

凍害からの保護を期待する領域の気泡分布シミュレーションに基づく評価

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

コンクリート中の気泡が適切に分布して、凍結融解抵抗性を改善するためには、セメントペースト（以後、ペースト）を、気泡の保護領域として被覆できるようなペースト-気泡間近接性を持つことが必要である。適切な近接性は未凍結水移動距離に関わる材料特性として決定されるものであり、その一方で、気泡はランダムに分布しているの、確率過程として特性化されるべきである。そして、距離としての材料特性値と気泡分布の幾何学的特性値を対応づけることが、空気連行の適切さの評価の基本となる。

本研究においては、ペースト中にて保護を必要とする距離と気泡分布を対応付ける評価法として、点過程としての各気泡が、母点として最近傍点となる範囲を表す領域分割（ディリクレ分割）を用いた。分割された多角形領域（タイル）面積を、各気泡が最低限保護を与えるべき領域とみなした。気泡のランダム分布シミュレーションによりタイル面積分布の変動を推定し、保護領域の観点から、空気量の変化による保護範囲の変化を明らかにすることを目的とした。

2. 解析方法

(1)コンクリートの配合と気泡特性

目標空気量 3,4.5 および 6%で配合設計された普通コンクリート(W/C=0.5, $G_{max}=20\text{mm}$)を解析対象とした。表-1 に示方配合を、表-2 に ASTM C457 リニアトラバース法（自動計測法）の結果を示す。

(2)気泡の点過程変換とペーストのディリクレ分割

各配合に対して、解析対象とする代表的な領域(約 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$)を選んだ。気泡を点過程で表し、これを

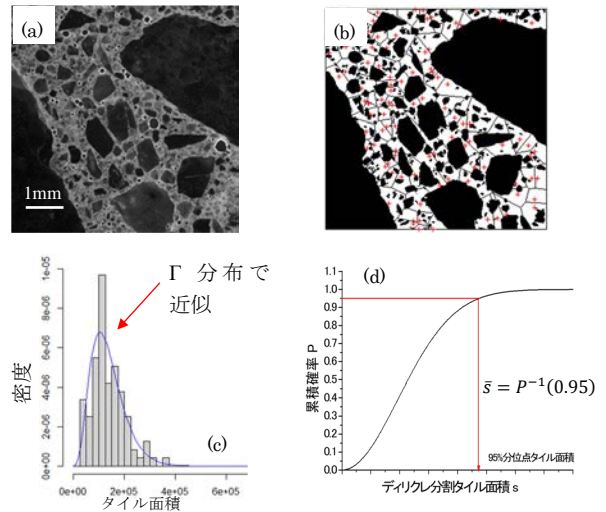


図-1 解析対象領域とディリクレ分割によるペー母点として周囲のペースト部のディリクレ分割を行い、各タイル内の骨材を除いたペースト部分（保護を必要とする範囲）の面積 s を求めた。図-1 に空気量 3% のコンクリートの解析対象領域（図-1(a)）とそのディリクレ分割（図-1(b)）を示す。

(3)気泡分布とディリクレ分割シミュレーション

全解析領域 ($60\text{mm} \times 60\text{mm}$) のリニアトラバース法の計測記録から、各配合における気泡の点密度 λ を求めた。気泡はこれを期待値とするポアソン点過程であるとし、ペースト部にそのポアソン分布に従う点をランダムに発生させ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ペースト部のディリクレ分割を行い、タイル面積のヒストグラムを得た（図-1(c)）。これを Γ 分布にて近似して確率密度関数を求め、その累積確率分布 P から 95% 分位点のタイル面積 $\bar{s} = P^{-1}(0.95)$ を求めた（図-1(d)）。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	スランプ (cm)	目標空気量 (%)	単位数 (kg/m^3)					空気量 (%) (フレッシュ)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤 (%W/L/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

表-2 リニアトラバース法計測結果

全トラバース長 (mm)	気泡数 (個)	平均弦長 (mm)	空気量 (硬化) (%)	気泡間隔係数 (mm)
2745.6	359	0.158	2.1	0.280
2745.6	779	0.128	3.6	0.178
2745.6	1013	0.144	5.3	0.168

キーワード 気泡分布, ディリクレ分割, タイル面積, Γ 分布, 95%分位点, 気泡間隔係数
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 地球社会基盤学専攻

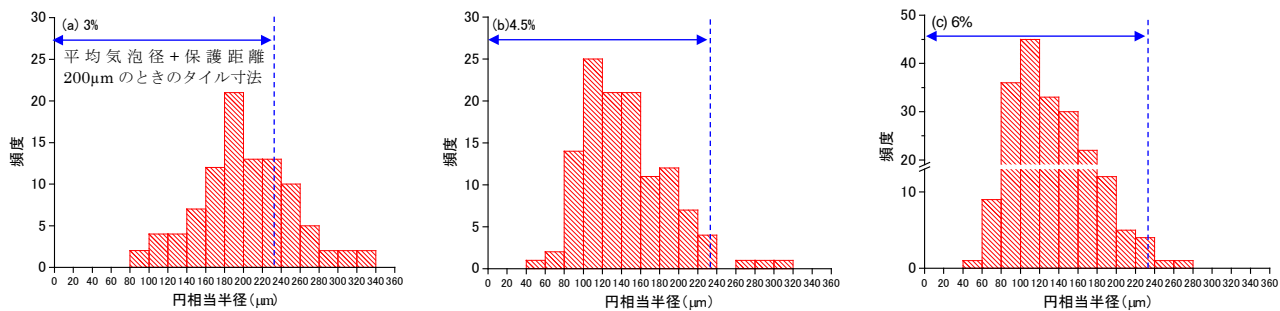


図-2 実際の気泡を母点とするディリクレ分割タイル面積の分布

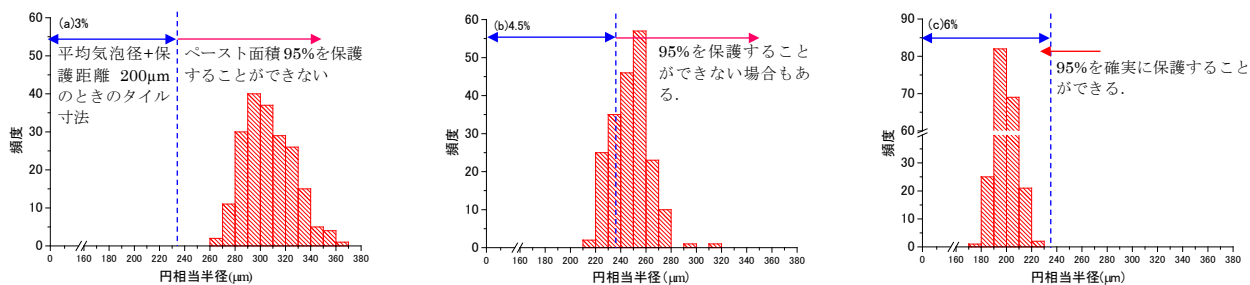


図-3 シミュレーションされた点パターンの95%分位点タイル面積の分布

3. 結果および考察

図-2 に解析対象領域の実際の気泡分布に対してディリクレ分割を行い、各タイル面積を円相当半径で表したヒストグラムを示す。空気量の増大とともに気泡数が増えてタイル面積は小さくなっていくので、ヒストグラムは径の小さい側へと移動していく。平均タイル半径は空気量3、4.5 および6%の配合で、それぞれ約200、150、130 μm である。3配合のコンクリートは空気量が異なるだけで、その他は、使用AE剤を含め同一配合である。よって、気泡の粒度分布には相違はないと考えられ、画像から求めた気泡直径は3配合平均で68 μm であった。十分多数の気泡を観察しているので、2D平面の気泡直径と3D空間の気泡球径の平均径には大差はないと考え、保護を必要とする平均的な大きさのタイルでは、空気量3、4.5及び6%のコンクリートで、それぞれ気泡表面から166、114、96 μm 程度の範囲の保護を必要としていることになり、この距離は気泡間隔係数の推奨値200 μm よりも小さい。

図-3 にシミュレーションにて得られた95%分位点のタイル面積の円相当半径のヒストグラムを示す。空気量が増すと、全体として分布が階級値の大きい側へひずむ傾向は小さくなり、中央部峰の周囲に集中する傾向が現れる。空気量3、4.5 および6%の各配合における平均値は310、250 および200 μm 程度

である。この場合も平均的な大きさの気泡球の存在を仮定すれば、保護を必要とするペースト範囲はそれぞれ276、216、および166 μm 程度となる。気泡間隔係数の推奨値200 μm を材料特性とし、平均径の気泡の存在を仮定すると、目標空気量6%配合ではペーストのほぼ全領域が保護され、4.5%の配合では95%を保護できない場合が確率1/2以上で存在する。一方、空気量3%配合では、大きなタイルはほぼ保護できない。このことは、空気量と耐凍害性に関する一般的な認識とも一致する。よって、ランダム気泡系にて保護を必要とする面積分布と、最遠距離としての気泡間隔係数の推奨値は、十分な保護を与える近接性の目安という点で矛盾しないといえる。

4. 結論

気泡点まわりの領域のディリクレ分割を用い、各タイルを気泡に保護を期待する領域とみなした。気泡間隔係数の一般的な推奨値を、保護に関する許容最遠距離と考えると、この距離はタイル面積分布にて十分な保護を得られる面積率という点で、矛盾しない距離特性値であることが示された。

謝辞

本研究を行うにあたり、ニュージーランド、オークランド大学 R. Turner 教授に指導、助言を賜りました。ここに謝意を表します。また、本研究は科研費(21K04211)の助成を受けたものである。