

# 点過程法とリニアトラバース法によって求めたコンクリートの気泡特性値の比較に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 室谷, 卓実, Murotani, Takuma メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/00056513">http://hdl.handle.net/2297/00056513</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



要旨

博 士 論 文

点過程法とリニアトラバース法によって求めた  
コンクリートの気泡特性値の比較に関する研究

Comparison of air void parameters in concrete evaluated by spatial point process and linear traverse methods

論 文 要 旨

金沢大学大学院

自然科学研究科 環境デザイン学専攻

室谷 卓実

## 要旨

### Abstract

In order to evaluate the frost resistance of concrete in detail, it is necessary to determine the spatial distribution of air voids. The point process theory can be used for evaluating the spatial distribution easily. If it is applied to air voids in concrete, it is possible to evaluate the distribution and the distances between air voids. The applicant for the dissertation has defined a characteristic distance as an alternative to the spacing factor defined in ASTM C457. For low magnification images, the applicant has been pointing out that the parameters deduced from the spatial statistics function do not contradict the spacing factor. The purpose of this study is to determine and compare characteristic distances and spacing factors using high magnification images that meet the requirements of ASTM C457. As a result, even for high magnification images, distance parameters using the point process statistics do not contradict the spacing factor. In particular, the characteristic distance to represent the air-void system is almost comparable when a proper amount of air is entrained in concrete. Furthermore, all the procedure to obtain the characteristic distance can be done with free reliable software. The proposed method is quite promising as a practical evaluation technique.

### 1. 序論

コンクリートの耐凍害性を詳細に判断するためにはコンクリート中の気泡の空間分布を評価することが重要となる。一方、空間に分布した対象物を比較的簡単に評価する手段として点過程の考え方がある。これに従うならば、個々の気泡を点に置き換えることにより、分布のランダム性や点間距離をそのままの状態、確率論に裏付けられた定量的な値として簡単に求めることができる。さらに、現在では一般に公開されていて無償で入手できる統計解析ソフト「R」に、点過程統計量の計算やグラフ化を行えるパッケージが提供されており、これを用いれば誰でも容易に点過程統計量の計算が可能となる。学位請求者はコンクリート中の気泡に点過程理論を適用し、コンクリート中の気泡の空間分布の評価を行ってきた<sup>1) 2)</sup>。特に、気泡間の距離に着目し、最近傍距離分布関数から定義した代表値と簡単な画像解析操作により求められる平均気泡径を用いて、気泡間隔特性値を定義し、これと従来用いられてきた気泡間隔係数との対応を検討した<sup>1) 2)</sup>。その結果、気泡間隔特性値と気泡間隔係数の間には非常に良好な相関関係が存在し、気泡間隔特性値が気泡間隔係数に代わる耐凍害性評価の指標になる可能性が強く示唆された。しかし、これらの結果は市販のスキャナーで取得した低倍率画像から得られたものであり、ASTM C457 に規定された条件を満足するような高倍率画像から得られたものではない。例えば、ASTM C457 の規定では径 10 $\mu\text{m}$  の気泡を同定できるレベルの高倍率画像を要求しており、そのような画像では気泡数はスキャナー画像に比べて著しく増大する一方で、観察視野は小さく制限される。この場合、視野内の気泡分布は骨材の存在に強く影響されることになり、気泡分布のランダム性はスキャナー画像とは大きく異なることも考えられる。

本研究においては、ASTM C457 のリニアトラバース法による気泡間隔係数と、学位請求者が定義した気泡間隔特性値の対応を、観察倍率が異なる場合、および ASTM C457 の規定を満足する高倍率画像間で比較した場合について、明らかにすることを目的としている。その結果に基づき、点過程理論に基づく気泡間隔特性値の計測手法（点過程法）が、リニアトラバース法に代わる耐凍害性評価手法としての極めて有望な手法であることを示す。

## 要旨

表-1 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	S/a (%)	目標スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						フレッシュ性状	
					W	C	S	G	AE減水剤 (C.wt%)	AE剤 (C.wt%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
SL8	55	48.4	8±2.5	4.5~	167	304	881	950	1.1	0.002	10	6.7
SL18	55	49.3	18±2.5	4.5~	185	337	860	894	1.1	0.002	19.5	6.3

表-2 ラウンドロビン試験結果

配合	空気量 (フレッシュ)	空気量 (硬化)	トラバース全長 (mm)	全弦長 (mm)	気泡数 (個)	平均弦長 (mm)	気泡個数密度 (個/mm)	気泡間隔係数 (mm)
	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(個)	(mm)	(個/mm)	(mm)
全機関平均	SL8	6.7	6.1	2555	155	944	0.165	0.37
	SL18	6.3	6	2549	154	775	0.2	0.3
代表機関	SL8	-	5.8	2468	142	935	0.152	0.38
	SL18	-	6.2	2432	151	778	0.194	0.32

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	目標スランブ (cm)	設計空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュ時空気量 (%)	
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
50	45	10±2	3.0	165	330	813	1027	0.004	3.7
50	45	10±2	4.5	165	330	797	1003	0.007	5.0
50	45	10±2	6.0	165	330	779	982	0.01	6.5

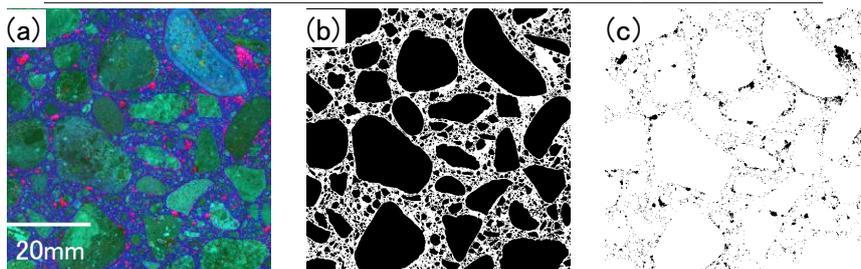


図-1 RGB 画像による骨材および気泡の抽出手順

## 2. 実験概要

本研究で用いたコンクリートの配合を表-1、表-2 および表-3 に示す。表-1 のコンクリートは、日本コンクリート工学会研究委員会「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 TC141A」評価ワーキンググループにて実施された硬化コンクリートの気泡組織計測に関わるラウンドロビン試験に用いられたものである。後述する「4. 観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の気泡分布特性の比較」ではこのラウンドロビン試験の結果を用いた (表-2)<sup>3)</sup>。その試験で用いられたコンクリート供試体の提供を受け、スキャナーにて低倍率画像 (分解能: 30μm) を取得した。RGB 解析により骨材相、セメントペーストマトリックスおよび気泡をそれぞれ異なる色で表示した画像 (図-1 (a)) を作成し、骨材やセメントペーストマトリックス相の抽出を行なった (図-1 (b))。気泡の2値画像は、断面の黒色処理と微細白色粉末を充填する方法を用いて取得した (図-1 (c))。表-3 のコンクリートは所定材齢にて供試体から 100×100×30mm 程度の板状試料を切り出し、その表面を精細研磨した後に洗浄および乾燥を行った。研磨面中央部 (60×60mm) を計測対象領域とし、高精度 CCD カメラを用いて撮影された研磨面のグレースケール高精細画像 (分解能 3μm/画素) を取得した。なお、画像取得の際は、対象領域を 11×11=121 個の小分画 (1 分画は約 6.14mm×6.14mm, 2048 画素×2048 画素, 分解能は 3μm/画素) に分割して取得している。それらの個々の分画画像取得時にて、順光と斜光照射

## 要旨

を繰り返し行い、陰影の差分により気泡を自動的に抽出した。抽出した気泡の2値画像に対してリニアトラバース法を適用した。また、スキャナーにて低倍率画像も取得し、前述と同様の手順で画像解析を行った。

### 2.1 気泡間隔係数の計算<sup>4)</sup>

ASTM C457に従って気泡間隔係数 $L$ を求めた。

### 2.2 リニアトラバース法にて求められる平均弦長からの点密度の計算<sup>5)</sup>

リニアトラバース法では気泡を単一寸法球(直径 $D_V$ )の集合と考えている。コンクリートの断面にて規定の走査線全長になるように、複数の走査線のあるピッチで複数引いたとき、気泡を横切る長さの平均値(平均弦長 $\bar{l}$ )と単一寸法の気泡球の半径 $R$ との間には、次式の関係がある<sup>4)</sup>。

$$\bar{l} = \frac{4}{3}R \quad (1)$$

すると、気泡の直径 $D_V$ は $1.5\bar{l}$ となり、この寸法の気泡球が多数存在して、全空気量体積 $V_A$ に達している状態を仮想的に考えている。単位体積のコンクリート中に存在する気泡数を $n$ とすれば、

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{1.5\bar{l}}{2}\right)^3 n = V_A \quad (2)$$

よって、コンクリートのペースト率 $p(\%)$ のとき、セメントペーストマトリックス単位体積当たりの気泡数 $N_V$ は、次式にて与えられる。

$$N_V = \frac{n}{pV_c + V_A} \quad (3)$$

ここに、 $V_c$ はコンクリートの体積であり、 $V_A/V_c = A$ である。気泡が単一寸法の直径 $D_V$ の球であることを考え、DeHoff & Rhine 式<sup>5)</sup>を用いると、単位体積当たりの気泡数 $N_V$ から、単位面積当たりの気泡数 $N_A$ 、すなわち気泡点密度 $\lambda_A$ が求められる。

$$N_A = E[H]N_V \quad (4)$$

$E[H]$ は切断面に垂直な方向への粒子の平均投影高さであり、単一寸法球を考える場合には、 $E[H] = D_V$ となる。

### 2.3 代表体積要素の計算<sup>6)</sup>

気泡特性評価を不均質分布を持つ母集団から抽出した標本による母集団特性の推定とみなすとき、どの大きさの寸法の標本をいくつ抽出するかで、推定値は異なりうる。この寸法以上の領域が母集団の不均質性を再現するのに十分な情報を持つ、もしくはこれ以上の領域に拡大すると、推定しようとしている特性値の誤差(変動係数)が予め設定していた値よりも小さくなると考えられる最小体積を代表体積要素 $V_{RVE}$ と称される。画像分画数を増大させたときの標本誤差に対する変動係数を求めた。なお、本研究においては、対象は2次元断面であるので、以後、代表面積要素と称す。抽出する画像分画の大きさに対する代表面積要素を式(5)および(6)により求めた。

$$V_{RVE} = \frac{4(1-A)A^2}{nA\epsilon^2} \quad (5)$$

$$A_2 = \frac{D_A^2(V) \cdot V}{A(1-A)} \quad (6)$$

要旨

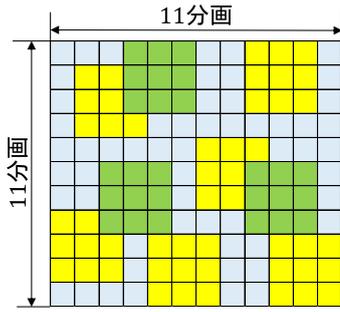


図-2 面積解析法の解析対象領域からの分画抽出例  
(3×3分画, 9箇所ランダム抽出)

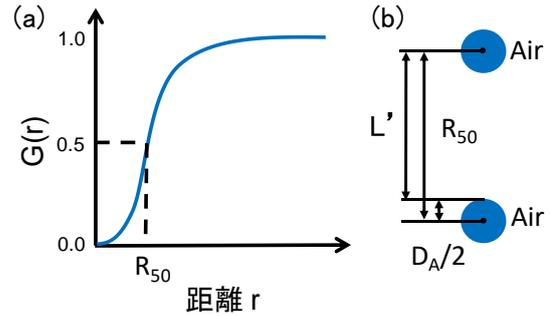


図-3 メディアン距離  $R_{50}$  と気泡間隔特性値  $L'$  の  
模式図

ここに、 $A$  は空気量、 $N$  は標本数、 $\varepsilon$  は相対誤差、 $A_2$  は計測された空気量の分散に関する値、 $D_A^2(V)$  は分画面像  $V$  の計測の空気量の分散である。相対誤差 0.1 までを許容するものとし、標本数は一般的なコンクリート組織の画像解析の実務上の作業負荷と本研究における分画面数を考慮して、画像枚数を 9 枚とした。121 枚の分画面中、抽出する分画面数を 1 から 81 (縦横  $1 \times 1$  から  $9 \times 9$  分画面からなる正方形領域) まで変化させた。それぞれの分画面数にてランダムに領域を 9 箇所抽出して、その分画面領域内の気泡分布に関する特性値とそれらの標本分散を求めた (図-2)。

### 3. 点過程統計量

コンクリート中の気泡画像を取得し、その特徴量をステレオロジーの考えから 3 次元における特徴量とした。重心点座標を求め、気泡を重心点に置き換え画像中の点の距離に関する特徴を点過程理論に基づき評価した。本研究にて用いた主な点過程統計量を以下に示す。

#### 3.1 点密度<sup>1)</sup>

観察領域内の点の個数を観察領域面積で除して点密度  $\lambda_A$  を求めた。

#### 3.2 最近傍距離分布関数 (G 関数)<sup>1)</sup>

最近傍距離分布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、累積確率で表したものである。統計解析ソフト「R」を用いて最近距離分布関数を求めた。最近距離分布関数を式(7)に示す。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq r) \cdot \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^N \mathbf{1}(s_i \leq b_i) \cdot w(s_i)} \quad (7)$$

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

ここに、 $s_i$  は最近傍距離、 $b_i$  は各点  $x_i$  から画像縁までの最短距離、 $\mathbf{1}()$  は  $()$  が真であるときに 1、偽のときは 0 を返す指示関数、 $w(s_i)$  はエッジ補正係数である。

#### 3.3 気泡間隔特性値<sup>1)</sup>

最近傍距離分布関数を代表する特性値として本研究においては累積確率分布で表された距離の第 2 四分位点 (メディアン) の距離をメディアン距離  $R_{50}$  と定義した (図-3 (a))。メディアン距離  $R_{50}$  と画像解析にて取得した平均気泡径  $D_A$  から気泡間隔特性値  $L'$  を求めた (図-3 (b))。

### 4. 観察倍率の異なるコンクリート断面画像中の気泡分布特性の比較<sup>5)</sup>

要旨

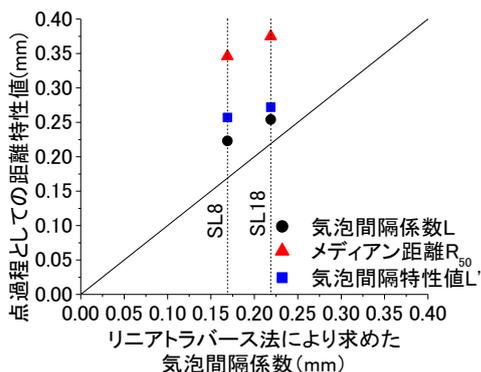


図-4 リニアトラバース法と点過程法の距離特性値の対応

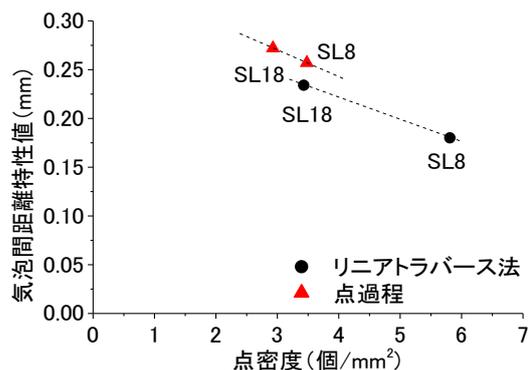


図-5 スキャナー取得と同じ低倍率を想定した場合の気泡数と距離特性の対応

表-4 気泡特性の比較

		配合	平均弦長 $l$ (mm)	気泡直径 $D_v$ (mm)	気泡間隔係数 $L$ (mm)	気泡個数密度 $N_A$ (個/mm <sup>2</sup> )
リニアトラバース法 (高倍率画像)	減数前	SL8	0.152	0.228	0.174	6.61
		SL18	0.194	0.291	0.212	3.95
	減数後	SL8	0.161	0.242	0.18	5.81
		SL18	0.207	0.311	0.234	3.43
点過程法 (低倍率画像)		SL8	-	0.178	0.233	3.48
		SL18	-	0.205	0.254	2.93

図-4 に点過程として評価された気泡の距離特性値とリニアトラバース法の気泡間隔係数との対応を示す。明らかに、気泡を点過程としてみなして求めたいずれの距離特性値も、リニアトラバース法の気泡間隔係数よりも大きい。しかし、画像解析による面積解析法<sup>4)</sup>にて求めた気泡間隔係数とリニアトラバース法の気泡間隔係数の差は、コンクリート SL8 と SL18 でそれぞれ 0.055mm および 0.026mm と画素にして 1~2 画素程度でしかなく、その大小関係もリニアトラバース法のそれと一致している。また、この  $L'$  の値と面積解析法にて得られた気泡間隔係数との差も高々 0.020mm 程度である。また、点過程統計量から得られたメディアン距離とリニアトラバース法の気泡間隔係数の差は、コンクリート SL8 と SL18 のいずれにおいても大きい。大小関係は一致している。メディアン距離に平均気泡径を考慮した気泡間隔特性値ではその差は小さくなり、その差は、コンクリート SL8 と SL18 でそれぞれ 0.079mm および 0.044mm と画素にして 2 画素程度である。大小関係もリニアトラバース法のそれと一致している。気泡間隔係数は立方体格子の対角線の半長に気泡半径を引いた値であり、気泡径が考慮されている。一方、点過程統計量から得られる特性値も気泡径を考慮することでその値が気泡間隔係数値に近づくことが確認された。このことは点過程統計量から得られる特性値にも気泡間隔係数と同様に気泡径を考慮する必要性を示唆している。

表-4 に実測データにて、0.030mm 以下の弦長の気泡を減数したときの気泡空間の特性値を減数前の結果および実際に観察した結果とともに示す。全数を考慮した場合に比べて、平均弦長と気泡球の直径は大きくなり、気泡間隔係数も大きくなる。しかし、分解能の低下にともなう気泡数の減数を考慮したとしても、個数密度は実際に観察された点密度よりも依然として大きい。

図-5 に同じ倍率（分解能）を想定して 0.030mm 以下の弦長を減数したときの、気泡間距離特性値と点密度の対応を示す。点密度の範囲はリニアトラバース法と点過程法では大きく異なる。しかし、耐凍害性の判断に関して重要な特性と考えられる距離特性に着目すると、その変化率は両者にてほぼ等しい。点密度 1 の変化に

要旨

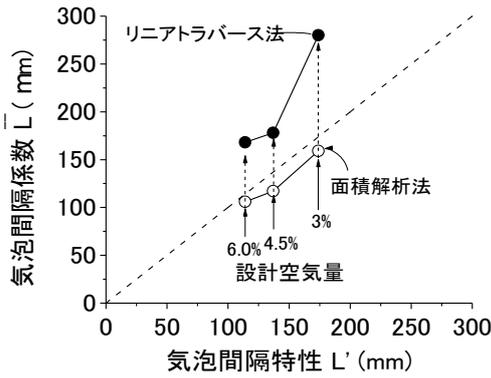


図-6  $\bar{L}$  と  $L'$  の対応

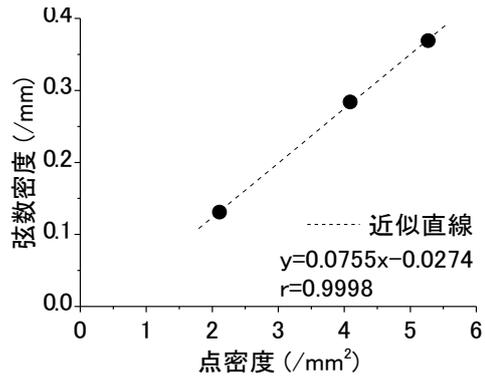


図-7 弦数密度と点密度の対応

対する距離特性値の変化は、リニアトラバース法の気泡間隔係数で  $0.027\text{mm}/\text{個}$ 、点過程の特性値  $L'$  で  $0.023\text{mm}/\text{個}$  である。このことは、スキャナーにより簡単に取得できる等倍の画像にて同定された気泡個数の変化が、従来の気泡間隔係数の決定における単一寸法の気泡数の変化と対応することを示すと考えられる。換言すると、低倍率画像にて観察される点過程としての気泡数は、従来の気泡間隔係数を決定する系における気泡数と同等に気泡間距離特性を変化させると考えてよいようである。低倍率画像中にて点として視認される気泡の数が、そのままリニアトラバース法にて想定する気泡数と同等の指標になることは、気泡数の大小から直感的に気泡間隔係数と関連付けて気泡組織を判断することが可能となることを示唆し、実務上の簡便で有用な特性であると考えられる。

5. リニアトラバース法と点過程法を同一画像情報に適用して評価した気泡間距離特性値の比較<sup>7)</sup>

図-6 はリニアトラバース法と面積解析法にて求めた気泡間隔係数と点過程法にて求めた気泡間隔特性値の対応を示したものである。空気量 3.0% の配合では、リニアトラバース法による気泡間隔係数は約  $280\mu\text{m}$  と大きく、一般に推奨される値の上限に近い値である。リニアトラバース法により求めた気泡間隔係数は常に気泡間隔特性値よりも大きな値を示し、特に空気量 3.0% のコンクリートではその差は約  $100\mu\text{m}$  と大きい。しかし、設計空気量が大きくなると気泡間隔係数と気泡間隔特性値の差は小さくなり、約  $50\mu\text{m}$  程度にまで減少している。これに対して、面積解析法にて気泡間隔係数を求めた場合は、気泡間隔係数と気泡間隔特性値の関係は等値線の近傍にプロットされ、その差は最も大きな場合でも高々  $10\mu\text{m}$  程度である。よって、両者はほぼ一致しているとみなしてよいと思われる。

図-7 に弦数密度と点密度の対応を示す。両者の間には極めて良好な相関性が存在している。よって、トラバース線を顕微鏡下において、それに載った気泡弦長を逐次記録するという労力を要する作業を、単純に全体の気泡個数を求める作業に置き換えたとしても、従来法のトラバース線にて検出される気泡の確率過程としての存在のランダム性は、点密度に線形的に反映されているとみなせる。参照空間内にある気泡のような粒子の計数は、一般的な画像解析ソフトの基本機能であり、点密度の計測は容易に行える。また、前述のように点過程法の距離特性値は、より多くの標本数に基づいて決定された信頼性の高い気泡間隔係数とほぼ等しい。すなわち、点過程法は従来取得されてきた気泡情報と矛盾しない実際の気泡系の直接的な評価値を与え、また、その値も同程度であるので、結果として気泡間隔特性値と気泡間隔係数は相互に参照できることになる。すなわち、点過程として処理することで気泡間隔特性値が簡単に得られ、ひとたびそれが得られれば、多くの研究実績や

## 要旨

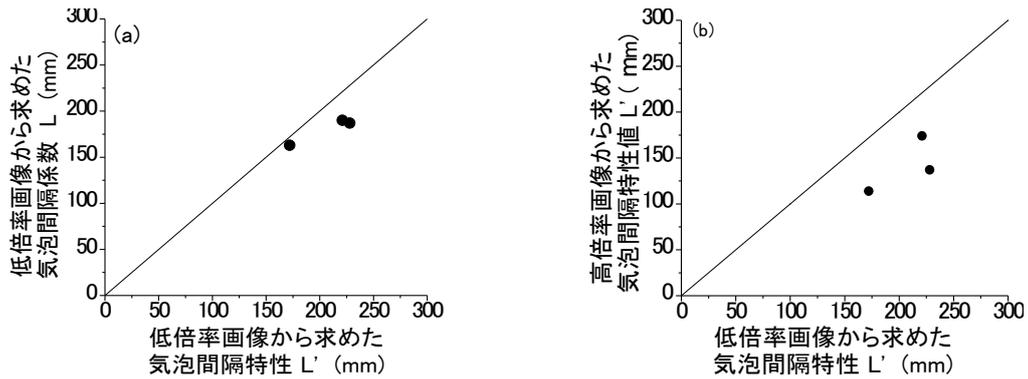


図-8 低倍率画像から得られた気泡間隔係数  $L$  と気泡間隔特性値  $L'$  の対応 (a) と異なる倍率での気泡間隔特性値の比較 (b)

実測データに裏付けられている気泡間隔係数と同様な判断基準に基づいて耐凍害性が評価できることになり、その意義は大きいと思われる。

図-8 にスキャナー画像中の気泡の気泡間隔係数と気泡間隔特性値 (図-8 (a)), および高精細画像の気泡間隔特性値とスキャナー画像の気泡間隔特性値の対応 (図-8 (b)) を示す。微細な気泡を検出できないために、平均気泡径や最近傍距離は大きくなる。その結果としてスキャナー画像から求めた気泡間隔係数も気泡間隔特性値も、図-6 の高倍率の観察に基づいて求めた結果と比較すると、距離の大きい側へとプロットは移動している (図-8 (a))。しかし、気泡間隔特性値の方が気泡間隔係数よりもやや大きくなる傾向は、高倍率下で気泡を同定した場合と同様であり、その差も約 1 画素、 $30\mu\text{m}$  程度の差に過ぎない。一方、図-8 (b) のように観察倍率が異なる場合は、検出される気泡数の影響が強く現れるので、気泡間隔特性値間の相違は  $50\sim 100\mu\text{m}$  と拡大する。また、異なる倍率間での気泡間隔特性値間の線形的な対応が認められない。低倍率での気泡観察ではスキャナー分解能以下の微細な気泡が計数されないことが、高倍率における気泡空間構造との相関性に影響を与えていると考えられる。同じ倍率の場合、点過程法による気泡間隔特性値  $L'$  は気泡間隔係数と対応することが確認された。よって、気泡検出法の影響を含め、観察倍率の違いによる気泡数の減数が高倍率における気泡空間構造との相関性に及ぼす影響について明確にすることができれば、低倍率画像を用いて気泡間隔特性値  $L'$  を求める手法が、簡便な耐凍害性評価手法になりうると考えられる。

## 6. 異なる計測方法による気泡特性値の相違と変動<sup>6)</sup>

図-9 は空気量に関する代表面積要素の大きさを示したものである。抽出する観察領域面積が小さい範囲では、観察領域を拡大していくと代表面積要素も大きくなるが、その後、観察領域の拡大とともに徐々に低下する傾向を示す。このとき、観察領域面積が小さい範囲では、代表面積要素は観察面積よりも大きい。よって、面積解析法にて気泡特性を求めようとするとき、標本数 9 個にて所定の精度で推定するにはもっと広い領域を観察しなければならないことになる。しかし、観察領域  $940\text{mm}^2$  (分画数  $5^2$  枚) 以上であれば、空気量に関わらず代表面積要素の大きさを上回る。よって、面積解析法としては一辺が約  $30\text{mm}$  程度以上の領域を観察することにすれば、本研究の画像数 9 枚で所定の誤差内で推定できることになる。このように小領域で評価が可能になることは、一連の作業にて画像ファイル容量の低減をもたらすことを意味し、画像解析を実施するうえからも有用と判断される。

## 要旨

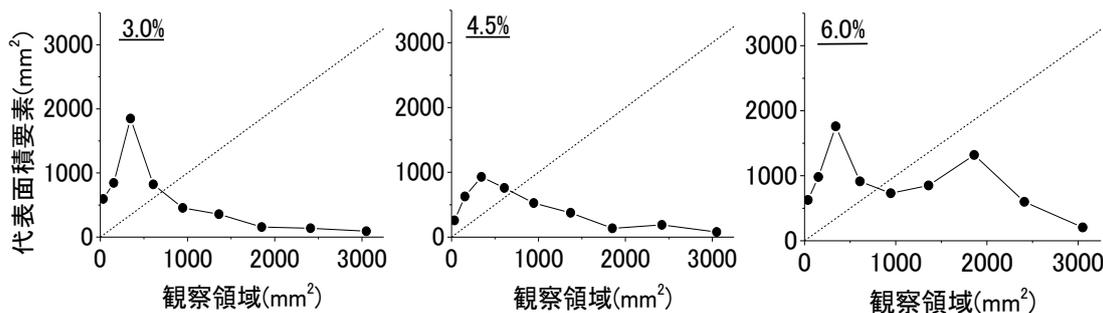


図-9 観察領域と代表面積要素の関係

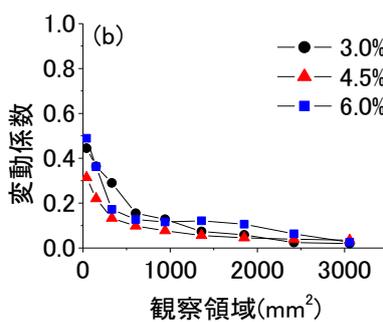
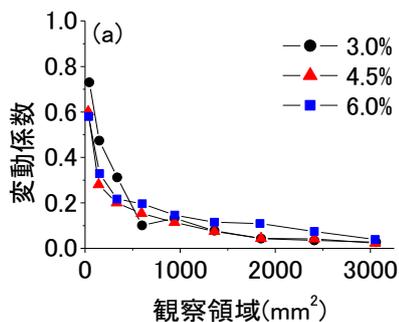


図-10 観察領域の拡大にともなう各パラメータの変動係数の変化

(a) 空気量, (b) 点密度

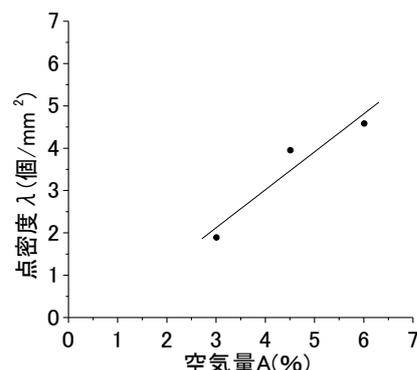


図-11 気泡の点密度と空気量の関係

図-10 は観察領域面積を変化させたときの空気量および気泡点密度の変動係数を示したものである。いずれも観察領域面積の増大とともに変動係数は低下している。また、いずれも観察領域 940mm<sup>2</sup> (分画数5<sup>2</sup>枚) 以上になると、変動係数は 0.1 程度以下になりその後の観察領域の増大にともなう変化は小さい。図-11 は空気量と点密度の関係を示したものである。両者には強い相関があり、点密度は空気量を反映していると見させる。また、図-10 に示したように空気量と点密度の誤差の収束傾向が一致することから、面積解析法と点過程法では代表体積領域も同程度であると判断される。さらに、両手法では同じ気泡個数情報と面積情報を用いている。以上のことが、両手法にて評価される気泡間隔係数がほぼ一致することに関係していることが考えられる。

## 7. 結論

本研究にて得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 点過程として評価した気泡間隔特性値は、観察倍率と仮定される気泡寸法が異なっても、リニアトラバース法の気泡間隔係数との差は大きくはなく、配合による大小関係も一致する。
- (2) リニアトラバース法にて計数される気泡密度の変化に対する気泡間隔係数の変化の割合は、点過程としての点密度の変化にともなう気泡間特性値の変化割合と等しい。よって、断面にて視認される気泡数は気泡間距離を考える上で有意な特性と考えてよい。
- (3) 高精細画像にて抽出された気泡に対してリニアトラバース法と面積解析法を適用して気泡間隔係数を求めると、両者の値は必ずしも一致せず、面積解析法の方が小さな値を与える。一方、気泡間隔特性値は標本数の観点から、より信頼性が高いと考えられる面積解析法により求めた気泡間隔係数とほぼ一致する。
- (4) 気泡分布のランダム性を表す基本パラメータである 1 次元の気泡弦数密度と 2 次元の気泡点密度の間には良好な相関性が存在する。

## 要旨

- (5) 簡易な評価を目的としてスキャナー像を用いると、微細な気泡を検出しないために、気泡間距離特性は大きく評価されるが、その差は 30 $\mu\text{m}$  程度である。一方、高倍率と低倍率の画像を用いて求めた気泡間隔特性値を比較すると、最大で 100 $\mu\text{m}$  程度の差が認められ、両者の間には線形的な対応が認められない。気泡数が少ない系にて微細な気泡を同定できないことが、気泡空間分布の特徴抽出と気泡間距離評価に及ぼす影響についてさらに検討を要する。
- (6) 面積解析法にて気泡分布を評価する場合、代表面積要素の観点から分画数 25 枚 (約 940 $\text{mm}^2$ ) 以上を観察すれば、変動の大きい空気量でも、標準誤差 10%以下の推定が可能である。また、このときの気泡数はリニアトラバース法で計数すべきとして推奨されてきた気泡数と矛盾しない。
- (7) 点過程法を用いる場合も分画数 25 枚を観察すれば、基本パラメータである点密度の標準誤差も 10%以下で推定される。
- (8) 面積解析法および点過程法における気泡特性値の一致性には、両手法が同じ気泡情報を用いることに加え、代表面積要素の大きさも一致することが関係していると考えられる。

本研究では、点過程法とリニアトラバース法の特性値の、測定方法および画像取得倍率が異なる場合での対応を明らかにした。同倍率の画像情報を用いる場合は、点過程法による気泡間隔特性値は気泡間隔係数とほぼ一致する。一方、低倍率画像と高倍率画像の気泡間隔特性値の対応では、空気量が少ない場合にて両者の差は大きくなり、線形的な対応は認められない。しかし、距離特性値の大小関係に矛盾はなく、耐凍害性の判断に齟齬を生じることはない。また、気泡間隔係数のような仮想系ではなく、実際の距離を評価しているという点において、点過程法および気泡間隔特性値はより合理的であることに異論の余地はないと思われる。今後、より多くの標本を用いて、両者の対応および本研究にて示した評価法の信頼性を高めることにより、点過程法は従来法、すなわち長年にわたって国際的なデフォルト評価法であったリニアトラバース法に代わる耐凍害性評価手法になり得ると確信する。

## 参考文献

- 1) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: 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, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.73, No.1, pp.36-49, 2017.
- 2) Murotani, T., Igarashi, S. and Koto, H.: Distribution analysis and modeling of air voids in concrete as spatial point processes, Cement and Concrete Research, Vol.115, pp.124-132, 2019.
- 3) 谷口円, 齋藤和秀, 作榮二郎, 西祐宜: 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.
- 4) 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, No.396, pp.2-8, 1986.
- 5) 室谷卓実, 古東秀文, 五十嵐心一: コンクリート中の気泡を点過程とみなした簡便法と ASTM 法によって評価した気泡分布特性の比較, コンクリート工学論文集, Vol.28, pp.133-142, 2017.
- 6) 細川智史, 室谷卓実, 山下総司, 五十嵐心一: 計測方法による気泡特性値の相違と変動, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.857-862, 2019.
- 7) 室谷卓実, 五十嵐心一, 寺澤佑丞: リニアトラバース法と点過程法で評価した気泡間距離特性値の比較, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.158-165, 2019.

## 学位論文審査報告書（甲）

## 1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

点過程法とリニアトラバース法によって求めたコンクリートの気泡特性値の比較に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏名 室谷 卓実

## 3. 審査結果の要旨（600～650 字）

令和元年 7 月 30 日に第 1 回審査会を開催し、学位論文の内容に関する説明を受け、その後質疑応答を行って修正事項を指摘した。令和元年 8 月 8 日に口頭発表会を開催し、第 1 回審査会における指摘事項に対して適切な修正がなされていることを確認し、さらに、より専門的で高度な詳細質疑を行った。口頭発表会終了後に第 2 回審査会を開催した。

コンクリートの耐凍害性評価を目的として、従来、ASTM C457 リニアトラバース法が国際標準的な試験として実施されてきた。しかし、この方法は計測に多大な労力を要し、また、実際の気泡分布ではなく、仮想系の距離特性値を与える点に問題を抱えていた。学位請求者はこれらの問題を解決する新しい方法として点過程法を提案し、本学位請求論文は、その提案方法による評価値が ASTM の規定に則った評価値と全く無矛盾であることを明らかにしている。気泡のランダム分布特性を、観察倍率が異なる場合、および異なる次元のプロープで特性化した場合という視点で整理している点に独創性を有し、結果として、気泡の分布はそのままの状態、空間統計学に裏付けられた距離特性値が容易に得られることを示したことの実務上の意義は大きい。

以上要するに、本学位請求論文はコンクリートの耐凍害性評価における長年の問題を解決すると同時に、より高度な判断を可能とする点過程法の有用性を明確に示している。その成果は、コンクリートの性能評価技術の発展に資するところは大であり、博士（工学）の学位授与に相応しいと判断した。

4. 審査結果 (1) 判定 (いずれかに○印)  合格 ・  不合格

(2) 授与学位 博士(工学)

## 5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

確認済み（確認方法：ithenticate を実施。）

未確認（理由：

）