

硬化コンクリート中の気泡間の排他的距離を考慮した空間分布シミュレーション

金沢大学 学生会員 ○大山 和哉
金沢大学 正会員 五十嵐 心一

1. 序論

空気連行によるコンクリートの凍結融解抵抗性の改善は、空気量はもとより気泡の分布構造によって左右される。気泡分布の評価は、画像解析によって2次元代表領域から実際の3次元構造を統計的に推定する方法が一般的である。現在ではASTM C457リニアトラバース法を用いて、一般に気泡間隔係数0.2mm以下という値を耐凍害性担保の指標としている。しかし、この方法は気泡の規則配置を仮定しているため、実際の気泡系を評価していない。これに対して室谷ら¹⁾は点過程法を用いて、気泡のランダム性を保持したまま、実際の気泡の空間分布構造が簡単に評価できることを示した。

しかし、点過程法では体積を持たない点として気泡を表すため、気泡分布構造の設計を目的としたシミュレーションを行った場合、気泡自身の大きさのため実際には近接できないような近距離であっても、他点が配置される場合がある。したがって、気泡同士が近接している短距離圏においては気泡分布を再現できているとは言い難い。

そこで本研究では、気泡分布を点過程として再現する際、確率過程に従って気泡間に排他的距離を与えるシミュレーションを行った。シミュレーションにより得られた気泡分布の最近傍距離関数(G関数)を求め、実際の気泡分布のG関数との一致性を検討した。さらに、従来の点過程法における気泡間隔の特性値の変化を明らかにすることとした。

2. 解析方法

(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を用いてW/C=0.5、最大骨材寸法20mm、目標空気量4.5%で配合設計された普通コンクリートを解析対象とした。使用したコンクリートの配合とASTM C457リニアトラバース法(自動計測法)によって得られた気泡間隔係数を合わせて表-1に示す。

(2) 画像取得

ASTM C457の規定に従って、切断した供試体断面を精細研磨した後、洗浄および乾燥を行った。研磨中央部(約6cm×6cm)を計測対象領域とし、グレースケール画像を取得した。なお、計測対象領域を11×11=121枚に分割(一区画約6mm×6mm)

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位置 (kg/m ³)				AE 剤 (%wt./C)	フレッシュ時 空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
				W	C	S	G			
50	45	10±2	4.5	165	330	797	1003	0.007	5.0	178

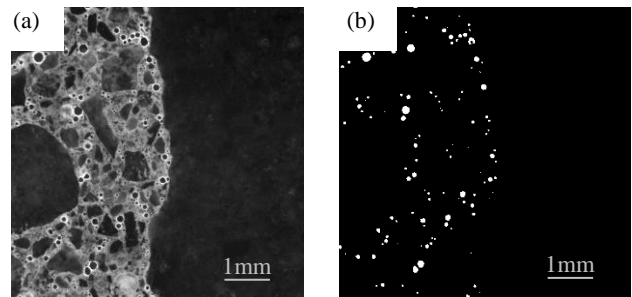


図-1 解析対象領域(a)とその気泡分布画像(b)

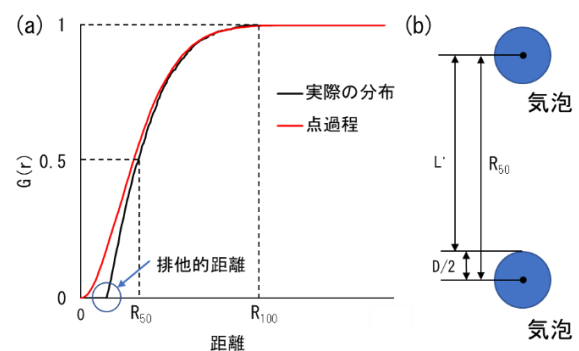


図-2 実際の気泡分布と点過程の最近傍距離関数の比較と排他的距離の説明図

し、ペースト面積率および骨材分布状況などから代表的なものを解析対象領域として選定した(図-1(a))。光照射の陰影差分より同定された気泡を二値化表示してその面内分布(図-1(b))を得た。

(3) 最近傍距離分布関数(G関数)と排他的距離

実際の気泡間の距離を評価するために、最近傍距離分布関数 $G(r)$ を用いた。これは点過程 X の要素である任意の点 $x_i(x_i \in X)$ から距離 r の位置に最近傍点 $x_j(x_j \in X, x_i \neq x_j)$ が存在する確率を表し、その定義は式(1a)によって与えられる。式中の $w(s_j)$ はエッジ補正係数であり、その式は式(1b)によって与えられる。

$$G(r) = \frac{\sum_{i=1}^N 1(s_j \leq r) \cdot 1(s_j \leq b_j) \cdot w(s_j)}{\sum_{i=1}^N 1(s_j \leq b_j) \cdot w(s_j)} \quad (1a)$$

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

ここに、 s_j : 最近傍距離、 c_i : 各点から視野縁までの最短距離、 a, b : 観察領域の辺長

実際の気泡分布と完全ランダム分布であるポアソン分布のG関数の一例を図-2(a)に模式的に示す。

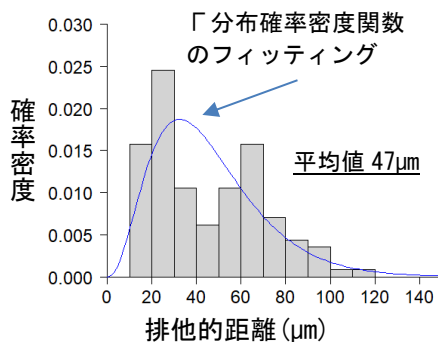


図-3 排他的距離の度数分布と Γ 分布近似した確率密度関数

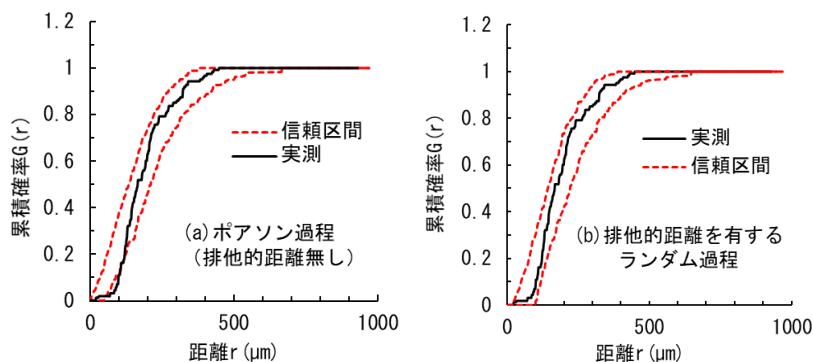


図-4 シミュレーションによって得られた最近傍距離関数の95%信頼区間と実際の気泡分布のG関数の比較

同じ点密度でもポアソン分布の場合は、きわめて短距離圏でも他点が存在しうる。これに対して、実際の分布は気泡自身の体積により、他の気泡の重心点は近接できないため、 x 軸切片を生じる。これを気泡間の排他的距離とし、画像121枚の気泡分布の最近傍距離分布関数の排他的距離の度数分布を求めた。また、図-2(b)にG関数から得られる気泡間隔の特性値の説明図を示す。 R_{50} はG関数の累積確率0.5に該当する距離であり、 L' は R_{50} 値から平均気泡半径を引いた距離である。

(4) 排他的距離を有する点過程シミュレーションと有意性の検定

取得された121枚の画像から点密度 λ を求めた。気泡数はこの値を期待値とするポアソン過程に従う分布であるとして点密度を発生させ、さらに、図-2(a)の気泡存在領域であるセメントペースト領域にランダムで点を発生させることにした。ただし、排他的距離の変化を考慮するために、2.(3)によって得られた排他的距離の度数分布より確率密度関数を求め、これに従った排他的距離の乱数を発生させ、その距離内には点を発生させないとした。以上のシミュレーションを199回繰り返し、実際の気泡分布との比較を行った。

3. 結果および考察

図-3に121枚の画像中の気泡分布（総気泡数：17500程度）から得られた排他的距離の度数分布と Γ 分布で近似した確率密度関数を合わせて示す。排他的距離の平均値は約47 μm であり、本配合の画像から得られる平均気泡径68 μm よりもやや小さい値となった。また、最頻値は20~30 μm であった。これらの気泡が接近できる最短距離は、気泡間隔係数計測で仮定された単一寸法の気泡径（190 μm ）よりもかなり小さい。断面外に中心を持つ大きな気泡がこのような近接断面を生じさせることは考えにくいことから、これらの距離を考慮することにより、従来のリニアトラバース法では考慮されない粒径の小さい気泡が、より明確に再現されることになる。また、ヒストグラムの概略の形は双峰型であるが、径の大きい値のほうに裾を引く形

表-2 各特性値の変化

特性値(μm)	R_{50}	L'
ポアソン過程	139	105
排他的距離を有するポアソン過程	170	136

であるため、 Γ 分布で近似した確率密度関数で再現することは妥当であると判断できる。

図-4 にシミュレーションによって得られた気泡分布の最近傍距離分布関数の95%信頼区間と実測の気泡分布のG関数を示す。排他的距離を持たない完全ランダム過程とした場合（図-4(a)）、距離100 μm 程度の範囲において実際の分布が信頼区間を外れており、近距離での気泡分布を再現できていない。このことは、気泡間の距離に関係づけられる保護領域を、近距離範囲では再現できないことを示唆する。一方、気泡間に排他的距離を与えると（図-4(b)）、シミュレーションの結果95%信頼全区間内に実際の気泡分布がプロットされ、気泡径の影響を反映した分布が再現されている。

表-2 にシミュレーションに得られた気泡間隔の特性値の比較結果を示す。完全ランダム分布と排他的距離を有したランダム分布で、気泡間隔特性値の差は31 μm であり、図-3における最頻値程度の排他的距離と同程度の距離である。また、排他的距離を有する場合の気泡間距離の特性値は、従来の完全ランダム分布と比較して、本配合の気泡間隔係数178 μm により近い値となっている。また気泡間隔係数の値は50%分位点距離とおおよそ一致していることがわかる。

4. 結論

気泡間の排他的距離を考慮した点発生シミュレーションを行うことで、より実際の分布の再現性の高い気泡分布シミュレーションが可能であり、気泡間隔係数は実際の気泡分布の50%分位点距離に対応することが明らかとなった。

参考文献

- 1) T.Murotani et al.:Distribution analysis and modeling of air voids in concrete as spatial point processes,Cem.Concr. Res.,Vol.115,pp124-132(2019)