

骨材の存在がコンクリート中の気泡の分布に与える影響

金沢大学大学院 学生会員 ○室谷 卓実

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

耐凍害性を評価するうえでコンクリート中の気泡分布構造の評価は重要である。しかし、例えば気泡間隔係数の計算においては、気泡分布が規則的な配置であることを仮定しており、実際の気泡分布の距離のパラメーターではない。また、骨材が多く体積率を占めるコンクリート中において、気泡の存在可能な領域が制限されているという条件を考慮したうえで、その分布の特徴を評価した例はきわめて少ない。

本研究においては、点過程統計量を用いてコンクリート中の気泡の空間分布を定量的に評価することを目的とする。また、骨材が気泡の分布に与える影響をランダム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 g/cm³, 比表面積:3310cm²/g)を使用し、骨材には川砂(密度:2.60 g/cm³, 吸水率:2.05%)および川砂利(密度:2.60 g/cm³, 吸水率:1.81%, G_{max}:25mm)を用いた。混和剤には AE 減水剤および AE 剤をそれぞれ希釈して用いた。作製したコンクリートの示方配合を表-1に示す。本研究では AE 剤量を調整し、計3種類の空気量の異なるコンクリートを作製した。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ、100mm×100mm×400mm の型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し、材齢 7 日まで水中養生(20℃)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。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 847dpi であり、1 画素は約 30μm に相当する。なお、断面中央の 60mm×60mm を観察領域

表-1 コンクリートの示方配合

W/C	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				単位量 (cc/m ³)	
				W	C	G	S	AE 減水剤	AE 助剤
			2.5±0.5			1033	686		438
40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	4380	876
			7.0±0.5			963	639		5256

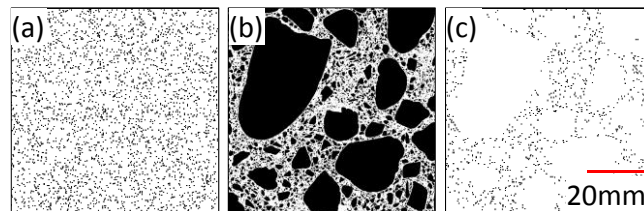


図-1 画像重ね合わせによる間引きの手順例

(a) 点過程 X_b (b) 骨材粒子 (c) 残った点過程 X_p 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 12~13μm)を気泡に充填し、白黒画像を取得した。

2.3 画像解析による評価

画像解析ソフトウェアを用いて、2.2 にて取得したそれぞれの画像を重ね合わせ、画像間の差分から骨材粒子の 2 値画像を得た。また、白黒画像に対しグレースケールに基づく 2 値化処理を行い、気泡の 2 値画像を得た。また 2 値化の際に、1 画素程度の孤立点はノイズとみなしこれを除去した。取得した気泡の 2 値画像から気泡面積率を算出し、ステレオロジーの考えに基づきこれを気泡体積率とした。また、気泡の重心点位置座標を求め、これを位置ベクトル x_i とみなして点過程 $X_c = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。また、観察領域 W 中の点の個数 $N(W)$ を観察領域面積 $A(W)$ で除してコンクリート中の気泡の点密度 λ_c を求めた。

(1) 画像間の間引きによる気泡分布の再現

画像解析により求めた点密度 λ_c とセメントペーストマトリックスの面積率 P からコンクリート中のセメントペーストマトリックスに対する気泡の点密度 λ_b ($=\lambda_c/P$) を算出した。算出した点密度 λ_b に相当するランダムな点過程 X_b (図-1 (a)) をシミュレーションによっ

表-2 得られた気泡特性

名称	フレッシュ時の空気量 (%)	硬化後の気泡体積率 (%)	点密度 (個/mm ²)	平均気泡径 (μm)
C-①	2.8	2.0	1.00	124
C-②	5.0	3.1	1.36	131
C-③	7.4	5.3	2.33	133

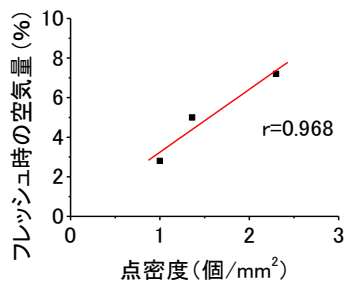


図-2 空気量と点密度の相関関係

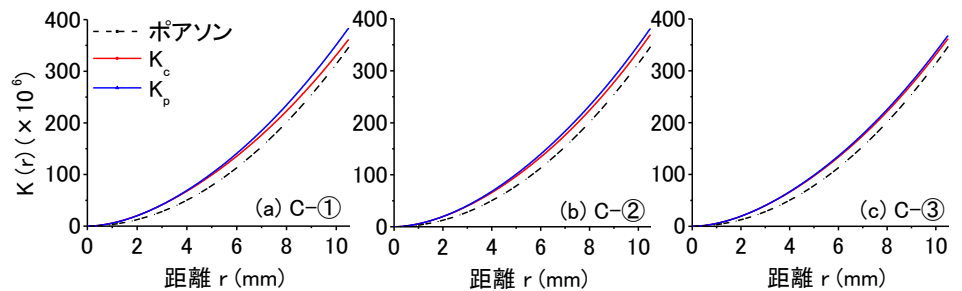


図-3 コンクリート中の気泡の K 関数 (K_c : 実際の分布, K_p : 再現した分布)

て発生させた。その点過程 X_b と画像解析によって取得した骨材の2値画像(図-1(b))を重ね合わせ、骨材と重なった点を除去し、残った点過程 X_p (図-1(c))をランダムな点過程 X_b から間引きによって得られるコンクリート中の仮想的な気泡の分布とした。図-1に画像の重ね合わせによる間引き処理の手順例を示す。なお、間引きの際に基本となる点過程 X_b に相当するセメントペースト中の気泡がランダムに分布していることを事前に確認している¹⁾。この間引き処理を10回繰り返し、K関数を求めた。

(2) K関数

実際のコンクリート中の気泡の点過程 X_c および再現した点過程 X_p に対してK関数を式[1]から求め、分布のランダム性および骨材が気泡の分布に与える影響を評価した。

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

式中の $1(\quad)$ は $(\quad)$ 内が真であれば1を与え、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. 結果および考察

表-2に画像解析によって得られた気泡特性を示す。硬化後の気泡体積率がフレッシュ時の空気量よりも小さく、打ち込みから硬化までの間に空気が失われていることが考えられる。また、平均気泡径は同程度であるが、空気量の増加にともない点密度も増加している。

図-2に空気量と点密度の関係を示す。空気量と点密度の間には直線で近似できる非常に良好な相関がみられる。ステレオロジーの考えに基づくならば、2次元断面内における対象粒子の個数情報と3次元空間内の対象粒子の体積率を直接関連付けることは本来できない。しかし、図-2のような相関関係がみられることから、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の個数をおおよそ予想することができるといえる。

図-3に実際のコンクリート中の気泡のK関数 K_c および間引き処理によって再現された気泡のK関数 K_p を示す。いずれもポアソン分布よりも明らかに大きな関数値を示していることから、コンクリート中の気泡は凝集性を有した分布であることがわかる。これは、体積率が60%以上を占める骨材により、気泡の存在できる領域が大幅に制限されたためである。また、実際のコンクリート中の気泡の分布 K_c と再現された分布 K_p を比較すると、いずれも距離の短い範囲(6mm程度)までは関数値が一致しており、骨材は気泡の分布をランダムに制限する以上の影響を与えていないと判断される。空気量が少ない系においては6mmを超えると関数値には差が見られるようになり、骨材が気泡の凝集を緩和する作用があると判断される。しかし、その緩和の程度は空気量が増えると小さくなる。これは、空気量および点個数が増加すると、ランダム性の観点からは分布の多様性もしくは変動が小さくなることを示している。以上より、空気量が十分であれば、骨材は気泡の存在領域をランダムに制限するだけで、気泡粒子そのもののランダム性への影響は小さいと判断される。換言すれば、コンクリート中の気泡の分布は、点をランダムに発生させた点過程 X_p から重ね合わせた画像中の骨材と重なった点を間引くことで、点過程として再現することができると考えられる。

4. 結論

フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の間には非常に良好な相関が存在する。また、空気量が十分あれば骨材は気泡の分布領域をランダムに制限する以上の影響を与えておらず、コンクリート中の気泡分布をシミュレーションにより再現することが可能である。

参考文献

- 1) 室谷卓実ほか：コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp493-498, 2015