

気泡による凍害からの保護領域評価における気泡凝集域と骨材の影響

大成建設（株） 正会員 ○田邊 駿

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. 序論

コンクリートに連行された空気による凍結融解抵抗性の改善では、空気量だけでなく多分散粒子の気泡の空間分布も重大な影響要因である。その評価には気泡表面のランダムな空間配置の特性化が必要であり、これまでいくつかの数理工学的モデルが提案されている。しかし、コンクリートの一般実務になじむとは言い難い。一方、気泡の分布を空間点過程としてモデル化する著者らの提案法は、ランダム性を考慮した気泡配置と距離の各特性値の評価、シミュレーションが容易で、気泡周囲の保護領域評価にも展開できる。

本研究においては、気泡の3次元粒子過程/表面積に基づく方法と点過程/ディリクレ分割に基づく方法によって保護領域を評価し、実際のコンクリート中の気泡の凝集域と骨材の存在が、保護領域評価に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 気泡による保護領域の評価方法

(1) コンクリートの配合と気泡画像の取得

解析対象のコンクリートは、目標空気量4.5%の一般的なAEコンクリートで、その配合を表-1に示す。所定材齢にて供試体を切断、断面の研磨後に、断面

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 (%)	単位量 (kg/m ³)				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

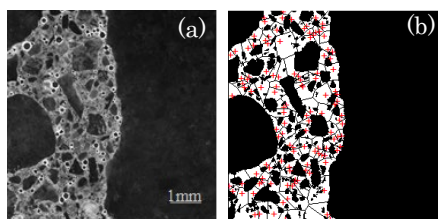
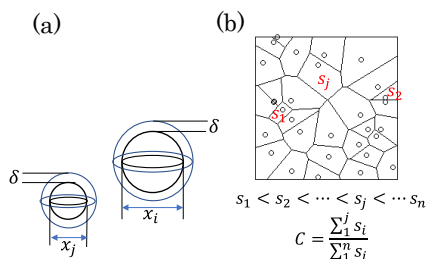


図-1 気泡画像(a)とディリクレ分割図(b)

図-2 保護領域の模式図 (a)厚さ δ の球殻 (b)タイル面積の累積の考え方

の画像を取得し、自動解析装置を用いて断面内の気泡を同定した(図-1)。

(2) 気泡の3次元粒度分布と保護領域の評価

画像解析により気泡の直径分布を求め、これから2次元断面における気泡直径 y の確率密度関数 $g(y)$ を決定した。関数 $g(y)$ から式[1]により3次元の気泡球径 x の分布の累積確率密度関数 $F(x)$ を求め、これから確率密度関数 $f(x)$ を求めた。

$$1 - F(x) = \frac{\int_x^\infty \frac{g(y)}{(y^2 - x^2)^{0.5}} dy}{\int_0^\infty \frac{g(y)}{y} dy} \quad [1]$$

多分散気泡粒子の表面に隣接して厚さ δ の保護領域が存在するとして、気泡球の曲率を考慮しない場合の保護領域体積 PPV_1 と曲率を考慮した場合の体積 PPV_2 を、式[2],[3]によりそれぞれ求めた。

$$PPV_1 = \sum_{i=1}^N 4\pi \left(\frac{x}{2}\right)^2 \delta n_i \quad [2]$$

$$PPV_2 = \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi \left\{ 3 \left(\frac{x}{2}\right)^2 \delta + 3 \left(\frac{x}{2}\right) \delta^2 + \delta^3 \right\} n_i \quad [3]$$

ここに、 n_i は気泡球径のヒストグラムの各階級 i ($i = 1, \dots, N$)での気泡個数である。

(3) ディリクレ分割による保護領域の評価

同定された気泡中心点を平面点過程として、周囲のペースト領域のディリクレ分割を行った(図-1)。

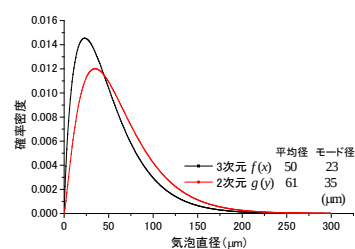


図-3 2および3次元の気泡直径分布

キーワード 気泡, 点過程, ディリクレ分割, 3次元粒度分布, 保護領域

連絡先 〒920-1192 金沢市角間町 金沢大学理工学域社会基盤学類

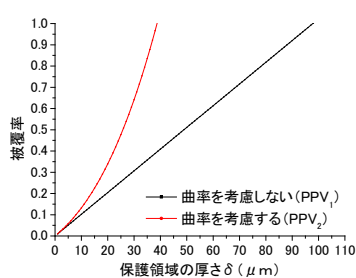


図-4 被覆率と保護範囲（球殻厚さ）の関係

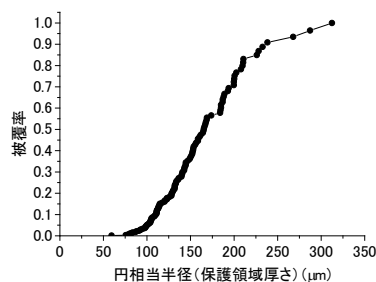


図-5 被覆率とディリクレ分割タイル面積の円相当半径の関係

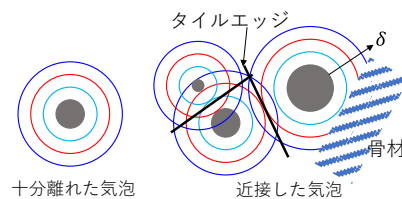


図-6 気泡凝集と骨材近接による保護領域存在の制限

個々のタイル内では内部の点が最短距離にある気泡であるので、このタイルを内部の気泡が保護すべき領域とした。骨材を含まないタイル面積を昇順に整理し、保護領域厚さ δ を順次仮定したときに、タイル面積の円相当半径がこれより小さいタイルは保護下にあるとしてその累積面積を求めた。

(2)および(3)にて、全セメントペースト体積に対する保護領域の割合を被覆率 C と定義した（図-2）。

3. 結果および考察

図-3に気泡の2次元、3次元の粒度分布の確率密度関数 $g(y)$ および $f(x)$ を示す。2次元断面にて観察された気泡の直径 y に比べて、3次元の球径 x の分布はモード径および平均径とも小さくなり、断面に現れない微細な気泡の粒度も推定されている。粒度分布 $f(x)$ の各気泡球表面に厚さ δ の保護領域を有するとしたときの、被覆率と保護領域厚さの関係を図-4に示す。曲率を考慮しない場合は仮定した厚さの増大とともに被覆率は直線的に増大する。これに対して、曲率を考慮して保護領域を球殻領域として評価すると、保護領域は急激に増大し、例えば本コンクリート（空気量3.6%）では、各気泡の表面からの距離数 $10\mu\text{m}$ の範囲まで保護可能であれば、ペーストの全領域が保護下に入ることになる。

図-5に2次元点過程のディリクレ分割タイル面積の累積から求めた被覆率の変化を示す。ペースト領域を保護範囲で被覆するために要求される保護距離は、図-4で求めた距離よりもかなり大きい。例えば95%の範囲を被覆するためには、およそ距離 $270\mu\text{m}$ までの保護を必要とする。このモデルでは被覆率に達するときの最大タイルの面積が特性値であり、タイル内に例えば画像から求めた平均径 $68\mu\text{m}$ 程度の気泡が存在するならば、気泡表面から最遠点までの距離は気泡間隔係数の推奨値程度の大きさになる。

図-4と図-5で同じ被覆率に達するのに必要な距離が大きく異なるのは、粒度分布 $f(x)$ の3次元粒子過程とする方法ではすべての気泡が十分に離れて存在し、個々の気泡の保護領域に重なりがない理想的な状態を仮定しているためである（図-6）。しかし、図-1から明らかなように、気泡の凝集領域もしくは骨材に近接した気泡が多数あり、保護領域が気泡周りに制限なく存在することはできない。一方、ディリクレ分割で表した場合は、タイルの辺までの範囲を保護範囲とするので保護領域の重複はなく、気泡の凝集域や骨材による保護領域の制限が評価できる（図-6）。広範囲を被覆するためには大きなタイルの保護が必要になり、所定の被覆率に達するのに必要な保護距離厚さは大きくなる。すなわち、気泡粒子過程分布/表面積に基づく評価では、3次元の粒度分布を厳密に求めたとしても、個々の気泡の位置に関わる制限を考慮するのが難しいが、点過程/領域分割法はその制限下での保護領域を与える。また、複雑な形状のペースト領域であっても、点分布のシミュレーションによりタイル面積の分布、変動が容易に考慮できるので、気泡の空間分布を耐凍害性機構に関連付ける有用な方法であると考えられる。

4. 結論

気泡の凝集域と骨材の存在が保護領域評価に大きく影響及ぼす。しかし、点過程と領域分割を組み合わせた方法では、その影響を受けないで、保護領域の評価が可能である。

謝辞：本研究は科研費(21K04211)の助成を受けたものである。

参考文献：1) 大山和哉, 五十嵐心一：気泡周りの領域分割とセメントペースト-気泡近接性評価式により推定される保護領域の比較, セメント・コンクリート論文集, Vol.76, 2023.

(印刷中)