論文 同一画像情報を用いてリニアトラバース法と点過程法により評価された気泡間距離特性値の比較

寺澤 佑丞*1・室谷 卓実*2・五十嵐 心一*3

要旨:気泡間隔をリニアトラバース法と点過程法で評価し,両者の気泡間距離の異同を調べた。リニアトラバース法は高精細画像を用いた自動解析法にて実施し,同時に得られる気泡位置情報を用いて,点過程へと変換した。点過程法にて求めた気泡間隔特性値は,気泡間隔係数とほぼ等しい値であった。また,簡便評価を目的として低倍率スキャナー像を用いた場合でも,気泡間隔特性値と気泡間隔係数に大きな差は認められない。計測の容易性および既往の知見との対応づけの容易性を考慮すると,点過程法は気泡空間分布構造評価の有用な方法であると考えられる。

キーワード:リニアトラバース法,点過程法,気泡間隔係数,気泡間隔特性値,最近傍距離関数,低倍率像

1. 序論

コンクリートへの AE 剤による空気連行に関して,耐 凍害性を獲得するメカニズムから,空気量よりも気泡間 の距離が重要であることは共通の認識である¹⁾。また, フレッシュ時に測定される空気量と硬化コンクリート中 の気泡量が異なり得ることも古くから指摘されてきた¹⁾。 このため,耐凍害性の判断のためには,硬化コンクリー ト中の気泡を観察し,気泡量だけでなく気泡粒子間の距 離の簡便かつ合理的な評価が必要となる。

硬化コンクリート中の気泡量と気泡間隔を評価する規 準化された試験方法で,長年にわたって用いられてきた 方法はASTM C457²⁾ リニアトラバース法(以後 ASTM 法 と称す)である。この試験法に規定された手順は,観察 面調整作業と計測作業に分けられ,前者においては, 150μmから5μm程度までの砥粒寸法の研磨紙および研磨 粉による研磨を要求し,後者においては径が10μmの気 泡が識別できる観察倍率にて,トラバース線が横切る 個々の気泡弦長を記録していくことを規定している。し かし,実際の作業においては適切な研磨がなされていた としても,目視では気泡の識別に戸惑う場合が少なから ずあり,また個々の気泡弦長を手動にて記録していく作 業には多大な時間を要する。

1980 年代以降の汎用コンピューター普及と画像デー タの取得,解析法の発展にともない,ASTM 法の実施に ともなう作業労力の軽減も図られてきた。表面観察に関 しては気泡の自動識別技術が確立され³⁾,リニアトラバ ース計測も取得画像に対する自動計算によって行うこと も可能になっている⁴⁾。これにより,気泡計測作業は容 易化かつ高精度化され,オペレーターによる計測値の変 動も小さくなっている。しかし,このような作業改善が

*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)
*2 大成建設(株) 東北支店 修(工) (正会員)
*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学類教授 博(工) (

なされてはいても,基本的には ASTM 法の計測をオペレ ーターによるバイアスを可能な限り排除して,簡単かつ 正確に行えるようにしているのであって,気泡分布,特 に気泡間隔を特性化するパラメーターとして,気泡間隔 係数を求めていることに変わりはない。

このような状況に対して,著者らは黒色に染色した研 磨面内の気泡に白色粉を充填し,その画像を市販の一般 的なスキャナーで取得し,抽出した気泡粒子群を2次元 点過程に置き換えて気泡間距離を求める簡便な方法(点 過程法)を提案している⁵⁾。本方法によれば,ASTM法 のような気泡の寸法や分布に関する仮定を行うことなく 気泡間距離が評価でき,その気泡間隔特性値は従来の気 泡間隔係数との間に線形的な対応があることを指摘して きた。その結果として,気泡間隔特性値は耐凍害性指標 である耐久性指数とも関係づけることも可能で,実際, 気泡間隔特性値は凍結融解作用を受けるコンクリートの スケーリング抵抗性と対応することを示した⁹。これよ り,気泡間隔特性値は気泡間隔係数に代わる距離パラメ ーターになりうると期待している。

これまで著者らが行ってきた気泡間距離特性の対応 に関する検討を表-1 に整理して示す。著者らはこれま

表-1 ASTM 法と点過程法の計測の対応表

評価法	ASTM	点過程法		
	リニアトラ 面積法のL		気泡間隔特性	
	バース法の Ī		值 L'	
使用画像				
低倍率画像				
(スキャナ	-	(a)	(b)	
一画像)				
高倍率画像		(4)		
(顕微鏡像)	(0)	(a)	(e)	

(正会員)

表-2 コンクリートの配合

				单位量 (kg/m ³)				測定空気量	
丘 (%)	(%)	(cm) $(%)$	(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤 (%wt./C)	(%)
50	45	10±2	4.5	165	330	797	1003	0.007	5.0

で, i) 硬化コンクリートの低倍率気泡画像を用いて, ASTM 法の一部手順の改良版である面積法 [¬]により求め た気泡間隔係数Lと点過程法の気泡間隔特性値L'の比較 ((a)と(b)の比較)⁸, ii) ASTM 法の手順に従って高倍率 観察下にてリニアトラバース法を実施して求めた気泡間 隔係数Lと,同じコンクリートの低倍率画像を別途取得 し,それに点過程法を適用して求めた気泡間隔特性値L' の比較((c)と(b)の比較)⁹を行ってきた。しかし,ASTM 法に規定された倍率で取得した全く同一の顕微鏡像につ いて,リニアトラバース法で求めた気泡間隔係数Lと点

過程法で求めた気泡間隔特性値L'の比較((c)と(e)の比較) を行ってはおらず,その異同および対応は明らかではない。

本研究においてはこの未実施の比較を行うことを主な 目的とする。所定の配合のコンクリートについて、ASTM 法に規定された条件を満足する精細画像データ(高倍率 顕微鏡像)を用い,気泡の空間分布の特徴を空間統計量 の観点から明らかにする。さらに,その画像に対してリ ニアトラバース法(自動法)と面積法を実施して得られ た気泡間隔係数L((c)と(d))と,著者らが提案してきた 点過程法による気泡間隔特性値L'((e))との比較を行う。 また,同じ断面の低倍率画像を取得して気泡間隔特性値 L'((b))を同様に求め,高倍率画像にて求めたそれ((e)) との比較を行い,簡便に気泡間隔を評価する方法として の点過程法の妥当性について論ずる。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³), 細骨材には大井川水系陸砂 (表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.22%), 粗骨材には青梅産砂岩砕石



図-1小分画高精細画像と気泡の抽出 (a)原画像 (b)気泡を抽出した2値画像

(表乾密度 2.66g/cm³, 吸水率 0.52%, 最大寸法 20mm) を使用した。また, JIS A6204 の I 種適合の変性ロジン 酸化物系の AE 剤を使用した。コンクリート供試体 (100mm×100mm×400mm)は打込後 24 時間にて脱型 し,所定材令まで水中養生(20±2℃)を行った。使用 したコンクリートの配合を表-2 に示す。

2.2 ASTM法(自動法)による計測

所定材令にて供試体から $100 \times 100 \times 30$ mm 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水洗浄お よび乾燥を行った。研磨面中央部 (60×60 mm)を計測対 象領域とし,高精度 CCD カメラを用いて研磨面のグレ ースケール画像を取得した。なお,画像取得の際は,対 象領域を $11 \times 11 = 121$ 個の小分画 (1 分画は約 6.14mm× 6.14mm, 2048 画素 $\times 2048$ 画素,分解能は 0.003mm/画素) に分割して取得した。取得した画像の例を図-1 に示す。 それらの個々の分画画像取得時にて,順光と斜光照射を 繰り返し行い,陰影の差分により気泡を同定した。同定 された気泡について,骨材上の凹部などの誤抽出を補正 し(図-1(b)),残った気泡の径(円相当径)およびその 中心座標 x_i (i = 1, ...j, ...,n)を画像解析により求めた。

ASTM 法の最大骨材寸法によって規定される最小ト ラバース長を満足するように、1 分画内にて4本のトラ バース線を設定し、121 分画での総トラバース長を約 2746mm とした。各分画内の各トラバース線上にて気泡 数および気泡弦長を自動計測した。表-2 のコンクリー ト配合に示すように、セメントペースト/空気体積比(p/A) は4.342 より大きい。よって ASTM 法に規定された式(1) を用いて、気泡間隔係数L を求めた。









図-3 解析領域全体画像: (a)小分画画像の接合 (b)骨材体積率を配合と一致させて不定形マトリックス領域を 抽出した2値画像(白色:セメントペーストマトリックス,気泡)(c)スキャナー取得画像

ここに、 α は気泡の比表面積(=4/ \overline{l} , \overline{l} は平均弦長)である。 気泡画像を取得できている場合、気泡面積は画像解析から直接求められ、また、比表面積 α は弦長測定を行わずに式(2)によって求めることができる⁷)。これらを同じく式(1)に代入して得られる値を、面積法によって求めた気泡 間隔係数 \overline{L} とした。

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}}$$
(2)

ここにāは平均気泡面積であり、画像解析にて求めた。

2.3 気泡の凝集性とランダム性の判断

2.2 にて取得された 121 分画の個々の画像内の気泡数 を用いて,検定統計量として次式にて定義される分布指 標 I を求めた¹⁰⁾。

$$I = \frac{(k-1)s^2}{\bar{x}} \tag{3}$$

ここに, kは分画数, xは各分画の平均気泡数, s²は1分 画中の気泡数の標本分散である。気泡の完全ランダム分 布を帰無仮説,対立仮説をランダム分布ではないとして, 分画計数法に従い¹⁰, 分布指標 Iを用いて有意水準 95% のχ²両側検定を行った。

2.4 点過程法による気泡間隔特性値の決定

2.2 にて取得した 121 分画中の各気泡の重心点座標デ ータ*x_i* (i = 1,…j, …,n)を用いて,各分画のそれぞれにつ いて,距離 r を変数とする以下の点過程統計量,K 関数 K(r)と最近傍距離関数 G(r)を求めた。

$$K(r) = \frac{1}{\lambda_A^2} \sum_{i \neq j} \frac{\mathbf{1}(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| < r)}{s(x)}$$
(4a)

$$s(x) = ab - \frac{(2a+2b-x)x}{\pi}$$
(4b)

$$x = |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| \tag{4c}$$

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N(W)} \mathbf{1}(s_i \le r) \mathbf{1}(s_i \le c_i) \cdot w(s_i)}{\sum_{i=1}^{N(W)} \mathbf{1}(s_i \le c_i) \cdot w(s_i)}$$
(5a)

$$w(s_i) = \{(a - 2s_i)(b - 2s_i)\}^{-1}$$
(5b)

ここに、 λ_A は気泡数を観察視野面積で除した気泡点密度, a,b は観察視野の辺長, c_i は各点から視野周縁辺までの最 短距離である。また, $w(s_i)$ 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収縮処理した観察領域面積の逆数で ある。

累積確率で表される最近傍距離関数の特性値として 累積確率の中央値を採用し、対応する距離をメディアン 距離 R_{50} と定義した($\mathbf{2}-2$)。このメディアン距離は、気 泡を面積を持たない点で代表させたときの中心点間の距 離である。ASTM法と同様に、セメントペースト固体相 中の任意点から気泡表面までの距離として気泡径を考慮 した距離特性にするため、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、最近傍距離関数と接触分布関数の同値性から¹⁰、こ れを気泡間隔特性値L'として定義した。($\mathbf{2}-2$,式(6))。

$$L' = R_{50} - \frac{D_A}{2} \tag{6}$$

2.5 解析領域全体への気泡配置シミュレーション

小分画として取得された高精細画像について、上下左 右の隣接分画が重ならないように注意して貼り合わせ、 全解析領域の精細画像を再構成した(図-3(a))。この画 像は高精細ではあるものの、グレースケールだけで骨材 を抽出することは困難である。そこで、コンクリートの 配合(表-2)から骨材の体積率(=面積率)pは既知で あるとして、黒色側から単一閾値法を用いて閾値を順次 変化させて面積率が骨材の体積率と一致する濃度に閾値 を決定する p-タイル法¹¹⁾により、骨材を抽出する2値化 処理を行った。骨材の補集合部分を2次元空間を不定形 に占有するセメントペースト領域とした(図-3(b))。

体積率が一致するように抽出されたセメントペースト 領域内にて,2.2 にて同定された気泡数に等しい点をラ ンダム発生させるシミュレーションを200回繰り返した。 個々のシミュレーションにてK関数を求めた。

2.6 低倍率画像の取得

2.2 の研磨面の高精細画像取得後,表面に黒色インク を塗布した。インクの乾燥後、白色粉末(炭酸カルシウ ム微粉: 粒径 12~13µm) を表面の凹部に充填し, これを 気泡が白色にて抽出された状態とみなして、その白黒画 像を市販の汎用スキャナーにより取得した(図-3(c))。 スキャナーの解像度は 847dpi で1 画素は約 30µm に相当 する。なお、解析対象領域は2.2の領域と一致させるよ うにして、断面中心部の 60mm×60mm の矩形領域とし た。AE 剤にて連行される気泡径の主たる範囲は数 10µm 以上であること、および周囲を黒色画素で囲まれた1画 素の孤立した白色部は、画像ノイズの影響もあることを 考慮して、この1画素の白色部は気泡ではないものと判 断して,画像処理によって除去した。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2.4と同様の 手法を用いて各気泡位置を決定し,K関数K(r),最近傍 距離関数 G(r),メディアン距離 R50 および気泡間隔特性 値L'を求めた。

3. 結果および考察

3.1 気泡分布の全体的な特徴

表-3 に分画法の計数値と χ^2 値を示す。分布指標 I は 自由度 120 の $\chi^2_{0.05}$ 値を大きく超えており、凝集分布と 判断される。骨材によって気泡分布箇所が制限されてい ることは明らかである。

図-4 に気泡の K 関数を示す。図中には 121 分画それ ぞれに存在した気泡に対して求めた K 関数の平均と領域 全体の K 関数を示し,それらを視野全体を参照空間とす る完全ランダム過程(ポアソン分布)と比較して示して いる。予想されたとおり実際の気泡分布はポアソン分布



より上方にプロットされ,凝集側の分布であることを示 している。骨材によって気泡の存在位置が制限されてお り,分画法の結果と一致する。また,121 分画の平均の 関数値が,解析領域全体の気泡座標を用いた分布のK関 数よりも上方にプロットされる。これは小分画画像を自 動的に取得していく場合,図-1 に示すようにマトリッ クス領域がある程度存在する分画だけでなく,骨材領域 が大部分を占有するような分画も含まれることになり, 結果として凝集傾向が強く現れやすいためと考えられる。

3.2 高精細画像における気泡間距離特性評価

表-4にASTM法(リニアトラバース(自動計測)法, 面積法)に従って求めた高精細画像中の気泡の気泡間隔 係数を示す。フレッシュ時に計測された空気量は表-2 に示したように5.0%であったが,硬化コンクリートの空 気量はリニアトラバース法および面積法でそれぞれ 3.6%,3.0%であり,リニアトラバース法では設計空気量 との差が0.9%程度であるが,画像解析(面積法)ではそ の差はやや大きい。しかし,気泡間隔係数はそれぞれ 178μmと117μmで,面積法の気泡間隔係数はリニアトラ バース法よりも小さい。高精細画像内の微細な気泡も含 めてすべてを用いている結果,表-4の比表面積(式(2)) から明らかなように,面積法では気泡間隔係数が定義さ れる空間に配置される単一寸法気泡球が小さくなる。そ のため,空気量は小さくても気泡個数は大きくなり,結 果として気泡間隔が小さくなったと考えられる。

表-5 に点過程法により評価した気泡間隔特性値を示 す。気泡間隔特性値は 137μm と ASTM 法の面積法と同 程度の値で,リニアトラバース法との差は高々40μm 程 度の近接した値が得られている。気泡間隔係数が計算さ れる仮想の気泡配置と気泡の点過程では,空間分布が全 く異なる。前者は立方体格子配置であり,後者は具体的

表 -3 分画内計数と χ^2 検定結果						
自由度k	分画内平	$\chi^{2}_{0.95}$	検定指標 I	$\chi^{2}_{0.05}$		
120	均 凤 泡釵X	05.7	10(2	146.6		
120	144.8	95.7	1963	146.6		

表-4 ASTM 法計測結果

	空気量	比表面積	気泡間隔係
	(%)	α (mm ² /mm ³)	数(µm)
リニアトラバー	3.6	31.3	178
ス法			
面積法	3.0	51.2	117

表-5 点過程法による気泡特性

使用画像	空気量	平均径	気泡間隔特性値	
	(%)	(µm)	(µm)	
高精細画像	3.0	67.2	137	

な分布構造を仮定することなく、ランダムな過程を確率 論に基づいて評価している。したがって、両者の一致性 を必ずしも期待するものではない。しかし、そのような 場合であっても、両者が近接した値を示すことは、従来 の気泡間隔係数と著者らが提案してきた気泡間隔特性値 の相互参照を容易にし、また従来の気泡間隔係数に基づ く判断を、点過程法の評価値にも適用しうることを示し ている。

3.3 低倍率画像の気泡間隔特性値

上述のように、高精細画像にて同定された気泡の座標 値を取得して気泡間隔特性値を求めると、ASTM 法の気 泡間隔係数と同程度の値を与える。基本的に ASTM 法の 手順に従って気泡を同定、計数すること自体が、労力と 経験を要する作業である。著者らはこの作業工程を簡略 化して,低倍率画像からも気泡系を代表する気泡間隔特 性値が得られることを指摘している^{7,8)}。その場合,気泡 がセメントペーストマトリックス中にランダムに分布し ていることを前提としている。図-3(c)に高精細画像と 同じ領域を黒色に染色、空隙に白色粉を充填したコンク リート表面のスキャナー像を示す。スキャナー像は分解 能が低い等倍率画像であるので、微細な気泡は検出され ていない。目視の限りにおいては、気泡の存在しない領 域、すなわち骨材領域があるため凝集分布であるように 見え、また気泡数が減少していることからその凝集傾向 がさらに強まっているような印象を受ける。実際に、こ のような分布がランダムであるかどうかを確認するため に、図-3(b)の2値化にて得た不定形領域のセメントペ ーストマトリックス中に,スキャナー取得画像と同じ点 密度でランダムに点を配置するシミュレーションを行っ た。

図-5 に図-3(b)のマトリックス領域にランダムに点 を発生させるシミュレーションを行って再現された気泡 配置と実際のスキャナー画像にて同定された気泡、およ び図-4 に示した高精細画像中の気泡から、スキャナー 像の分解能に相当する径が 30µm 以下の気泡を除去した 分布のK関数を示す。また、比較のために領域全体を参 照空間としたときのポアソン分布を合わせて示している。 図-4 同様、気泡分布は領域全体からみれば凝集側と判 断される。しかし、スキャナー画像中の気泡とセメント ペーストマトリックス領域に同じ点密度でランダムに点 配置を繰り返したシミュレーションのK関数はほぼ完全 に一致している。よって, 観察視野内では見かけ上は凝 集分布であっても、セメントペーストマトリックス内を 参照空間と考えれば、気泡はランダムに分布していると 判断できる。一方、高精細画像中にて同定された気泡か らスキャナーの分解能(30µm/画素)以下の気泡に対応 する点を削除すると、この場合もそのK関数はスキャナ

ー画像中の気泡のK関数とほぼ一致している。

図-6 に高精細画像とスキャナー画像にて同定された 気泡の最近傍距離関数を比較して示す。いずれの関数と も距離の小さい範囲で、隣接点が存在しない距離(横軸 切片)を持ち、その後距離とともに関数値は増大してい く。高精細画像では 0.5mm 程度, スキャナー画像では 0.8mm 程度で関数値はほぼ確率1に収束する。スキャナ 一画像中の気泡に関する関数が下方にプロットされてお り、同一距離にて近傍の気泡を見つける確率は小さいこ とを示す。また、同一確率を考えた場合、一つの気泡か ら近傍の気泡を探索しようとする場合は、より広範囲の 領域を走査しなければならないことになる。これらは, スキャナー画像では分解能が低く、小さな気泡を検出同 定できないことにより、気泡数が少なくなることを関数 として表現している。また、高精細画像から 30µm 以下 の気泡を除去したときの最近傍距離関数は、同定された 気泡全てを考慮した気泡よりもわずかに下方にプロット されるが、関数全体としての傾向は全ての気泡を考慮し たものと一致している。この 30µm 以下の気泡を除去し た場合とスキャナー像の最近傍距離関数には大きな差が 認められ、スキャナー像と高精細画像で分解能を合わせ て比べていても、後者がやはり気泡検出能において優れ ていることを示す。

表-6 にスキャナー画像中にて同定された気泡の気泡 間隔特性値を示す。分解能が低いために微細な気泡の径



図-5 スキャナー像中の気泡とシミュレーションに より発生させた気泡の K 関数の比較



図-6 スキャナー像中の気泡とランダムシミュ-ション により発生させた気泡の最近傍距離関数の比較

表-6 スキャナー画像中の気泡の特性値の比較

	空気	メディアン	平均	気泡間隔
	量	距離 R50	気泡径	特性値 L
使用画像	(%)	(µm)	(µm)	(µm)
スキャナー像	3.2	273	89.3	228
高精細画像 (30µm 以下の 粒子除去)	3.0	186	76.1	148

を抽出できないが、しかし、表-4 および5 に示した画 像内で同定された気泡面積(3.0%)と同量の空気量であ った。また、平均気泡径は高精細画像の値(表-5)より も 22µm 程度大きい 89.3µm であった。これも低分解能 であるために粗大径の気泡を検出していることを表して いる。気泡間隔特性値は 228µm で, ASTM 法(リニアト ラバース法)の結果 178µm に比べて 50µm 程度大きく, 面積法の結果よりは 100µm 程度大きな値となっている。 高精細画像として気泡を抽出し、面積法に基づいて計数 した場合は、スキャナー画像との気泡数に大きな差を生 じるために、気泡間隔特性値と気泡間隔係数には大きな 差を生じることになる。しかし、ASTM 法に規定される トラバース法に則って計測されたならば、両者の差は 1~2 画素程度に過ぎない。また、画像の分解能を合わせ て、高精細画像中の径が 30µm 以下の気泡を間引いて求 めた気泡間隔特性値は 148µm で, 全気泡数を考慮した場 合との差は 10µm 程度である。この場合、スキャナー画 像は高精細画像の特性値とは2画素程度の差となり、高 精細画像とスキャナー画像で同定された気泡系には相違 があることを示している。そうであっても,数10µm 程 度の差で、かつ気泡分布を仮定しない状態の距離特性値 が容易に得られることの意義は大きく、点過程法は有用 な方法であると考えられる。

4. 結論

著者らが提案してきた気泡を点で代表させて,気泡間 隔を評価する点過程法と,ASTM C457 に規定されたリニ アトラバース法を同じ画像データに適用して,気泡間隔 特性の比較を行った。本研究にて得られた主な結果は, 以下の通りである。

- (1) 高精度画像にて抽出された気泡を点過程と見なしたときの気泡間隔特性値と、従来の ASTM 法の気泡間隔係数の差は 40μm 程度である。
- (2) スキャナー画像により気泡を抽出すると、気泡間隔 特性値と ASTM 法の気泡間隔係数との差は 50µm 程度である。
- (3) 高精細画像から微細な気泡を間引いたとしても、低 分解能のスキャナー画像にて検出される気泡分布 とは異なり、距離特性値としては数10µm 程度の差

を生じる。

謝辞

本研究を実施するにあたり,(株)八洋コンサルタント, 田中章夫博士および白石聖氏より ASTM 法の気泡計測 結果および高精細画像データの提供,および ASTM 自動 解析法に関する助言を賜りました。ここに記し,深甚の 謝意を表します。

参考文献

- 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
- ASTM C457-98: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, American Society for Testing and Materials, 1998
- 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, 第420号/V-13,pp.81-86,1990
- Jakobsen, U.H. at al.: Automated air void analysis of hardened concrete- a Round Robin study, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.8, pp.1444-1452, 2006
- 5) 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
- 古東秀文,室谷卓実,五十嵐心一,山本瑞希: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
- 7) 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
- 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
- 9) 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
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H. and Stoyan, D.: Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point patterns, John Wiley & Sons, 2008
- 新編画像解析ハンドブック(高木幹雄・下田陽久監 修),東京大学出版会,2004