

異なる次元の気泡寸法分布と Powers モデルとの比較

金沢大学 学生会員 ○田邊 駿
 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

従来、気泡分布はリアトラバース法により得られた気泡の平均弦長を用いて、単一分散系の気泡の規則配置を仮定した気泡間隔係数により評価されてきた。現在では3次元のCT画像が用いられるようになり、気泡の特徴が明らかになりつつあるが、体積代表要素寸法以上の十分な大きさの試料を観察するには至っていない。一方、2次元の断面観察レベルでは比較的大きな範囲の画像取得が容易であり、かつ気泡のランダム性を考慮するならば2次元画像の特徴から3次元の気泡分布の特徴量を推定することは困難ではない。しかし、骨材が存在する実際のコンクリート中の気泡分布に関して、これを行なった例は限られる。

本研究では、コンクリート切断面の気泡の2次元直径分布から、ステレオロジーの考え方に基づいて3次元および1次元の特性値としての球径および弦長の分布を求めた。これら各次元の気泡寸法に関する特性値を比較し、観察次元による気泡寸法の計測値の変化傾向を明らかにした。さらに、それらの特性値と Powers モデルの単一分散の気泡分布構造との比較を行い、その差異について考察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画像の取得

目標空気量 4.5%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に示方配合を示す。

コンクリート供試体は脱型後、所定材齢まで水中養生($20 \pm 2^\circ\text{C}$)を行なった。材齢3週にて供試体から板状試料を切り出し、その表面を精細研磨した。研磨面中央部(約 $60\text{mm} \times 60\text{mm}$)を解析対象領域とし、 $11 \times 11=121$ 個の小区画(1区画は約 $6.14\text{mm} \times 6.14\text{mm}$, 2048 画素 \times 2048 画素, 分解能は約 $3\mu\text{m}$ /画素)に分割し、各区画の画像を取得した。取得した画

表-1 コンクリートの配合

設計空気量 (%)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位数 (kg/m ³)				実測空気量 (%)	
				水	セメント	細骨材	粗骨材		
4.5	10 ± 2	50	45	165	330	797	1003	0.007	5.0

表-2 リニアトラバース法計測記録

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)
2745.6	779	0.128	3.6	178

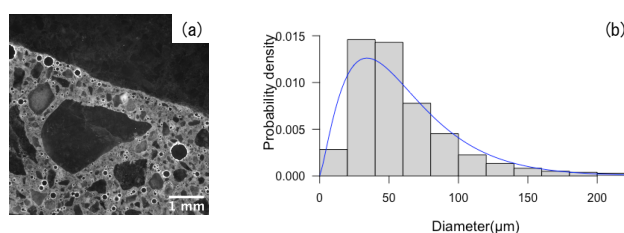


図-1 気泡の画像例(a)と直径分布(b)

像の例を図-1(a)に示す。これら121枚の画像に対して、自動計測装置により求められたリニアトラバース法の計測結果を表-2に示す。解析対象のコンクリートの気泡間隔係数は一般的な推奨値 $200\mu\text{m}$ よりも小さく、凍結融解に対する抵抗性を有したコンクリートと判断される。

(2) 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

取得画像にて自動解析により気泡を同定し、その気泡の直径分布を画像解析によって求めた。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次元直径分布 $g(y)$ に対して、式[1]を用いて3次元の気泡球径の累積確率密度関数 $F(x)$ を求め、これから気泡球径の確率密度関数 $f(x)$ を求めた¹⁾。

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

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

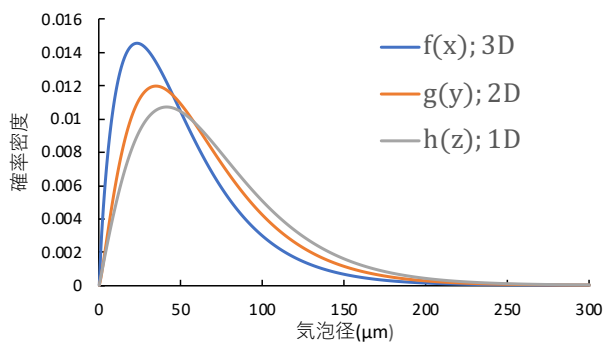


図-2 各次元における気泡の粒度分布の比較

表-3 各次元における気泡特性径の比較

設計空気量 (%)	平均径(μm)			モード径(μm)			Powers モデル径 (μm)
	3次元	2次元	1次元	3次元	2次元	1次元	
4.5	50	61	69	23	35	41	192

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

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。

(3) 気泡間隔係数に対応した単一寸法の気泡径

気泡分布を単一分散系として、気泡間隔係数の算出に用いられる気泡直径 D は、リニアトラバース計測にて求められる平均弦長 \bar{l} を用いて、 $D = 3\bar{l}/2$ と求めることができる。

3. 結果および考察

図-2に実測された直径分布に対応する2次元直径 $g(y)$ 、およびこれから求められた3次元球径 $f(x)$ と1次元弦長 $h(z)$ の分布をあわせて示す。次元が大きくなるにつれて関数が最大値を示す径(モード径)は小さくなり、また分散も小さくなった。表-3に各次元の気泡の特性径と気泡間隔係数の算出にて仮定される気泡径を比較して示す。各次元の気泡の平均値は、次元が大きくなるにつれて小さくなり、3次元における平均径はおよそ $50\mu\text{m}$ と推定された。一方、1次元の平均弦長はおよそ $70\mu\text{m}$ であるので、約 $20\mu\text{m}$ の差を生じていることになる。従来、気泡寸法を論ずる際、リニアトラバース計測値を基本として、多くの気泡を計測していれば、弦長と気泡径の間には大きな差はないとみなして、弦長を気泡径とみなすことがある。しかし、図-2より、明らかにそのような解釈は適切ではないと思われる。一方、観察画像から直接画像解析により求めた気泡の平均径は $68\mu\text{m}$ と、 Γ 分布によって近似された分布の2次元の

平均径の計算値 $61\mu\text{m}$ は同程度の値を示し、 Γ 分布により気泡寸法は適切に近似されたと判断できる。

リニアトラバース法により得られた平均弦長は $128\mu\text{m}$ であり、これより仮定される単一分散の気泡球径は $192\mu\text{m}$ となる。3次元空間分布として推定される平均気泡径に比べ、約4倍もの大きい気泡径を仮定しており、図-2に示すようにそのような寸法の気泡はほとんど存在しない。次元が小さくなるほど大きな気泡寸法を得るのは、2次元断面をプローブ(検査面)としたときは、大きい気泡ほどその面に現れやすく、さらにその面内に1次元プローブとしてトラバース線を引くと、その中でもさらに大きい側の気泡が計測されることの影響が表れるためである。このような実際の寸法と Powers モデルで仮定される寸法の乖離が、気泡間隔係数が同程度であっても、凍結融解抵抗性に大きな差異を生ずることの一因と考えられる。

一方、次元が大きくなるにつれて平均径が小さくなるということは、実際の気泡分布では気泡の比表面積が大きくなり、気泡数が増大して、気泡間隔が小さくなることを意味する。それぞれの気泡が周囲のセメントペーストを凍害から保護するので、断面には現れないそれらの気泡による保護が期待することになる。例えば、3次元の平均気泡径の気泡の立方体格子配置を考えると、気泡間隔係数としては $43\mu\text{m}$ 程度となる。すなわち、仮想的に気泡表面からセメントペースト最遠点までの距離が $43\mu\text{m}$ ということであり、画像として観察されない気泡の寄与が極めて大きいことが確認できる²⁾。

4. 結論

2次元画像の気泡の直径分布から、3次元の気泡径分布を推定し、弦長計測や面積計測では検出されない微細な空隙の存在が、耐凍害性発現において重要な役割を果たすことが示唆された。

参考文献

- 1) Snyder, K., Natesaiyer, K. and Hover, K.: Materials Science of Concrete VI (eds. S. Mindess and J. Skalny), American Ceramic Society, pp.129-214, 2001.
- 2) Song, Y. et al.: Cement and Concrete Research 128, 105952, 2020.