

論文 気泡の3次元の粒度分布を用いた凍害からの保護領域の評価

田邊 駿^{*1}・大山 和哉^{*2}・五十嵐 心一^{*3}

要旨：コンクリート切断面の2次元の気泡の直径分布から3次元の気泡の球径分布を求め、3次元空間内での保護されたセメントペースト領域体積の評価を行った。気泡の粒度分布から表面積を求めて保護領域厚さとの積を考える簡便法と曲率を有した球殻として評価する2つのモデルで計算した。その結果、保護領域を球殻体積としてモデル化すると、小さい保護領域厚さでより大きな割合のセメントペースト体積を被覆できることが確認された。また、気泡近傍に存在する骨材を考慮して、その体積率を一定としたモデルを示し、セメントペーストの保護のためにはより大きな保護領域厚さが必要になることを示した。

キーワード：保護領域、気泡-ペースト近接性、粒度分布、気泡間隔係数、骨材、被覆率

1. 序論

コンクリートの耐凍害性を評価する上で重要なのは、コンクリート中における気泡量よりもその質、すなわちその分布構造といわれている。従来、気泡分布の質を評価するために、Powersのモデル¹⁾とそれに基づく気泡間隔係数の評価が用いられてきた。気泡間隔係数の計測は、ASTM C457に規定されたリニアトラバース法によって求めるのが一般的であるが、このとき気泡の寸法は、あるピッチ間で設定されたトラバース線が横切った気泡の弦長により評価される。この計測では大きな気泡が検出される確率が高く、微細な気泡が検出、同定される確率は低くなる²⁾。結果として、平均弦長で決まる単一分散の気泡寸法は大きくなり、この気泡を立方体格子状に規則配置するので、実際の気泡分布構造とはかなり異なった構造で気泡間の距離を代表させることになる。

気泡の分布状態として、気泡同士が接触せずランダムに配置され、微細な気泡が多く連行されていることが好ましい。これは同一の気泡体積であっても、気泡をいたるところに密に配置することによって気泡間の距離が小さくなり、セメントペースト中に存在する未凍結水が近くの気泡に移動したり、気泡が氷晶形成場になったりすることを容易にし、コンクリートの内部損傷低減に繋がるためである。換言すれば、連行される気泡の比表面積を大きくすることで、少ない空気量でより大きな領域を凍害から保護できるということになる。

普通コンクリートに対して、一般的に気泡間隔係数の値が200 μm 以下となれば、そのコンクリートは耐凍害性を有していると判定される。この背景には、気泡とセメントペーストとの近接性に関して、Powersの提唱では影響範囲と称されるセメントペースト保護体積の考え方がある。すなわち、気泡間隔係数という仮想系に置き換え

たときの距離が200 μm 以下の気泡分布構造であれば、凍結融解試験にて求められる耐久性指数は高く維持されることから、セメントペースト部分全体が適切に保護された状態にあると考えている。しかし、評価指標が実際のコンクリート中の距離ではないため、凍結融解作用に対する耐凍害性と気泡間隔係数の関連性が明確ではない場合もあり、気泡間隔係数はあまり有用ではないとする報告もある³⁾。一方、このPowersのモデルを基本にして、より現実的な距離を用いてセメントペースト保護体積の評価を行うことを目的として、気泡とセメントペーストとの近接性を表すモデルがいくつか提唱されてきた。これについては、Snyder⁴⁾らが詳細なレビューを行っている。それらのモデルでは、気泡のランダム性と気泡表面の存在を、確率に基づいて定式化しているが、気泡寸法の多分散性の取り扱いやランダム配置の考え方などが異なり、また気泡の凝集や骨材の影響の考え方などにそれぞれ特徴がある。著者ら⁵⁾は、保護領域が水分移動性、到達性に関連することから距離を評価することに着目して、個々の気泡の寸法を考えずに、ランダムに分布する気泡1個が保護すべき領域面積から、気泡とペースト間の近接性を評価するモデルを提案している。

一方で、実際のコンクリート中における気泡分布を考えるならば、3次元空間内での実際の分布を直接計測すればよい。現在では3次元画像取得も可能になり、これを行うことは可能であるが^{6,7)}、一般のコンクリートの実務にて日常業務として3次元気泡計測を行うことは難しい。しかし、コンクリート切断面にて観察された気泡断面の2次元の気泡直径分布から、3次元の気泡球径分布の統計的な性質を特性化することは古くから試みられており²⁾、必ずしも難しいことではない。3次元の気泡の粒度分布を得ることができるならば、3次元空間内の気泡の平均径やモ

*1 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科博士前期課程社会基盤専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工学域地球社会基盤学類 教授 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

設計空気量 (%)	スラump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					実測空気量 (%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤 (%wt. /C)	
3.0	10 ± 2	50	45	165	330	813	1027	0.004	3.7
4.5	10 ± 2	50	45	165	330	797	1003	0.007	5.0
6.0	10 ± 2	50	45	165	330	779	982	0.01	6.5

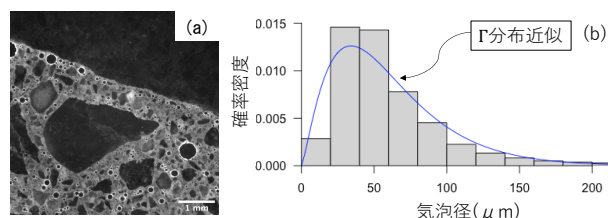


図-1 解析画像例(a)とヒストグラム(b)

ード径を推定することが可能となり、また気泡の表面積やその表面と隣接する保護領域の評価も可能となるので、より現実の構造に近いコンクリート中の気泡分布構造の評価を行うことができる。しかし、実際のコンクリート断面の気泡の2次元の分布情報を用いて、3次元の気泡-セメントペースト近接性や保護体積を直接求めた例は少ない⁴⁾。

そこで本研究では、実際のコンクリート断面から、2次元の気泡直径分布を画像解析により求め、これを用いて、ステレオロジーの考え方に基づいて3次元および1次元の気泡径分布を求めた。そして、この3次元の気泡分布を用いて保護体積を評価するモデルを提案し、セメントペースト体積全体に対してほぼ全域と考えられる範囲を保護体積として被覆するための保護領域の厚さ δ 、すなわち気泡表面からの距離を求めた。特に、従来の気泡の比表面積に対して一定厚さを乗じて考える場合と、気泡の粒径分布と曲率を考慮した球殻として考える場合で、被覆率の相違を推定した。また、既往の気泡-セメントペースト近接性評価モデルにおいては、骨材間の空間は気泡寸法にくらべて十分に大きいとの仮定のもと、被覆率の評価には骨材の存在を考慮していない⁴⁾。しかし、実際のコンクリート中では、骨材の存在に影響された気泡の凝集領域が観察される⁸⁾。そこで、本研究では気泡の近傍に存在しうる骨材を考慮する場合の被覆率を計算し、同じ被覆率を達成するための保護領域厚さ δ を推定した。これらの結果と従来の気泡間隔係数、およびSnyderら⁴⁾によると現在最も実際の気泡とセメントペースト近接性を正しく評価するとしているLu and Torquatoのモデル⁹⁾、そして著者らが提案するディリクレ分割モデル⁵⁾との比較を行った。そして、その対応関係から、3次元の気泡球径分布から保護領域を評価する提案モデルの有用性を検証す

表-2 リニアトラバース法計測結果

設計空気量 (%)	全トラバース長 (mm)	気泡数 (個)	平均弦長 (mm)	空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
3.0	2745.6	359	0.158	2.1	280
4.5	2745.6	779	0.128	3.6	178
6.0	2745.6	1013	0.144	5.3	168

ることを目的とした。

2. 解析方法

2.1 使用材料とコンクリートの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)である。細骨材には大井川水系陸砂(表乾密度2.58g/cm³、吸水率2.22%、最大寸法20mm)、粗骨材には青梅産砂岩砕石(表乾密度2.66g/cm³、吸水率0.52%、最大寸法20mm)を使用した。また、JIS A 6204のI種適合の変性ロジン酸化物系のAE剤を使用した。コンクリート供試体(100mm×100mm×400mm)は打込後24時間にて脱型し、材齢21日まで水中養生(20 ± 2°C)を行った。使用したコンクリートの配合を表-1に示す。

2.2 画像取得と空気量、気泡間隔係数の計測

養生後の供試体から100mm×100mm×30mm程度の板状試料を切り出し、その表面を精細研磨した後に洗浄および乾燥を行った。研磨面中央部(60mm×60mm)を計測対象とし、高精度カメラを用いて研磨面のグレースケール高精細画像を取得した。画像取得の際は、計測対象領域を11 × 11 = 121個の小区画(1区画は約6.14mm×6.14mm、2048画素×2048画素、分解能は約3 μm /画素)に分割して取得した。それらの個々の領域画像取得時に、順光と斜光照射を繰り返し行い、陰影の差分により気泡を同定した。解析画像(1区画)の例を図-1(a)に示す。なお、ASTM C 457法の最大骨材寸法によって規定される最小トラバース長を満足するように、1区画内に4本のトラバース線を設定し、121区画での総トラバース長を約2750mmとした。リニアトラバース法による計測結果を表-2に示す。

2.3 3次元球径分布の推定

2.2で同定された気泡の直径を画像解析によって求めた。その直径分布のヒストグラムの特徴から、これを Γ 分布によって近似することとし、2次元平面内の気泡直径 y の確率密度関数 $g(y)$ を決定した(図-1(b))。2次元直径

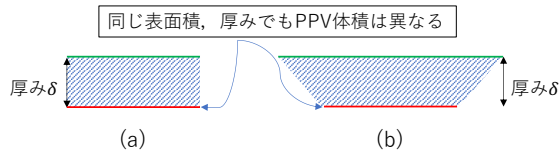


図-2 表面積の積モデル(a)と球殻モデル(b)の模式図

分布 $g(y)$ に対して、式(1)⁴⁾を用いて3次元の気泡球径 x の累積確率密度関数 $F(x)$ を求め、これから気泡の3次元球径の確率密度関数 $f(x)$ を求めた。

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

また、1次元の弦長 z の分布の確率密度関数 $h(z)$ を式(2)⁴⁾により求めた。

$$\frac{h(z)}{z} = \frac{2}{\langle X^2 \rangle} [1 - F(z)] \quad (2)$$

ここに $\langle X^2 \rangle$ は3次元の気泡球径 X の2乗値の平均値である。

2.4 3次元空間における気泡数の推定と保護領域体積の算出

3次元空間におけるコンクリートの単位体積当たりの気泡数 N_V はステレオロジーの基本式(式(3))を用いて求めることとした²⁾。

$$N_V = N_A / E[H] \quad (3)$$

ここに N_A はコンクリート断面の2次元平面内の気泡の単位面積当たりの個数であり、 $E[H]$ はその観察断面に垂直な面への各気泡の投影高さの期待値である。本研究では、3次元の気泡の球径分布 $f(x)$ から $E[H]$ が計算され、一方2次元面内の気泡数は画像から決定される。これらの値から3次元の気泡数の密度 N_V を求めた。

2.3にて得られた3次元の気泡球径分布 $f(x)$ に対して、図-2に示すように、それぞれの気泡周りに一定の厚み δ を持った保護領域が存在すると仮定する。このとき、気泡の粒度分布が未知の場合でも水力半径(径深)とのアナロジーから、図-2(a)に示すように、気泡の全表面積にその厚さ δ を乗じて保護領域体積を求める場合¹⁰⁾と、図-

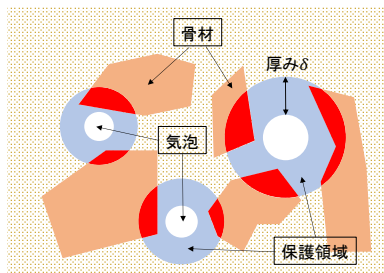


図-3 骨材を考慮した保護領域の模式図

2(b)に示すように気泡球の曲率を考慮して、保護領域を厚さ δ の球殻として求める場合の2つについて評価を行った。以下にその導出過程を示す。ここに、式(3)を用いて求められるコンクリート中の気泡の総数を $N = n_1 + n_2 + \dots + n_j = \sum_{i=1}^j n_i$ (n_i は気泡球径の各階級での気泡の個数)とする。また、セメントペースト全体積に対する保護領域体積の割合を被覆率と定義した。セメントペースト全領域を保護下におくことは被覆率100%を意味するが、本研究では空間統計学および工学の一般的な評価法に従って、被覆率95%の信頼区間の上側信頼限界をほぼ全領域が保護下に置かれるときの特性値とし、そのときの保護領域厚さ δ_{95} を求めた。

(1) 保護領域を気泡の表面積と厚さ δ の積とする場合

直径 x の気泡一つが持つ保護領域(PPV: Protected Paste Volume)は、式(4)にて与えられる。

$$PPV = 4\pi \left(\frac{x}{2}\right)^2 \delta \quad (4)$$

直径 x_i を有する気泡の個数を $n_i (= f(x_i)N)$ とすると、すべての気泡径について和をとると、保護領域の総体積は式(5)にて与えられる。

$$PPV_N = \sum_{i=1}^j 4\pi \left(\frac{x_i}{2}\right)^2 \delta n_i \quad (5)$$

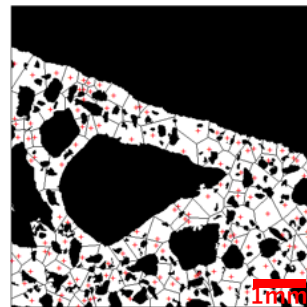
(2) 保護領域を厚さ δ の球殻体積とする場合

直径 x の気泡の表面に厚さ δ の保護領域があるとき、曲率を考慮すると、一つの気泡が持つ保護領域体積は、式(6)より求められる。

$$\begin{aligned} PPV &= \frac{4\pi}{3} \left(\frac{x}{2} + \delta\right)^3 - \frac{4\pi}{3} \left(\frac{x}{2}\right)^3 \\ &= \frac{4\pi}{3} \left\{ 3 \left(\frac{x}{2}\right)^2 \delta + 3 \left(\frac{x}{2}\right) \delta^2 + \delta^3 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

(1)と同様にして、すべての気泡径 x_i の粒子個数について和をとれば、保護領域の全体積は式(7)で与えられる。

$$PPV_N = \sum_{i=1}^j \frac{4\pi}{3} \left\{ 3 \left(\frac{x_i}{2}\right)^2 \delta + 3 \left(\frac{x_i}{2}\right) \delta^2 + \delta^3 \right\} n_i \quad (7)$$



黒色：骨料粒子
+：気泡点

図-4 ディリクレ分割例

2.5 骨材を考慮した保護領域体積の計算

図-3に示すように、気泡1個の表面周りに厚さ δ の範囲のセメントペーストマトリックスを考えたとき、その中にはセメントペースト部分と骨材部分が存在しうる。コンクリート中どの領域においても骨材率が一定であると仮定し、セメントペーストの体積割合を p 、骨材のそれを q とする。ここで、気泡の保護領域の重複はないと仮定して、2.4 同様に2つの場合について保護領域の評価をおこなうと、実際のペースト体積は以下のように計算される。

(1) 表面積と厚さ δ の積とする場合

$$PPV_N = \frac{p}{p+q} \sum_{i=1}^j 4\pi \left(\frac{x_i}{2}\right)^2 \delta n_i \quad (8)$$

(2) 厚さ δ の球殻体積とする場合

$$PPV_N = \frac{p}{p+q} \sum_{i=1}^j \frac{4\pi}{3} \left\{ 3 \left(\frac{x_i}{2}\right)^2 \delta + 3 \left(\frac{x_i}{2}\right) \delta^2 + \delta^3 \right\} n_i \quad (9)$$

2.6 Lu and Torquato のモデル⁹⁾

前述のSnyderのレビューによれば、既往の気泡-ペースト近接性モデルのうちで、Lu and Torquatoのモデルが最も精度よく近接性を評価できるとしている。このモデルは、寸法の異なる円が2次元面内にランダムに分布する系に対して定義されたn点相関関数を、数学的に3次元に自然に拡張した関数を用いて評価する。モデルでは、対象領域においてランダムに選択された点からある距離以内に気泡が存在しない確率を求めることによって、ペースト-気泡近接性を評価している。距離 s 以内に気泡が存在する確率はその補集合確率であると考え、その確率 $E_V(s)$ が95%となる距離 s が求められる。Lu and Torquatoのモデルを式(10)に示す。

$$E_V(s) = 1 - \exp[-\pi n(cs + ds^2 + gs^3)] \quad (10)$$

$$\xi_k = \frac{\pi}{3} n 2^{k-1} \langle R^k \rangle \quad (11.a)$$

$$c = \frac{4\langle R^2 \rangle}{1-A} \quad (11.b)$$

$$d = \frac{4\langle R \rangle}{1-A} + \frac{12\xi_2}{(1-\xi_1)^2} \langle R^2 \rangle \quad (11.c)$$

$$g = \frac{4}{3(1-A)} + \frac{8\xi_2}{(1-A)^2} \langle R \rangle \quad (11.d)$$

ここに、 n は単位体積あたりの気泡数、 A は空気量、 k は次元を表し、 $\langle R^k \rangle$ は3次元における気泡半径 R の k 乗の期待値である。また、式(11)における ξ 、 c 、 d 、 g は式(10)に示すように、それらを用いて定義される係数である。

2.7 ディリクレ分割モデル⁵⁾

セメントペースト領域内の任意の位置から最も近い気泡を表すように、各気泡間に対して、垂直二等分線を引き、領域を多角形に分割するディリクレ分割（ボロノイ分割）を行った(図-4)。セメントペーストは最寄りの気泡により保護されると考え、このタイル領域を内部の気泡が凍害から保護すべき領域とみなした。気泡の空間内での配置はランダムであり、コンクリートの場所ごとにその分布は全く異なるので、この分布をポアソン過程として再現する点過程生成シミュレーションを行い、各タイルにて骨材の面積を減じた残りのタイル面積（セメントペースト部分）のヒストグラムを得た。そのタイルを面積の等しい等価円に置き換えたときの気泡径を、タイル面積の特性値とした。タイル面積分布を Γ 関数により近似し、その累積確率が95%に達するときのタイル面積から画像より取得した気泡の平均半径を差し引いた値を気泡がセメントペーストを保護すべき距離の最大値とした。

3. 結果および考察

3.1 2次元直径分布から3次元球径分布および1次元弦長分布の推定

図-5に目標空気量3%、4.5%、6%のコンクリートにて計測された2次元直径分布 $g(y)$ とそれらから求めた3次元球径分布 $f(x)$ 、1次元弦長分布 $h(z)$ を表す。同一AE剤を使用しているため、空気量が異なっても各次元の気泡直径の確率密度関数に有意な差は認められないようであり、空気量が増すことによる気泡の合併などの影響は画像内情報からは認められない。次元の大きい方が関数分布は径の小さい側へとシフトしていて、表-3に示すように、2次元よりも3次元空間では平均径およびモード径とも10 μm 程度小さくなっており、各次元間においても

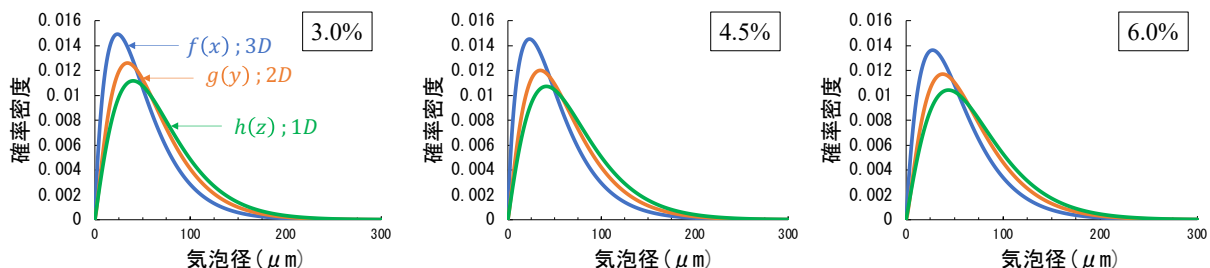


図-5 各次元における気泡径分布の比較

表-3 各次元における気泡径分布の特性値

設計空気量 (%)	平均径(μm)			モード径(μm)		
	3次元	2次元	1次元	3次元	2次元	1次元
3.0	49	59	67	24	34	40
4.5	50	61	69	23	35	41
6.0	54	64	71	27	38	43

10 μm 程度の差が生じているが、空気量間の差は小さい。多分散系の粒子が3次元空間に分布しているとき、2次元平面を検査面（プローブ）として評価すると、径の大きな気泡ほどその面を横断する確率が大きくなることの影響が表れている。また、この傾向は径の大きな範囲の気泡からも示され、3次元で考えると確率としては小さな気泡でも2次元では大きな確率となって検出されていることから理解できる。また、径の小さい側の分布をみると、同じ径でも3次元球の径の確率が大きく、特にモード径近傍で大きな差が見られる。このことは、3次元空間内では2次元面では観察されない微細な気泡球の割合が大きいことを示す。そのような気泡球は観察面（検査面）には現れなくても、観察断面直下もしくは直上にも存在するので、それらの気泡も保護領域を提供することを考えると、Song ら⁸⁾が指摘するような面外からの保護の影響は大きくなることが推察される。また、各空気量における1次元の気泡の平均径は、リニアトラバース法により求められた平均弦長の半分程度の値である。前述のように従来のリニアトラバース法では微細な気泡は同定されにくく、ASTM C457 では直径10 μm 未満の気泡検出は必ずしも要求されてはいない。このため気泡数は少なく評価され、微細な気泡の存在が検出されにくく⁷⁾、実際の気泡間隔よりも大きく評価していることがこれからわかる。さらに、画像から直接計測した気泡直径の平均径は68 μm であり、この値は表-3の値とは数 μm の差であった。その統計的な変動を考慮すれば、粒度分布を従来の一般的に仮定されてきた対数正規分布ではなく、 Γ 分布による近似は妥当であったと判断される¹¹⁾。

3.2 保護領域の評価と骨材の影響

図-6 に目標空気量 3%、4.5%、6%における気泡球の表面積と保護領域厚さの積で評価した場合と、その厚さの球殻として評価した場合の、保護領域による被覆率と保護領域厚さの関係を示す。保護領域厚さが大きくなれば、被覆率が上がるのは明らかであるが、前者の方法では被覆率は厚さが増すと直線的に増大していく。例えば、目標空気量 3%のコンクリートは、リニアトラバース法の計測により気泡間隔係数が 280 μm と耐凍害性としては劣ると判断されるコンクリートでも、160 μm 程度の保護領域があれば、セメントペースト全体が保護できることになる。一方、保護領域体積を球殻として評価すると、被

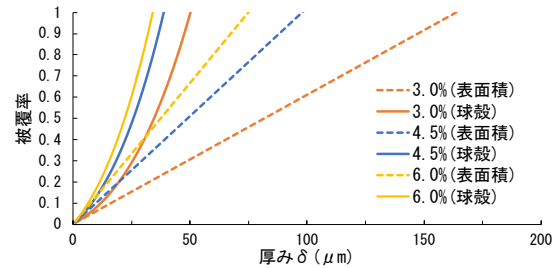


図-6 保護領域による被覆率と保護領域厚さとの関係

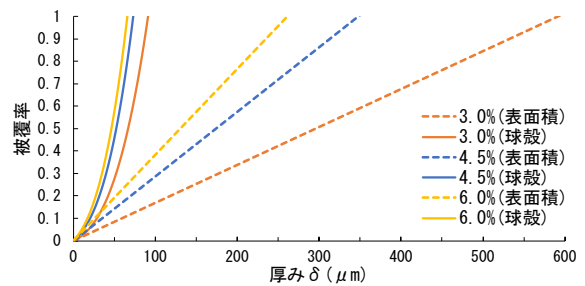


図-7 骨材を考慮した保護領域による被覆率と保護領域厚さとの関係

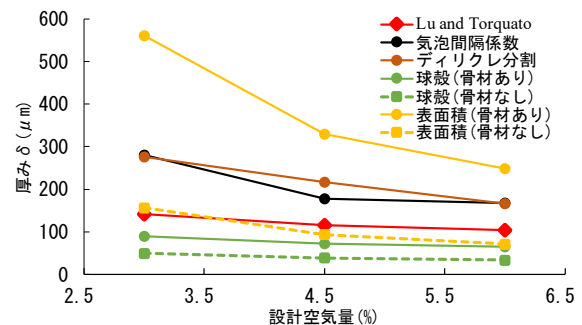


図-8 保護領域厚さと気泡-ペースト近接性モデルとの関係

覆率は保護厚さとともに急激に増大し、いずれの空気量の場合も、気泡表面から厚さ 50 μm 程度の保護があれば、セメントペースト全体が保護できることになる。同じ保護領域厚さでも被覆率が大きく異なるのは、図-2 に示すように、球殻としての評価は同じ厚さでも放射方向に拡大した領域として保護領域が計算されるためである。

一方、図-6 の評価は気泡表面に隣接して保護領域が存在し、それらが重複せず、かつ骨材の存在に影響されないという理想的な状態での計算値である。実際の気泡分布では、気泡の周囲に骨材が存在する局所領域も多数存

在しうる。図-7 に気泡球の表面積と保護領域厚さの積で評価した場合と球殻を用いた評価法のそれぞれに対して、気泡表面からの保護領域内に骨材の存在を考慮したセメントペースト被覆率を表す。図-6 と比較して骨材が存在すると同じ厚さを仮定しても被覆率は著しく小さくなる。例えば、球殻の評価を考えた場合、図-6 にていずれの空気量でも被覆率 100%を達成できる保護領域厚さ $50\mu\text{m}$ を仮定しても、目標空気量 6%のコンクリートでも被覆率は 50%程度にすぎない。このように被覆率が低下するのは、すべての気泡の周囲に一定割合の体積率で骨材が存在すると仮定したためで、実際には骨材から離れた気泡も存在し、任意の気泡の周囲のセメントペースト体積率 p もランダムに変動する。このランダム性の局所変動を考慮したモデル化については今後の課題としたい。

3.3 3次元粒度分布から得られた保護領域厚さと既往の気泡-ペースト近接性モデルとの比較

3 次元粒度分布から得られた保護領域厚みと気泡間隔係数、Lu and Torquato モデル、著者らが提案してきたディリクレ分割モデルによる保護領域厚み δ_{95} の比較を図-8 に示す。気泡間隔係数およびディリクレ分割モデルとは表面積から保護領域厚さ(骨材考慮)の積を仮定した場合を除いて、3 次元粒度分布から得られた保護領域厚みは数 $100\mu\text{m}$ から数 $10\mu\text{m}$ 程度小さい値となった。Lu and Torquato モデルとは、球殻の保護領域厚さを考えたとき、各空気量における骨材を無視した場合では $80\mu\text{m}$ 程度、骨材を考慮した場合では $50\mu\text{m}$ 程度の差が生じた。また、骨材を無視した表面積と保護領域厚さの積で求めた値は同じく骨材の存在を無視している Lu and Torquato モデルと同程度の値を示した。

4. 結論

本研究によって得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) コンクリート中の気泡の各次元における気泡径は各次元間で平均径、モード径とも約 $10\mu\text{m}$ の差がある。
- (2) 3次元の粒度分布と2次元の粒度分布から、大きな粒子が2次元断面に現れる確率が高く、断面に現れない微細な気泡の存在が保護領域に寄与することが示された。
- (3) 気泡の表面積と保護領域厚さの積により保護領域体積を評価するモデルと、保護領域厚さを球殻として保護領域体積を評価するモデルでは、セメントペースト被覆率に大きな差が生じる。
- (4) 骨材が気泡表面近傍に存在することを考慮して、骨材体積率を一定と仮定して球殻による保護領域を評価すると、骨材を考慮しない場合に比べて、セメントペースト被覆率 95%を満たす厚み δ は約 2 倍の値を示すが、いずれの空気量においても $100\mu\text{m}$ 以下と

なる。

- (5) 気泡の3次元粒度分布より求められる表面積に厚さの積で求めた保護領域は Lu and Torquato モデルと同程度の値を示した。

謝辞

本研究の気泡計測の記録は、八洋コンサルタント社に提供を受けた。また、本研究は科研費(21K04211)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Powers, T.C.: The air requirement of frost-resistant concrete, Proc. Highway Research Board, Vol.29, pp.184-211, 1950
- 2) Baddeley, A. and Vedel Jensen, E.B.: Stereology for Statisticians, Chapman & Hall/CRC, 2005
- 3) Liu, Z., Hansen, W. and Meng, B.: Characterisation of air-void systems in concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.68, No.4, PP.178-186, Feb.2016
- 4) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K.: The stereological and statistical properties of entrained air voids in concrete: A mathematical basis for air void system characterization, Materials Science of Concrete VI(eds. S. Mindess and J. Skalny), pp.129-214, 2001
- 5) 大山和哉, 五十嵐心一, 山下総司: 気泡による保護領域面積の評価と分布シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vo.44, No.1, pp.532-537, 2022.7
- 6) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011.7
- 7) Sokhansefat, G. et al.: Using X-ray computed tomography to investigate mortar subjected to freeze-thaw cycles, Cement and Concrete Composites. Vol.108, 103520, Jan.2020
- 8) Song, Y. et al.: A 3D petrographic analysis for concrete freeze-thaw protection, Cement and Concrete Research, Vol.128, 105952, Dec.2019
- 9) Lu, B. and Torquato, S.: Nearest-surface distribution functions for polydispersed particle systems, Physical Review A, Vol.45, pp.5530-5544, Apr.1992
- 10) 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, No.1, pp.66-73, 2022.3
- 11) Attiogbe, E.K.: Volume fraction of protected paste and mean spacing of air voids, ACI Materials Journal, Vol.94, No.6, pp.588-591, Nov.-Dec.1997