打ち込み、その 24 時間後に脱型し、材齢 7 日まで水中養生を行った。

2.2 試料作製および画像取得

養生終了後、供試体から厚さ 15mm 程度の板状試料を切り出し、切断面の研磨を行った。その後、スキャナを用いて断面画像を 10 枚取得した。観察領域は断面中央の 60mm×60mm とした。その後、セメントペースト相をフェノール呈色した画像を取得した。また、黒色インクで塗り潰し、白色粉末を気泡に充填した画像を取得した。

2.3 画像解析による評価

取得した画像を重ね合わせ、画像間の差分から骨材お

表-1 示方配合と得られた空気量

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	(kg/m ³)				(C×%)		測定結果 空気量 (%)
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤	
C2-①				2.0±0.5			1045	785		-	1.7
C2-②	55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	0.25	0.002	4.0
C2-③				9.0±0.5			941	707		0.010	9.0

よび気泡の 2 値画像を取得した。気泡の 2 値画像から ASTM C 457 の定義に基づく気泡間隔係数を求めた。また、気泡の重心点座標を求め、点過程とした。さらに、観察領域中の点に関して、単位面積あたりの点の個数である点密度 λ を求めた。取得した気泡の重心点座標データを「R」に読み込み、パッケージ「spatstat」を使用して分布のランダム性に関する統計量²⁾ (L 関数) と点間距離に関する統計量²⁾ (最近傍距離関数) を計算した。また、最近傍距離関数における累積確率 50% のときの距離をメディアン距離 R_{50} と称し、これを気泡間距離に関する特性値とした。

2.4 骨材領域外への点発生シミュレーション

骨材データを「R」に読み込み、骨材以外の領域に点密度 λ から決まる点数をランダムに発生させ、L 関数および最近傍距離関数を計算するシミュレーションを各骨材画像に対して 20 回ずつ (計 200 回) 繰り返し、平均値を求めた。この平均値と実際の関数値を比較することで、コンクリート中の気泡の空間分布の再現性を考察した。

3. 結果および考察

図-1 に空気量と点密度の関係を示す。両者には直線近似可能な正の相関関係がみられる。これより、点過程統計量におけるパラメーターである点密度が空気量と同様に気泡パラメーターになり得ると考えられる。換言すると、フレッシュ時の空気量から硬化後にコンクリート中に存在する気泡個数を予想することができるといえる。

図-2 に実際のコンクリート中の気泡の L 関数 L_C とシミュレーションによって再現した L 関数 L_R を示す。いずれも完全ランダム分布のときの関数値よりも大きな値を示し、観察領域全体で見ると気泡は凝集分布であると判定される。これは、骨材によって気泡の存在可能な領域が制限されたためである。また、関数値 L_R は 100 μ m 程度

キーワード 気泡, 点過程統計量, 画像解析, メディアン距離, R, シミュレーション

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 TEL:076-264-6373

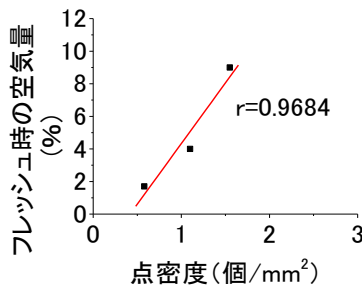


図-1 空気量と気泡点密度の関係

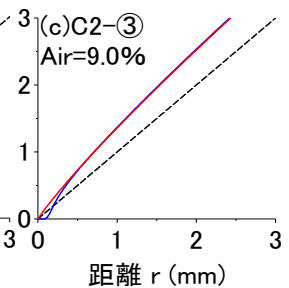
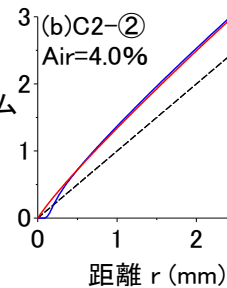
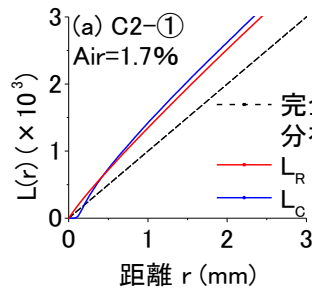


図-2 コンクリート中の気泡のL関数

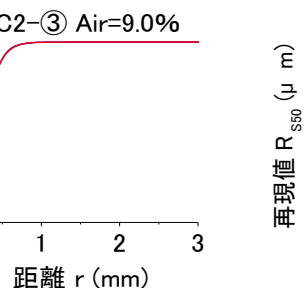
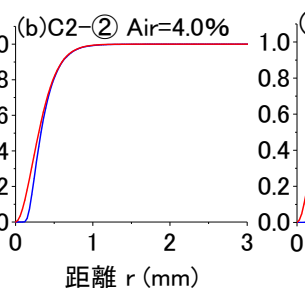
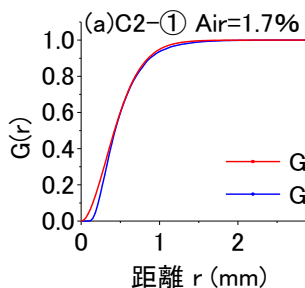


図-3 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数

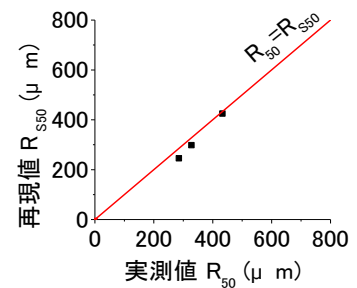
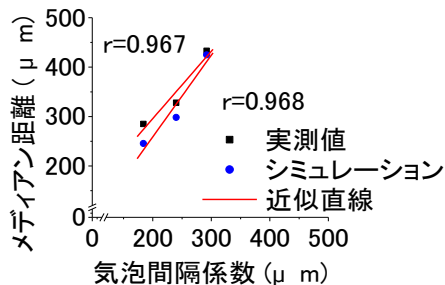
図-4 R_{s50} と R_{50} の関係

図-5 メディアン距離と気泡間隔係数の関係

の短距離範囲において実際の関数 L_G を上回る。これは、大きさを持たない点を配置することによって分布を再現しているため、実際の分布よりもより近距離にて他点が配置される場合があるためである。この範囲を越えると両関数値はほぼ一致し、点密度が増えると両関数値の差は小さくなる。これより、コンクリート中の気泡分布は単純に骨材以外のセメントペーストマトリックス領域に、点をランダムに発生させることで再現可能であると考えられる。換言すると、コンクリート中の気泡は観察領域全体で見ると凝集分布であるが、セメントペーストマトリックス領域ではランダムに分布しているといえる。

図-3 に実際の気泡の最近傍距離関数 G_G と再現した最近傍距離関数 G_R を示す。いずれも点密度が増えると最近傍距離関数の勾配が大きくなり、点間距離が短くなっている。また、 L 関数とは異なり点密度が増えると両関数値の差が見られるようになり、点間距離に関しては点密度が増えると気泡径の影響が大きくなるようである。

図-4 にシミュレーションによって再現したメディアン距離 R_{s50} と、実際のメディアン距離 R_{50} の関係を示す。両者の値には気泡径の影響による若干の差がみられるが、高々数 $10\mu\text{m}$ 程度でありその差は小さい。これより、シミュレーションによって気泡の空間分布だけではなく気泡間の距離特性も再現可能であると考えられる。

ユレーションによって気泡の空間分布だけではなく気泡間の距離特性も再現可能であると考えられる。

図-5 に点過程としての実際の気泡分布とシミュレーションにより再現した分布から求めたメディアン距離を従来耐凍害性の判定に用いられてきた気泡間隔係数に対してプロットした結果を示す。いずれのメディアン距離も気泡間隔係数とは直線で近似できる良好な相関関係が見られる。これより、空気量に対応した点数をランダムに発生させた点過程シミュレーションによって気泡間隔係数を事前に推定することも可能であると考えられる。

本研究ではスキャナ画像から抽出した気泡の2値画像から、「R」を用いて点過程統計量を求めている。この簡便な手順で得られるメディアン距離が気泡間隔係数の代わりになりうるならば、従来法に代わる安価で簡便な耐凍害性評価手法になりうると期待される。

4. 結論

コンクリート中の気泡は骨材の影響で凝集分布を示すが、空間分布と距離特性はセメントペーストマトリックス領域中ではランダムに分布しており、シミュレーションによって再現できることが確認された。メディアン距離と気泡間隔係数には良好な相関関数があり、気泡間隔係数を事前に推定できると期待される。

参考文献

- 1) A. Baddeley and R. Turner : spatstat : An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns, Journal of Statistical Software, Vol.12, Issue6, 2005
- 2) D. Stoyan et al : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, JOHN WILEY & SONS, 1995