

# 論文 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

古東 秀文\*1・室谷 卓実\*2・五十嵐 心一\*3・山本 瑞希\*4

**要旨:** コンクリート中の気泡に点過程理論を適用し, 最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値と従来からの気泡間隔係数との対応を検討した。また, スケーリング試験結果との対応を基に, 耐凍害性評価に距離に関する点過程統計量を導入することの有用性について検討した。その結果, 最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値が従来の気泡間隔係数と極めて良好な正の相関を有し, スケーリング量とも良好な対応が存在することが明らかになった。最近傍距離関数から得られる気泡間隔特性値は, 耐凍害性の評価において有用な指標となると期待される。

**キーワード:** 点過程, 気泡, 最近傍距離関数, メディアン距離, 気泡間隔係数, スケーリング

## 1. 序論

耐凍害性を考慮しなければならないとき, コンクリートに存在すべき量として推奨される空気量は一般的に 4~6%程度であり, セメント・水・骨材・空気要素で考えた場合, 最も体積率の小さな構成要素である。しかし, 体積率の小さい空気がコンクリートの物性に与える影響が小さくないことは周知である。より良いコンクリートには安定した空気の存在が不可欠となる。空気量測定は一般的に JIS A 1128 に規定される「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に従い測定される。しかし, 耐凍害性の評価においては空気量の総量だけでは十分でなく, より厳密に耐凍害性を考える場合には, 硬化コンクリート中の気泡の間隔が重要な意味を持つ。

Powers<sup>1)</sup>により提案された耐凍害性の指標である気泡間隔係数は, コンクリート中の気泡組織を定量評価するために, 同一径の気泡が規則的に配置されている分布を仮定し, その分布における気泡間の平均距離の最大値を表している。この気泡間隔係数は現在に至るまで耐凍害性を評価する指標となっている。しかし, 測定には多大な労力を必要とすることから, より簡便な測定手法で気泡間隔係数を求めようとする研究も活発になされてきた。例えば, 濱ら<sup>2)</sup>は浮力法によって簡便に気泡間隔係数を求めている。また, 杉山ら<sup>3)</sup>は X 線 CT 法によって 3 次元空隙画像を取得し, より詳細に気泡間隔係数を求める手法を提案している。

以上の研究はこれまで多くの研究報告がなされ, 信頼に足るパラメータである気泡間隔係数を簡便に評価することを目的としている。これに対して近年, 空間データの数理モデリングが, 多くの分野で活発に研究が進めら

れるようになると, これを用いてコンクリート中の気泡の実際の分布をより合理的に適切に評価しようとする研究が進められている。例えば Snyder<sup>4)</sup>はこれまでに提案されているいくつかの気泡間隔評価式に関して数値解析によりその妥当性を検討している。しかし, この数値解析においては骨材の存在を無視しており, 実際のコンクリート中の気泡間の距離との対応は明確ではない。

コンクリート中にて気泡が存在する領域はセメントペーストマトリックス相であり, この相の形状や大きさは当然のことながら骨材量や骨材寸法の影響を受ける。よって, 実際のコンクリート中の気泡の距離特性値を求めようとするならば, 骨材による存在の制限と空間分布のランダム性を考慮する必要がある。これを比較的簡単に行える手段として点過程の考え方が挙げられ, 著者らはセメントペーストやモルタル中の気泡のランダム性と距離特性を評価してきた<sup>5) 6)</sup>。その結果, 低倍率画像として簡単に取得できる画像から求められる距離特性値が, 気泡間隔係数と対応した現実の空間分布の距離を代表できることを指摘してきた<sup>7)</sup>。

本研究においては, その考え方をコンクリートに適用し, 骨材量が大きく, より強い分布制限を受ける空間内での気泡間隔特性値を求める。その特性値と気泡間隔係数の対応, およびスケーリング試験結果との対応性を明らかにし, 実際の分布を直接評価しうる気泡間隔特性値の有用性について論ずることを目的とする。

## 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: 3.15

\*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 示方配合

名称	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	(kg/m <sup>3</sup> )				(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

g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:3310cm<sup>2</sup>/g) を使用し, 骨材には川砂 (密度: 2.60 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 2.05%) および川砂利 (密度: 2.60 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.81%, 最大骨材寸法: 25mm) を用いた。水セメント比は 0.40 と 0.55 とした。混和剤には AE 減水剤および AE 剤を用いた。コンクリートの示方配合を表-1 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 3 種類ずつ (計 6 種類) の空気量の異なるコンクリートを作製した。JIS R 5201 に準じてコンクリートを練り混ぜ, 100mm×100mm×400mm の型枠に打ち込んだ。打ち込み後 24 時間にて脱型し, 材齢 7 日まで水中養生 (20°C) 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 15mm 程度の板状試料を切り出し, 耐水研磨紙を用いて切断面の研磨を行った。Zalocha ら<sup>8)</sup>は市販のフラットベッドスキャナによって取得した画像を用いても, ASTM C 457 の実体顕微鏡を用いた画像解析と同等の精度の解析結果が得られると述べている。そこで本研究では, 簡便性も考慮してフラットベッドスキャナを用いて画像を取得した。まず, 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を取得した。さらに, セメントペースト相と同色の骨材を抽出するために, 試料の研磨面に対して 1%フェノールフタレイン水溶液の噴霧を行い, セメントペースト相の染色を行った。呈色後, 余分な水分を拭き取り画像を取得した。画像を取得後, 研磨面を黒色インクで塗り潰した。その後, 気泡を白色粉末で充填した。充填後, 試料表面に残った余分な粉末を除去し, 白黒画像を取得した。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 847dpi とし, 1 画素は約 30μm 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 60mm×60mm の領域を解析領域とした。

## 2.3 画像解析

取得した断面画像, フェノール呈色画像および白黒画像からそれぞれ青成分, 緑成分および赤成分を加算した画像を取得し, これらの RGB 情報を持つ画像を重ね合わせるにより, 骨材相, セメントペースト相および気泡をそれぞれ異なる色で表示した RGB 画像を得た<sup>9)</sup>。重ね合わせた画像中における骨材色は様々であるため,

明度および色度に対して解析時に示される濃度ヒストグラムから閾値を設定することで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。また, 気泡の 2 値画像については, 白黒画像のグレースケール値から直接画像解析ソフトを用いて気泡が抽出された 2 値画像を取得した。このとき, AE 剤にて連行される気泡径の範囲はおおよそ 30~250μm であること<sup>10)</sup>および, ステレオロジーの観点から多くの微細な粒子がすべて大きな球の端面の切断による円形断面として一斉に特定の断面に現れたとは考えられないことから, 1 画素程度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面積率を画像解析により求め, これを気泡体積率とみなした。さらに, 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 $x_i$ とみなし, 気泡を点で代表させた点過程 $X = \{x_i; i=1, \dots, n\}$ とした。

## 2.4 点過程統計量による気泡分布の評価

### (1) 点密度

観察領域 $W$ 内にある点 $(x_i \in X)$ に関して, 点の個数 $N(W)$ を領域面積 $A(W)$ で除して点密度 $\lambda$ を求めた<sup>11)</sup>。

### (2) 最近傍距離関数

最近傍距離関数とは, 点過程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, 式(1)で与えられる<sup>11)</sup>。

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

式中の  $\mathbf{1}(\ )$  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,  $w(s_i)$  はエッジ補正係数であり,  $s_i$  を半径とする領域だけ縮小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(2)にて与えられる<sup>11)</sup>。

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

ここに,  $s_i$  は最近傍距離であり,  $b_i$  は各点から画像縁までの最短距離を表す。また, 完全ランダム分布のときの最近傍距離関数は式(3)で表される<sup>11)</sup>。

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda\pi r^2) \quad (3)$$

### (3) メディアン距離と気泡間隔特性値

最近傍距離関数は累積確率で表されている。この関数分布から得られる特性値として, 累積確率の中央値をメディアン距離 $R_{50}$ とした (図-1(a))。メディアン距離は任意の点 $x_i \in X$ の周囲にてこの距離範囲までを探索すれば 50%の確率で他点が必ず存在することを意味する。このメディアン距離は実際の気泡を点で表した時の点間距離である。これに気泡の径を考慮するため単純にメディアン距離 $R_{50}$ から平均気泡径 $D$ の 1/2 を差し引き, これを

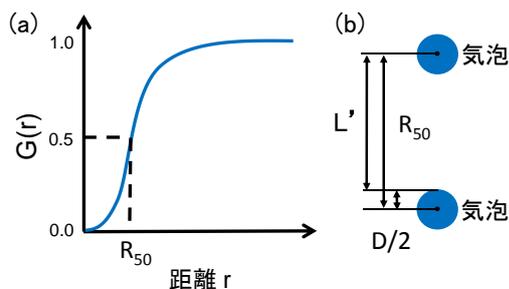


図-1 模式図 (a)最近傍距離関数, (b)R<sub>50</sub>とL'の関係

気泡間隔特性 L'として定義した (図-1 (b))。すなわち気泡間隔特性値 L'は式(4)にて定義する<sup>7)</sup>。

$$L' = R_{50} - D/2 \quad (4)$$

## 2.5 気泡間隔係数

ASTM C 457 に従い気泡間隔係数を式(5)より求めた<sup>7)</sup>。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[ 1.4^3 \sqrt{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (P/A \geq 4.342) \quad (5a)$$

$$L = \frac{P}{A\alpha} \quad (P/A \leq 4.342) \quad (5b)$$

ここに、 $\alpha$ ：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

本研究においては、2 値画像から得られる結果から気泡の比表面積 $\alpha$ を式(6)から求めた<sup>12)</sup>。

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

ここに、 $\bar{a}$ ：気泡面積の平均値

## 2.6 スケーリング試験

JSCE-K 572, RILEM CDF および ASTM C 672 を参考にスケーリング試験を行った。供試体および試験面に関しては JSCE-K 572, 試験液の吸水方法に関しては RILEM CDF, 温度条件および試験サイクルに関しては ASTM C 672 を参考にした。2.1 にて作製したコンクリートに対して材齢 14 日まで水中養生 (20°C) を行った。その後、供試体を 100mm×100mm×100mm に切断し、各配合に対して 6 個ずつ用意した。また、供試体側面を試験面とし、試験面以外からの劣化を防ぐために側面以外の面にエポキシ樹脂で被覆した。図-2 のようにスペーサーを設置した容器に供試体を設置し、14 日間 (材齢 28 日) の乾燥養生 (相対湿度 60%, 温度 20°C) を行った。また、乾燥養生終了の 7 日前 (材齢 21 日) に濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を試験面から浸漬深さが 5mm となるよう

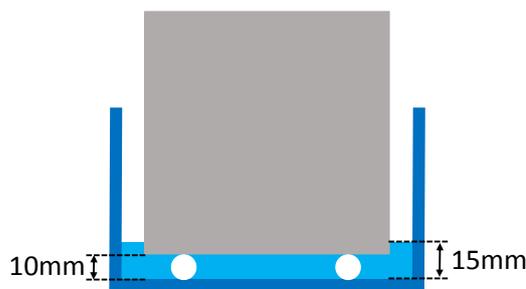


図-2 スケーリング試験用供試体の模式図

に入れ、下面吸着法による試験液の吸水を行った。乾燥養生終了後、冷温槽 (温度 -20°C) にて 18 時間静置した。その後、供試体を冷温槽から取り出し、温度 20°C にて 6 時間静置した。以上の計 24 時間を 1 サイクルとしてコンクリートに凍結融解のサイクルを与えた。凍結融解 5 サイクルごとにスケーリング量を計測した。n サイクル後のスケーリング量を計測し、式(7)より単位面積当たりの累積スケーリング量を求めた。

$$S_n = \frac{\sum m_n}{A} \quad (7)$$

ここに、 $S_n$ ：n サイクル後の累積のスケーリング量

$m_n$ ：n サイクル後のスケーリング片の質量

A：試験面の面積

## 3. 結果および考察

### 3.1 気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応

表-2 に画像解析によって得られた気泡特性を示す。W/C=0.40 では点密度が大きくなるに従い、硬化後の気泡体積率も大きくなっている。この傾向は、W/C=0.55 においても同様であり、硬化後の気泡体積率が増加すると気泡点密度も同様に増加することが確認された。また、平均気泡径は、W/C=0.55 よりも W/C=0.40 の方が小さく、気泡残存率も比較的低いことから、W/C=0.40 の系は締め固めの際に径の大きな気泡が多く失われたと推測される。

図-3 にコンクリート中の気泡の最近傍距離関数を示す。最近傍距離関数では、観察点が規則性を持たずランダムに存在する場合、図-3 の黒破線で示した曲線で表される。このランダムな状態を示す曲線の左側に最近傍距離関数が示された場合は、気泡は凝集の傾向を持つと判断される。図-3 から予想通り水セメント比の相違によらず、骨材の影響によって気泡の存在領域が制限され、凝集された気泡配置となっている。また、空気量の増加により、最近傍距離関数の勾配が大きくなり、 $G(r)=1.0$  となる距離 r の収束値が、小さくなる傾向を示した。これは、空気量の増加にともない気泡の個数が増加し、気泡間の距離が短くなったためと考えられる。表-2 においても、空気量の増加にともない気泡個数が多くなり、気泡相互の距離が近接する傾向を示すことと一致する。

表-2 画像から得られた気泡特性

水セメント比	0.40			0.55		
名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
点密度 (個/mm <sup>2</sup> )	1.00	1.36	2.30	0.58	1.10	1.55
平均気泡径 (μ m)	124	131	133	131	156	171
フレッシュ時の空気量 (%)	2.8	5.0	7.2	1.7	4.0	9.0
硬化後の気泡体積率 (%)	2.0	3.0	5.2	1.6	3.9	7.8
気泡残存率 (%)	73.2	59.7	72.2	91.5	98.6	86.7

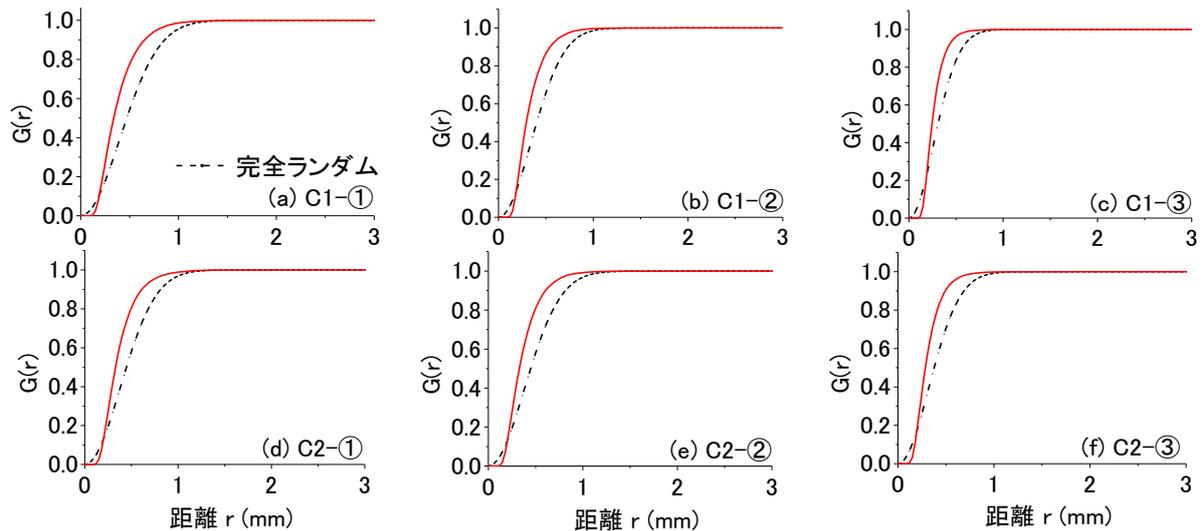


図-3 コンクリート中の気泡の最近傍距離関数

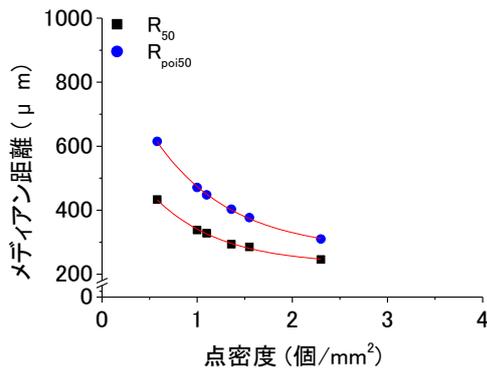


図-4 メディアン距離と点密度の関係

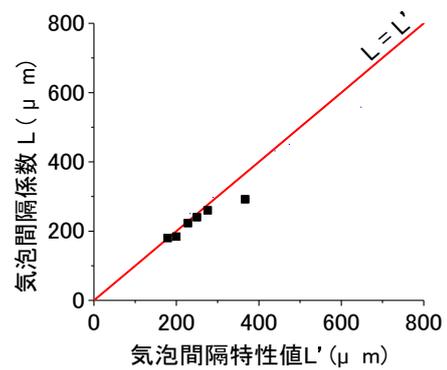


図-5 気泡間隔係数と気泡間隔特性値の関係

以上より、点過程統計量のひとつである最近傍距離関数が気泡間の距離特性を反映していることが確認された。

図-4 に最近傍距離関数から求めた実際のコンクリート中の気泡のメディアン距離 $R_{50}$ 、式(3)から求めた完全ランダム分布のときのメディアン距離 $R_{poi50}$ と気泡の点密度 $\lambda$ の関係を示す。いずれも空気量の増加により点密度が大きくなるにともない、メディアン距離は小さくなる。点密度の値が大きくなることは、気泡の個数が増加していることを表しており、気泡個数が多くなるとともに短い距離において気泡同士がより近接して存在することを示している。また、点密度が増加すると実際のコンクリート中の気泡のメディアン距離 $R_{50}$ と完全ランダム分布のときのメディアン距離 $R_{poi50}$ の差が小さくなっている。これは、点密度が増加することで分布の多様性がなくな

り、点間距離の中央値の変化が小さくなったためと考えられる。

図-5 に ASTM C 457 の定義に従って求めた気泡間隔係数 $L$ と最近傍距離関数の特性値として求めた気泡間隔特性値 $L'$ の関係を示す。両者には極めて良好な正の相関関係がみられ、またその値もほぼ等しい。このことは、もし耐凍害性の評価に気泡間隔係数を求めることが要求される場合には、気泡を単純な点に置き換えて気泡間隔特性値 $L'$ を求めてやればほぼ同じ値が推定できることを示す。逆に Powers の気泡間隔係数はランダム性や凝集性などの空間配置を考慮していないけれども、その値はランダム分布の確率的な中央値とほぼ一致する値を与えているということになる。

表-3 に気泡間隔係数 $L$ と気泡間隔特性値 $L'$ の値とその差を示す。気泡間隔特性値 $L'$ と気泡間隔係数 $L$ の差は、空気量が少ない系(C1-①, C2-①)が大きく、空気量が増えるとその差は小さくなる傾向がみられる。

図-6 に気泡間隔係数が仮定する立方体配置とメディアン距離 $R_{50}$ との対応関係を模式的に示す。単純に気泡間隔係数の計算の前提となる立方体格子にて、気泡間隔係数を与える対角線の1/2がメディアン距離 $R_{50}$ とほぼ一致

表-3 画像から得られた気泡の点過程として特性

W/C	0.40			0.55		
名称	C1-①	C1-②	C1-③	C2-①	C2-②	C2-③
$R_{50}$ ( $\mu m$ )	338	294	246	433	328	285
$L'$ ( $\mu m$ )	276	228	179	367	250	200
$L$ ( $\mu m$ )	260	223	180	292	240	184
$ L'-L $ ( $\mu m$ )	15	4	1	75	10	16

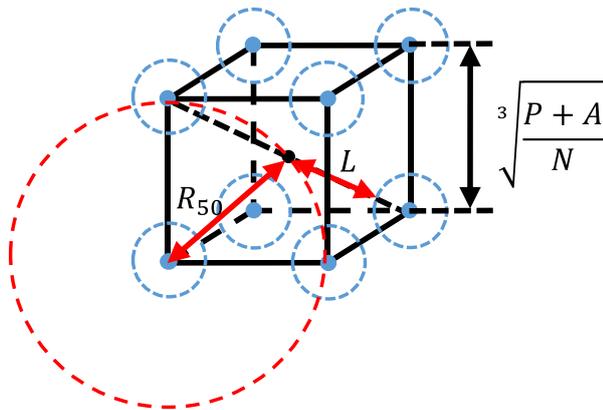


図-6 気泡間隔係数が想定する気泡配置と  $R_{50}$  の対応

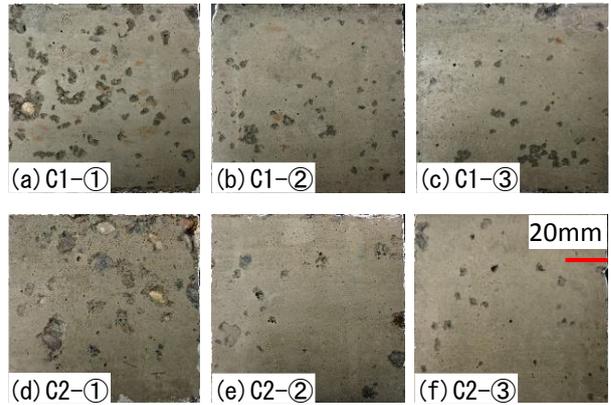


図-7 スケーリング試験後の断面画像 (50 サイクル後)

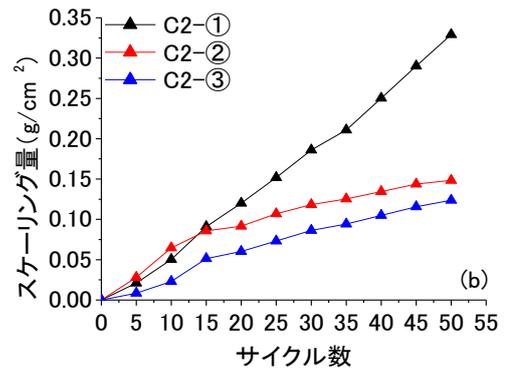
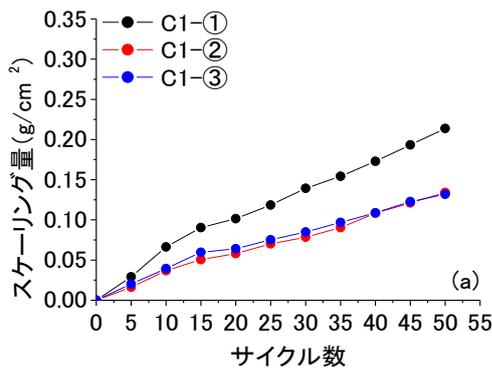


図-8 スケーリング量 (a) W/C=0.40, (b) W/C=0.55

するということを意味する。

### 3.2 気泡間隔特性値とスケーリング試験との対応

本研究では、コンクリート中の気泡の空間分布の簡便な評価を目的の一つとしている。点過程統計量から得られた特性値が気泡間隔係数と対応する結果が得られたことは、点過程統計量を用いて凍害性評価を簡便に行うことができることを示す。それを確認すべく、耐凍害性との関係があり比較的簡便な耐凍害性評価法であるスケーリング量と、コンクリート中の気泡の等倍率画像から得られる気泡パラメータとの対応を考察する。

図-7に、50 サイクル時のコンクリートのスケーリング試験面の写真を示す。空気量が3%よりも少ない系(図-7(a), (d))においては、表面の劣化が顕著に現れてい

る。特に水セメント比が高いほうが劣化が大きく、表層のセメントペースト部が剥落して骨材が露出している部分が多く認められた(図-7(d))。ASTM C 672の表面の目視による評価基準における劣化度3と同程度の劣化である。また、空気量が増えると表面スケーリングの程度に目視的な大きな差は認められなくなる(図-7(b), (c), (e), (f))。ASTM C 672の評価基準における劣化度1と同程度の劣化である。

図-8にスケーリング試験の結果を示す。いずれの水セメント比においても空気量が3%よりも少ない系(C1-①, C2-①)がスケーリング量が一番大きい。空気量が増えるとスケーリング量も小さくなり、図-7の劣化の様子と同様の結果となっている。

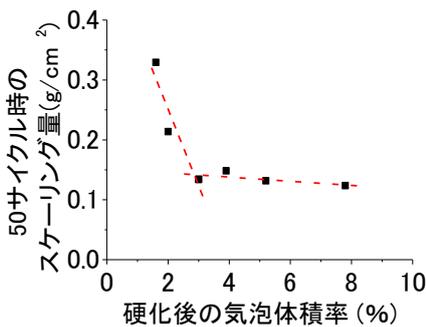


図-9 硬化後の気泡体積率とスケーリング量の対応

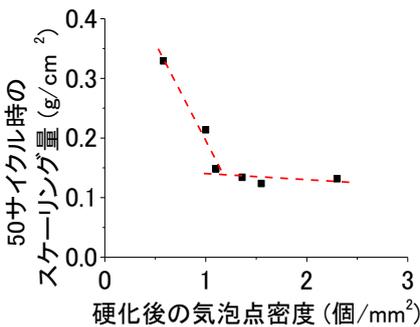


図-10 硬化後の気泡点密度とスケーリング量の対応

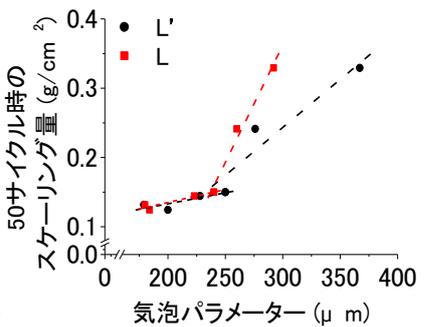


図-11 各種気泡パラメータとスケーリング量の対応

図-9に硬化後の気泡体積率と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。硬化後の気泡体積率が一般に耐凍害性を確保するために必要な最低空気量である3%以上の場合、スケーリング量は小さく一定であるが、3%未満になるとスケーリング量が急激に大きくなっている。すなわち、従来から指摘されているように硬化後の気泡体積率が耐凍害性評価において重要なパラメータであることが確認された。

図-10に硬化後の気泡点密度と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。図-9と同様に点密度もスケーリング量との対応がみられる。本研究では、点密度が1.0個/mm<sup>2</sup>よりも小さいとスケーリング量が大きくなり、耐凍害性が小さくなると判断される。以上より、点過程における最も基本的なパラメータである点密度を耐凍害性評価に適用できると考えられる。

図-11に気泡間隔係数Lおよび気泡間隔特性値L'と50サイクル時のスケーリング量の関係を示す。耐凍害性の指標である、気泡パラメータの閾値を250 $\mu$ mと考えた場合、気泡間隔特性値L'および気泡間隔係数Lが、250 $\mu$ mを超えたC1-①とC2-②のスケーリング量が大きくなっている。これらの結果より、骨材が存在し、気泡の存在領域に制限がある環境下においても、点過程統計量を用いて得られる気泡間隔特性値L'は、従来の指標の気泡間隔係数と矛盾しない関係が得られたこととなる。このことは図-5に示した気泡間隔係数Lと気泡間隔特性値L'の直線対応と両者の値がほぼ一致することから予想される結果が、実験的にも確認されたことを意味する。

本研究では気泡の簡単な評価を目的として、スキャナ画像を利用し、単純に2値化抽出された気泡の最近傍距離関数を求めることを評価の基本事項としている。一連の手順は簡単であり、この手順で得られる気泡間隔特性値L'が気泡間隔係数の代わりになりうるならば、従来法に代わる安価で簡便な耐凍害性評価手法になりうることが期待される。

#### 4. 結論

コンクリート中の気泡の空間分布を点過程統計量を用いて評価し、それから得られる距離に関する特性値と気泡間隔係数およびスケーリング試験との対応を考察した。本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 強い凝集性を示すコンクリート中の気泡の最近傍距離関数から定義したメディアン距離は、点密度の増加とともに減少する。
- (2) 凝集分布であってもその点密度は気泡の分布における距離特性を反映している。
- (3) 気泡間隔特性値L'は気泡間隔係数Lと正の相関関

係があり、またその値もほぼ等しい。

- (4) スケーリング量と気泡間隔特性値は対応しており、耐凍害性評価において気泡間隔特性値L'は従来の気泡間隔係数の代わりに用いることが可能と考えられる。
- (5) 本研究のスキャナ画像を用いたコンクリート中の気泡の空間分布評価手法は、従来法に代わる安価で簡便な耐凍害性評価手法になりうることを期待される。

#### 参考文献

- 1) Powers, T. C. : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proceedings of the Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1949
- 2) 濱幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 3) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011
- 4) Snyder, K. A. : A Numerical Test of Air Void Spacing Equations, Advn Cem Bas Mat, pp.28-44, 1998
- 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
- 6) 室谷卓実, 五十嵐心一: モルタル中の骨材が気泡の空間分布のランダム性に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.70, pp.945-946, 2015
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 川村満紀: 土木材料学, 森北出版株式会社, 1996
- 11) Stoyan, D. and Kendall, W. S. and Mecke, J. : STOCHASTIC GEOMETRY and its APPLICATIONS, 2nd Edition, JOHN WILEY & SONS Ltd, 1995
- 12) 小長井宜生, 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