

点過程法とリニアトラバース法で求めた気泡間隔に関する特性値の対応

金沢大学 学生会員 ○寫越 豊 山下総司

金沢大学 正会員 五十嵐心一

1. 序論

凍結融解作用によるコンクリートの劣化は、寒冷地において重大な問題であり、コンクリートの施工にあつては必ず考慮されなければならない。この対策として、AE 剤を使用して適切に空気を連行すればよいことは周知であり、練混ぜ後のフレッシュコンクリートに所定量の空気が連行されていることを確認して、凍結融解抵抗性は担保されているとみなしている。しかし、凍害劣化機構の観点からは、フレッシュ時の空気量よりも、硬化後の空気量および気泡の分布、特に気泡間の距離が耐凍害性を評価するための重要な特性値である。

著者らはこの気泡間の距離を簡単に評価する方法として、気泡分布をランダムな点過程とみなし、画像から気泡間隔特性値を求める点過程法を提案し、それが従来のリニアトラバース法による気泡間隔係数と同等かつ矛盾しないことを指摘してきた¹⁾。しかし、その主張の根拠とした標本数は多くはなく、点過程法の適用性を明らかにするためには、数多くの既往の記録との照合が必要と考えられる。

そこで本研究においては、専門技術者により実施されたリニアトラバース法の信頼できる気泡計測記録の提供を受けた。それらの計測記録に点過程法の考え方を適用して気泡間隔特性値を求め、気泡間隔係数との対応性から、点過程法の統計的な信頼性および有用性を実証することを目的とした。

2. 解析方法

(1) リニアトラバース法の原データ

提供されたリニアトラバース法のデータは、水セメント比や空気量、最大骨材寸法などが多様なコンクリートに関して得られたものである。それらのうちセメントペースト率や気泡数、平均弦長および気泡比表面積など、算定に必要なデータに欠損がない

(2) リニアトラバース法計測記録から点過程法計算に必要なパラメータの抽出

点過程法の基本パラメータは、単位面積当たりの気泡数を表す点密度 λ_A と平均気泡径 D_A であり、これらと気泡間隔係数 L の間には式(1)の関係がある。

$$L = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{pD_A}{\lambda_A}} - \frac{D_A}{2} \quad (1)$$

ここに、 p :ペースト率である。しかし、ASTM C457に従って計測されたリニアトラバース法では、式(1)中の点密度と平均気泡径は計測されない。したがってこれらは不明値であるので、原データから推定することになる。ここでリニアトラバース法実施時に計測していたなら視野内で観察されたであろう気泡の平均面積を $\bar{a}$ 、気泡数を n_A とすると、リニアトラバース法にて求められた気泡面積率 A_A との間には、式(2)の関係がある。

$$A_A = \frac{A_{air}}{A_W} = \frac{n_A \bar{a}}{A_W} = \frac{\text{弦長和}}{\text{全トラバース長}} \quad (2)$$

ここに A_{air} :気泡面積、 A_W :参照領域面積。よって、点密度 λ_A は式(3)で求められ、気泡平均面積 $\bar{a}$ を求めることに帰着する。

$$\lambda_A = \frac{n_A}{A_W} = \frac{A_A}{\bar{a}} \quad (3)$$

気泡平均面積 $\bar{a}$ は、リニアトラバース法にて求められる平均弦長 $\bar{l}$ で決まる比表面積 α と次式にて関係づけられる。

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}} = \sqrt{\frac{6\pi}{\bar{a}}} \quad (4)$$

これより、個々の気泡の面積や個数計測を行っていないリニアトラバース法でも、平均弦長から平均気泡面積が推定され、結果として点密度が求められることになる。

(3) 点過程データから気泡間隔係数および気泡間隔特性値の算出

気泡がセメントペースト中に完全にランダムに分布しているとき、その重心点間の距離を r とする

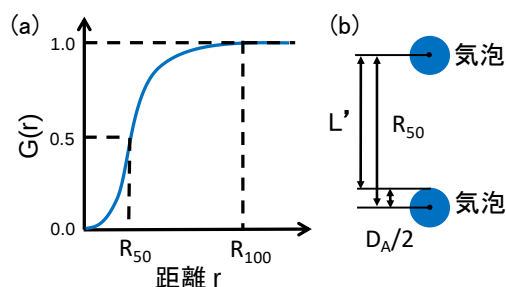


図-1 最近傍距離分布関数と気泡間隔特性値

と、気泡の分布を表す最近傍距離分布関数 $G(r)$ は次式にて一意に定まる。

$$G(r) = 1 - \exp(-\lambda_A \pi r^2) \quad (5)$$

著者らは累積確率関数である $G(r)$ の確率 0.5 に対応する距離 R_{50} から、平均気泡半径を差引いた値を気泡間隔特性値 L' として用いることを提案している

(図-1)。完全ランダム分布のとき、気泡間隔特性値は(6)式にて与えられる。

$$\begin{aligned} L' &= \left(1 - 0.77 \frac{\lambda_A}{p} R_{50}^2\right) R_{50} \\ &= (0.47p - 0.08) \frac{1}{p\sqrt{\lambda_A}} \end{aligned} \quad (6)$$

すなわち、リニアトラバース法の計測結果をもとにして点密度を決定すれば、気泡間隔特性値 L' が求められることになる。

3. 結果および考察

図-2 に 49 配合のコンクリートのリニアトラバース法の計測結果を示す。一般的な推奨値である 5% 前後の空気量が目標空気量であったとするならば、実際に硬化コンクリート中に連行された空気は、それより小さい場合が多い。また、平均弦長には概して大きな変動はないようであり、配合が異なっても 0.1 ～ 0.2mm 程度が多数を占める。比表面積は正規分布のような左右均等のような分布を示す。上述のようにある程度の空気量の損失があったと考えられるが、気泡間隔係数は一般に要求される 250 μm 以下という条件を満足する配合が多い。

図-3 に点過程法で求めた気泡間隔特性値 L' とリニアトラバース法で実測された気泡間隔係数 L の関係を示す。両者の間にはきわめて良好な相関性が認められ、かつその差も高々数 10 μm 程度でしかない。この良好な相関性から、両者の関係を適当な補正係数で対応付けることも可能と思われる。また、同一寸法気泡球の立方体格子配置を仮定して求められ

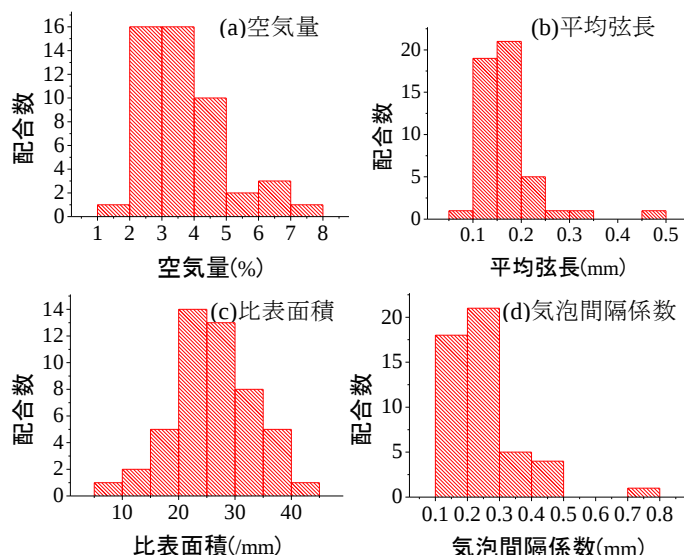


図-2 49 配合のリニアトラバース法計測結果

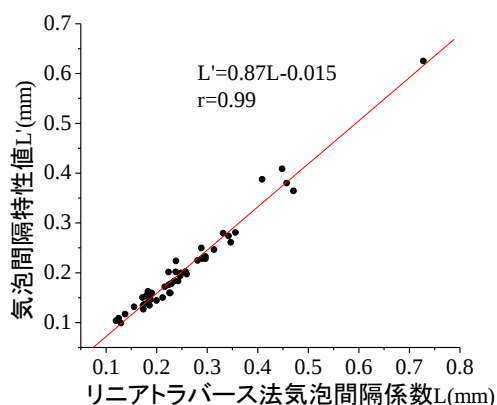


図-3 気泡間隔特性値と気泡間隔係数の対応

る気泡間隔係数は、実際のコンクリート中のランダムな気泡分布に対して、点過程として求めたランダム過程の確率の中央値を反映した値とみなしてよいと思われる。これまでは限られた標本数での確認であったが、本研究により、多くの配合での両者の相関が明らかになり、気泡間隔特性値 L' は、気泡間隔係数の代わりとなる統計的な信頼性を備えた特性値であると判断される。

4. 結論

点過程法の気泡間隔特性値 L' は気泡間隔係数 L と極めて良好な相関性を持つことを、複数のリニアトラバース法の計測結果との照合から実証し、特性値 L' の有用性を確認した。

参考文献

- 1) 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.