

点過程としての硬化コンクリート中の気泡の空間分布の評価と気泡間隔の簡便な推定法の提案

室谷 卓実¹・古東 秀文²・五十嵐 心一³

¹正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: t.murotani994@gmail.com

²正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: kotou-hidefumi@asanuma.co.jp

³正会員 金沢大学教授 理工学域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: igarashi@se.kanazawa-u.ac.jp

コンクリート中の気泡の分布を点過程とみなし、分布の特徴と距離特性の評価を行った。気泡量を変化させた種々の気泡系に対し最近傍距離関数から特性値を定義し、従来の気泡間隔係数との対応を検討した。その結果、気泡は見かけ上凝集性の分布を示すが、セメントペーストマトリックス内ではある程度の距離以上にてランダム分布と見なせ、シミュレーションにてその分布を再現できることを確認した。また、そのランダム分布の特性値は気泡間隔係数と同等の値を与え、その理由を気泡間隔係数が定義される3次元規則配置下での距離の同義性から説明した。また、点密度と配合から気泡間隔係数を簡便に推定できることを示した。空間点過程としての取り扱い、新たな気泡構造評価法もしくは気泡間隔係数推定の有用な手段になりうると考えられる。

Key Words: air void, point process, nearest neighbor distance, spacing factor, simulation

1. 序論

コンクリートは異なる相で構成される多相材料であり、その中で空気は体積割合で数%程度と構成する相の中で最も小さい。しかし、凍結融解抵抗性はもとよりワーカビリティや強度特性、さらには物質透過性にも影響を及ぼし¹⁾、フレッシュ時から硬化後の特性、耐久性とコンクリートの物性に継続して関わる重要な分散相である。多相材料における分散相の材料全体の物性への関わりは、その量と分布状況に左右されるが、コンクリートの耐凍害性付与機構を一義に考えた場合には、空気量よりも分布の方がより重要であるというのが一般的な認識である。硬化後の気泡のように、空間に離散的に分布した空間構造を評価するには複数の方法が考えられるが、基本的に耐凍害性機構に結び付けられる値によって評価するのが理解しやすい。よって、未凍結水の移動と氷晶形成をともなう劣化に対して、これを緩和するには適切な間隔で気泡が存在することが必要であるとの理解に基づき、気泡間の距離を反映した特性値である気泡間隔係数²⁾を用いて評価を行ってきた。しかし、気泡間隔係数は、約

60年以上前の観察技術と当時の知見を前提に導かれた特性値であり、その本質は仮想的な気泡空間構造の特徴量であって、係数と称されるように実際の気泡系にて実現されている距離を評価するものではない。

非透明な材料であるコンクリートにて、気泡の3次元構造を直接観察することは一般にはできない。よって、2次元断面に現れた気泡断面の分布の特徴から、対象が等方性で均質でランダムであることを前提とするモデルベースのステレオロジーの基本則に基づいて気泡の分布構造は評価される。このとき、空気量は1次のステレオロジーパラメーターとして、画像解析の一般的な手段を使うだけで比較的簡単に求めることができる。しかし、前述のように、より重要なパラメーターでありうる気泡間の距離は、3次元構造を観察して初めて求められるのであって、2次元断面に現れた気泡の断面分布から、気泡間距離を一意に決定することはできない。これを行うには、最低でも気泡形状と寸法に関する仮定が必要であり³⁾、例えば従来のASTM C457⁴⁾の気泡間隔係数の導出過程においても、それらの仮定がなされている。さらに、ASTM C457では気泡の空間配置に関する仮定も加えられ

表-1 セメントペーストおよびモルタルの配合

種類	名称	AE		高性能 減水剤 (C×%)	空気量 (%)	フロー	
		C:S	減水剤 (C×%)				AE 剤 (C×%)
セメント ペースト	CP/1	-	-	-	2.4	195	
	CP/2	-	0.10	-	3.4	213	
	CP/3	1:0	0.25	-	4.9	222	
	CP/4	-	0.50	-	6.4	249	
	CP/5	-	0.25	0.01	6.0	228	
	CP/6	-	0.25	0.02	8.5	227	
モルタル	M1/1	-	-	-	2.0	198	
	M1/2	1:1	-	0.06	0.10	5.5	197
	M1/3	-	-	0.10	-	7.2	198
	M2/1	-	-	-	-	5.7	202
	M2/2	1:2	-	0.002	0.45	8.6	217
	M2/3	-	-	0.006	-	11	218

ており、実際に観察された気泡系の特徴を、規則配置に置き換えたときの気泡表面から最遠部の距離が、気泡間隔係数として定義されている。すなわち、現在まで凍結融解抵抗性評価の重要なパラメーターとして用いられてきた気泡間隔係数は、ランダム性を前提とした手順により評価された値を用いながら、実際にランダム性を仮定していた気泡空間分布の特性値を評価してはいないことになる。

1980年代になると、画像解析手法が一般に普及しはじめ、現在では使用機器のみならずその画像データ処理法も大きく発展を遂げている。この普及により気泡計測の労力は著しく軽減され、またこれに対応してASTMC457も何度か改訂がなされてきている⁴⁾。しかし、画像解析システムが導入されていても、気泡構造評価が最終的に依拠する規準は依然としてASTM C457であることが多く、最終的に求めようとする値は空気量と気泡間隔係数である⁵⁾。気泡間隔係数が耐久性指数と関連付けられるために既往の研究、計測データとの対応を考えやすく、結果として、気泡間隔係数が長年の実績に基づく耐凍害性の判断において重要な役割を担ってきたことの表れであろう。しかし、近年の画像解析法の発展が、単に精細画像取得の容易化と普及だけでなく、同時に大量の空間データ解析やモデリング手法の発展をともしない^{6,7)}、空間統計量として様々な特性値が得られるようになっていく点にも注目すべきであると考えられる。例えば、ランダム性の評価だけでも、現在では様々な解析法が確立しており、従来、気泡に対して暗黙の裡に仮定されてきたランダム分布も、空間統計学に裏付けられた特性値として厳密に評価することも可能である^{7,8)}。すなわち1950年代では評価が困難であった空間分布も、現在では体系化された数学的取扱いの下に統計量として求めることができるので、ASTMC457のように実際の分布を仮想的な配置に置き換えて解釈せずとも、実際の気泡の空間分布のまま、本質的な特徴を直接評価できることになる。つまり、現在においてはより高度な解析が容易に実施できるようになっているので、仮想的な配置ではなく、コンクリー

表-2 コンクリートの配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	(kg/m ³)				(C×%)	
					W	C	G	S	AE 減水剤	AE 剤
C1/1	-	-	-	2.5±0.5	-	-	1033	686	-	0.001
C1/2	40	39.9	15±2	4.5±0.5	175	438	1002	665	0.25	0.002
C1/3	-	-	-	7.0±0.5	-	-	963	639	-	0.012
C2/1	-	-	-	2.0±0.5	-	-	1045	785	-	-
C2/2	55	42.9	15±2	4.5±0.5	175	318	1008	754	0.25	0.002
C2/3	-	-	-	9.0±0.5	-	-	941	707	-	0.010

ト中のありのままの空間配置にて気泡分布を評価する方が合理的であろうということが本研究の動機付けとなっている。

本研究においては、簡易な評価となることを意図して低倍率にて取得した気泡の画像に対して、気泡を点で置き換えた点過程の考え方を導入する。まず初めに気泡の配置のランダム性の検証を行い、合わせて骨材が気泡配置に及ぼす影響を明らかにする。続いて、点過程としての気泡のランダム性に着目して、実際の気泡空間分布をシミュレーションにより再現することの妥当性について論じる。さらに、気泡の2次元画像の点過程に対して定義した距離特性値と、従来用いられてきた3次元を想定した気泡間隔係数との対応を明らかにし、モノグラフとして両者の関係を与え、これを用いて気泡間隔係数を簡便に推定する方法を提案して、その有用性について論ずることを目的とする。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

a) セメントペーストおよびモルタル供試体の作製

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：2.60 g/cm³，吸水率：2.05%）を用いた。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剤を用いた。作製したセメントペーストおよびモルタルの水セメント比は0.40であり、それらの配合を表-1に示す。JISR 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、モルタル用の小型エアメーターを用いて空気量を計測した後、40mm×40mm×160mmの型枠に打ち込んだ。締固めは木槌による打撃にて行った。打込み後24時間にて脱型し、材齢7日まで水中養生(20±2°C)を行った。

b) コンクリート供試体の作製

上述の材料に加え、川砂利（密度：2.60 g/cm³，吸水率：1.81%，最大骨材寸法：25mm）を用いた。コンクリートの水セメント比は0.40および0.55であり、その計画配合を表-2に示す。本研究ではAE剤量を調整し、各水セメント比に対して空気量を3種類ずつ、計6種類に変

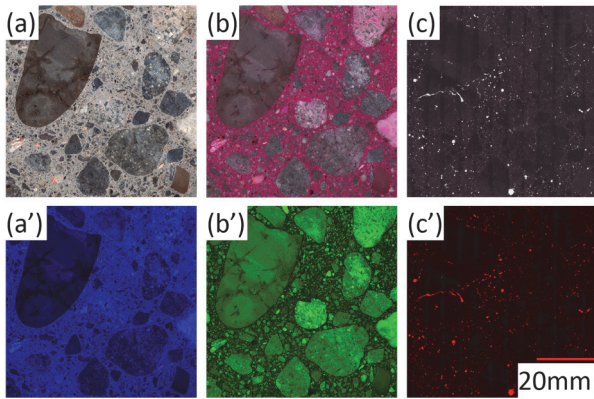


図-1 RGB画像作製手順例(コンクリート)

化させ、エアメーターを用いて空気量を計測した後、コンクリート角柱供試体(100mm×100mm×400mm)を作製した。a)と同様、打込み後24時間にて脱型し、材齢7日まで水中養生を行った。

(2) 画像の取得

a) セメントペースト断面画像の取得

養生終了後、1本の供試体から厚さ10mm程度の板状試料を、供試体中央部付近から10枚切り出し、耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。研磨終了後、試料を50°Cの乾燥炉に入れ、10分程度乾燥させた。その後、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12~13 μm)を気泡に充填させた。その後、市販のフラットベッドスキャナを用いて等倍率の断面画像を取得した⁹⁾。このときの解像度は1200dpiであり、1画素は約21.2 μm に相当する。なお、試料の縁部では黒色インクの均一な染色がなされない領域が存在する場合があるため、中心部の30mm×30mmの領域を解析領域とした。なお、本研究における取得画像の倍率はASTM C457にて規定される倍率を満足するものではないことに留意する必要がある。本研究はそのような低倍率画像の気泡空間構造の解析方法を提案し、さらにその低倍率の画像に対して、従来の気泡間隔係数の定義に従って評価した値を対応させたとき、低倍率であっても気泡の点過程特性値が有意であることを論ずることに主眼を置いている。

b) モルタルおよびコンクリート断面画像の取得

モルタルおよびコンクリートにおいては、1本の供試体に対して厚さ10~15mm程度の板状試料を10枚切り出し、同様に耐水研磨紙を用いて研磨を行った。市販のフラットベッドスキャナを用いて試料断面のカラー画像(図-1(a))を取得した。続いて、試料の研磨面に対してフェノールフタレイン水溶液を噴霧してセメントペーストマトリックス相のみの染色を行い、画像(図-1(b))を取得した。その後、a)の手順同様に、黒色インク塗布、白色粉末充填を行い、気泡を白色にて抽出した白黒画像

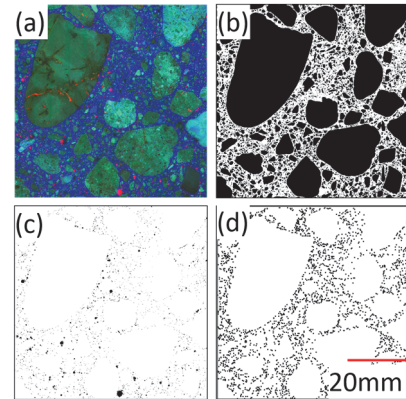


図-2 気泡および骨材の2値画像抽出例(コンクリート)

(図-1(c))を取得した。モルタルの断面の画像取得条件はセメントペーストと同様であるが、コンクリートの断面画像においては、解像度は847dpiとし、1画素は約30 μm に相当する。コンクリート断面に対しては、骨材の最大寸法が大きくなるために、モルタルに比べて広い領域を観察する必要がある。本研究においては、縁部の影響を受けないと考えられる中心部の60mm×60mmの領域を解析領域としたが、この寸法は、骨材粒子の2次元画像情報から決定される体積代表要素寸法(供試体全体の平均的な空間分布特性を代表する最小寸法)よりは十分に大きい¹⁰⁾。

(3) 画像解析

取得したそれぞれの画像に対して、画像解析ソフトウェアを用いて、原画像、セメントペーストマトリックス相の呈色画像および気泡抽出白黒画像の3枚の画像の座標位置を一致させた。その後、それぞれの画像から特定のRGB成分を抽出した画像を求め(図-1(a'), (b'), および(c'))、それらを重ね合わせることによって骨材相、セメントペーストマトリックス相および気泡をそれぞれ異なる色で表示したカラー画像を得た(図-2(a))。このカラー画像における骨材相とセメントペーストマトリックス相の明度、色度の違いを利用して骨材相の抽出を行った¹¹⁾。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるが、明度および色度に対して解析時に示されるそれぞれの色抽出の濃淡ヒストグラムのうち、特にG成分に関して単一の閾値を設定すると骨材抽出が適切に行えることを確認している⁹⁾。これを注意深く行うことによって目的とする骨材粒子の2値画像を得た。最終的に、目視で判断できた未抽出箇所に対して手動補正を施し、骨材粒子の2値画像とした(図-2(b))。セメントペーストマトリックス相の2値画像は骨材相の2値画像を白黒反転させることにより得た。気泡の抽出には図-1(c)の白黒画像をそのまま用いた(図-2(c))。このとき、AE剤にて連行される気泡径の主たる範囲はおおよそ30~250 μm 程度であること¹²⁾およびステレオロジーの観点から、微細な

粒子がすべて大きな球の端部が切断されて現れた円形断面であって、いま観察している特定の断面にそれらが多数現れるようにして、大きな球が近傍に分布していたとは考えにくい。よって、1画素の孤立した白色部は気泡以外の表面凹凸部もしくはその他の空隙であると判断し、これを除去した。残された白色部が気泡であると考え、この2値画像に対して気泡の面積率を画像解析により求め、ステレオロジーの考え方にに基づきこれを気泡体積率とした。また、この気泡の2値画像から個々の気泡の重心点位置座標 $x_i (i = 1, \dots, n)$ を求め、これを気泡の位置ベクトル x_i とし、気泡を点で代表させた点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ とした(図-2(d))。観察領域 W 内にある点 $x_i \in X$ の個数 $N(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して、点密度 λ_A を式(1)により求めた。

$$\lambda_A = \frac{N(W)}{A(W)} \quad (1)$$

(4) 点過程統計量の計算

取得した気泡の重心点位置座標データ $x_i (i = 1, \dots, n)$ を統計解析環境「R」に読み込み、点過程パッケージ「spatstat」¹³⁾を使用して以下の点過程統計量¹⁴⁾の計算およびシミュレーションを行った。

a) K関数とL関数

気泡の分布のパターンを直観的に判断できるK関数(式(2a))を求めた。その後、完全ランダム分布(定常ポアソン過程)を帰無仮説としたとき、標本としての実際の分布の偏差の有意性を判断するために、L関数(式(3))を求めた。変数 r は距離を表し、式(2a)中の $\mathbf{1}(\)$ は()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る。また、 $s(x)$ はエッジ補正係数であり、観察画像領域の辺長を a, b とすると、式(2b), (2c)にて与えられる。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda_A^2} \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{1}(|x_i - x_j| < r)}{s(x)} \quad (2a)$$

$$s(x) = ab - \frac{(2a + 2b - x)x}{\pi} \quad (2b)$$

$$x = |x_i - x_j| \quad (2c)$$

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} \quad (3)$$

b) 最近傍距離関数

実際の気泡粒子間の距離を評価するために、最近傍距離関数 $G(r)$ を用いた。これは点過程 X の要素である任意の点 $x_i (x_i \in X)$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j (x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表し、その定義は式(4a)で与えられる。式中の $w(s_i)$ は、観察視野外に最近傍点が存在する可能性を考慮するエッジ補正係数であり、 s_i を半径とする領域だけ縮退させた観察領域面積の逆数である。観察視野 W の辺長を a, b とすると、エッジ補正係数は式(4b)にて与えられる。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N(W)} \mathbf{1}(s_i \leq r) \mathbf{1}(s_i \leq c_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^{N(W)} \mathbf{1}(s_i \leq c_i) \cdot w(s_i)} \quad (4a)$$

$$w(s_i) = \{(a - 2s_i)(b - 2s_i)\}^{-1} \quad (4b)$$

ここに、

s_i : 最近傍距離

c_i : 各点から視野縁までの最短距離

(5) 気泡の空間分布の点過程シミュレーションと有意性の検定

モルタルおよびコンクリートの骨材抽出画像(図-2(b))から骨材の位置データをパーソナルコンピュータに読み込んだ。その補集合空間領域であるセメントペーストマトリックス領域に、点密度 λ_A から定まる点数をランダムに発生させる2項点過程としてシミュレーションを行った。シミュレーションにより得られた点の分布を新たな点過程 X_S として、そのL関数および最近傍距離関数を求めた。取得した10枚の画像に関して、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シミュレーションを1枚の画像に対して20回ずつ行い、計200回のシミュレーションを行った。シミュレーションによって再現した点過程 X_S のL関数および最近傍距離関数を、帰無仮説である完全ランダム分布のL関数および最近傍距離関数とした。セメントペースト中の気泡に関しては、観察領域全体を点の存在可能領域として、点を点密度に応じて2項点過程として所定数発生させた。また、これらのシミュレーションにより発生させた点パターンのL関数および最近傍距離関数の95%信頼区間を求め、実際の供試体のそれらの関数と比較して、関数の偏差の有意性の判定を行った¹⁵⁾。

(6) 気泡間隔係数

得られた低倍率の気泡画像に対して、ASTMC457の定義に従い気泡間隔係数 \bar{L} を式(6a), (6b)より求めた⁴⁾。なお、気泡の比表面積 α は気泡の2値画像の画像解析によ

表-3 画像から得られた気泡特性

名称	セメントペースト						モルタル						コンクリート					
	CP/1	CP/2	CP/3	CP/4	CP/5	CP/6	M1/1	M1/2	M1/3	M2/1	M2/2	M2/3	C1/1	C1/2	C1/3	C2/1	C2/2	C2/3
フレッシュ時の空気量 (%)	2.4	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	2.0	5.5	7.2	5.7	8.6	11	2.8	5.0	7.4	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率 (%)	1.0	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.6	5.3	6.6	4.7	6.5	9.5	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
点密度 (個/mm ²)	0.46	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.60	2.18	2.91	0.83	1.66	2.80	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μm)	123	138	120	118	100	126	144	145	142	175	158	157	124	131	133	131	156	171

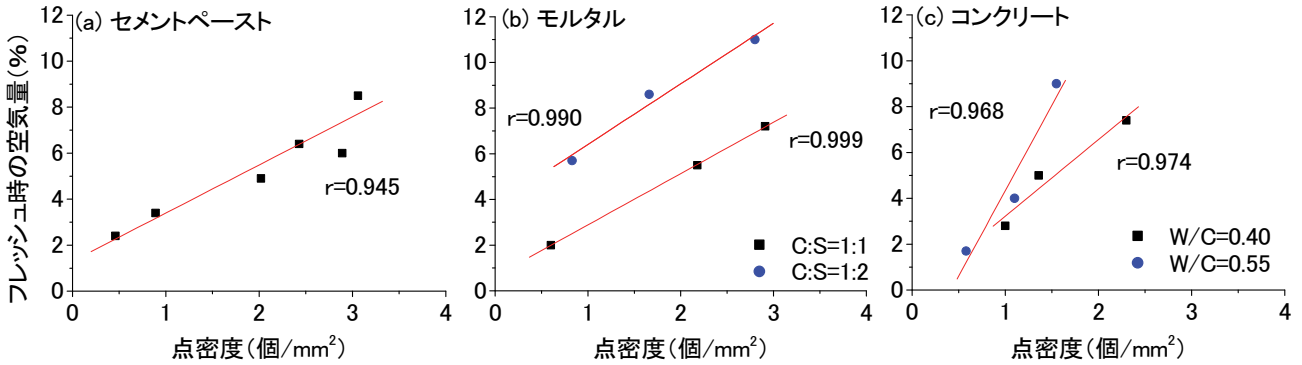


図-3 フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の関係

って得られる結果を用いて、式(6c)より求めた¹⁶⁾。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \sqrt[3]{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad \left(\frac{P}{A} \geq 4.342 \right) \quad (6a)$$

$$\bar{L} = \frac{P}{A\alpha} \quad \left(\frac{P}{A} < 4.342 \right) \quad (6b)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}} \quad (6c)$$

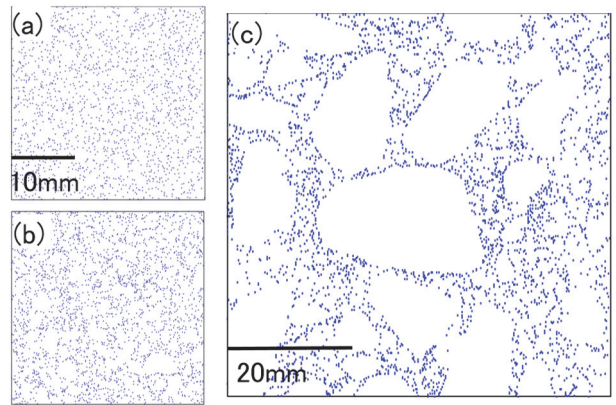
ここに、

- α : 気泡の比表面積
- P : ペースト容積比
- A : 硬化コンクリートの空気量
- ā : 気泡面積の平均値

3. 結果および考察

(1) 画像解析から得られる気泡特性

表-3に画像から得られた気泡特性を一覧にして示す。いずれの配合においても、フレッシュ時に測定された空気量と画像から得られた硬化後の気泡体積率には差がある。画像取得を市販の一般的なフラットベッドスキャナにより行い、低倍率であるがために微細な気泡を計数できていないことの影響が現れているようである。しかし、そのような微細気泡は量的には多くはないので¹⁷⁾、硬化後の低い体積率は、主に打込みから締固めの過程における損失によるところが大きいと考えられる¹⁸⁾。また、観察された気泡径の最大値は、供試体の種類を問わず数



(a)セメントペースト (b)モルタル (c)コンクリート
図4 点過程の一例

mm程度であったが、そのような極端に大きな気泡の数は少なく、平均気泡径は骨材の存在しないセメントペースト供試体では120μm程度であり、骨材が存在するモルタルおよびコンクリート中の平均気泡径はセメントペーストのそれよりも大きい。

図-3にフレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の関係を示す。いずれの配合においても、フレッシュ時の空気量と硬化後の気泡点密度の間には、直線近似可能な非常に良好な相関関係が存在する。ステレオロジーの観点からは、一般に2次元断面内の粒子の個数を3次元空間内の粒子の体積率に直接関連付けることはできない¹⁹⁾。しかし、図-3の結果から、気泡を点過程とみなし気泡径や体積率の情報を排したとしても、空気の気泡径分布や平均径等が一般的なものであれば、点密度はコンクリート中の空気量の変化を反映した値とみなすことは可能であると考えられる²⁰⁾。

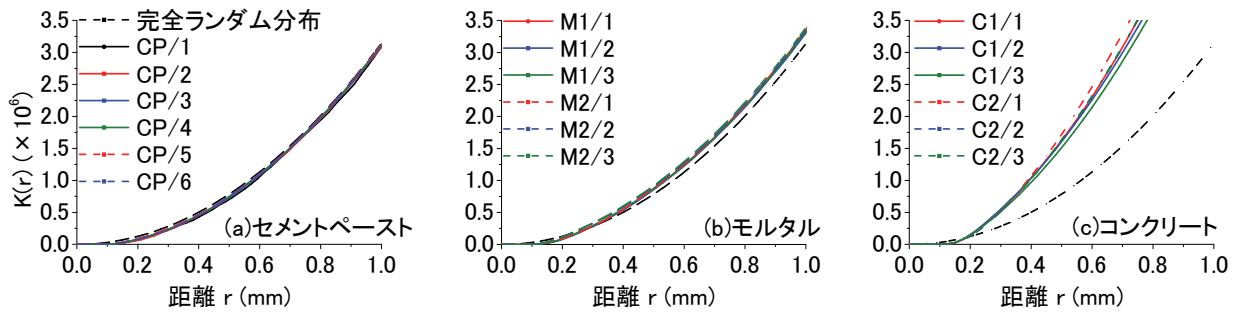


図-5 気泡のK関数

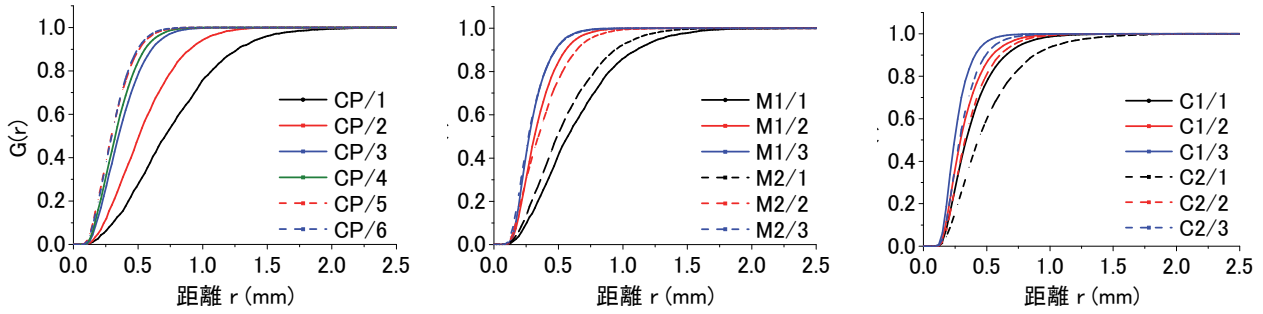


図-6 気泡の最近傍距離関数

(2) 気泡の空間分布のランダム性評価

図-4にセメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡の点過程の一例を示す。セメントペースト中では(図-4(a))、点が観察領域全体にまんべんなく配置されているように見え、モルタル(図-4(b))では、細骨材部分が空白域になってはいても、全体としては均質に点が分散しているように見えなくもない。これに対して、コンクリート(図-4(c))では骨材領域の大きな空白域や局所的な疎密の差が明らかな分布であり、視野全体として目視的にも均質な分布ではないことが理解される。

図-5にセメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡のK関数を示す。図中の黒破線は完全ランダム分布(定常ポアソン過程)であるときの関数値を示している。セメントペースト中の気泡は、気泡量にかかわらずいずれも完全ランダム分布の関数値とほぼ一致している。よって、セメントペースト供試体中の空気量は、一般的な空気量を有するコンクリート中のセメントペーストマトリックス体積当たりの空気量に比べて小さいけれども、気泡は観察領域全体にランダムに分布していると判断される²⁰⁾。このことはセメントペースト中の気泡粒子は、実際には個々の寸法を有するが、他の気泡の存在の影響を受けずに分布しているとみなしてよいことを示している。よって、セメントペースト中の気泡の分布を再現しようとするときは、点をランダムに発生させるだけで再現できることになる。一方、モルタル中の気泡のK関数値は、いずれも完全ランダム分布の関数値より若干大きな値を示しており、凝集性を有した分布とな

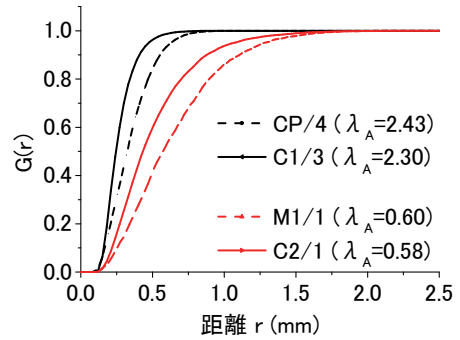


図-7 点密度が同程度の気泡の最近傍距離関数

っている。骨材の存在しないセメントペースト中では気泡はランダムに分布していることから、モルタル中の気泡は細骨材の存在によってその分布が制限され、凝集側の分布を示したことは明らかである。さらに、粗骨材の存在するコンクリート中の気泡のK関数値は、モルタル中の気泡のK関数値よりもさらに大きな値を示し、非常に強い凝集性を有した分布であると判断される。これは、気泡の存在できる領域(セメントペーストマトリックス領域)がより局所化したためである。以上より、骨材の存在は気泡の空間分布に明らかに影響を及ぼし、その影響の程度はK関数を用いることで評価できると思われる。

図-6にセメントペースト、モルタルおよびコンクリート中の気泡の最近傍距離関数を示す。いずれも空気量および気泡点密度の増加とともに、最近傍距離関数の初期の立ち上がり部の傾きが大きくなっている。気泡点密度が増加することで気泡間の距離が短くなり、短距離にて

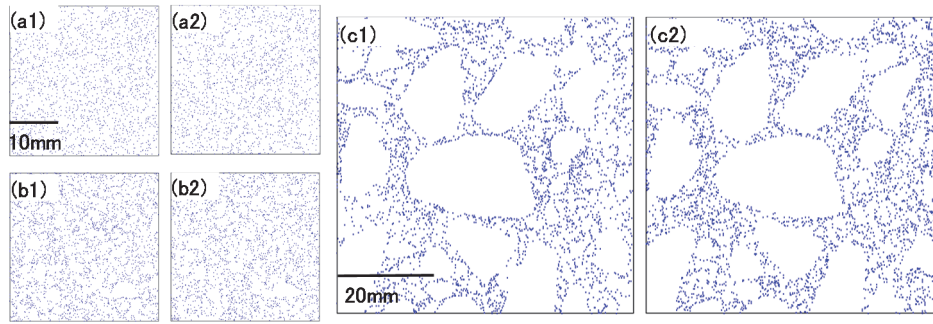


図-8 実際の点過程 X_R と再現した点過程 X_S (a:セメントペースト, b:モルタル, c:コンクリート, 1: X_R , 2: X_S)

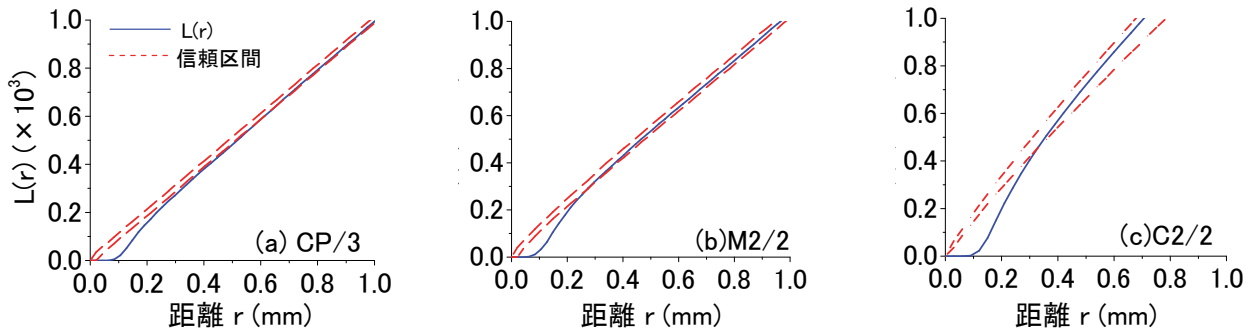


図-9 気泡の L 関数の一例

点が他点を見つけやすくなること関数値の増大として現れている。また、 K 関数 (図-5) に比べて、空気量間の関数の相違は明瞭である。

図-7 にセメントペーストおよびモルタルの気泡の最近傍距離関数について、点密度 λ_A が同程度であるコンクリートの気泡の最近傍距離関数と比較したものを示す。いずれにおいても、同程度の点密度であっても同一距離における関数値は常にコンクリートの方が大きく、粗骨材による分布の制限によって気泡間の距離が近づき、より強い凝集性を有していることは明らかである。また、このことは図-4 にて示したコンクリート供試体における K 関数のポアソン過程からの偏差とも対応している。以上より、骨材の存在によって気泡は凝集性の分布を示すことが最近傍距離関数においても確認された。また、凝集性への影響という観点からは、空気量が増加することの影響は、骨材の影響に比べて大きくはないと結論される。

(3) 気泡分布のランダム性評価および再現

上述のように、セメントペースト中の気泡はランダムに分布しているので、例えばこれをシミュレーションにより点過程として再現しようと思えば、単純に対象領域内に点をランダムに発生させればよいことになる。したがって、シミュレーションの実行は非常に簡単である。一方、モルタルおよびコンクリート中の気泡は、骨材の

影響で視野内では明らかに凝集性を有しているが、骨材と気泡、および気泡同士の相互作用の有無は確認できていないため、何らかの規則に従って点を発生させて単に凝集性の分布を再現するシミュレーションの妥当性は不明である。そこで、骨材を含む画像に対して、気泡の存在可能領域であるセメントペーストマトリックス領域を抽出し、この領域のみに点をランダムに発生させるシミュレーションを行い、これと実際のモルタル、コンクリート中の気泡分布を比較して、そのランダム性の相違を比較した。

図-8 にシミュレーションによって再現した点過程 X_S と実際の気泡の点過程 X_R の一例を比較して示す。個々の点座標は異なっても、目視上では両者の分布パターン間に相違は認められず、点発生シミュレーションで得られた点過程の分布は、実際の分布を再現しているように見える。

図-9 に実際の供試体中の気泡の L 関数 (実線) と 2 項点過程としてシミュレーションにより発生させたランダム点過程の L 関数の 95% 信頼区間 (破線) との対応を示す。いずれも距離の小さい範囲 (0.3mm 程度以下) では、実際の気泡分布の L 関数値は信頼区間を下回っている。よって、実際の分布は、このような短距離範囲にて点過程としては規則性 (反撥性) 分布ということになり、完全ランダム過程という帰無仮説は棄却される。これは、シミュレーションでは大きさを持たない点をランダムに

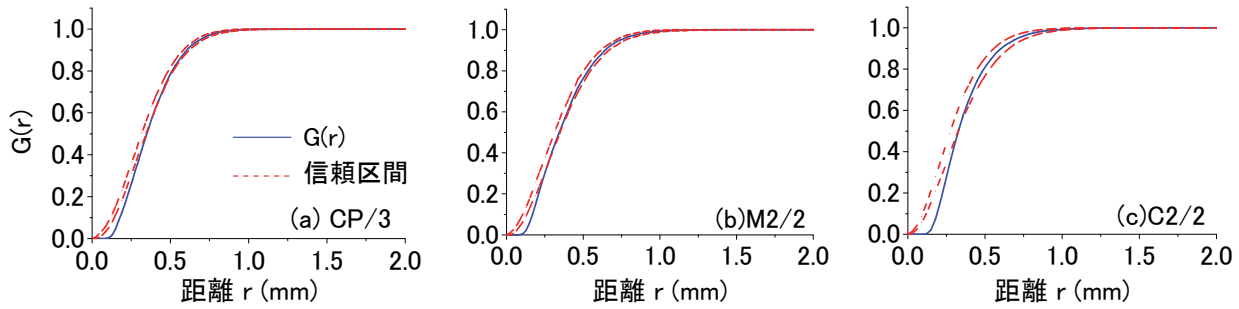


図-10 気泡の最近傍距離関数の一例

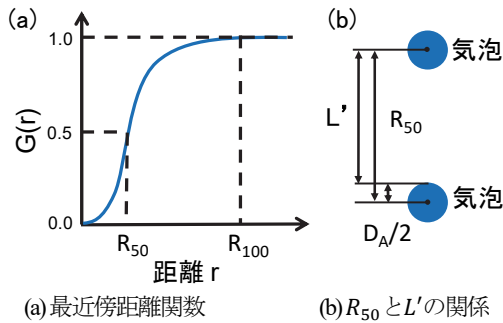


図-11 模式図

発生させているため、自身が大きさを有する実際の気泡では近接できないような近距離であっても、他点が配置される場合があるためである。しかし、それ以降の長距離範囲では信頼区間内に実際の分布が入っている。よって、気泡の存在可能領域であるセメントペーストマトリックス領域のみに点をランダムに発生させたとすれば、短距離範囲にてシミュレーションの一致性は高くはないが、平均気泡径の約2倍程度以上の距離では、骨材の有無に関わらず、気泡分布は再現されていると判断される。つまり、骨材が存在したとしても気泡の存在可能領域がランダムに制限されるだけであり、セメントペーストマトリックス領域に着目すれば、ある距離以上では気泡は互いに影響し合うことなくランダムに分布しているのと同じ状態が再現されていると考えられる。

図-10 に実際の気泡の最近傍距離関数とシミュレーションにより求めた気泡分布の95%信頼区間を示す。L関数と同様に短距離範囲にて信頼区間を下回る範囲が存在しており、気泡間距離にも気泡径の影響が現れている。しかし、この場合も同様に、それ以降の長距離範囲では信頼区間の範囲内である。特に、分布の中央値である累積確率が0.5に対応する距離では、実際の気泡分布は信頼区間内にプロットされている。よって、長距離範囲においてはランダム分布は再現されるとして以下の解析を行った。

(4) 点過程の気泡間隔特性値と気泡間隔係数の推定

最近傍距離関数は累積確率で表されている。この関数

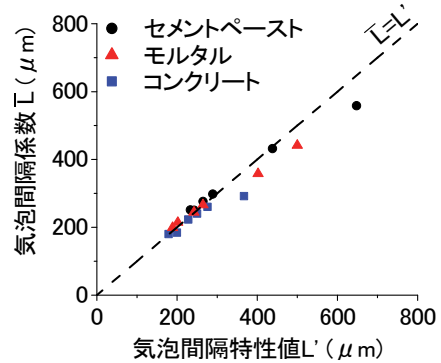


図-12 気泡間隔係数 \bar{L} と気泡間隔特性値 L' の関係

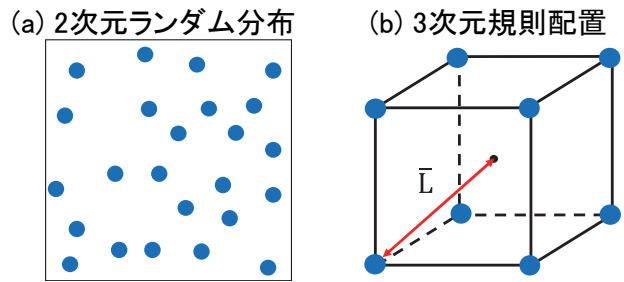


図-13 点分布の模式図

分布から得られる特性値として、累積確率の中央値を採用し、これに対応する距離をメディアン距離 R_{50} と定義する(図-11(a))。メディアン距離は任意の点の周囲にて、この距離範囲までを探索すれば50%の確率で他点が見つかることを意味する。このメディアン距離は、実際の気泡を面積を持たない点で表したときの中心点間の距離であるので、気泡の径を考慮するため、単純にメディアン距離 R_{50} から画像解析により求められる平均気泡径 D_A の1/2を差し引き、これを気泡間隔特性値 L' として定義し²⁾、従来の気泡間隔係数 \bar{L} との比較を行うことにした(図-11(b), 式(7))。

$$L' = R_{50} - \frac{D_A}{2} \quad (7)$$

図-12 に従来の気泡間隔係数 \bar{L} と定義した気泡間隔特性値 L' との関係を示す。両者には直線近似可能な非常に

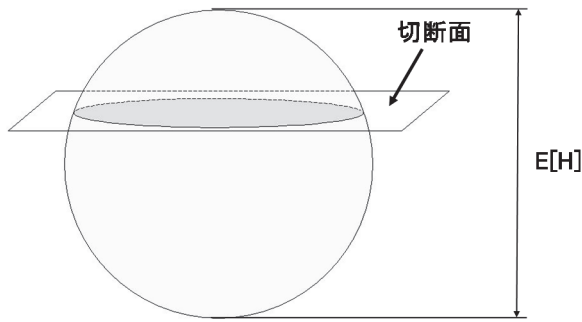


図-14 断面垂直方向の粒子投影高さ

良好な相関関係が見られ、さらにその値もほぼ一致している。この相関性から、気泡間隔特性値 L' は従来の気泡間隔係数 \bar{L} と関連付けることが可能のようであり、さらに、両者の線形対応を考慮すると、気泡間隔係数 \bar{L} の代わりに取得および評価の簡単な L' を用いて、耐凍害性を判定することを期待させる²³⁾。しかし、気泡間隔特性値 L' は2次元ランダム空間分布(図-13(a))から得られる特性値であるのに対して、気泡間隔係数 \bar{L} は、気泡を立方体格子状に規則配置したとき(図-13(b))、最寄りの気泡から最遠にある位置から気泡表面までの距離という3次元の距離特性値である。よって、全く異なる空間配置にて定義され本質的に異なる値が相関するという事実を単純に受け入れるのではなく、図-12の両者の値もほぼ一致することの蓋然性を考察していくことは、以下の理由により意義を有すると考える。

- [1] 気泡構造の評価手段としては簡便性が求められ、 L' の取得は非常に容易である。しかし、その値の有用性を主張するうえで、その幾何学的な意味をできる限り明らかにしておくべきである。
- [2] 長い歴史を持つ気泡間隔係数 \bar{L} との対応を明確にすることは、異なる評価体系での評価値 L' を用いて、過去の実績に基づいて耐凍害性を判断することの妥当性を担保しうる。

そこで、まず初めに2次元空間における点密度 λ_A を3次元空間における点密度に換算する。そして、2次元ランダム分布から得られたメディアン距離 R_{50} と3次元立方体格子から得られる気泡間隔係数 \bar{L} の対応を調べ、気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 \bar{L} の幾何学的な関係を考察してみる。

3次元空間に分布する粒子が凸(粒子内の任意の2点を結ぶ線分全体がその粒子内に入っている)である場合、単位体積当たりの粒子数の期待値 N_V と単位面積当たりの粒子数の期待値 N_A の間には、断面に垂直な方向への粒子の平均投影高さ $E[H]$ (図-14)を用いると、DeHoff and Rhines式と称される式(8a)の関係がある²⁴⁾。対象とする粒子は本研究では気泡なので球と仮定でき、平均投影高さ $E[H]$ を平均気泡径 D_V を用いて書き換えることができる(式(8b))。

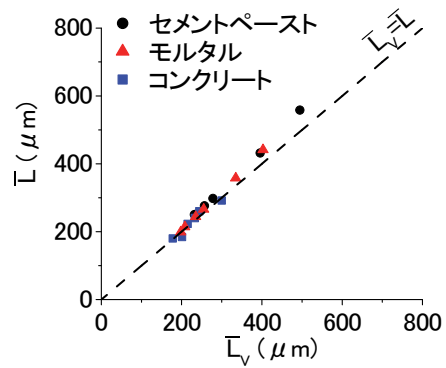


図-15 気泡間隔係数 \bar{L} とDeHoff and Rhines式に基づく気泡間隔係数 \bar{L}_V の関係

$$N_A = E[H]N_V \quad (8a)$$

$$N_A = D_V N_V \quad (8b)$$

ASTMC457においても採り入れられていることを考慮して、2次元の気泡平均径 D_A (表-3)と式(8b)の3次元の平均径 D_V は等しいとする。また、気泡間隔係数 \bar{L} は、気泡はセメントペーストマトリックス領域のみに存在することに対応して、セメントペースト体積率 P と空気量 A を用いて定義していることから(式(6))、気泡点密度 λ_A をセメントペーストマトリックス領域の面積率(=体積率) p で除すことにより、コンクリート中のセメントペーストマトリックス領域における点密度 N_A が λ_A/p として与えられることになる。すると、3次元空間における気泡点密度を $\lambda_V (= N_V)$ と書くことにすると、セメントペーストマトリックス単位体積当たりの気泡個数である λ_V は式(9)で与えられる。

$$\lambda_V = \frac{\lambda_A}{pD_A} \quad (9)$$

λ_V の逆数は点1個が占有する立方体の体積とみなすことができるので、その立方体の対角線の1/2を $R_V/2$ とすると、その対角線半長は三平方の定理を用いて式(10)で表される。

$$\frac{R_V}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{1}{\lambda_V}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{pD_A}{\lambda_A}} \quad (10)$$

また、気泡間隔係数 \bar{L} は定義する立方体の対角線から気泡径を差し引いた距離の1/2であるので、点密度から決定される立方体の対角線長 R_V から、2次元平均気泡径 D_A を引いた値の1/2が、ASTM C457の定義する気泡間隔係数と同義の距離となる。以上の2次元点密度を元にDeHoff and Rhines式(式(8a))を介して推定される気泡間隔

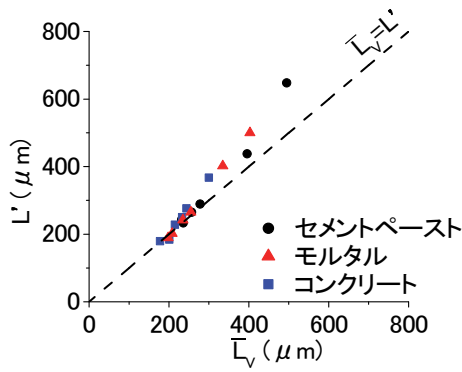


図-16 気泡間隔特性値 L' と DeHoff and Rhine 式に基づく気泡間隔係数 \bar{L}_V の関係

係数を \bar{L}_V とすると、 \bar{L}_V は式(11)で表され、点過程の点密度と平均気泡径から導かれる気泡間隔係数ということになる。

$$\bar{L}_V = \frac{R_V - D_A}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{\rho D_A}{\lambda_A}} - \frac{D_A}{2} \quad (11)$$

図-15 に本研究にて取得した画像に対して ASTM C457 の定義式である式(6)を適用して求めた気泡間隔係数 \bar{L} と式(11)から求めた気泡間隔係数 \bar{L}_V の関係を示す。 \bar{L} と \bar{L}_V の値はほぼ等しい。以上のことから、画像解析にて求められる2次元の気泡点密度 λ_A と平均気泡径 D_A を用いて求めた気泡間隔係数 \bar{L}_V と、ASTM C457 に定義される気泡間隔係数 \bar{L} との同義性が確認され、また点密度は気泡間隔係数の定義とも整合する特性値であることになる。よって、 \bar{L}_V を一般的に用いられてきた気泡間隔係数 \bar{L} に代わる値とみなすことは可能と思われる。

図-16 に最近傍距離関数の中央値として求めた気泡間隔特性値 L' と気泡間隔係数 \bar{L}_V の関係を示す。点密度が大きくなり点間距離が短くなるにつれて、両者の差が小さくなっている。これは、点密度が増大することで気泡の分布の多様性(気泡分布の局所変動)が小さくなりより一様な配置に近づくことによって、2次元空間におけるランダム分布の点間距離の中央値が、気泡間隔係数を定義している規則配置された立方体格子対角線の1/2に近づくことを示している。

図-16 より、気泡間距離に関する2つの特性値 L' と \bar{L}_V がほぼ等しくなることが確認でき、ランダム分布の中央値である L' は、それを規則配置に置き換えると気泡間隔係数 \bar{L} と同等の値を与える特性値である。よって、点過程の最近傍距離関数の確率50%に相当する中央値として定義したメディアン距離 R_{50} は、式(7)と式(11)を等置すると、規則配置を想定したとき気泡1個が占有する立方体格子対角線の1/2の長さということになる(式(12))。

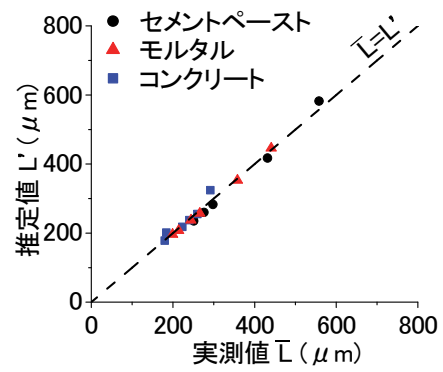


図-17 推定された気泡間隔特性値 L' と実測された気泡間隔係数 \bar{L} の関係

$$R_{50} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt[3]{\frac{\rho D_A}{\lambda_A}} \quad (12)$$

ここで、平均気泡径は使用する混和剤によって大きく異なったり、配合間でランダムに変動するような値ではないことを考慮すると、点過程としての確率に基づき求めたメディアン距離 R_{50} は、式(12)より、結局は点密度で決定される距離であることになる。よって、ある点密度にてメディアン距離が決定される時、式(12)から気泡の平均径を推定できることになる。実測値ではなく推定値であることを区別するために、改めて推定される気泡径を D_e と書くことにすると、式(13)のように、点密度とメディアン距離によって表すことができる。

$$D_e = \frac{8}{3\sqrt{3}} \times \frac{\lambda_A}{\rho} R_{50}^3 \approx 1.54 \frac{\lambda_A}{\rho} R_{50}^3 \quad (13)$$

式(13)を式(7)に代入すると、気泡間隔特性値 L' はさらに次式のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} L' &= R_{50} - \frac{1.54 \lambda_A}{2 \rho} R_{50}^3 \\ &\approx \left(1 - 0.77 \frac{\lambda_A}{\rho} R_{50}^2\right) R_{50} \end{aligned} \quad (14)$$

すなわち、セメントペースト体積率は画像解析もしくは配合から既知であるとするれば、気泡間隔特性値 L' は点過程パターンから求められる点密度とメディアン距離だけで決定されることになり、気泡寸法の計測を必要としないことになる。

図-17 に式(14)にて推定される気泡間隔特性値 L' と実際の供試体から求めた気泡間隔係数 \bar{L} の関係を示す。点密度の大小に関わらず両者の値はほぼ一致している。すなわち、気泡間隔係数の推定値としての意味を持つランダム分布の特性値 L' を求めることは、従来の気泡間隔係数

表4 骨材体積率の配合値と画像解析値

名称	モルタル						コンクリート					
	M1			M2			C1			C2		
	/1	/2	/3	/1	/2	/3	/1	/2	/3	/1	/2	/3
配合値 (%)	34.4	32.9	32.3	48.7	47.2	46.0	65.8	64.1	61.2	70.7	67.9	63.4
画像解析値 (%)	30.8	32.7	31.4	45.0	40.0	41.8	64.5	64.9	61.2	66.5	67.2	67.2

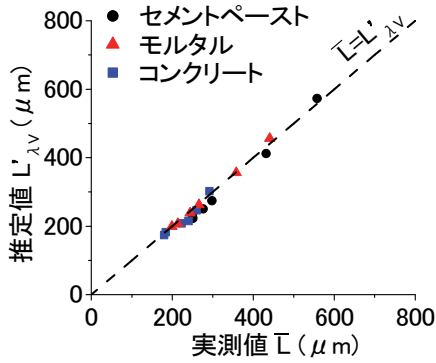


図-18 3次元点密度の推定に基づいて決定した気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ と実測された気泡間隔係数 \bar{L} の関係

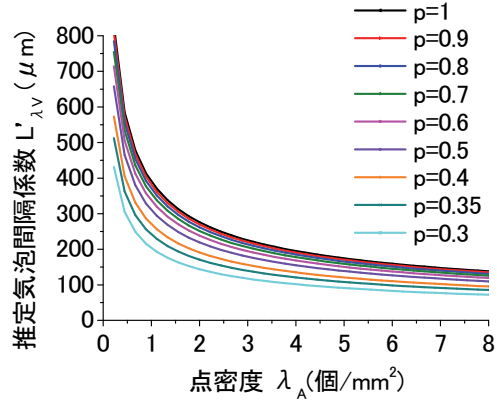


図-19 気泡間隔係数曲線

\bar{L} を求めることには加えられず、よって図-12に示した L' と \bar{L} の一致の蓋然性、および気泡間隔特性値 L' の幾何学的配置に関係づけたときの有意性が示されたことになる。式(14)により求めた気泡間隔特性値は、DeHoff and Rhines式を用いて3次元の点密度を推定することによって得られた3次元の気泡間隔の特性値である。よって、式(7)の2次元の特性値と区別するため、後者を気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ と書き改めることにする。

(5) 気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ の簡易推定法の提案

気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ は気泡の最近傍距離関数から得られるメディアン距離 R_{50} 、気泡の点密度 λ_A 、セメントペーストマトリックス相の体積率 p （もしくは骨材相の体積率）の3つの変数によって決定される特性値である。この値 $L'_{\lambda V}$ が従来の気泡間隔係数 \bar{L} とよい一致性を示すことから（図-17）、 $L'_{\lambda V}$ が簡単に求められればASTM C457の手順に従わなくても、点分布パターンから従来の気泡間隔係数 \bar{L} が直接求められるといえる。また、気泡を点過程に置き換えて考えた場合、最近傍距離関数の中央値の範囲では、気泡はランダム分布に従っていたことを考慮し、メディアン距離 R_{50} を完全ランダム分布（2次元定常ポアソン過程）のメディアン距離 R_{p50} に置き換えることにする。点密度が λ のときの完全ランダム分布の最近傍距離関数は式(15)にて与えられ、メディアン距離 R_{p50} は式(15)にて $\lambda = \lambda_A$ 、 $G(r) = 0.5$ として変形することで求められる（式(16)）。

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda \pi r^2) \tag{15}$$

$$R_{p50} = \sqrt{\frac{\ln(0.5)}{-\pi \lambda_A}} \approx \frac{0.47}{\sqrt{\lambda_A}} \tag{16}$$

すると、気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ について、式(14)がさらに簡単に書き換えられて、次式を得る。

$$L'_{\lambda V} = \left(1 - 0.77 \frac{\lambda_A}{p} \left(\frac{0.47}{\sqrt{\lambda_A}} \right)^2 \right) \frac{0.47}{\sqrt{\lambda_A}} \approx (0.47p - 0.08) \frac{1}{p \sqrt{\lambda_A}} \tag{17}$$

以上より、3次元を想定した気泡間隔特性値 $L'_{\lambda V}$ は、気泡の点密度 λ_A とセメントペーストマトリックス相の体積率 p のみで決定できることになる。セメントペーストマトリックス相の体積率 p は、画像から画像解析により求めた骨材体積率 V_{ag} から $1 - V_{ag}$ として求めることができる。

表4に本研究で用いたモルタルおよびコンクリートの骨材体積率の配合値と画像解析値の一覧を示す。両者の値は、M2/2を除いて、ほぼ一致していると思わせるようである。よって、式(17)により得られる特性値 $L'_{\lambda V}$ と従来の気泡間隔係数 \bar{L} が一致することが確認できれば、結論として画像から求められる情報であるセメントペースト体積率 p と気泡点密度 λ_A を得るだけで気泡間隔係数が求められることになる。なお、このセメントペースト体積率 p （体積率=面積率）も気泡点密度 λ_A もステレオロジーの最も基本的な量（1次元）であり、取得が非

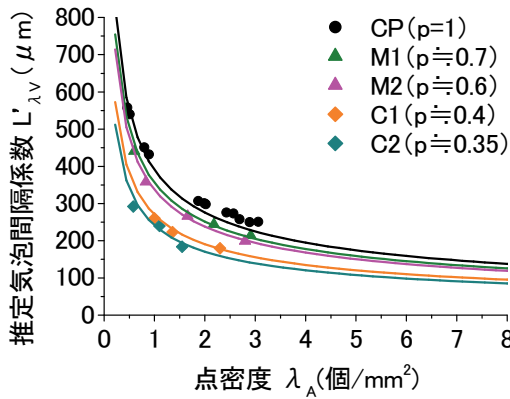


図-20 実測値をプロットした気泡間隔係数曲線

常に容易な量であることに留意したい。図-18に式(17)を用いランダム点過程として求めた気泡間隔係数特性値 L'_{AV} と、同じ画像に対して従来の定義に基づいた気泡間隔係数 \bar{L} の関係を示す。両者の値はほぼ一致し、式(17)を気泡間隔係数の簡易推定式として用いることができると考えられる。

一方、前述のように式(17)の気泡間隔特性値 L'_{AV} はセメントペーストマトリックス相の体積率 p と気泡の点密度 λ_A によって決定される。そこで、 p と λ_A の値をパラメトリックに変化させて、セメントペーストマトリックスの体積率ごとに点密度と気泡間隔の関係をプロットすると図-19の曲線を得る。画像から容易に求められる気泡の2次元点密度を判断の根拠としたとき、これらの曲線を用いれば、目的の気泡間隔係数を得るのに必要な点密度を求めることができる。すなわち、コンクリートの配合が既知であるとき、気泡の点密度としてどれぐらいあれば、気泡間隔係数の条件を満足するかを決定することになる。これらの曲線のモノグラフとしての適用性を確認するために、本研究にて使用した供試体の気泡間隔係数をこのグラフにプロットした結果を図-20に示す。いずれの気泡間隔係数値も曲線近傍にプロットされる。よって、例えば配合が既知のコンクリート供試体に対して、任意の方法で取得した気泡空間分布の2次元画像があるとき、適当な手段にて点密度を求めて、既知のセメントペースト体積率に関して点密度を座標値としてプロットすれば、そのコンクリートの気泡間隔係数が求められることになる。気泡間隔係数の計測が非常に労力を要し、熟練も必要であることを考慮すると²⁾、本提案法は点密度だけで気泡間隔係数が決定できることになり、2値画像取得後に1画像の解析に要する時間も作業時間を含めても高々数分である。気泡組織を簡便に評価できる方法としての意義は小さくないものと思われる。

4. 結論

スキャナーを用いて取得した低倍率の気泡分布画像に

対して2次元点過程の考え方を適用し、2次元の空間分布状況を点過程統計量により評価した。また、その統計量を用いて、空気量の変化および配合の変化にともなう気泡の空間構造の変化を代表する特性値を定義した。この特性値を耐凍害性の判定に使用することの妥当性を明らかにすることを目的として、従来の気泡間隔係数との対応を検討した。本研究により得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) セメントペースト中の気泡はランダムに分布しているが、骨材が存在するモルタルおよびコンクリート中の気泡は、骨材の分布制限により見かけ上凝集性を有した分布なることが K 関数および最近傍距離関数から確認された。
- (2) セメントペーストマトリックス領域内に着目すれば、気泡はある程度の距離以上にてランダム分布であるとみなされ、気泡位置は単純なランダムシミュレーションにより再現することが可能である。
- (3) 最近傍距離関数の中央値を基にして定義した気泡間隔特性値 L' は、従来の気泡間隔係数 \bar{L} とほぼ同様の値を与える。この L' を気泡間隔の評価指標として用いることが可能である。
- (4) 気泡間隔特性値 L' と平均気泡径に対応する規則配置を仮定すると、気泡間隔係数が定義される気泡空間構造における気泡間隔係数 \bar{L}_V が導かれ、これは従来の気泡間隔係数 \bar{L} とほぼ一致する。つまりランダム分布の特性値である L' は気泡間隔係数 \bar{L} と同義な値とみなすことができるようである。
- (5) 点過程としてみた場合、気泡間隔特性値 L' が定義される距離では、気泡はセメントペーストマトリックス領域内では完全ランダム分布とみなせる。よって、完全ランダム分布を前提として気泡間隔特性値 L' を求めることにすれば、気泡間隔係数 \bar{L} は点密度とセメントペースト体積率のみにより簡単な関数として与えられる。
- (6) 完全ランダム分布を仮定して、気泡間隔係数と点密度の関係を表す曲線を提示した。これを用いれば、簡便に求められる画像から気泡点密度を求め、既知のセメントペースト体積率に応じてプロットするだけで、そのコンクリートの気泡間隔係数が即座に推定できる。
- (7) 気泡を点過程とした最近傍距離関数の中央値に対応する気泡間隔特性値 L' は、a) 気泡間隔係数と整合した新しい気泡構造評価パラメーターとして、および b) 従来の気泡間隔係数を簡単に推定するための距離特性値として用いることができる。

参考文献

- 1) Neville, A. N. : *Properties of Concrete*, Fourth Edition,

- Wiley, 1996.
- 2) Powers, T. C. : The air requirement of frost-resistant concrete, *Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 29, pp. 184-211, 1949.
 - 3) Schwartz, H. A. : The metallographic determination of the size distribution of temper carbon nodules, *Metals Alloys*, Vol. 5, p. 139, 1934.
 - 4) ASTM C457/C457M-12 : Standard Test Method for Microstructural Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 2012.
 - 5) コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2016.
 - 6) 間瀬茂, 武田純 : 空間データモデリング, 共立出版, 2001.
 - 7) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K. : The stereological and statistical properties of entrained air voids in concrete : A mathematical basis for air void system characterization, *Materials Science of Concrete VI* (Eds. S. Mindess and J. Skalny), American Ceramic Society, pp. 129-214, 2001.
 - 8) Torquato, S. : *Random Heterogeneous Materials, Microstructure and Macroscopic Properties*, Springer, 2001.
 - 9) Zalocha, D. and Kasperkiewicz, J. : Estimation of structure of air entrained concrete using a flatbed scanner, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 2041-2046, 2005.
 - 10) Dang, G. H., 五十嵐心一, 内藤大輔 : コンクリート画像からの骨材相の抽出と粒度分布の推定, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 31, No. 1, pp. 2065-2070, 2009.
 - 11) 横田光一郎, 五十嵐心一 : RGB 情報を利用したモルタル断面画像からの骨材抽出と構成相の空間分布特性に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 35, No. 1, pp. 1759-1764, 2013.
 - 12) 川村満紀 : 土木材料学, 森北出版, 1996.
 - 13) Baddeley, A. and Turner, R. : spatstat; An R package for analyzing spatial point patterns, *Journal of Statistical Software* (<http://www.jstasoft.org/>), Vol. 12, No. 6, pp. 1-42, 2005.
 - 14) Stoyan, D., Kendall, W. S. and Mecke, J. : *Stochastic Geometry and its Applications*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1995.
 - 15) Ripley, B. D. : *Spatial Statistics*, A John Wiley & Sons, 2004.
 - 16) 小長井宣生, 大橋猛, 根本任宏 : 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメーター解析理論, *土木試験所月報*, No. 396, pp. 2-8, 1986.
 - 17) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 点過程統計量を用いたセメントペースト中の気泡の空間分布の定量評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 37, No. 1, pp. 493-498, 2015.
 - 18) 高橋和雄 : コンクリート製品の振動による空気量の減少について, *農業土木学会論文集*, 第 143 号, pp. 69-77, 1989.
 - 19) Baddeley, A. and Vedel Jensen, E. V. : *Stereology for Statisticians*, Chapman & Hall/CRC, 2005.
 - 20) Mayercsik, N. P., Felice, R., Ley, M. T. and Kurtis, K. E. : A probabilistic technique for entrained air void analysis in hardened concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 59, pp. 16-23, 2014.
 - 21) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一 : モルタル中の気泡の点過程としての特徴と間引きシミュレーションによる空間分布の再現, *セメント・コンクリート論文集*, Vol. 69, pp. 146-153, 2015.
 - 22) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一, 吉川峻生 : 気泡の空間分布構造の距離に関する特徴量と気泡間隔係数との対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 37, No. 1, pp. 841-846, 2015.
 - 23) 古東秀文, 室谷卓実, 五十嵐心一 : コンクリート中の気泡の点過程としての特徴量と凍結融解抵抗性の対応, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 38, No. 1, pp. 987-992, 2016.
 - 24) DeHoff, R. T. and Rhines, F. N. : Determination of number of particles per unit volume from measurements made on random plane sections: the general cylinder and the ellipsoid, *Transactions AIME*, No. 221, pp. 975-982, 1961.
 - 25) 谷口円, 斎藤和秀, 作榮二郎, 西裕宜 : 気泡組織計測に関わるラウンドロビン試験, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 38, No. 1, pp. 993-998, 2016.

(2016. 9. 20 受付)

EVALUATION OF AIR-VOID SYSTEMS IN CONCRETE BY POINT PROCESS STATISTICS AND ESTIMATION OF THE CONVENTIONAL SPACING FACTOR

Takuma MUROTANI, Hidefumi KOTO and Shin-ichi IGARASHI

Distribution of air voids in concrete was regarded as 2D spatial point processes. Characteristics of their distribution were evaluated by several spatial statistics functions. Furthermore, a characteristic distance between air voids was defined in the nearest neighbor distance function. Correspondence between the characteristic distance and the conventional spacing factor was investigated. Clustered distribution of air voids due to the presence of aggregate particles were properly estimated by the spatial statistics functions. However, as far as the cement paste matrix was concerned, it was possible to assume that air voids were distributed randomly except a range of short distances. Thus, spatial structure of air-void systems, in particular the characteristic distance between air voids could be simply simulated as a random point process. Furthermore, the characteristic distance of real air-void distribution was almost the same as the conventional spacing factor. Compared to the conventional spacing factor that is obtained by following the ASTM C457 procedure, the characteristic distance is quite easy to obtain. Furthermore, taking account of the fact that the characteristic distances measured for real distribution in concretes are plotted within the 95% confidence interval of binominal random point process, air-void systems in concrete can be assumed as 2D Poisson point process. Thus, a simple equation to obtain the spacing factor from a point process was proposed. The spacing factor was correctly estimated by the equation. Therefore, the characteristic distance of air voids defined in this study can be used as a new distance parameter between air voids, alternatively it may be used as a parameter to estimate the traditional spacing factor.