

論文 計測方法による気泡特性値の相違と変動

細川 智史*1・室谷 卓実*2・山下 総司*1・五十嵐 心一*3

要旨：トラバース長を変化させたリニアトラバース法と観察領域面積を変化させた面積法、および点過程法を用いて気泡分布を評価し、計測条件の相違にともなう特性値間の対応を検討した。トラバース長および観察領域の増大とともに計測値の変動は小さくなるが、気泡比表面積はリニアトラバース法と面積法では異なって評価された。また、面積法と点過程法は同程度の大きさの代表体積要素を持つようであり、これをもとに所定の許容誤差に対応して観察すべき領域の大きさを示した。

キーワード：気泡, リニアトラバース法, 面積法, 気泡間隔係数, ステレオロジー, 代表体積要素

1. 序論

コンクリート中に適切に空気を連行することは、凍結融解抵抗性改善のための基本対策である。意図した気泡が適切に分布しているかどうかは、一般には ASTM C457¹⁾リニアトラバース法を用いて評価される。このとき、全体の空気量はステレオロジーの基本則に基づいて評価されるが、実際に耐凍害性を発揮するうえで重要なのは、気泡間の距離を反映した気泡間隔係数とされる。その気泡間隔係数を決める重要なパラメータは、単一寸法球として仮定される気泡球の比表面積であり、これは平均弦長により決定される。この平均弦長は気泡個数に左右されるので、結局のところ、計測作業におけるトラバース線上の気泡の遺漏のない計数が、結果の信頼性を大きく左右することになる。この計数作業は極めて労力が大きく、ASTMに規定された当初の方法に従って手動で行うならば、熟練技術者であっても数時間にわたって単調な作業を継続しなければならないようである。

この作業労力の軽減を図るべく気泡計測と気泡間隔係数評価を自動的に行える計測システムが開発されて久しい。この自動計測システムの開発過程において、従来の手動計測と自動計測の結果の比較検討も詳細になされてきた。手動計測では技術者が目視により、逐次気泡の識別を適切に行っていくことができるが、自動計測ではその識別が必ずしも目視ほどの精度を持たないことから、自動計測法の有用性が疑問視されていたこともある²⁾。気泡識別のすべてを自動化するのではなく、適宜目視判断も加えながら自動計測を行った場合でも、微細な弦の抽出にて自動計測と手動計測の差が現れる場合もあるようだが^{3,4)}、作業労力は著しく低減されて今日に至る。

ASTM C457 では作業や計測手順に関して必ずしも詳細に規定されているわけではない。自動計測については規定の本文中にて言及されているが、その計測に画像

解析を用いた場合の具体的手順に関する記述はない。例えば、リニアトラバース法を実施する場合には、最大骨材寸法に応じた最小観察領域の大きさや最小のトラバース長が規定されている。しかし、計測対象を弦ではなく気泡の個数や面積とすることに關連して、解析対象とすべき領域の具体的な大きさなどは明らかではない。

セメントペースト体積率が配合等により既知である場合、画像解析であっても求めるべき重要な値は気泡体積率と気泡比表面積である。リニアトラバース法においては、前者は規定された全トラバース長に対する気泡を横切った弦長和の比から、後者は平均弦長から決定される。画像内の気泡が同定されて個々の気泡面積が利用できる場合でも、リニアトラバース法の手順に従い1画素幅のトラバース線を画像上に設定して、弦長計数を行うことは可能である。しかし、一般には、前者は2値化抽出された気泡の画素数の計数から、後者は断面に現れた気泡断面の直径や平均面積から求める方（以後、面積法と称す）がより直接的で簡単である^{2,5)}。また、この面積法を用いるならば、プログラミング等の専門知識は必ずしも必要ではなく、一連の計数作業を一般的な画像解析ソフトウェアの基本機能だけで行うことも可能である。

一方、著者ら⁶⁾はより簡便な気泡構造評価を目的として、気泡を点に置き換えて気泡間の距離を評価する点過程法を提案してきた。その方法によれば、ランダム配置を代表する気泡間隔特性値は、面積法によって求めた気泡間隔係数とほぼ等しい。しかし、点過程法の結果はリニアトラバース法のそれとやや差があり、特に空気量が少ない場合において、リニアトラバース法により求めた気泡間隔係数との差が大きくなる傾向がある⁷⁾。

画像としては一般的な2次元の同一画像を用いて同じ特性値を求めていながら異なる結果が得られるというのは、画像からの計測や評価を汎用的な手段として導入し

*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) 東北支店技術室 修士 (工学) (正会員)

*3 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 教授 博士 (工学) (正会員)

ていくうえで、その適用性上の大きな問題になりうる。また、不均質材料であるコンクリートの画像から計測を行うことを、標本抽出による母集団特性の推定とみなすならば、手法に対応した適切な標本の大きさとしての画像寸法（解析領域）を考える必要がある。評価の対象とする画像内の特徴が異なるので、解析対象とすべき領域は必ずしもリニアトラバース法と同じとは限らず、面積法ではどの範囲の画像を取得すべきかなど、具体的な手順を明確にしていくことも必要である。

本研究においては、リニアトラバース法と面積法、および点過程法で評価される気泡特性値に関して、計測方法間での相違と対応について明らかにする。そして、気泡間隔係数に関わる個々の計測値の変動を、標本としての気泡数や観察領域の大きさの観点から論ずることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 コンクリート使用材料と配合

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、細骨材には大井川水系陸砂（表乾密度 2.58g/cm^3 、吸水率 2.22%）、粗骨材には青梅産砂岩碎石（表乾密度 2.66g/cm^3 、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（ $100 \times 100 \times 400\text{mm}^3$ ）は打込後 24 時間にて脱型し、水中養生（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）を行った。コンクリートの水セメント比は 0.50 で、設計空気量を 3.0、4.5、および 6.0% として AE 剤量を調整した。使用したコンクリートの配合とフレッシュ時に計測された空気量を表-1 に合わせて示す。

2.2 ASTM リニアトラバース法および面積法による計測

材齢 3 週にて供試体から $100 \times 100 \times 30\text{mm}^3$ 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（ $60 \times 60\text{mm}^2$ ）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高精細画像を取得した。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 $6.14 \times 6.14\text{mm}^2$ 、2048 画素 \times 2048 画素、分解能は $3\mu\text{m}/\text{画素}$ ）に分割して取得した。それらの個々の分画画像取得時に、順光と斜光照射を繰り返し行い、陰影の差分により

気泡を自動的に検出した。取得した分画画像および自動検出された気泡の 2 値化抽出の例を図-1 に示す。気泡は白く縁取りされて現れ、目視上は微細な気泡まで適切に抽出できているように判断される。また、一部の気泡は分画画像の周縁上に存在していて、全断面が現れていないものが認められる。しかし、本解析においては、このような気泡数は全気泡数に比べて小さく、トラバース線で走査される確率も高くないと判断し、エッジ補正等を行っていない。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、残った気泡の数、個々の径（ D_i ：円相当径）およびその中心座標 x_i （ $i = 1, \dots, j, \dots, n$ ）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 分画内のトラバース線の本数 4 本を最小数とした。さらに気泡検出数を増すことを意図して、これを 8、12 および 16 本と変化させた。よって、121 分画での全トラバース長は、画素寸法を基

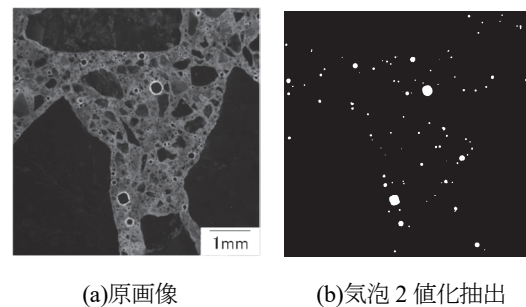


図-1 小分画の精細画像とその気泡抽出画像（設計空気量 3.0%配合コンクリート）

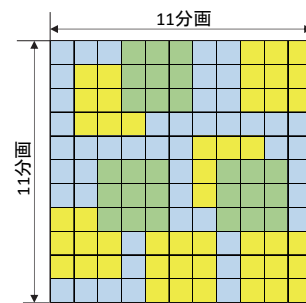


図-2 面積法の解析対象領域からの分画抽出例（ 3×3 分画、9箇所のランダム抽出）

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	設計空気量 (%)	単位量 (kg/m^3)					フレッシュ時空気量 (%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤 (%wt./C)	
50	45	10 ± 2	3	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	165	330	779	982	0.01	6.5

に換算すると、それぞれ約 2970, 5940, 8920mm および 11890mm である。各分画内にてそのトラバース線の数で分画全体を代表させるようにしてトラバース線の間隔を適当に調整して 2 値化画像上に配置し、画像解析によって各トラバース線上の気泡数および気泡弦長を自動計測した。トラバース線を配置する試行の繰り返し数は 5 回とした。表-1 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。ただし、円相当径で 2mm 以上の空隙部分はエントレインドエアではないと判断して、これを横断する弦は計数から除いた。

$$L = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(1 + \frac{p}{A} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (1)$$

ここに、 A : 気泡の体積率
p : セメントペースト容積比
α : 気泡の比表面積

なお、気泡比表面積はリニアトラバース法により計測する場合は式(2)、面積法に基づく場合には式(3)により求めた⁹⁾。

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} \quad (2)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}} \quad (3)$$

ここに、 \bar{l} : 平均弦長
 \bar{a} : 気泡の平均面積

2.3 代表体積要素の計算

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は代表体積要素 V_{RVE} と称される⁸⁾。評価しようとする物性に対して代表体積要素が実験により求められな

い場合は、画像演算により求める、もしくは統計的に求めることができる⁹⁾。本研究では後者の方法を用いることとし、画像分画数を増大させたときの標準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 Kanit⁸⁾の提案に基づき式(5)および(6)により求めた。

$$V_{RVE} = \frac{4(1-A)A_2}{nA\varepsilon^2} \quad (5)$$

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

ここに、 A : 空気量
n : 標本数
ε : 相対誤差
 A_2 : 計測された空気量の分散に関する値
 $D_A^2(V)$: 分画面積Vの計測の空気量の分散

式(5)より、推定の要求精度を高くすると、抽出された標本の変動が大きい場合には、より広い範囲の観察が必要であることがわかる。本研究においては、相対誤差 0.1 までを許容するものとし¹⁰⁾、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数を考慮して、画像枚数を 9 枚とした。121 枚の分画中、抽出する分画数を 1 から 81 (縦横 1 × 1 から 9 × 9 分画からなる正方形領域) まで変化させた。それぞれの分画数にてランダムに領域を 9 箇所抽出して、その分画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)。

2.4 点密度の計算

気泡をその重心点で代表させる点過程法の基本パラメーターである気泡個数の点密度λを次式により求めた

$$\lambda = \frac{N(W)}{A(W)} \quad (4)$$

ここに、 N(W) : 観察領域 W 内にある気泡の個数
A(W) : 観察領域面積

3. 結果および考察

3.1 リニアトラバース法の検出気泡数の増加にともなう特性値の変化

表-2 気泡計測結果一覧

トラバース線数/分画	空気量A(%)			平均弦長(μm)			比表面積α(/mm)			気泡間隔係数L(μm)		
	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%	3.0%	4.5%	6.0%
4	1.3	2.6	3.2	105	101	101	38.2	39.7	39.6	231	163	149
8	1.3	2.6	3.2	103	101	100	38.8	39.6	40.1	225	162	147
12	1.2	2.6	3.2	102	103	100	39.2	38.9	40.2	227	165	147
16	1.3	2.6	3.2	102	101	100	39.2	39.7	40.2	225	162	147
面積法	1.3	2.6	3.2	-	-	-	52.6	53.3	52.0	166	121	113
点過程法 ⁷⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	174	137	114

表-2はリニアトラバース法、面積法の計測結果と点過程法にて求めた気泡間隔特性値 λ を合わせて示したものである。ASTMの規定を満足するトラバース線数4本(トラバース長2970mm)の気泡間隔係数を面積法と比べると、空気量が小さいほど両者の差が大きくなる傾向があり、空気量3.0%の配合では65 μm の差がある。Snyderら¹¹⁾は、空気量が小さくて弦数が少ない場合には、計測結果の変動が大きいことをシミュレーションによって示し、計測の信頼性を向上させるためにトラバース長を規定以上に大きくとることを勧めている。そして、検出弦数が1000~3000個程度になるようにすると、信頼区間95%で実際の空気量との誤差10%以内での推定が可能

であると指摘している。実際にトラバース長を増大させたときの各特性値の計測値の変動係数を図-3に示す。いずれの空気量の配合においても、トラバース長を増大させることによる変動係数の低下は明らかである。特に、空気量に関して、1分画当たりのトラバース線数を4本(トラバース長2970mm)から8本(トラバース長5940mm)に増大させることによる変動係数の低下割合が大きく、かつ設計空気量が少ない3.0%の配合にてその傾向が顕著である。しかし、表-2の結果に示すように、トラバース長を増大させて計測値の変動が小さくなくても、計測結果および気泡間隔係数はほとんど変化しない。よって、リニアトラバース法と面積法で求めた気泡間隔

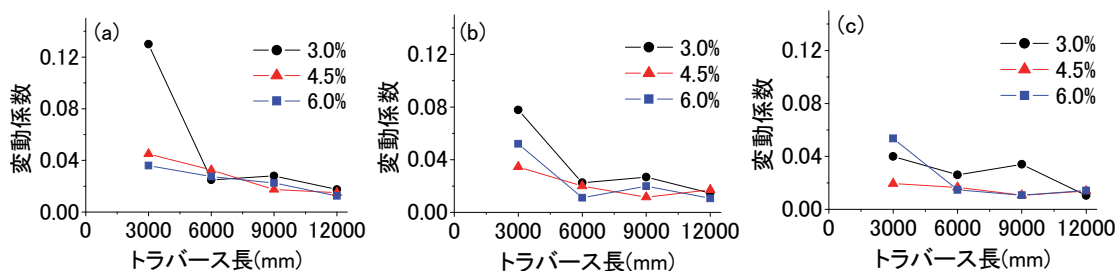


図-3 トラバース長の増大にともなう各特性値の変動係数の変化: (a) 空気量 (b) 平均弦長および比表面積 (c) 気泡間隔係数

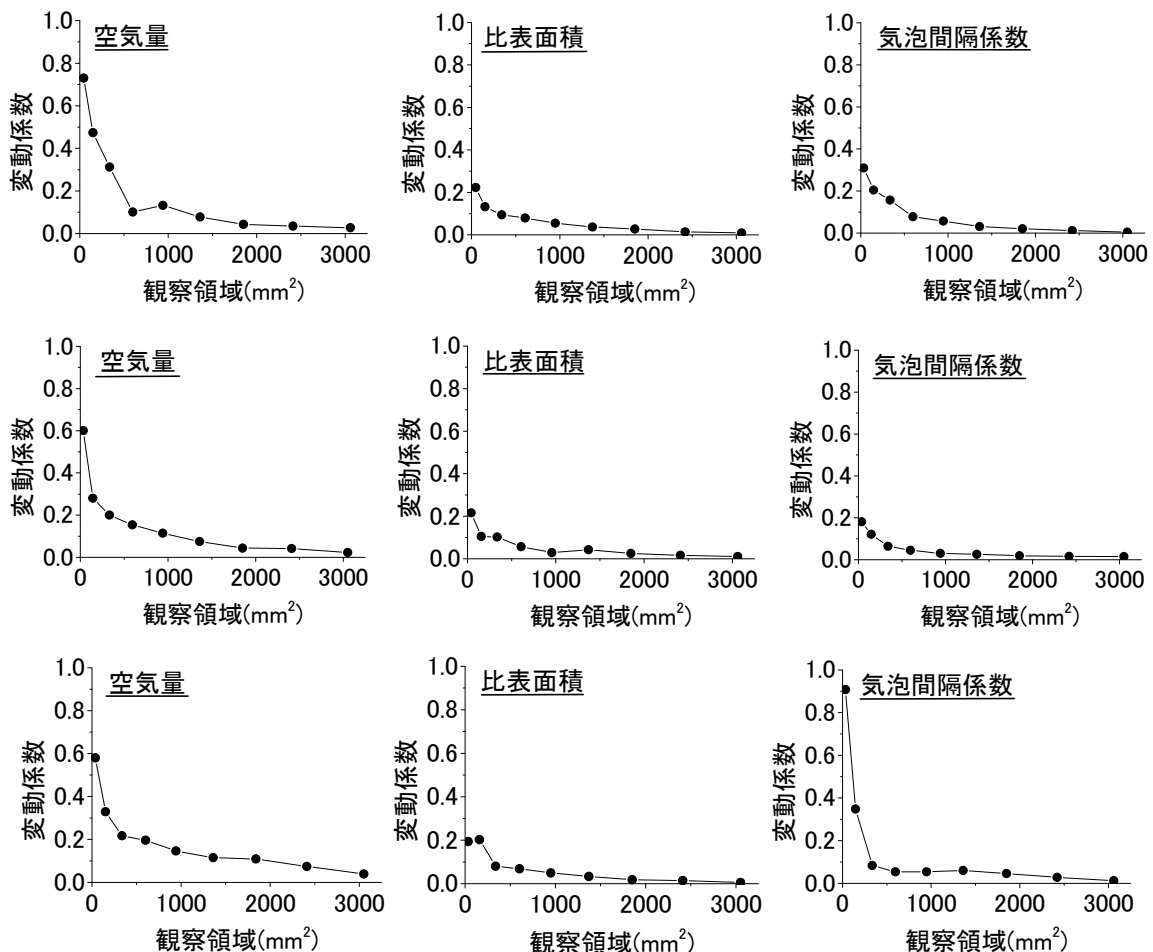


図-4 観察領域の拡大にともなう各特性値の変動係数の変化 (上段 3.0%, 中段 4.5%, 下段 6.0%)

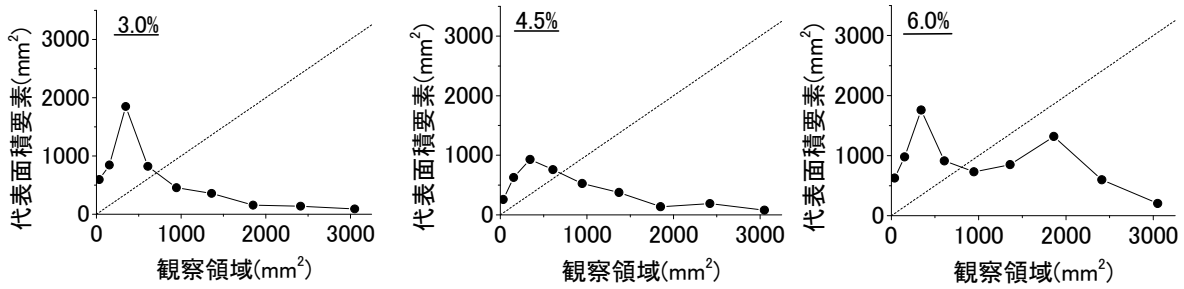


図-5 観察領域と代表面積要素の関係

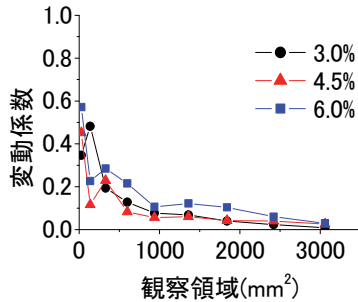


図-6 観察領域の拡大ともなう点密度の変動係数の変化

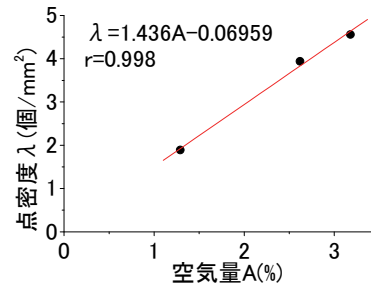


図-7 気泡の点密度と空気量の関係

係数の相違は、式(1)中の空気量 A に差がないことから(表-2), 結果として評価された比表面積 α の差に帰着することになる。

比表面積は計測される弦長や面積の平均値により決定され、このとき気泡の計数値が重要なパラメーターとなる。リニアトラバース法では、トラバース線的位置によって影響を受ける弦数が平均値の計算に用いられる。しかし、リニアトラバース法の根拠となるステレオロジーにおいて、この弦数はステレオロジー量間の関係式に含まれる基本ステレオロジー量ではない¹²⁾。一方、面積法では面内にて実際に現れている気泡の実数を用い、これはステレオロジーの一つの基本量でもある。よって、異なる統計的背景を持つ数で除すという平均値取得操作が、評価値としての比表面積に及ぼす影響に関して、さらに検討する必要があると思われる。

3.2 面積法の解析対象領域面積の変化ともなう気泡特性値の変化

図-4は面積法にて観察領域の大きさを変化させたときの各特性値の変動係数を示したものである。観察領域を拡大することによる各特性値の変動係数の低下は明らかである。設計空気量3.0%、4.5%および6.0%の各配合にて空気量の計測にて変動係数0.1まで許容するとすれば、いずれの配合も分画数25(5²枚, 観察領域約940mm²)以上の領域を観察しなければならない。比表面積は空気量よりも変動係数は小さく変化していて、いずれの配合も分画数9(3²枚, 観察領域約340mm²)以上の領域を観察すれば、許容誤差以下となる。空気量はその分画内に

占める骨材領域の大きさに強く影響を受けるため、観察領域が小さい場合の変動係数は大きくなったものと考えられる。一方、比表面積は空気量が少なく、かつ観察領域面積に差があっても、観察された気泡の粒度分布に大きな偏りは認められなかった。その結果、比表面積は領域間の局所的な変動が小さく、より均質な性質を持つ特性値として得られているようである。以上の特性値を用いて計算される気泡間隔係数では、空気量3.0%の配合では分画数16(4²枚, 観察領域約600mm²)、4.5%と6.0%の配合では分画数9(3²枚, 観察領域約340mm²)以上の領域を観察すれば許容誤差以内の推定が可能ということになる。このとき、最も気泡数の少ない3.0%の配合でも計数される気泡数は約1100個程度であり、Snyderらの指摘¹¹⁾と矛盾しない。

図-5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940mm²(分画数5²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、面積法としては一辺が約30mm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上からも有用と判断される。

図-6は観察領域面積を変化させたときの気泡点密度の変動係数を示したものである。図-4と類似の傾向が認められ、観察領域面積の増大とともに変動係数は低下する。観察領域940mm²(分画数5²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ともなう変化は小さい。一方、図-7は実際の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思なせる。また、図-4および図-6に示したように誤差の収束傾向が一致することから、面積法と点過程法では代表体積領域も同程度であって、さらに両者においては同じ気泡個数情報と面積情報を用いる⁹⁾。これらのことが、両者にて評価される気泡間隔係数がほぼ一致することに⁹⁾に関係していることが考えられる。

4. 結論

空気量を変化させたコンクリートの気泡特性を、ASTMC457 リニアトラバース法、面積法および点過程として評価し、気泡間隔係数に関わる各特性値の変動を解析領域の大きさおよび気泡数との対応から検討した。本研究にて得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) トラバース長を増大させると各特性値の変動係数は低下するが、それらの平均値はほとんど変化しない。
- (2) リニアトラバース法と面積法の気泡間隔係数の差異は気泡比表面積の相違に帰着する。両者において計数された個数で除すという平均を得る操作の背景についてさらに検討を要する。
- (3) 面積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940mm²)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。
- (4) 点過程法を用いる場合も分画数25枚を観察すれば、基本パラメーターである点密度の標準誤差も10%以下で推定される。
- (5) 面積法と点過程法における気泡特性値の一致性には、両者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。

謝辞

本研究の実施にあたり、(株)八洋コンサルタントより

気泡画像データを提供いただきました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) ASTM C 457-98: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void Systems in Hardened Concrete, 1998.
- 2) Pleau, R., Pigeon, M. and Laurencot, J.L.: Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol.23, No.2-3, pp.237-246, 2001.
- 3) Jakobsen, U.H. et al: Automated air void analysis of hardened concrete- a Round Robin study, *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.8, pp.1444-1452, 2006.
- 4) 谷口円ほか: 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.
- 5) 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の解析理論, *土木試験所月報*, No.396, pp.2-8, 1986.
- 6) 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, 2016.
- 7) 寺澤佑丞, 室谷卓実, 五十嵐心一: 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隔特性値の比較, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.40, No.1, pp.507-512, 2018.
- 8) Kanit, T. et al: Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach, *International Journal of Solids and Structures*, Vol.40, No.13-14, pp.3647-3679, 2003.
- 9) Rozenbaum, O. and Roscoat, S.R.: Representative elementary volume assessment of three-dimensional x-ray microtomography images of heterogeneous materials: Application to limestones, *Physical Review*, 89 053304, 2014.
- 10) Illian, J. et al: Statistical analysis and modelling of spatial point patterns, Wiley, Chichester, 2008.
- 11) Snyder, K., Hover, K. and Natesaiyer, K.: An investigation of the minimum expected uncertainty in the linear traverse technique, *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol.13, No.1, pp.3-10, 1991.