

## 耐凍害性の観点から許容される気泡間距離とディリクレ分割タイル面積の対応

金沢大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○大山 和哉  
金沢大学理工学域地球社会基盤学類 正会員 五十嵐心一

## 1. 目的

コンクリート中の気泡を評価する目的として、観察された気泡分布に関する幾何学的特性値を見出すことと、その気泡分布を耐凍害性発現機構に関連付けることの2つがある。前者は基本的に凍害とは無関係に定義でき、後者により前者の有意性が担保される。実際のランダム分布の気泡に対してこの両者を行える方法として、著者らは気泡を点過程として取り扱うモデルを提案してきた<sup>1)</sup>。前者に対しては最近傍距離分布関数(G関数)を用いて気泡間距離を特性化し、後者に対してはディリクレ分割タイル面積を用いて気泡が保護すべき範囲を特性化した。しかし、両者にて得られる特性値の対応は明確ではない。

本研究は、ランダムな気泡点過程に関して、凍害に対して不利な条件にあると判断される局所領域の発生に着目する。そして、気泡間の最大距離特性と要求される保護面積の対応を明らかにし、耐凍害性の観点から一般に必要とされてきた空気量を、保護もしくは許容できる距離と面積の対応から説明することを目的とする。

## 2. 気泡分布の解析方法

## (1) コンクリートの配合と画像取得

解析対象は一般的な材料を使用した目標空気量 3, 4.5, 6%の普通AEコンクリート(W/C=0.5)であり、それらの配合を表-1に示す。3配合にてセメントペースト体積率は一定であり、空気量の増分は骨材体積にて調整した。コンクリートを所定材齢養生した後に、断面を研磨して高精度カメラを用いて断面中央部の60mm×60mmのグレースケール画像を取得した(図

-1(a))。なお、画像取得の際は、これを11×11=121個の小区画(1区画は約6.14mm×6.14mm, 2048画素×2048画素)に分割して取得し、陰影の差分により自動的に気泡を同定した。

## (2) 最近傍距離分布関数と距離の特性値

同定された気泡の重心点座標 $x_i$ を求め、これを点過程 $X = \{x_i; i = 1, \dots, n\}$ とした。その点過程に対して、点間距離 $r$ を変数とするG関数 $G(r)$ を求めた(式[1])。

$$G(r) = \Pr\{d_i = d(x_i, X \setminus x_i) \leq r | x_i \in X\} \quad [1]$$

ここに $d(x_i, X \setminus x_i)$ は点 $x_i$ と点 $x_i$ を除いた点過程 $X$ の最近傍点までの距離を表し、 $G(r)$ はその距離が $r$ 以下になる累積確率を表す。G関数を距離に対してプロットしたとき(図-2)、累積確率が0.95になるときの距離を特性値 $r_{95}$ と定義した。

## (3) ディリクレ分割と保護面積の特性値

点過程 $X$ に対して、ペースト領域のディリクレ分割を行った(図-1(b))。点を囲む個々の多角形タイル内では内部の点が最近傍点(気泡)となるので、各タイルの面積 $S_i$ から骨材の面積を差し引き、残りの面積 $S'_i$ を内部の気泡が保護すべき領域とした。点 $x_i \in X$ が最近傍点となるような点 $u \in W$ の集合(タイル領域 $S_i(x_i)$ )の定義を式[2]に示す。

$$S_i(x_i) = \left\{ u \in W : \|u - x_i\| = \min_j \|u - x_j\| \right\} \quad [2]$$

タイル面積 $S'_i$ を昇順に並べ替え、その累積面積 $\sum S'_i$ の全セメントペースト面積 $S_p$ に対する割合を被覆率と定義した。被覆率0.95に達するときの最大タイル面積の円相当半径 $R_{95}$ を保護範囲の特性値とした。

表-1 コンクリートの配合

| W/C<br>(%) | S/a<br>(%) | スランプ<br>(cm) | 設計空気<br>量<br>(%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |      | フレッシュ<br>時空気量<br>(%) | 硬化コン<br>クリート<br>空気量<br>(%) | 気泡間隔<br>係数(μm) |
|------------|------------|--------------|------------------|--------------------------|------|-----|------|----------------------|----------------------------|----------------|
|            |            |              |                  | 水                        | セメント | 細骨材 | 粗骨材  |                      |                            |                |
| 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            |

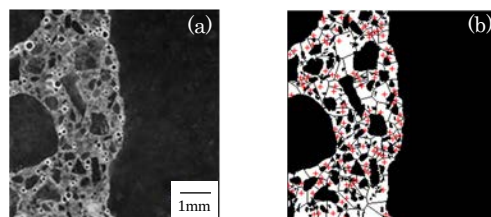


図-1 解析対象領域(a)とそのディリクレ分割図(b)

キーワード 気泡, 点過程, 最近傍距離分布関数, ディリクレ分割, タイル面積, 特性値

連絡先 〒920-1192 金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科 TEL 076-264-6364

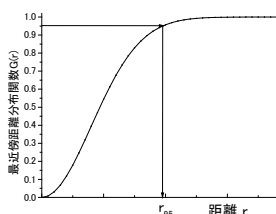
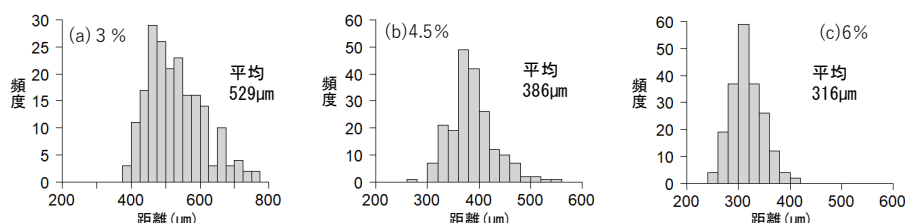
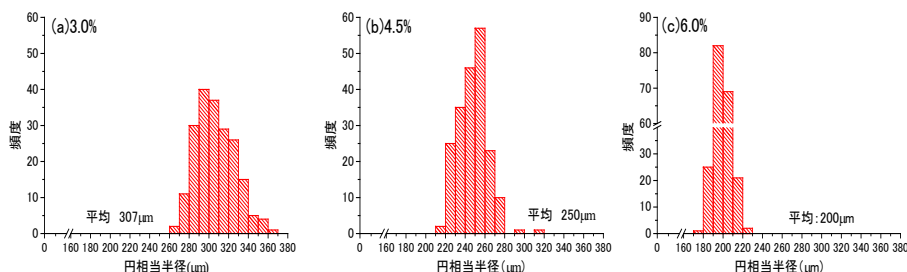
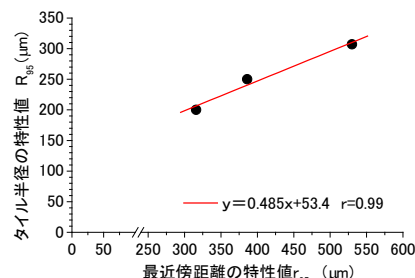
図-2 距離特性値  $r_{95}$  の定義図-3 最近傍距離の特性値  $r_{95}$  の分布図-4 被覆率 95%に達するときのタイル面積半径  $R_{95}$  の分布

図-5 特性値の相関性

#### (4) シミュレーションによる特性値 $r_{95}$ と $R_{95}$ の決定

気泡の分布はランダムに変動するので、その特性値も変化する。そこで、各配合 121 枚の画像から気泡の点密度  $\lambda$  を決定し、同時に各配合の代表領域とみなされる 1 枚の画像を選択した。そのセメントペースト部分の気泡の点密度は、 $\lambda$  をパラメーターとするポアソン分布に従うとした。そのポアソン分布に従う乱数を発生させ、発生させた乱数に対応する個数の点を、代表画像のペースト領域にランダムに配置するシミュレーションを 199 回行った。1 回のシミュレーションを行うたびに再現される点過程  $X$  に対して、G 関数の計算およびディリクレ分割を行い、特性値の  $r_{95}$  と  $R_{95}$  を求めた。

### 3. 結果および考察

図-3 はシミュレーションにて求められた G 関数の特性値  $r_{95}$  の分布を示したものである。最近傍距離は数  $100\mu\text{m}$  の範囲にわたり、空気量 3% では距離の大きい側に裾を持ち、気泡数が少なくなるとペースト内には気泡が疎らな領域の形成が避けられないことが強く表れている。一方、空気量が増大すると平均値も分布の範囲も小さくなり、6% ではほぼ左右対称の分布を示すようになる。例えば全画像から求めた平均径  $68\mu\text{m}$  の気泡の存在を仮定すると、凍害に対して不利な条件にある局所領域でも、空気量 6% では表面間距離は  $250\mu\text{m}$  程度になり、距離としては気泡間隔係数の推奨値に近い。

図-4 はディリクレ分割タイル面積から求めた特性値  $R_{95}$  の分布を示したものである。空気量が増すと気泡数が増し、1 つの気泡に割り当てられるタイル面積は減少するので、全体の分布は半径の小さい側へとシフトす

る。特に、空気量 6% では、半径は中央の峰部付近に集中する傾向が明らかで、気泡は偏りなく均質に分布するようになる。また、ここでもそのタイルに平均的な大きさの気泡の存在を仮定すると、3 配合で保護すべき距離は  $170\sim 270\mu\text{m}$  となり、この値は気泡間隔係数で示される距離とほぼ一致する。

図-5 に 2 つの特性値  $r_{95}$  と  $R_{95}$  の関係を示す。両者には直線で近似される強い相関が存在し、その値の間 ( $R_{95} < r_{95}$ ) には保護範囲の観点からの矛盾はない。よって、簡単に求められる G 関数の距離特性値から、配合設計上考慮すべき、凍害に対して弱点となる領域にて要求される保護距離を推定することは可能と考えられる。

### 4. 結論

気泡の希薄域の最近傍距離分布関数とディリクレ分割タイル面積のそれぞれの特性値間には強い相関がある。また、両者から推定される保護を必要とする距離は気泡間隔係数程度となり、気泡間隔係数の数値は、気泡が少なく凍害に対して弱点となる領域のランダムな気泡間距離特性に対応している。

### 謝辞

本研究の実施にあたり科研費(21K04211)の助成を受けた。

### 参考文献

- [1] 五十嵐心一, 山下総司, 油上慧吾: リニアトラバース法計測記録から推定した気泡の保護領域体積と気泡点まわりの領域分割で評価した保護領域面積分布の対応, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.66-73, 2022.