

気泡断面積測定による硬化コンクリートの 気泡パラメータの解析理論

Determination of Air Void Parameters in Hardened Concrete From
Measurement of Intercepted Air Void's Area

小長井宣生* 大橋 猛** 根本任宏***

従来、硬化コンクリートの気泡パラメータは、多大の労力を費やす肉眼での顕微鏡観察により、点または線解析理論に基づいて求めていた (ASTM C-457)。このため、省力化・精度向上を目的として、画像解析装置による測定法を開発することとした。

本文は、この新しい画像解析による測定法を実用化するために、形量形態学の分野での面積解析の原理を応用し、硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法の基礎理論として体系化したものである。

《コンクリート；気泡パラメータ；画像解析；計量形態学》

1. はじめに

冬期に厳しい凍結融解作用を受ける地域において施工されるコンクリートは、AE 剤により空気泡 (エントレインドエア) を連行させて、耐凍害性を確保することが必要とされる。

AE 剤を用いた AE コンクリートは、今日では常識となっているが、AE 剤の歴史は古く、1930 年代に米国で、偶然天然セメントの粉砕助剤として添加した脂肪酸に耐久性改善の効果のあることが発見され、昭和 23 年 (1948 年) には、わが国にも導入されて以後、広く普及したものである。

また、AE 剤の普及とともに、気泡パラメータと耐久性改善効果の関連について古くから研究がなされてきた。エントレインドエアがコンクリート中の氷結による膨張圧と水の移動圧を緩和することによって、耐凍害性が改善されるといわれており、その効果は、空気量、気泡の比表面積、気泡間隔係数などの気泡パラメータによって評価される。気泡間隔係数は気泡の平均的な分布状態を表わす指標であり 1949 年、T. C. Powers によって示された概念である¹⁾。

一般に気泡間隔係数が 200~250 μm 以下であれば、耐久性に富むコンクリートが得られるとされており、通常

は、粗骨材の最大寸法に応じて 3~6% の空気量とした AE コンクリートが用いられる。AE コンクリートの性能を確認するためには、硬化コンクリートの気泡特性を直接測定することが必要となる。

しかし、ASTM C-457²⁾ に定められている既応の測定法では肉眼による顕微鏡観察のため、多大の時間と労力を要することから、実際には多くの場合フレッシュコンクリートにおける空気量を測定し、間接的に判断する方法が行われている。

通常の性能のよく知られた良質の AE 減水剤などを用いる場合には、これで十分であろう。しかしながら、例えば流動化剤などの新しい混和材料を併用したり、あるいは新しい製造方法による AE コンクリートの耐凍害性を確認する場合、さらに、気泡パラメータが耐凍害性に果たす役割を検討する場合などにおいては、硬化コンクリートの気泡パラメータを直接測定することが必要となる。

一方、最近の画像入力用の高性能テレビカメラ、高速データ処理の可能なパーソナルコンピュータなどの機器の発達により、ハードウェアの面からは比較的低コストで、十分な性能を持った画像解析システムを構成することが可能となっている。そこで、従来の多大の労力を要

*前コンクリート研究室副室長 現帯広開発建設部道路課長 **コンクリート研究室長 ***同室員

する肉眼による顕微鏡観察に替わるものとして、画像解析による硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法を用いた省力化、測定精度の向上が望まれている。

本文は、この画像解析による硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法の理論的根拠を明確にすることを目的としている。ここでは、まず顕微鏡による断面測定の原理となる基礎的な概念について説明した上で、これらを応用した、従来の ASTM C-457 に定められた、気泡パラメータ解析法について記述し、さらに、新しい画像解析のための気泡断面積の測定に基づく気泡パラメータの解析方法について述べる。

2. 体積比率の解析に関する基礎理論

ここで述べる理論³⁾は、J. E. Hilliard により示されたもので、体積比率とは、ある複数の成分からなる物質中に占める 1 つの成分の体積の割合をいう。顕微鏡を用いた体積比率の測定はもともと金属組織学、あるいは岩石学の分野でよく行われてきたもので、その基本的な解析理論は、計量形態学 (Quantitative Microscopy)、あるいはステレオロジー (Sterology) として、体系化されている³⁾。

コンクリートでいえば、コンクリート中の空気量を求めることが、すなわち体積比率を測定することに相当する。ここで述べる面積解析は、画像解析による新しい測定法の原理となるものであり、また、線解析および点解析は、それぞれ ASTM のリニヤトラバース法、修正ポイントカウント法の原理に対応する。

以下、2次元の断面上で得られる粒子の面積、線または点の比率と、その粒子の体積比率とが等価であることを示す。

2.1 面積解析

ある物質中で、1辺の長さ L の立方体の体積要素 (図-1) 中に、1つの面 (x, y 平面) に平行でそれから z の距離にある平面を考える。

$$0 \leq z \leq L$$

今、 $A(z)$ をある 1 つの試験面が、その物質中の成分である α 粒子相と交わってできる面積の総和とする。この試験面中で α 粒子相の占める面積比率は、

$$A_A(z) = \frac{A(z)}{L^2}$$

ここで、 z は確率変数であり、その関数 $A_A(z)$ を z の変域 ($0 \leq z \leq L$) にわたって平均した値、すなわち期待値をとると

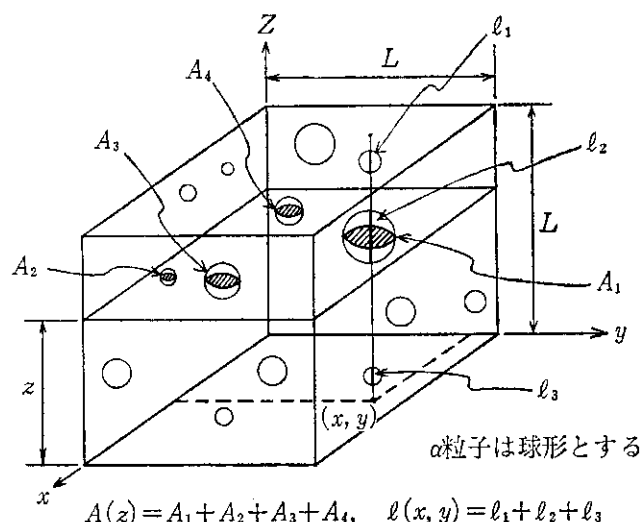


図-1 3次元立方体要素中の α 粒子相と面あるいは線との交わり

$$E\langle A_A(z) \rangle = \bar{A}_A(z) = \int_0^L A_A(z) \cdot f(z) dz \dots \quad (2-1)$$

となる。ここで、 $f(z) dz$ はある試験面が z と $z+dz$ の間にある確率である。一様に分布する試験面からランダムに、試験面がサンプリングされる場合には、

$$f(z) dz = \frac{dz}{L} \text{ となる。}$$

これを式 (2-1) に代入して、

$$\begin{aligned} \bar{A}_A &= \int_0^L A_A(z) \frac{dz}{L} = \int_0^L \frac{A(z)}{L^2} \cdot \frac{dz}{L} \\ &= \int_0^L \frac{A(z) dz}{L^3} \dots \end{aligned} \quad (2-2)$$

上式で積分 $\int_0^L A(z) dz$ は立方体中の α 粒子の全体積 V_α に等しいから、

$$\bar{A}_A = \frac{V_\alpha}{L^3} = \frac{V_\alpha}{V} = V_V \dots \quad (2-3)$$

この式は、 α 粒子の面積比率 $\bar{A}_A$ の期待値は、 α 粒子の体積比率 V_V に等しいこと、すなわち面積比率 A_A は、体積比率 V_V の不偏推定量であることを示す。

2.2 線解析

上で述べた立方体要素中で、その辺に平行な長さ L の 1 本の線を考える (図-1)。この線の位置は座標 (x, y) で定義される。今、この試験線が α 粒子相と交わるときの切片長の総和を $l(x, y)$ とすると、 α 粒子相が占める線比率は $L_L(x, y) = l(x, y)/L$ である。

ただし、 $0 \leq x \leq L$, $0 \leq y \leq L$

ここで、確率変数 x, y の関数である線比率 $L_L(x, y)$

の期待値をとると

$$E\langle L_L(x, y) \rangle = \bar{L}_L(x, y) \\ = \int_0^L \int_0^L L_L(x, y) f(x, y) dx dy \quad (2.4)$$

となる。ここで、 $f(x, y) dx dy$ はある試験線が、 x から $x+dx$, y から $y+dy$ の範囲にある同時確率である。

ある面積にわたって、一様に分布する試験線からランダムに試験線がサンプリングされる場合には、

$$f(x, y) = \frac{1}{L^2} \text{ となる。}$$

これを式 (2.4) に代入すると、

$$\bar{L}_L = \int_0^L \int_0^L \frac{l(x, y)}{L} \cdot \frac{1}{L^2} dx dy \quad (2.5)$$

ここで、 $\int_0^L \int_0^L l(x, y) dx dy$ は、立方体中の α 粒子の全体積 V_a に等しく、これを式 (2.5) に代入すると、

$$\bar{L}_L = \frac{V_a}{L^3} = \frac{V_a}{V} = V_V \quad (2.6)$$

これは、 α 粒子の線比率 L_L はその体積比率 V_V の不偏推定量であることを示すものである。

もし、試験線がある体積要素中にランダムにおかれるのではなく、2次元のある面上にランダムにおかれるとすると、上と同様にして、

$$\bar{L}_{LA} = A_A \quad (2.7)$$

となることが容易に証明される。

ここで、 A_A はある2次元の面についての α 粒子の面積比率である。

式 (2.3)、式 (2.7) から、2次元の面上から得られる α 粒子の線比率 L_{LA} は、その粒子の体積比率の推定値となる。

2.3 点解析

今、試験点のある体積中にランダムにおいたとすると、この点が α 粒子中に入る確率は、 α 粒子の体積比率に等しい。したがって、 α 粒子中にある点の比率の期待値 $\bar{P}_P$ は、

$$\bar{P}_P = V_V \quad (2.8)$$

となる。同様に、もしある2次元の面上にランダムに点がおかれたとすると、

$$\bar{P}_P = A_A \quad (2.9)$$

となり、ある線上に点がランダムにおかれた場合は、

$$\bar{P}_P = L_L \quad (2.10)$$

式 (2.8)~(2.10) までは、ランダムでない系統的な点の配置 (例えば正正方格子状) についてもあてはまる。したが

って、ある平面上に系統的に配置された点がある成分粒子中に含まれる比率を測定することによって、その粒子の体積比率が推定できることになる。

2.4 統計的誤差

上で述べたどの方法も、物質からの面積、線、あるいは点要素のサンプリング測定を必要とするので、統計的誤差は避けられない。

これらの方法を選択するには、まず同じサンプルについてある解析法でなん回か繰返し測定し、標準偏差によって表わされる再現性をそれぞれ求めておく。

そして、与えられた標準偏差に達するまでに要する労力について、各方法を比較することにより判定を行う。測定の再現性の尺度としては、標準偏差 $\sigma(V_V)$ を用いる。得られたデータが正規分布となる場合には、 $\bar{V}_V \pm \sigma(V_V)$ の範囲に入る確率は約 68% となる。

また、相対誤差は変動係数 $\sigma(V_V)/\bar{V}_V$ で表わされる。面積解析における統計的誤差は、測定面積中の α 粒子 (体積比率を推定しようとする成分) の数と大きさの変動を考慮に入れて、

$$\frac{\sigma^2(V_V)}{\bar{V}_V^2} = \frac{1}{N} \left[1 + \frac{\sigma^2(a)}{a^2} \right] \quad (2.11)$$

と書くことができる。

N : 測定面積中の α 粒子面の数

$\sigma(a)$: 測定面積中の α 粒子面積の標準偏差

a : 測定面積中の α 粒子面積の平均

α 粒子が一定の直径の球の場合、

$$\frac{\sigma^2(a)}{a^2} \cong 0.2$$

となるので、面積解析の変動係数の下限は、

$$\frac{\sigma^2(V_V)}{\bar{V}_V^2} = \frac{\sigma^2(A_A)}{\bar{A}_A^2} \geq \frac{1.2}{N} \quad (2.12)$$

または、

$$\frac{\sigma(V_V)}{\bar{V}_V} \geq \frac{1.1}{\sqrt{N}} \quad (2.13)$$

これから、例えば変動係数を 5% 以下に抑えるためには、測定面上で約 500 個の粒子面積を測定することが必要となる。

3. 従来の気泡パラメータ解析法 (ASTM C-457)

3.1 気泡パラメータ

硬化コンクリートの気泡パラメータを顕微鏡によって調べる方法は、ASTM 基準 C-457 に定められている。この中には、リニヤトラバース法と修正ポイントカウント法の 2 つの方法が記述されている。

これらの方法によって得られる気泡パラメータのうち、重要なものは空気量、気泡頻度、比表面積、気泡間隔係数である。

空気量

空気量： A はコンクリート中の空気容積の割合であり、

$$A = \frac{V_a}{V_c} = \frac{L_a}{L_t} = \frac{S_a}{S_t} = n\bar{l} \quad (2.14)$$

V_a ： 気泡の容量 (cm^3)

V_c ： コンクリートの容量 (cm^3)

L_a ： 気泡中を横切るトラバース線の線分総和長 (cm)

L_t ： トラバース線の全長 (cm)

S_a ： 気泡中に入るカウント数

S_t ： 全カウント数

$\bar{l}$ ： 気泡を横切る平均強度、 $=L_a/N$ (cm)

N はトラバース線が横切る気泡の総数

n ： 気泡頻度、 $=N/L_t$ (cm^{-1})

上述の関係式がなりたつ根拠は、2.2、2.3 で示した考え方に基づく。

気泡頻度

気泡頻度は $n = N/L_t$ で表わされる。

これは、単位長さ当たりのトラバース線が横切る気泡の数である。良質の AE コンクリートでは $n = 8 \sim 16/\text{inch}$ ($300 \sim 600/\text{m}$) となる。

比表面積

気泡の比表面積 α は、全気泡の単位容積当たりの表面積であり、次の関係がなりたつ。

$$\alpha = \frac{A_a}{V_a} = \frac{4}{\bar{l}} = \frac{4n}{A} \quad (2.15)$$

A_a ： 全気泡の表面積 (mm^2)

V_a ： 全気泡の容積 (mm^3)

良質の AE コンクリートでは、 $\alpha = 24 \sim 48$ (mm^{-1}) となる。

$$\begin{aligned} \bar{l} &= \lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} \sum_{j=1}^{r_i/h} [l_{ij}]}{\sum_{i=1}^{R/t} \left(\frac{r_i}{h} \right)} \\ &= \lim_{\substack{t \rightarrow 0 \\ h \rightarrow 0}} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} \left[\sum_{j=1}^{r_i/h} 2h \sqrt{r_i^2 - \{(j-1)h\}^2} \right]}{\sum_{i=1}^{R/t} r_i} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{2 \sum_{i=0}^{R/t} \lim_{h \rightarrow 0} \left[r_i + \sqrt{r_i^2 - h^2} + \sqrt{r_i^2 - (2h)^2} + \cdots + \sqrt{r_i^2 - \left\{ \left(\frac{r_i}{h} - 1 \right) h \right\}^2} \right] h}{\sum_{i=1}^{R/t} r_i} \end{aligned}$$

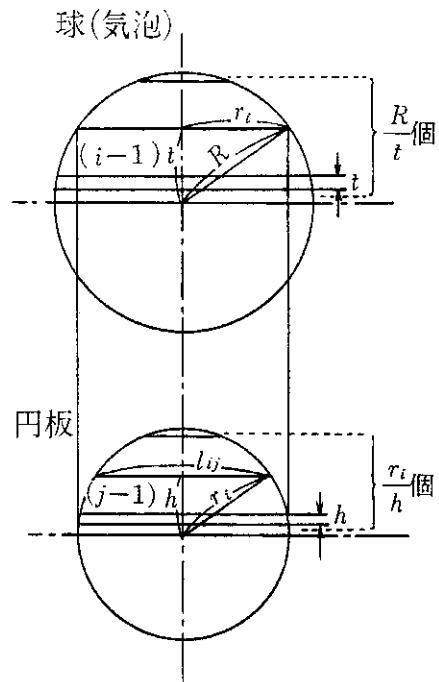


図-2 気泡からトラバース線が切りだす弦長と気泡径との関係

ここで、 $\alpha = \frac{4}{\bar{l}}$ の関係は以下のようにして導かれる⁴⁾。

今、簡単のために、コンクリート中に大きさの等しい球形の気泡が分布している仮想モデルを考える。トラバース線が気泡から切りだす弦長の平均値は、球を平行な平面で無数の薄い円板に分割し、その円板をまた平行な線で無数の台形要素に分割したときのその要素の長辺の平均値である。図-2のように、半径 R の球を厚さ t の円板に分割したとすると、球の中心から i 番目の円板の半径 r_i は、

$$r_i = \sqrt{R^2 - \{(i-1)t\}^2}$$

さらに、半径 r_i の円板を高さ h の台形要素に分割すると、円板の中心から j 番目の要素の長辺の長さ l_{ij} は、

$$l_{ij} = 2 \times \sqrt{r_i^2 - \{(j-1)h\}^2}$$

したがって、球から切りだした弦長の平均値 $\bar{l}$ は、

$$\begin{aligned}
&= 2 \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} \left[\int_0^{r_i} \sqrt{r_i^2 - x^2} dx \right]}{\sum_{i=1}^{R/t} r_i} = 2 \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} \left[\frac{\pi}{4} r_i^2 \right]}{\sum_{i=1}^{R/t} r_i} \\
&= \frac{\pi}{2} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} [R^2 - \{(i-1)t\}^2]}{\sum_{i=1}^{R/t} \sqrt{R^2 - \{(i-1)t\}^2}} \\
&= \frac{\pi}{2} \frac{\lim_{t \rightarrow 0} \left[R^2 + (R^2 - t^2) + \{R^2 - (2t)^2\} + \dots + R^2 - \left\{ \left(\frac{R}{t} - 1 \right) t \right\}^2 \right] t}{\lim_{t \rightarrow 0} \left[R + \sqrt{R^2 - t^2} + \sqrt{R^2 - (2t)^2} + \dots + \sqrt{R^2 - \left\{ \left(\frac{R}{t} - 1 \right) t \right\}^2} \right] t} \\
&= \frac{\pi}{2} \frac{\int_0^R (R^2 - x^2) dx}{\int_0^R \sqrt{R^2 - x^2} dx} = \frac{\pi}{2} \frac{\frac{2}{3} R^3}{\frac{\pi}{4} R^2} = \frac{4}{3} R
\end{aligned}$$

ゆえに、

$$\alpha = \frac{\text{気泡表面積}}{\text{気泡体積}} = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R} = \frac{3}{\frac{3}{4}l} = \frac{4}{l}$$

となり、式(2.15)の関係が得られる。

なお、種々の径の球からなる実際の気泡分布状態に対しても、上式の関係がなりたつことは T. F. Willis により証明されている¹⁾。

気泡間隔係数

T. C. Powers によって、AE コンクリートの気泡分布の適切さを表わすパラメータとして定義されたもので、コンクリートが凍害を受けないためには、ペースト中のどの点も気泡からの限界距離以内にあるようにすべきであるという仮説に基づいている。

ASTM C-457 では、気泡間隔係数はペースト/空気量比によって、2通りに定式化されている。

- i) $P/A \leq 4.342$ すなわち、空気量が比較的多い場合

$$\bar{L} = \frac{P}{4n} = \frac{P}{A\alpha} \quad (2.16)$$

$\bar{L}$: 気泡間隔係数 (mm)

P : コンクリート中のセメントペーストの割合 (容積比)

上式の定義によれば、 $\bar{L}$ はペーストが気泡周囲に均一に広がっているとした場合、気泡の表面をとり囲むペースト層の厚さということになる。

すなわち、 $\bar{L} = V_P/A_a$

V_P : コンクリート中のセメントペーストの容積 (mm³)

- ii) $P/A > 4.342$ の場合 (P/A は、通常コンクリートではおよそ 3.7~6 の範囲の値をとるが、 $P/A > 4.342$ であ

る場合が多い)。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.43 \sqrt{\frac{P}{A} + 1} - 1 \right] \quad (2.17)$$

上式は、等大の球である気泡が立方格子状に分布するモデルを仮定することにより、以下のように導かれる。気泡球の半径を r_h 体積を V とすると、

$$V = \frac{4}{3} \pi r_h^3 = \frac{r_h}{3} (4\pi r_h^2)$$

$$\therefore \alpha = \frac{4\pi r_h^2}{V} = \frac{3}{r_h}$$

$$\text{したがって、} V_h = \frac{3}{\alpha} = \frac{3}{4} l$$

気泡の影響範囲 (影響球) の半径 r_m は、気泡を中心としたセメントペーストを気泡の数 N に分割したときの立方体の対角線の長さの 1/2 に等しい (図-3)。

立方体の体積は $\frac{P+A}{N}$

立方体の一辺の長さは $l = \sqrt[3]{\frac{P+A}{N}}$

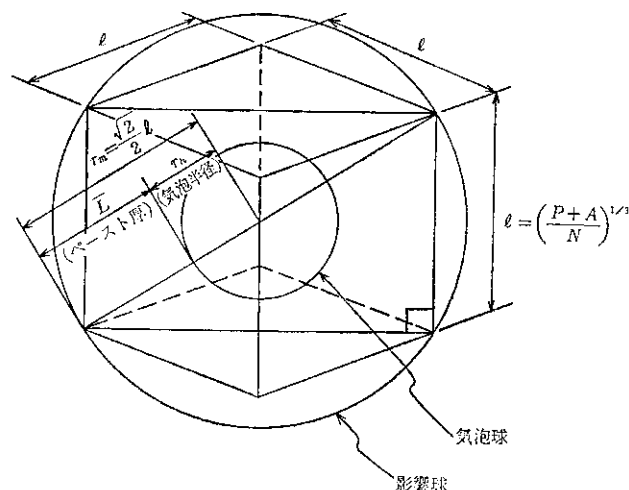


図-3 Powers による気泡間隔係数の概念モデル

したがって、

$$r_m = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{P+A}{N}}$$

$$\bar{L} = r_m - r_h = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{\frac{P+A}{N}} - r_h$$

ここで、

$$N = \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot \pi r_h^3} = \frac{\alpha^3 \cdot A}{36 \pi}$$

であるから、

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.43 \sqrt{\frac{P}{A}} + 1 - 1 \right]$$

耐久的な AE コンクリートでは、気泡間隔係数は 100 ~ 200 μm の範囲にあるとされている。 $\bar{L}$ の計算に必要なペースト量 P は、通常、配合表から計算されるが、仮定値 0.25 を用いることもできる。

Powers の気泡間隔係数では、気泡粒径の違い、すなわち大きさの分布を考慮に入れていないが、リニヤトラバース法によって得られる弦長の分布データから、気泡の粒径分布を計算する方法は、G. W. Lord と T. F. Willis により示されている⁵⁾。

3.2 リニヤトラバース法 (線解析)

リニヤトラバース法は 2.2 で示したように、物質中のある相の体積比率とその相中を横切るランダムな線の長さの比率 (線比率) とが等しいという考えに基づいている。

$$\text{すなわち、} \frac{V_a}{V_t} = \frac{L_a}{L_t}$$

V_a : 空気量

V_t : コンクリートの全容積

L_a : 気泡中を横切る線の線分総和長

L_t : トラバース線の全長

がなりたつことである。

この線解析の原理は、1898 年オーストリアの岩石学者 A. Rosiwal⁶⁾ によって初めて導入されたことから、リニヤトラバース法は Rosiwal 法とも呼ばれる。

十分に研磨した試料面をトラバースし、気泡およびその他の相内のトラバース長は、カウンター付の回転スクリー装置で別々に測定される。測定倍率は 50 $\times$ ~ 125 $\times$ にとられる。十分な精度を持つ結果を得るために必要なトラバース長は、粗骨材の最大寸法に応じて表-1 のように定められている。空気量以外の気泡パラメータを求める場合には、カウンターによってトラバース線が横切る気泡の数 N を測定する必要がある。

表-1 リニヤトラバース法に対する最小トラバース長²⁾

骨材最大寸法 (mm)	$A, \alpha, \bar{L}$ の計算に必要な トラバース長* (mm)
150.0	4,064
75.0	3,048
37.5	2,540
25.0	2,413
19.0	2,286
12.5	2,032
9.5	1,905
4.8	1,397

* 空気量に関して得られる結果の精度は、トラバース長と空気量の大きさに依存する。経験的に定められたこの表の値を用いれば、空気量が 3% までの結果は、信頼でき、このとき標準偏差は 0.5% 以下である。3% の空気量が得られるときの変動係数は 17% である。トラバース長が 1,397 mm 以上、空気量 3% 以上の場合、変動係数は低下する。

3.3 ポイント・カウント法 (点解析)

この方法は、2.3 で示したランダムな点が物質中のある相中に落ちる数の比率と、その相の体積比率が等価であるという点解析の考えに基づくものである。

$$\text{すなわち、} \frac{V_a}{V_t} = \frac{S_a}{S_t} \text{ がなりたつ。}$$

S_a : ランダムなポイントが気泡中に落ちる数

S_t : 総ポイント数

ランダムなポイントは、よく研磨された試料面上で格子線の交点にとられる。カウンターにより気泡、ペースト、骨材の各組に落ちるポイントの数が測定される。リニヤトラバース法と比べてポイント・カウント法の大きなメリットは、カウンターによってペースト量など、他の相の比率が容易に求められることである。

必要な最小ポイント数が骨材の最大寸法に応じて定められており、通常約 1,500 点である。

4. 気泡断面積による気泡パラメータの解析法

(面積解析)

この方法は、2.1 で示した面積解析の原理から次式がなりたつことを前提としている。

$$A = \frac{V_a}{V_t} = \frac{A_a}{A_t} \quad (2.18)$$

A_a : 測定面積中に占める気泡面積の総和 (cm^2)

A_t : 測定される全面積 (cm²)

気泡面積の平均値を a とすると、気泡の比表面積は、

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{a}} \quad (2.19)$$

で表わされる。これは、以下のようにして証明される。

まず、3.1で線解析による弦長の平均値 $\bar{l}$ から α を求めたときと同様に、簡単のために、大きさの等しい気泡が分布する仮想モデルを考える。

ある面が気泡から切りだす面積の平均値は、球を無数の薄い円板に分割したときの他の要素の面積の平均値である。図-2から半径 R の球を厚さ t の円板に分割したとすると、球の中心から i 番目の円板の面積は、

$$a_i = \pi r_i^2 = \pi [R^2 - \{(i-1)t\}^2]$$

したがって、球から切りだした円板面積の平均値 $\bar{a}$ は、

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} S_i}{\frac{R}{t}} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{R/t} \pi \cdot t \cdot [R^2 - \{(i-1)t\}^2]}{R} \\ &= \frac{\pi}{R} \lim_{t \rightarrow 0} \left[R^2 + (R^2 - t^2) + \left\{ R^2 - (2t)^2 \right\} + \dots \right. \\ &\quad \left. + R^2 - \left\{ \left(\frac{R}{t} - 1 \right) t \right\}^2 \right] t \\ &= \frac{\pi}{R} \int_0^R (R^2 - x^2) dx = \frac{\pi}{R} \cdot \frac{2}{3} R^3 = \frac{2}{3} \pi R^2 \end{aligned}$$

ゆえに、

$$\alpha = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{3}{R} = \frac{3}{\sqrt{\frac{3a}{2\pi}}} = \sqrt{\frac{6\pi}{a}}$$

気泡間隔係数は、 P/A の比率によって前述の式(2.16)、(2.17)式から求められる。ただし、ここで A および α は式(2.18)、(2.19)からそれぞれ求めた値を用いる。

5. あとがき

従来、硬化コンクリートの気泡パラメータの測定に関しては、ASTMの規格で線解析に基づくリニヤトラバース法および点解析に基づくポイント・カウント法について定められていただけであった。

本文は、計量形態学 (Quantitative Microscopy) の分野での面積解析の原理を応用し、新しい画像解析による硬化コンクリートの気泡パラメータ測定法の基礎理論を体系化したものである。

現在、著者らはこの理論に基づいて、省力化および精度向上を目的として、画像解析装置を用いた気泡パラメータの測定法について検討を重ねており、近くその成果を報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) T. C. Powers: The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete, Proc. Highw. Res. Bd. [29], 1949.
- 2) ASTM C457-80: Standard Practice for Microscopical Determination of Air-Void Content and Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, ASTM Standards, Part 14.
- 3) R. T. DeHoff & F. N. Rhines: Quantitative Microscopy, McGraw-Hill Inc., USA, 1968.
- 4) 岩崎訓明: コンクリートの特性, コンクリートセミナー 1. 共立出版, 1975.
- 5) G. W. Lord & T. F. Willis: Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of a Rosiwal Traverse of Aerated Concrete, ASTM Bulletin, 1951.
- 6) A. Rosiwal: On Geometric Rock Analysis A Simple Surface Measurement to Determine the Quantitative Content of the Mineral Constituents of Stony Aggregate, Verhanal. K. K. Geol. Reich. Wien, 5-6, 1898.