

6. 博士論文：コンクリート中の気泡の空間構造の点過程としての評価に関する研究

Evaluation of Spatial Structure of Air Voids in Concrete by Point Process Statistics

古東 秀文*¹

□ 目的

コンクリートに耐凍害性が要求されるとき、一般的にはJIS A1128に規定される方法で空気量を測定し、空気量が4～6％程度の場合には、耐凍害性を有しているとみなす。しかし、耐凍害性は単純に空気量だけで決定されるわけではなく、気泡の分布、気泡間の距離、気泡の大きさおよび気泡の数等、気泡の空間分布構造とも密接に関わっている。凍害を発生した構造物との間に相関性が認められている気泡の空間構造のパラメータの一つに気泡間隔係数がある。気泡間隔係数は、1949年Powersにより提案された気泡間距離に関する特性値であり、セメントペースト内に存在する気泡構造に対し、同一寸法の気泡球体を同じ大きさの立方体格子に配置したとき、立方体の対角線の1/2の長さから気泡の半径を引いた距離として定義された距離である。この気泡間隔係数の測定方法はASTM C457に規定されているが、その測定には多大な労力を必要とし、日常的な検査方法として適切とはいえない。

本研究は、気泡構造の定量的な評価を行うために画像解析を行い、得られた幾何学的特徴を統計的に処理することにより、空間構造の特性値を得ることを目的としている。この空間構造を統計的に評価するにはいくつかの手法があるが、本研究ではコンクリートに含まれる気泡を点に置換し、点過程として空間分布構造の特性値を得ることとした。

□ 概要

本研究で用いた供試体は、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートである。代表としてコンクリートの配合を、表－1に示す。また、各供試体代表例として、気泡の分布画像を図－1に示す。

表-1 コンクリートの名称、示方配合および得られたフレッシュ特性

名 称	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空 気 量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				単 位 量 (cc/m ³)		測 定 結 果	
					W	C	G	S	AE 減 水 剤	AE 剤	スランブ (cm)	空 気 量 (%)
C1-①	0.40	39.9	15±2	2.5±0.5	175	438	1033	686	4380	438	13.0	2.8
C1-②				4.5±0.5			1002	665		876	17.0	5.0
C1-③				7.0±0.5			963	639		5256	16.0	7.2
C2-①	0.55	42.9	15±2	2.0±0.5	175	318	1045	785	3180	—	17.0	1.7
C2-②				4.5±0.5			1008	754		636	16.5	4.0
C2-③				9.0±0.5			941	707		3816	17.0	9.0

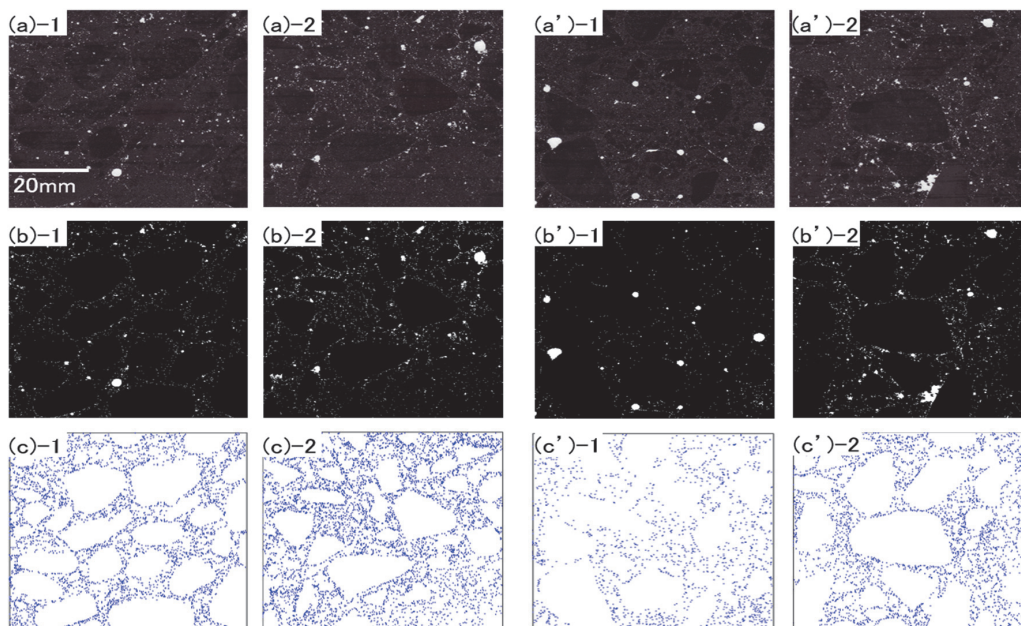


図-1 コンクリート中の気泡の画像解析の例（左から：C1-①、C1-②、C2-①、C2-②）

図－１の気泡分布より得られた画像から、気泡の重心点座標を求め、気泡をその重心点に置き換えた。画像内に存在する点の分布パターンや距離に関する特徴を点過程理論に基づき評価した。本研究にて用いた基本的な点過程統計量は最近傍距離関数である。最近傍距離関数は点過程の点から距離 r 離れた位置に最近傍点を見出す確率であり、その確率を累積で表したものである。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}$$

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) \quad (\text{ランダム分布のときの最近傍距離関数})$$

最近傍距離関数（G関数）から得られる距離に関する特性値としてメディアン距離 R_{50} がある。これは、気泡間隔の最近傍距離関数（G関数）から得られる距離に関する中央値であり、図－２に示すような関係となり、気泡の距離に関する指標の一つとなる。

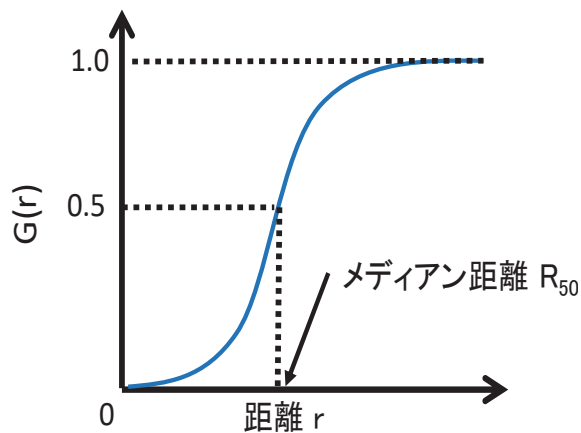


図-2 最近傍距離関数とメディアン距離の関係の模式図

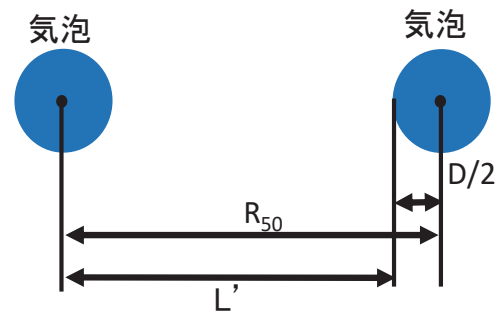


図-3 メディアン距離と気泡間距離特性の概念図

Powersにより提案された気泡間隔係数は、仮定された空間での気泡配置による気泡の距離に関する特性値であるが、実際の耐凍害性との間に相関性があることから、耐凍害性を評価するパラメーターとして用いられてきた。一方、実際の気泡を点過程とした場合に得られるメディアン距離（ R_{50} ）も距離に関する特性値であるため、両者の対応について検討を行った。メディアン距離から平均気泡径の1/2を差し引き、この値を気泡間隔特性値 L' として定義した。気泡間隔特性値 L' を式に示し、その概念を図－３に示す。

$$L' = R_{50} - D/2$$

ここに、 R_{50} ：メディアン距離、 D ：平均気泡径

上式から求められる気泡間隔特性値 L' と、従来まで用いられてきた気泡間隔係数 L を比較した場合、両者の間には、ほぼ同じ値が得られる相関性が認められた。

□ 結論

本研究では、気泡の定量評価に点過程理論を導入し、気泡の分布構造の特性および気泡の距離に関する特性値を取得した。その結果、気泡の空間分布構造が定量的に評価できるだけでなく、従来の気泡間隔係数も簡便に推定できることが明らかとなった。これらの方法は簡便なものであり、汎用性および実用性があると考えられる。

以下に主な結論を記載する。

- 気泡の点過程から得られるメディアン距離から平均気泡径の1/2を差し引いた気泡間隔特性値は、従来の気泡間隔係数との間に正の相関関係が認められ、両者の値がほぼ等しくなる結果が得られた。
- メディアン距離と気泡間隔係数が定義する立方体格子の間には幾何学的に相関性があり、その関係から従来の気泡間隔係数と同等の気泡間隔特性値を算出できる。