

論文 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

室谷 卓実*1・古東 秀文*2・五十嵐 心一*3・吉川 峻生*4

要旨: 市販のフラットベッドスキャナを用いて取得したセメントペーストの低倍率画像中の気泡の定量評価を行った。その結果、AE 減水剤を用いた場合、点密度と気泡体積率には非常に強い相関がみられ、ステレオロジーの観点から3次元における気泡個数とは関連付けられない2次元の点密度が、気泡体積をある程度反映していることが示唆された。また、エントレインドエアはエントラップトエアと比べて打ち込みから硬化までの損失が小さく、ランダムな分布を形成することが明らかになった。さらに、点密度および空気量が増加しても最近傍距離は一樣に小さくなるとは限らず、ある値に収束する傾向が存在することが示された。

キーワード: 画像解析, 点過程統計量, 空間分布, 気泡, スキャナ

1. 序論

コンクリートの微視的構造を明らかにすることは、コンクリートの性能を理解するうえで重要であり、画像解析法はその幾何学的特徴を定量的に評価できる点から注目されている。この画像解析法の発展により、例えばコンクリート中の気泡分布に関して ASTM C 457 に規定された肉眼による顕微鏡観察に要した労力が著しく軽減され、現在ではパーソナルコンピュータを用いた自動計測法も確立されている。例えば、仁木ら¹⁾は表面を黒色スタンプ液で着色し、気泡に白色充填剤を充填することで気泡部の識別を明確にし、画像解析によって2値化画像を取得し、従来では多大な労力と時間を要した気泡組織測定が比較的容易に得ることができると報告している。さらに、ASTM C 457 の修正ポイントカウント法との比較を行い、正の相関が得られることも報告している。また、鮎田ら²⁾は照度差を利用した画像解析法により取得した2値画像を用い、ASTM C 457 の手順に従って修正ポイントカウント法およびリニアトラバース法を適用して、自動処理によって簡便に気泡組織を測定できることを示している。さらに、従来の肉眼による方法との比較から、画像解析によって得られた結果の信頼度が高いものであることを報告している。

従来の ASTM C 457 の手順では、点解析である修正ポイントカウント法と線解析であるリニアトラバース法が用いられるが、これらの方法に代わる新しい解析方法を用いて気泡組織を評価した研究もある。小長井ら³⁾は画像解析による硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法の理論的根拠を明確にし、さらに計量形態学の分野での面積解析の原理を応用した新しい画像解析法を提案し、

その基礎理論を体系化している。また、太田ら⁴⁾は画像解析法を用いた気泡組織の測定を自動で行うことができる自動画像解析システムを開発し、従来法と比べて大幅な省力化および測定精度の向上を可能とした。さらに、面積解析の理論に基づいて気泡パラメータの計算が可能であると報告している。また近年では、従来の狭い領域を数100視野以上測定する部分解析ではなく、比較的安価なフラットベッドスキャナやデジタルカメラなどによって取得した画像を用いて、少ない視野でコンクリート表面の全体解析を行うことを目的とした検討も行われるようになっている^{5) 6)}。

以上のように、画像解析を用いてコンクリート中の気泡組織や気泡パラメータなどを評価した例は比較的多い。しかし、その研究の多くは耐凍害性と直接関連付けられる ASTM C 457 の試験で定められた気泡パラメータ、すなわち気泡量に加えて気泡間隔係数を求めることを目的としている。また、気泡間隔係数は仮想的に配置された気泡間の距離を反映した値であり、必ずしも実際に存在する気泡分布構造を再現する特性値とはいえない。これに対して、近年では画像情報を空間統計学に基づき、対象に対して何ら仮定を行うことなく定量的に評価することが一般的手段として確立している。この手順に従うならば、気泡分布構造を実際の距離をパラメータとして理解することが可能となる。そのような手段の一つとして着目粒子を点で表し、粒子の空間分布を定量化して評価する点過程理論がある。本法によれば、分布のランダム性や点間距離が確率に裏付けられた値として評価される。本研究においては、気泡の空間分布の基本特性を明らかにすることを目的とし、この点過程理論を骨材が存在せ

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (正会員)

*4 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

表-1 各試料の名称および混和剤量

水セメント比	名称	AE減水剤量 (C×%)	AE助剤量 (C×%)
0.4	Ref	-	-
	AE0.05	0.05	-
	AE0.10	0.10	-
	AE0.25	0.25	-
	AE0.50	0.50	-
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
0.45	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02
	Ref	-	-
	AE0.25	0.25	-
	AE0.50	0.50	-
	AE0.25-助剤0.01	0.25	0.01
	AE0.25-助剤0.02	0.25	0.02

ず分布上の拘束が小さいと考えられるセメントペーストの低倍率画像中の気泡に適用した。そして、気泡を点として簡便に処理することの妥当性を気泡体積との相関性および空間分布特性の差異の表現の可能性から検討した。

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 3.15g/cm³，比表面積 3310cm²/g）を使用し，セメントペーストの水セメント比を 0.40 および 0.45 とした。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。作製したセメントペーストの配合の名称および混和剤の量を表-1 に示す。JIS R 5201 に準じてセメントペーストを練り混ぜ，市販の小型エアメーターを用いて空気量を測定した。その後，40mm×40mm×160mm の角柱供試体を作製した。なお，本研究では木槌の打撃による締固めを行った。打ち込み後 24 時間にて脱型し，材齢 7 日まで水中養生（20℃）を行った。

2.2 試料の作製および画像取得

養生終了後，各供試体から厚さ 10mm 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，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

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（図-1(a)）。本研究では簡便性を考慮して取得する画像枚数は 10 枚とした。このときの解像度は 1200dpi とし，1 画素は 21.2μm 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，中心から 30mm×30mm を解析領域とした⁷⁾。また，デジタルマイクロスコープを用いて高倍率での気泡観察も行った。

2.3 画像解析

画像解析ソフトウェアを用いて，2.2 にて取得した画像に対し，モノクロ変換を行った。その後，平滑化フィルタ処理を行ってノイズを除去した後，グレースケールに基づく 2 値化処理を行い，気泡の 2 値画像を取得した。目視で判断できた未抽出箇所のみに対して，手動補正を施し気泡の 2 値画像とした（図-1(b)）。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方にに基づきこれを気泡体積率とした。さらに，画像解析ソフトウェアの機能を用いて，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 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ とした（図-1(c)）。

2.4 点過程統計量^{8) 9)}

(1) 点密度

点過程統計量とは，観察領域 W においてランダムに分散している点 $x_i \in X$ に関して，距離を変数としてその分布パターンを定量化し，点の分布特性を評価する確率関数である。その関数の計算において基本となるパラメータとして点密度 $\hat{\lambda}_p$ がある。点密度は単位面積あたりの点の個数を表し，式(1)により定義される。

$$\hat{\lambda}_p = N_p(W)/A(W) \quad (1)$$

ここに， $A(W)$ は視野 W の面積， $N_p(W)$ は視野 W 中の点の個数である。

(2) K 関数^{8) 9)}

K 関数とは，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正規化して表わしたものである。K 関数を用いることにより，点密度に関わらず，分布している点が 2 次元ランダム分布に比べて，規則性や凝集性を持った分布であるのかどうかを判定することができる。前

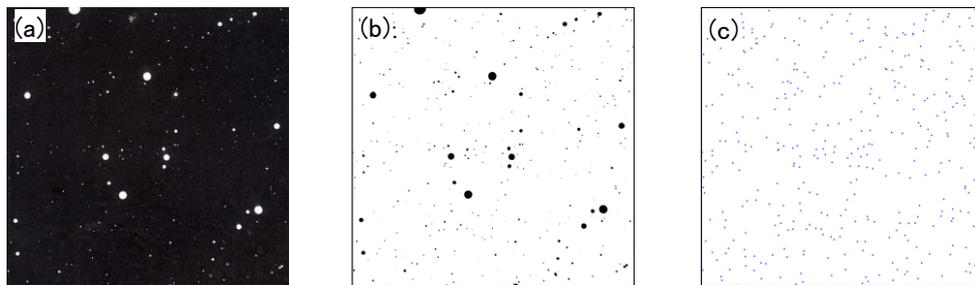


図-1 セメントペースト中の気泡の重心点抽出の例 (W/C=0.40-Ref)

(a) 気泡の画像 (b) 気泡の 2 値画像 (c) 重心点抽出結果

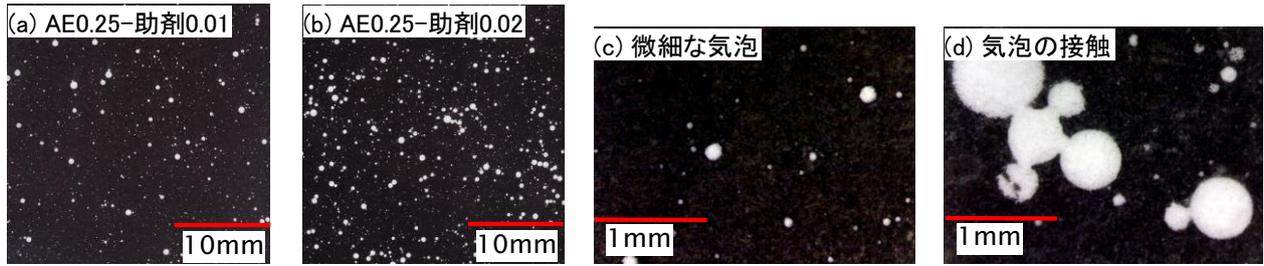


図-2 セメントペースト中の気泡の画像 (W/C=0.40)

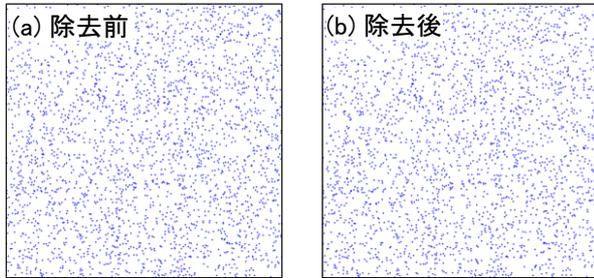


図-3 気泡の重心点の画像 (W/C=0.40)

述の点 $x_i \in X$ を中心とする半径 r の円領域 $b(x_i, r)$ 内に、他の重心点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在するか否かを判定し、K関数を式(2)より計算した。

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

ここに、 $1(\cdot)$ は (\cdot) 内が真であれば1、偽であれば0を与える指示関数である。エッジ補正係数 $s(x)$ は式(3)にて与えられ、式中の a 、 b は観察画像領域の辺長を表わす。

$$s(x) = ab - (2a + 2b - x)x/\pi \quad (3)$$

$$x = |x_i - x_j|$$

また、算出したK関数を式[4]によりL関数に変換した。

$$\hat{L}(r) = \sqrt{\hat{K}(r)/\pi} \quad (4)$$

(3) L関数による分布の有意性検定

K関数値の2次元ランダム分布からの偏差の有意性を判断するために、点密度から決定される点を二項点過程としてランダムに発生させるシミュレーションを繰り返す、このときのL関数値の95%信頼区間を決定した。実際の分布のL関数値と95%信頼区間を比較し、偏差の有意性の検定を行った。

(4) 最近傍距離関数⁸⁾

最近傍距離関数は点過程中の任意の点 $x_i \in X$ から距離 r 離れた位置に最近傍点 $x_j \in X (i \neq j)$ が存在する確率を求める関数であり、式(5)により求められる。

$$\hat{G}(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq r) \cdot 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N 1(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (5)$$

ここに、 s_i は最近傍距離、 b_i は各点から画像縁までの最短距離である。また、 $w(s_i)$ はエッジ補正係数であり、前述の 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 x 、 y とすると、式(6)により与えられる。

$$w(s_i) = \{(x - 2s_i) \cdot (y - 2s_i)\}^{-1} \quad (6)$$

3. 結果および考察

3.1 画像中の気泡の特徴

図-2 に市販のフラットベッドスキャナで取得したAE助剤使用のセメントペースト中の気泡の画像を示す。これより、セメントペースト中には様々な径の気泡が存在し、混和剤を使用することによって気泡が増加したことが目視でも確認できる。また、顕微鏡を用いた拡大観察を行うと(図-2(c))、 $30\mu\text{m}$ 程度の微細な気泡が存在することが確認できる。これより、白粒は微細な気泡にも充填されていると考えられる。また、いずれの水セメント比の場合も、混和剤を過度に混入した場合には(図-2(b))、比較的径の大きな気泡が多く見られ、中には気泡同士が接触した大きな気泡が多数観察された(図-2(d))。作榮ら¹⁰⁾は、AE剤により連行された気泡はブリーディング水により気泡の凝集体が形成されれば、それらの気泡同士が合わさって1つの気泡となる合一や気泡が消失する破泡という現象が起こることを指摘している。本研究においては、気泡の分散する空間はセメントペーストマトリクス全体であり、骨材を含んでいない。それにもかかわらずこのような気泡同士の接触が比較的多数認められるということは、実際の骨材の存在する系では骨材による分布の制限があり、より高い頻度で接触を生ずると推察される。

図-3(a)に図-2(b)の気泡画像を、画像解析ソフトウェアを用いて重心点に置き換えた画像を示す。図-2と比較すると、点の数が多く感じられるが、これは図-2中には寸法が1画素程度の微細な白色部分が存在するためである。一般にAE剤を使用した場合は、直径が $30 \sim 250\mu\text{m}$ 程度の範囲の気泡が一樣に形成されるようである¹¹⁾。よって、1画素程度(約 $20\mu\text{m}$)の白色部分は必ずしも気泡とは限らないと考えられる。さらに、そのような多数の白色の微細粒子が1断面に存在することから、大きな気泡が一樣に配置されていてその端面の切断面が一斉に現れているとは考えられない。よって、本研究にお

表-2 画像から得られた気泡の情報

水セメント比	0.40							0.45				
	名称	Ref	AE0.05	AE0.10	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01	AE0.25 -助剤0.02	Ref	AE0.25	AE0.50	AE0.25 -助剤0.01
点密度 (個/mm ²)	0.46	0.80	0.89	2.02	2.43	2.89	3.06	0.51	1.87	1.99	2.69	2.57
平均気泡径 (μm)	123	135	138	120	118	100	126	134	117	122	96	129
フレッシュ時の空気量 (%)	2.4	3.3	3.4	4.9	6.4	6.0	8.5	3.5	4.9	6.2	5.8	9.5
硬化後の気泡体積率 (%)	1.0	1.9	2.1	3.5	4.4	3.7	7.3	1.2	3.0	3.7	3.5	6.9
気泡体積率の変動係数	0.13	0.15	0.05	0.06	0.12	0.04	0.06	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09
残存率 (%)	41.7	56.6	63.1	72.2	69.0	62.0	85.9	34.2	62.1	59.9	60.1	72.9
フロー値	195	203	213	222	249	228	227	228	259	288	263	267

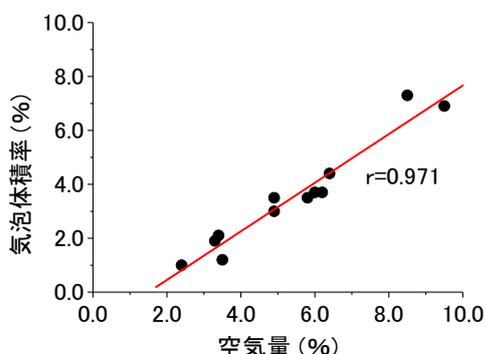


図-4 空気量と気泡体積率の関係

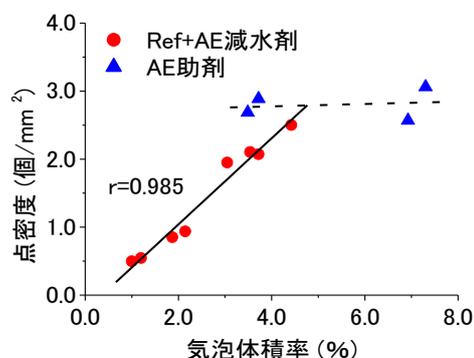


図-5 気泡体積率と点密度の関係

いては、30μm 以上を気泡とし、それ以下は気泡以外の表面の凹凸部に起因したものとみなして除去を行った。30μm 以下の微粒子の重心点を除去した結果を図-3(b)に示す。この場合でもかなりの点が存在し、AE 助剤により細かい気泡がいかに多数連行されているかが理解される。ASTM C 457 では観察のための最低倍率が規定され、スキャナにより取得した低倍率画像はその倍率条件を満足していない。しかし、上述のように気泡径の範囲は可視であること、また十分な個数の気泡が存在することから、その解析により気泡の空間分布を特徴づけることは可能であると判断した。

表-2 に 30μm 以下の粒子を除去した画像から得られた気泡の情報の一覧を示す。また、図-4 にエアメーターにより測定した空気量と画像解析により求めた気泡体積率の関係を示す。フレッシュ時の空気量と硬化時の気泡体積率には非常に強い相関が認められるが、両者の間にはほぼ一定の差があり、常に画像から求めた気泡が2%程度低くなっている。この原因としては打ち込みから締固めの際に失われた気泡および30μm 以下の微小な気泡の存在などが考えられる。しかし、上述のように30μm 以下の微細な気泡が気泡体積に占める割合はそれほど大きくないことを考えると、この差は打ち込みから締固めまでの間に失われた気泡による影響が大きいと考えられる。また、エントレインドエアが混入された系の気泡の残存率はエントラップトエアのみの場合よりも高くなっており、また低水セメント比のほうが残存率が高い(表-2)。これより、練り混ぜの際に巻き込まれるエントラ

ップトエアは混和剤によって連行されるエントレインドエアよりも失われやすく、その損失は水セメント比やフロー値の相違によって変化すると考えられる。さらに、概して気泡体積率の変動もそれほど大きくはないようであり、特にエントレインドエアが連行されるようになると変動係数も概ね小さくなる傾向がみられる。

3.2 気泡面積率と点密度の関係

図-5 に気泡体積率と点密度の関係を示す。AE 減水剤の混入量を変化させた場合(図-5 中の赤点)は、水セメント比に関係なく気泡体積率と点密度の関係は直線近似が可能で、非常に強い相関がみられる。2 次元断面に現れる粒子数、すなわち点個数はステレオロジーの観点からは3次元空間内における個数情報と直接結びつけることはできない。したがって、点密度から対象粒子の体積率を直接求めることはできない。しかし、図-5 に示すような相関が認められることは、点密度が気泡量の有効なパラメータになりうることを示し、点過程統計の適用の可能性を示すものと考えられる。しかしその一方で、AE 減水剤に加えてさらに AE 助剤を添加した場合(図-5 中の青点)、前述のような直線とは明らかに異なる傾向を示している。このことについてはさらに検討を要するが、前述のように気泡個数が増加して気泡の間隔が狭くなり、気泡の合一の影響が現れていると考えられる。

3.3 気泡の空間分布特性

図-6 に混和剤を使用していないときの気泡、すなわちエントラップトエアの K 関数を示す。図中のポアソンは、2次元ランダム分布に相当する K 関数を示している。

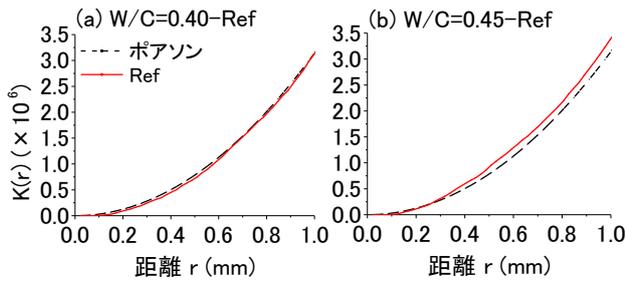


図-6 エントラップトエアのK関数

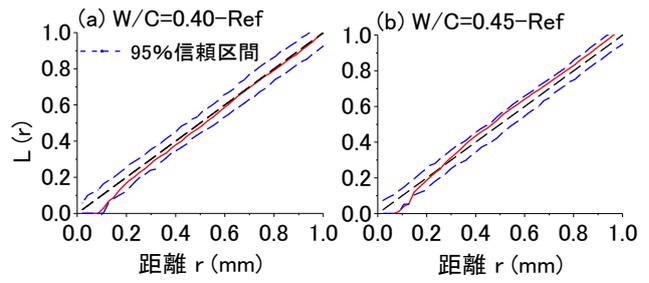


図-7 エントラップトエアのL関数

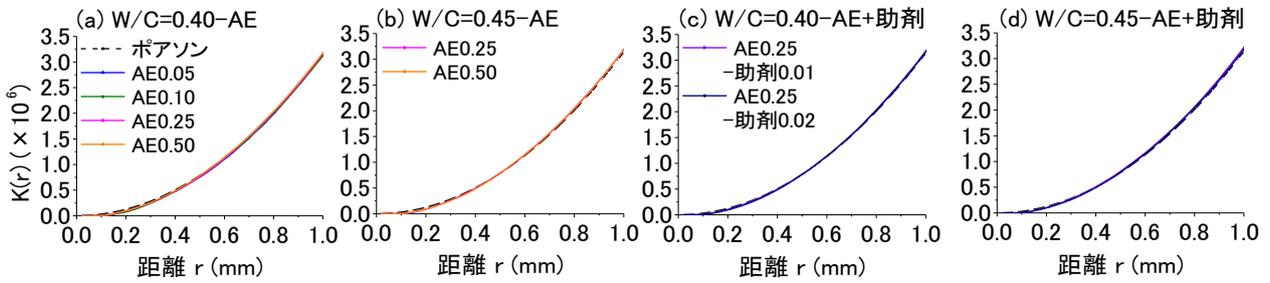


図-8 エントレインドエアのK関数

水セメント比が0.40の場合はほぼランダム分布に一致しており、気泡はランダムに空間内に分布している。これに対して水セメント比が0.45の場合は凝集側と判断されるような分布を示している。この偏差の有意性を評価するため、同じ点密度の二項点過程としてシミュレーションを行った。L関数の95%信頼区間との対応を図-7に示す。L関数は信頼区間内にプロットされており、ポアソン過程であるとする帰無仮説は棄却されずランダムに分布しているとみなされる。よって、セメントペースト中のエントラップトエアは基本的にランダム分布を形成するが、水セメント比やフロー値などのフレッシュ特性の違いによって変動が現れやすいものと思われる。

図-8に混和剤を加えた場合のK関数を示す。いずれの場合も気泡はほぼ完全にランダムに分布している。つまり、エントラップトエアのみでは若干不均質な分布にもなりうるセメントペースト中の気泡の空間分布も、エントレインドエアが連行されれば、本研究における打ち込みから締め固め過程において気泡の損失を生じたとしても、ランダムな空間分布を形成すると考えられる。

図-9に混和剤を添加した場合の気泡の最近傍距離関

数を示す。図中の破線はその試料における気泡が2次元ランダム分布を示す場合の最近傍距離関数を表す。距離の短い範囲にて、気泡そのものが点ではなく大きさを持つことの影響によるハードコア領域(x切片値)がいずれのセメントペーストにも認められ、その距離はほぼ等しくなっている。その後、最近傍距離関数はほぼ完全なランダム分布に従って変化している。これらの図において、関数値1.0は累積確率関数で表される最近傍距離関数の収束距離であり、この収束距離以上の距離においては点が必ず最近傍点が存在することを示している。

図-10に最近傍距離関数の収束距離と点密度の関係を示す。また、図-11に最近傍距離関数の収束距離と気泡体積率の関係を示す。いずれも同様な傾向を示しており、このことから点密度と気泡体積率には相関関係があることがうかがえる。また、点密度および空気量の増加にともない収束距離が短くなっている。これは、セメントペーストマトリックス中に点が増えたことにより、点間距離が全体として小さくなっていることを示す。しかし、空気量もしくは点密度が増えても、収束距離は単調に減少するとは限らず、約1.0mm程度にて収束するよ

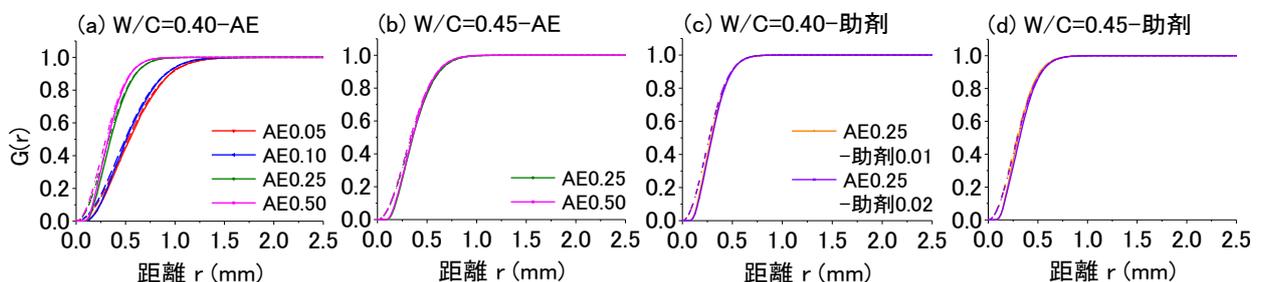


図-9 セメントペースト中の気泡の最近傍距離関数

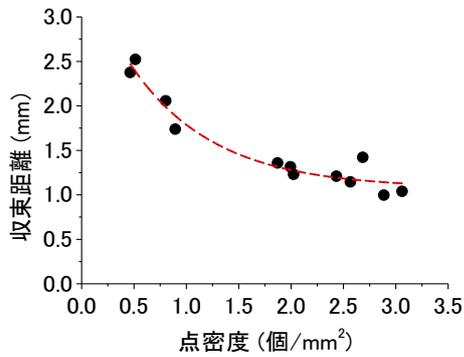


図-10 収束距離と点密度の関係

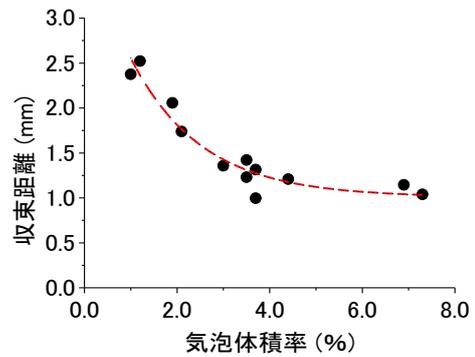


図-11 収束距離と気泡体積率の関係

うにみえる。これは、空気が増加して気泡個数が増えても、ある量に達すると必ず最近傍点を見出せる最大距離が変わらなくなることを示唆しており、気泡分布を点で表わしたときの分布を特徴づける距離に変化がなくなることを意味する。言い換えれば、点で気泡分布を考える場合の分布の構造単位が小さくなり、より狭い範囲によって分布を特性化しうることを示すものと考えられる。

4. 結論

骨材が存在せず分布上の拘束が小さいと考えられるセメントペースト中の気泡の空間構造を点過程統計量により評価し、基本特性を明らかにした。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) エントラップトエアはエントレインドエアよりも失われやすく、その損失はフレッシュ特性によって変化しやすいと考えられる。
- (2) AE 減水剤を用いた場合、気泡体積率と点密度には非常に強い相関があり、点個数が気泡量の有効なパラメータになりうることを示唆された。しかし、AE 助剤を用いた場合は異なる傾向を示し、これは気泡の合一の影響が現れていると考えられる。
- (3) セメントペースト中の気泡の空間分布は、エントラップトエアのみでは若干不均質な分布にもなりうる。しかし、エントレインドエアが連行されれば、打ち込み過程において気泡の損失を生じたとしてもランダムな空間分布を形成すると考えられる。
- (4) 空気量もしくは点密度が増えると、最近傍点の収束距離は約 1.0mm 程度にて収束する傾向がみられ、セメントペースト中の気泡分布はより狭い空間単位によって分布を特性化しうると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、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, 研究代表者: 五十嵐心一)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 仁木孟伯, 地頭菌博, 原田克己: 画像解析装置を用いた硬化コンクリート中の気泡組織測定方法について, セメント・コンクリート論文集, Vol.39, pp141-145, 1985
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 田辺寛一郎: 硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析, 土木学会論文集, No.420, Vol.13, pp81-86, 1990
- 3) 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解析理論, 土木試験所月報, No396, 1986
- 4) 太田利隆, 大橋猛, 小長井宣生, 根本任宏: 自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について, コンクリート工学年次論文集, Vol.8, No.0, pp.389-392, 1986
- 5) 安部洋平, 青木正雄, 辻厚志, 中村良太: 硬化コンクリートの気泡組織分布判定に関する研究, 農業土木学会全国大会講演要旨集, pp572-573, 2005
- 6) 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
- 7) 五十嵐心一, 米山義広: 若材齢におけるセメントペーストの組織の特徴とその定量評価, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.115-122, 2007
- 8) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J.: STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995
- 9) 島谷健一郎: 点過程による樹木分布地図の解析とモデリング, 日本生態学会誌, Vol.51, No.2, pp.87-106, 2001
- 10) 作榮二郎, 橋本学, 菅俣匠, 坂田昇: 中庸熟フライアッシュセメントを用いたコンクリートの気泡組織に及ぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1408-1413, 2014
- 11) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996