

論文 分割取得された小領域画像標本の気泡の統計量と分布シミュレーション

油上 慧吾*1・五十嵐 心一*2・山下 総司*3

要旨：自動計測にて取得された複数のコンクリート小領域画像標本から、気泡を点過程としてモデリングすることを目的として、それらの画像の気泡数に関する統計量を調べた。各標本の気泡点密度は骨材の影響を受けるため大きく変動するが、ペーストマトリックスを参照領域とした点密度では、標本間で大きな変動はなかった。ペースト率の分布を正規分布およびポアソン分布で、点密度をポアソン分布でモデル化した混合過程としてのシミュレーションにより、実際の気泡分布パターンをおよそ再現できるようであり、推定された気泡間距離の特性値と画像から直接求めた実測値との差は小さかった。

キーワード：画像, ペースト率, シミュレーション, 点過程, 最近傍距離分布関数, 気泡間隔

1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性を改善するために、適正量の空気が導入される。この場合の適正量とは、凍結融解抵抗性試験結果から求められる耐久性指数を基に、気泡間隔係数が例えば 0.2mm 以下になるような空気量として設定される。よって、コンクリートの凍結融解抵抗性を担保するためには、気泡間隔係数にて特性化される気泡間距離が、その設定値以下にあることを確認する必要がある。一般には ASTM C457¹⁾(以後 ASTM と称す)に規定されたリアトラバース法に従って計測されることが多い。この方法では走査型の実体顕微鏡下で、走査線を横断する気泡弦長を逐次記録していく。このとき断面に現れる大小の気泡観察に関して、直径 0.01mm の気泡が同定できることが要求されており、このために適切な表面研磨仕上げを行うことと、50 倍以上の倍率にて観察することを規定している。

一方、気泡計測は現在では従来の手動による走査線の逐次計数から、画像取得による自動計測へと試験方法は進歩している²⁾。その場合も、気泡分布の評価は ASTM に依拠しているため、画像取得においても 0.01mm の直径の気泡が識別できるような倍率が採用される。そのような倍率にて画像観察を行うと、一般の実体顕微鏡での観察視野の大きさは高々数 mm 四方程度となる。例えば、最大骨材寸法 25mm のコンクリートが評価対象であるとき、ASTM では最小で 77cm² の領域の研磨仕上げを要求している。この領域内にて数 mm の間隔で走査線を設定すれば、必要最低限のトラバース長約 2.4m の計測が行える。しかし、ASTM には画像を用いた計測のための画像取得に関する明確な記述はなく、もし 2 次元の画像情報を用いているにも関わらず、トラバース線という低次

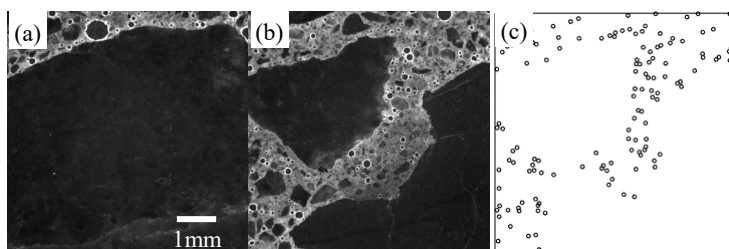
元 (1 次元) のプローブを用いた場合と同じ大きさの領域の画像を観察するのであれば、100 枚以上の画像が必要になる。ステレオロジーの基本方針である観察のバイアスを避けることを意識し、その一方にて、モルタル部分の多いところを選ぶことを指示している ASTM に従うことにより、ランダムに走査しながら観察箇所を選択、画像取得を繰り返すのは現実的ではない。結果として、従来のリアトラバース法と同様に自動計測においても、観察箇所は規則的なステージ移動を繰り返して連続した小領域の画像として取得される。それらの小領域画像を結合すれば走査領域全体の気泡分布状況が俯瞰できるが、画像容量が非常に大きくなり、通常の画像解析での取り扱いが困難になりがちである。

著者らは、画像を用いた気泡分布評価法として、気泡を 2 次元面内の点の分布と見なし、点過程の考え方をを用いて、気泡の座標情報から気泡間隔に関する距離の特性値を直接評価する方法を提案してきた^{3,4)}。本法によれば、きわめて簡単に気泡間隔係数に代わる距離特性値を得ることができる。しかし、その一方にて、前述のように、50 倍以上の倍率で小領域の画像の自動取得を行った場合、特に粗骨材を有するコンクリートの場合には、観察領域の大部分を骨材が占めてしまい、ほとんど気泡の含まれない画像も取得されることになる(図-1(a))。また、骨材の占有の状況によっては、気泡が小領域の画像内に偏在する場合があります。これを点過程に変換したときには、凝集性の分布なのかランダムな分布なのかの判断ができない分布も観察されることも多い(図-1(b)(c))。換言すれば、全体の気泡分布の局所的な標本として取得した画像は、その小領域内に気泡がどれぐらい含まれるかという事象に関する確率過程と、含まれている気泡が小領

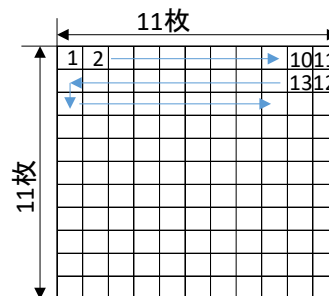
*1 金沢大学 理工学域環境デザイン学類 (学生会員)

*2 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)

*3 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)



図－1 自動計測にて取得された画像の気泡の分布：(a)骨材が大部分を占有する領域 (b)視野を横断するペースト領域に分布する気泡 (c)点過程としては凝集分布に見える例



図－2 領域の分割と画像取得方法

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 (%)	硬化コン クリート 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	2.1
50	45	10±2	4.5	165	330	797	1003	0.007	5.0	3.6
50	45	10±2	6	165	330	779	982	0.01	6.5	5.3

域内でどのような空間分布を呈するかの確率過程の2つを混合した過程の結果であり、気泡分布の特徴は個々の標本にて大きく変動することになる。

気泡分布を確率過程として評価することの主要目的として、それらのデータをモデリングしてシミュレーションを行い、所要の性能を推定することが挙げられる。そのモデリングのためには、標本として得られた小領域の画像データに対して、統計的な性質を明確にしておくことが必要である。そして、その小領域内の気泡分布の変動に対応したモデリングによって、全体の気泡分布のシミュレーションが可能になれば、気泡の評価に加えて、耐凍害性の条件を満足するような気泡分布を、配合条件から事前に推定できることになる。さらに、個々の画像標本の統計データを整理することは、一般に普及しながらも明確な手順が定められていない画像を用いた気泡分布の評価に関して、具体的な試験手順を確立するうえで有用な知見を与えるものと期待される。

そこで本研究においては、ASTMの規定を満足する条件下で自動取得された標本としての小領域画像を用い、点過程としてコンクリート全体の気泡分布を評価するときの基本パラメーターである点密度の決定に関わる統計データの特徴を明らかにする。特に、気泡の存在可能領域であるセメントペーストマトリックスの面積率に着目して、小領域内の面積率の分布をモデル化する。そのモデルに基づいて気泡分布のシミュレーションを行い、再現された気泡分布パターンに対して著者らが提案してきた点過程法の気泡間距離に関する特性値を求めて、それらと実測された特性値を比較して、シミュレーションモ

デルの適用性を検討することを目的とする。

2. 解析方法

2.1 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）を使用した。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碎石（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（100×100×400mm）を打込み後 24 時間にて脱型し、所定材齢まで水中養生（20±2℃）を行った。使用したコンクリートの配合を表－1 に示す。

2.2 画像取得とリニアトラバース法による計測

材齢 3 週にて供試体から 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、高精度カメラを用いて研磨面のグレースケール高精細画像を自動取得した。なお、画像の取得では、対象領域を 11×11 = 121 個の小領域（1 領域は約 6.14mm×6.14mm，2048 画素×2048 画素，画像サイズ 4M，分解能 3μm/画素）に分割して取得した（図－2）。各小領域の画像は試料ステージを水平方向に所定量の平行移動を行いながら取得し、走査領域端部に達したら下方に平行移動して逆方向に同じ走査を行って、計 121 枚の画像を取得した。なお、各小領域の画像取得時に、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同定した。同定された気泡に関して、リニアトラバース

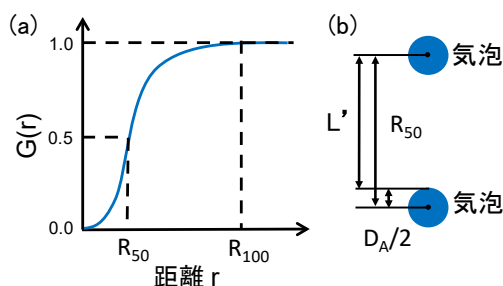


図-3 最近傍距離分布関数 $G(r)$ から定義した特性値 R_{50} と L'

手法の手順に従って弦長を自動計測し、空気量および気泡間隔係数を求めた。

2.3 点過程法における気泡間距離のパラメーター

2.2 にて取得した 121 枚の小領域を重なりのないように並べて貼り合わせ、解析対象領域全体とした。各気泡の重心を空間点とみなし、その座標 $x_i (i=1, \dots, j, \dots, n)$ の集合を点過程 $X=\{x_i: i=1, \dots, n\}$ とした。点過程 X に対して、距離 r を変数とする最近傍距離分布関数 $G(r)$ を求めた(式(1))⁵⁾。

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

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

ここに 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る。著者らが提案してきた点過程法では、累積確率で表される最近傍距離分布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(図-3)。メディアン距離 R_{50} から画像解析により求めた平均気泡径の 1/2 を差し引いて、これを気泡間隔特性値 L' として定義しているが^{3),4)}、シミュレーションは点の発生であって半径を持たない。よって、気泡間隔特性値 L' の推定では、実測された半径を仮定して求めた。

2.4 気泡の計数とセメントペースト面積率の決定

示方配合からコンクリート全体のペースト体積率は既知であるが、各小領域内では、骨材の占有割合によりペ

ーストマトリックス部分の面積率(以後ペースト率)は異なる。また、取得したグレースケール画像にて、骨材のグレースケール値は多様であるので(図-1(a))、セメントペースト相と骨材を厳密に識別することは困難である。よって、本研究では実務上の簡便性も考慮して、個々の画像について、目視判断にて最も視覚認識に一致するグレースケール値を単一のしきい値とする固定しきい値処理⁶⁾により、ペースト率を決定した。

2.5 気泡分布のモデリングとシミュレーション

各配合のコンクリートから取得した 121 個の小領域画像を標本としてペースト率の分布をモデル化し、その分布に従うペースト率をランダムに発生させた。そして、発生させたペースト率に対応する面積内に、気泡の点密度に対して仮定した確率分布に従って、気泡を表す点をランダムに配置した。その発生させた点パターンのメディアン距離 R_{50} および気泡間隔特性値 L' を求め、実際のコンクリート画像から直接求めたそれらの値、および従来法であるリニアトラバース法(弦長計測法、面積法)により得られた気泡間隔係数と比較した。

3. 結果および考察

3.1 小領域内のペースト率と気泡数の分布

図-4 に 121 個の小領域内のペースト率のヒストグラムを示す。検討対象としたコンクリート 3 配合は、単位水量とセメント量が同一であるので、ASTM に規定されるペースト量(気泡を含まない)は等しい。しかし、標本として同数の小領域を抽出していても、全体の分布は類似しているようには見えない。特に、空気量 3 および 6% の配合では、ペースト率 5% 以下という視野内のほとんどが骨材に占有されている小領域が数多く抽出されている。本研究では骨材の補集合領域としてペースト率を求めているので、これから空気量(表-1)を差し引いた値が、ASTM に定義されているペースト量に対応する。空気量 3% の配合のペースト率の平均値(29.5%)が示方配合から求められる値 26.9% に近い値を示す一方で、空気量 4.5% 配合のコンクリートでは、依然として示方配合

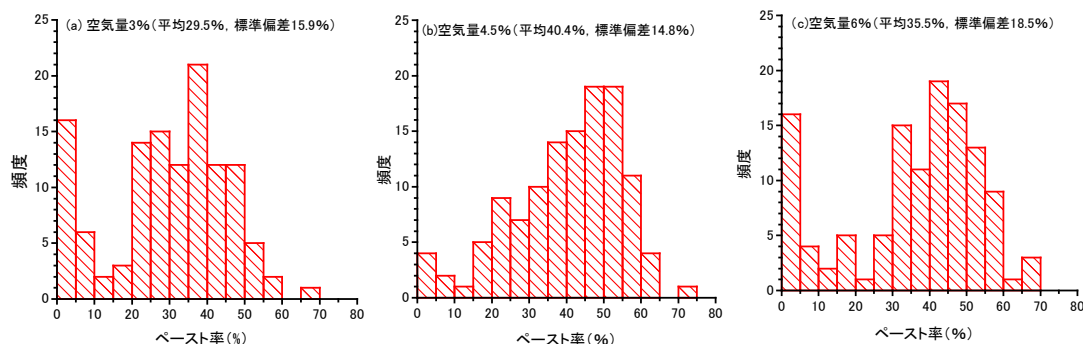
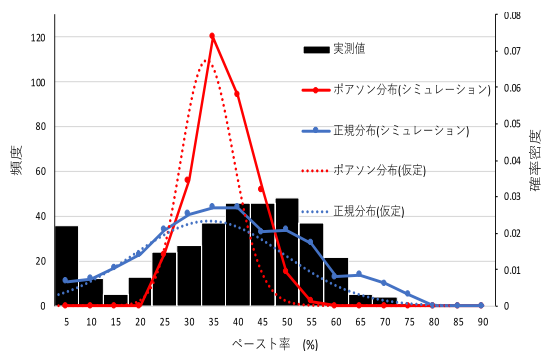


図-4 標本として的小領域内のペースト率の分布



図－5 小領域標本全数のペースト率の分布

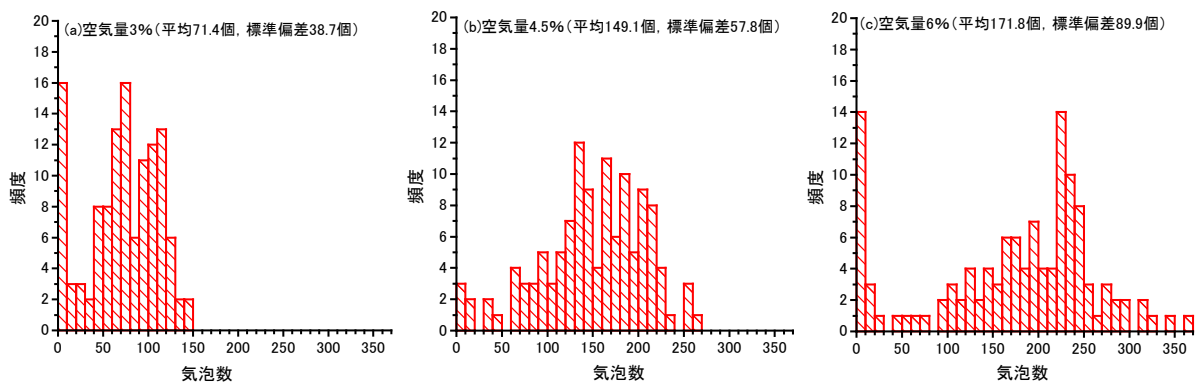
値と大きく異なる。ここで示方配合上のペースト量が同一であることに着目し、空気量を問わずに全小領域（363枚）を標本としたときのペースト率の分布を求めると、図－5 のヒストグラムを得る。示方配合値とペースト率全体の平均値（35.13%）はやはり大きく異なったままであるが、平均値付近を最頻値として両側に減少していく傾向は、各配合で個々に求めた場合よりも明確に現れているように思われる。また、骨材占有域が存在するので、ペースト率の大きくなる側への分布範囲は小さく、小さくなる側に尾を引くような分布を示す傾向は、図－3 と同様である。

図－6 は小領域内に含まれる気泡数のヒストグラムを示したものである。空気量が増すと気泡数が増えるので、

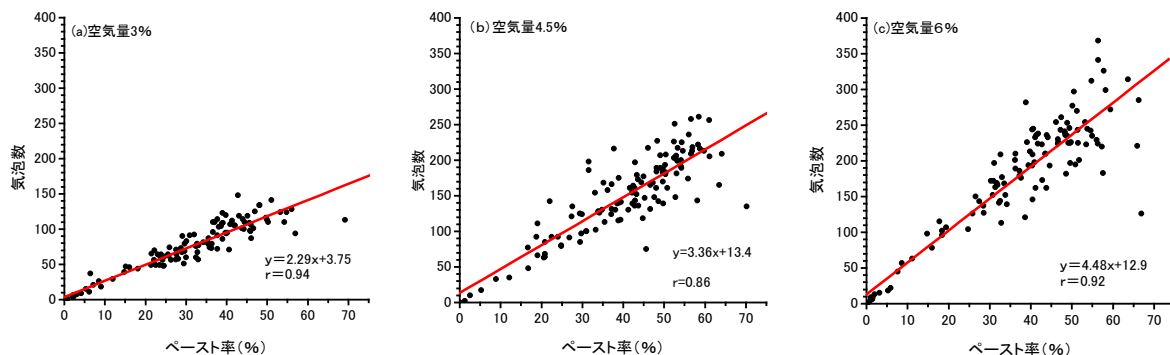
空気量が多いほど気泡が存在する階級の分布の範囲は広がっていく。また、気泡数分布の変動係数は空気量 3,4.5 および 6% 配合で、それぞれ 54, 39, 52% 程度であり、やはりペースト率の著しく低い小領域を多数含む空気量 3 および 6% 配合にてデータのばらつきの程度が大きくなっている。図－7 は小領域内の気泡数とペースト率の関係を示したものである。両者の間には直線回帰できる良好な相関性が認められる。これより、図－6 に示した小領域内気泡数の多少はペースト率を反映していることになり、ペーストマトリックス内に関する限り、面積が小さいのに多数の気泡点が存在するなどの凝集（点のクラスター形成）などの不均質な分布を生じることの影響は小さかったものと思われる。実際、ペースト領域を参照領域として点密度を求めると、図－8 に示すような分布を得る。点過程の標本抽出として一般的な方法である小領域抽出とその内部の点数計測を行って、点数に大きな変動があっても、基本パラメーターである点密度に大きな変動はなく、平均値付近に集中して頻度が大きくなる傾向が認められる。実際、点密度の平均値と分散の間に大きな差はなく、最も変動の大きいとみなされる空気量 6% の配合でも、過分散として考慮するほどではないと、ここでは判断した。

3.3 気泡の分布シミュレーション

小区画に区切られた領域の画像を取得し、これから気



図－6 小領域内の気泡数の分布



図－7 気泡数とペースト率の相関性

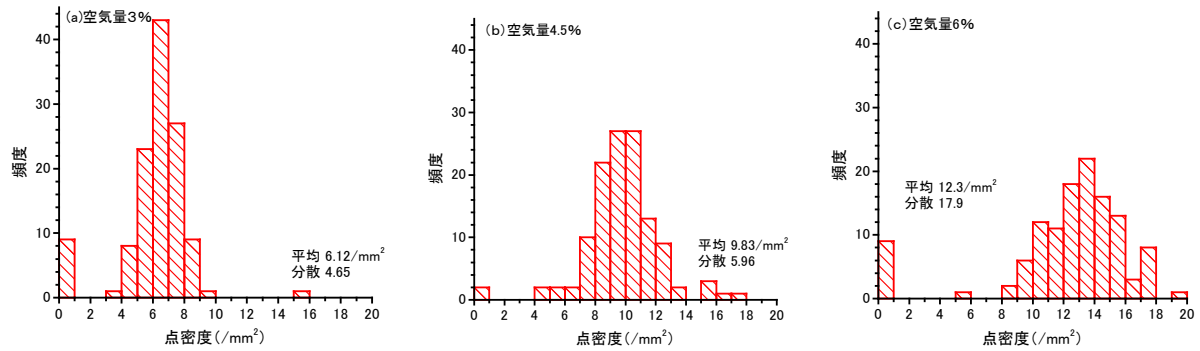


図-8 ペースト領域を参照領域とするときの点密度の分布

泡の空間分布を点過程として再現するためには、セメントペースト領域内での気泡の点密度を与える必要がある。そこで、ペースト率の分布と気泡の点過程分布の2つの確率過程を組み合わせ、画像標本を用いて以下の手順によるシミュレーションを試みた。

- 1) 本研究ではペースト率は標本分布としては異なっても、母集団としては等しいとみなされる。そこで、図-5の小領域内でのペースト率の分布を、①平均値 μ_p と標準偏差 S_p をもった正規分布、または②平均値 μ_p をパラメータとするポアソン分布で近似する。
- 2) 1)にて仮定したそれぞれの分布に従うペースト率 p_i を、ランダムに発生させる。
- 3) ペースト率 p_i の領域に対して、図-7の回帰式から決定される気泡数を用いた点密度 λ_i を決定する。これをパラメータとするポアソン過程として、点過程 X_i を発生させる。
- 4) 点過程 X_i の最近傍距離分布関数 $G_i(r)$ を求め、 $G_i(r) = 0.5$ となるメディアン距離 R_{50} を求める。
- 5) 1)から4)の手順を200回繰り返す($i = 1, \dots, 200$)、最近傍距離分布関数の95%信頼区間を決定する。

図-5にペースト率の分布に関して近似した正規分布およびポアソン分布の確率密度関数、およびシミュレーションにて発生させたペースト率 p_i と点密度 λ_i のそれぞれの階級の頻度を折れ線にて、ヒストグラムに重ねて示している。正規分布はパラメータを2個用いて分布を表すので、そのぶん標本データのヒストグラムをよく再現しているように見える。また、その仮定した正規分布に従ってランダムに発生させた分布は、ほぼ仮定どおりの頻度分布を示している。一方、ポアソン分布で近似すると、分散が平均値で規定されるため、平均値近傍の頻度が実際の分布よりも大きく仮定され、発生させたペースト率が存在する階級の範囲が狭くなっている。

図-9に200回のシミュレーションにて再現された気泡の最近傍距離分布関数 $G(r)$ の95%信頼区間を示す。ペ

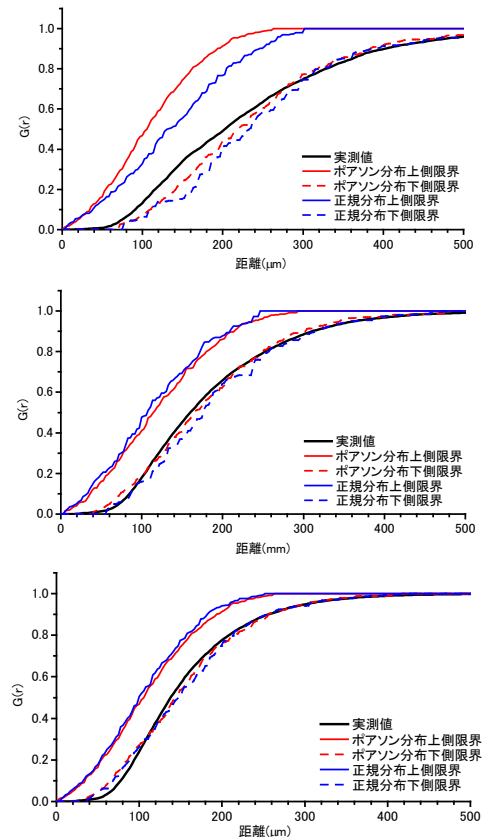


図-9 シミュレーションされた点パターンの最近傍距離分布関数の信頼区間と実測値の対応

ースト率の変動を正規分布で仮定してもポアソン分布で仮定しても、シミュレーションの結果にほとんど差はない。パラメータが1個のポアソン分布であっても、ペースト率の分布における代表的な範囲が含まれていたことが反映されている。また、これにより確率分布としてパラメータが1個のポアソン分布でも代表できることが示され、シミュレーションをより簡単に行えることを示している。実測された最近傍距離分布関数は、距離の小さい範囲では信頼区間の外にプロットされるが、気泡間隔特性値を与える累積確率0.5に対応する距離付近では、下限界に近い側ではあるが、信頼区間内に入ってい

表-2 気泡間隔に関する特性値の比較

設計空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)		メディアン距離 R_{50} (μm)		気泡間隔特性値 L' (μm)	
	リニアトラバース 法(自動解析)	面積法	実測	シミュレ ーション	実測	シミュレ ーション*
3	280	159	204	173	171	140
4.5	178	117	170	140	137	107
6	168	106	149	122	114	87

*実測の半径を仮定した場合

る。実際の気泡分布では、気泡自体の大きさを持つので、点が短距離にて隣接することはない。これに対して、シミュレーションではそのような近接配置も許されるので、実測値に比べて凝集側の分布を示し、信頼区間も実測値の上方に存在したと考えられる。メディアン距離は面積法で求められる気泡間隔係数との差異が高々数 $10\mu\text{m}$ 程度であり^{3,4)}、またペースト中の任意点から気泡中心までの距離と同意であることを考慮して、距離 $200\mu\text{m}$ に対応する確率をみると、空気量 3% の配合では、最近傍点をその距離内に有する点の割合は 40~80% と大きく変動し、空気量が増すにともない信頼区間は小さくなる。つまり、空気量が少ない場合はコンクリート内の場所によっては、局所的に気泡間隔係数の要求を満足しない気泡が疎な領域が多く存在する可能性が示唆されている。

表-2 にシミュレーションにて推定された気泡間隔特性値と実際の分布の特性値、リニアトラバース法の計測にて得られた気泡間隔係数をまとめて示す。シミュレーションにて推定した距離特性値と実測値および面積法で求めた気泡間隔係数との差は、やはり高々数 $10\mu\text{m}$ 程度ある。一方、以上のシミュレーションでは各標本のペースト率を既知としたが、一般にはこれが逐次求められるとは限らない。また、その同定の精度は必ずしも高くはない。しかし、図-5 に示すように、個々の小領域でのペースト率を用いずに配合上のペースト率を用いた場合も、最近傍距離分布関数は信頼区間に含まれる。よって、例えば図-10 に示すような日常的に計測される空気量と点密度の関係をjておけば、配合上のペースト率と空気量から推定される点密度に対して、それぞれポアソン過程を仮定してシミュレーションすることは可能であると思われる。

4. 結論

小領域画像標本の統計データをモデリングして、母集団である気泡分布の点過程シミュレーションを行った。本研究にて得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) 小領域中の気泡数は、ペースト率に左右される。しかし、ペースト領域を参照領域と考えたときの点密度に大きな変動は認められない。
- (2) 標本としての画像中のペースト率に正規分布もし

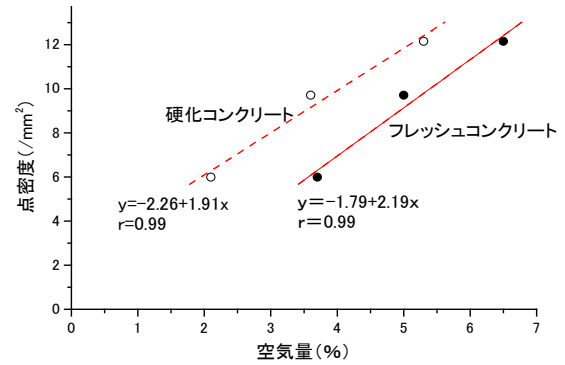


図-10 気泡点密度と空気量の関係

くはポアソン分布を仮定し、画像内での気泡の配置にはポアソン過程を仮定した混合過程として、シミュレーションする手順を示した。

- (3) ペースト率の標本分布を正規分布で仮定してもポアソン分布で仮定しても、シミュレーションの結果に差異は認められない。簡便なシミュレーションとしてポアソン過程のフィッティングが可能である。
- (4) シミュレーションにより推定した気泡間隔の特性値と実際に計測された距離特性値の差は小さい。

謝辞

本研究を行うにあたり、(株) 八洋コンサルタントより気泡計測記録を提供いただきました。ここに記し深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) ASTM C 457/C457M-16: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 2016
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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距離特性値の比較, コンクリート工学年次論文集, Vo.40, No.1, pp.507-512, 2018
- 5) Baddeley, A., Rubak, E. and Turner, R.: Spatial Point Process, Methodology and Application with R, CRC Press, 2016
- 6) 高木幹雄, 下田陽久 (監修): 新編画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, pp.1519-1523, 2004