

セメント・コンクリート中の気泡構造 (特に気泡球間隔及び気量について)

岐阜大学 正 大 坂 文 彦

〃 〃 〃 森 本 博 昭

1. まえがき

モルタル、コンクリート中に導入された空気泡の量と分布状態はその諸物性に入力な影響をおよぼすことが知られている。従来の研究においては気量と物性について検討を行なった例が大部分である。しかし最近の相乗複合材料の物性に対する phase geometry が認識されはじめ、特に構造敏感な強度特性においてはその影響がかなり存在するものと考えられるに至った。このようなことからモルタル、コンクリート中に導入された空気泡の幾何学的な分布構造は量とともにその物性に重大な影響を及ぼすものと考えられる。しかし実際の(三次元的な)空気泡の分布構造を直接知見することはできない。そこで著者らは断面にあらわれる気泡孔の分布構造の観測データをもとに確率統計的手法によりその三次元的な分布構造を推定する方法について検討を行ない気泡球半径の三次元的分布構造の推定方法についてはすでに報告⁽¹⁾済みである。そこで本研究では気泡球分布構造のもう一つの重要な指標である気泡球間隔の三次元的な分布および量的因子の気量の推定法について検討を行なったものである。

2. 気泡球間隔の解析

二つの気泡球の間隔を次のように定義する。図-1に示すように任意の二つの気泡球の中心を結ぶ線分が他の気泡球と交わらない時この線分を気泡球間隔 l とする。同様にして断面($x-x$)にあらわれる気泡孔間隔 d も定義することができる。今、 l, d の確率密度曲線および平均をそれぞれ、 $f(l), f(d), \bar{l}, \bar{d}$ とする。図-1を参照して断面 $x-x$ に中心間隔 l が現われる確率は $P(l) = \int_0^l f(l) dl / \bar{l}$ ($0 \leq l < \infty$) —— (1)

次に l なる線分が図-1に示すような x なる位置を占める確率は

$$P(x) = \frac{dx}{\bar{l}} \quad l \leq x \leq 2l \quad (0 \leq x \leq \frac{\pi}{2}) \quad \text{—— (2)}$$

以上より l なる線分が x なる位置を占める確率 $P(l|x)$ は

$$P(l|x) = f(l, x) dx dr = f(l) dl dx / \bar{l} \quad \text{—— (3)}$$

図-1より明らかなるように $d^2 = x(2l - x) \rightarrow d = \sqrt{x(2l - x)}$ —— (4)

なる関係より $d \leq d'$ なる確率 $P(d \leq d')$ ($0 \leq d' < \infty$) を求めると

$$P(d \leq d') = \int_{x(2l-x) \leq d'^2} f(l, x) dl dx = \frac{1}{\bar{l}} \int_{x(2l-x) \leq d'^2} f(l) dl dx \quad \text{—— (5)}$$

積分区域に注目して式(5)を変形すれば結果的に式(6)をうる。

$$P(d \leq d') = 1 - \frac{1}{\bar{l}} \int_{d'^2}^{\infty} f(l) \sqrt{l^2 - d'^2} dl \quad \text{—— (6)}$$

とこれが $P(d \leq d')$ は気泡孔間隔 d の確率分布曲線であるので

$$\left[\partial P(d \leq d') / \partial d' \right]_{d=d'} = f(d) \quad \text{—— (7)}$$

から $f(d)$ を算出することができる。(基礎式(6)は半径分布に関するものと全く同型の式である⁽¹⁾)

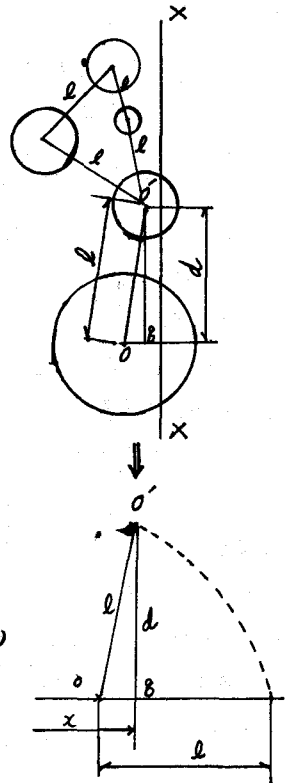


図-1

さて、式(6)(7)より $f(l)$ を推定する手順として本研究ではまず $f(l)$ を仮定し式(6)より解析的に $f(d)$ を求め、これと断面の観測から得られる $f(d)$ (ヒストグラム) を対比検討し $f(l)$ を決定するという方法によった。

3. モルタル、コンクリートに対する $f(l)$ の型

前述のように式(6)(7)より $f(l)$ を推定するにはまず $f(l)$ を仮定しなければならぬ。そこで本研究では気泡球半径の解析⁽¹⁾と同様の指数関数と仮定した。すなわち

$$f(l) = \lambda e^{-\lambda l} \quad \text{--- (9)} \quad (\lambda: \text{正定数}), \quad \bar{l} = \int_0^{\infty} l f(l) dl = \frac{1}{\lambda} \quad \text{--- (10')}$$

式(6)を式(9)に代入して

$$P(d \leq d') = 1 - \lambda^2 \int_{d'}^{\infty} \sqrt{l^2 - d'^2} \cdot e^{-\lambda l} dl \quad \text{--- (9)} \quad \text{ここで } l - d' = l' \text{ とおいて}$$

$$P(d \leq d') = 1 - \lambda^2 \int_0^{\infty} \sqrt{l'^2 + 2d'l'} \cdot e^{-\lambda(l'+d')} dl' = 1 - \lambda^2 e^{-\lambda d'} \int_0^{\infty} \sqrt{l'^2 + 2d'l'} \cdot e^{-\lambda l'} dl' \quad \text{--- (11)}$$

$$\begin{aligned} \text{式(11)より } f(d) &= \left[\frac{\partial P}{\partial d'} \right]_{d'=d} = \left[\lambda^3 e^{-\lambda d'} \int_0^{\infty} \sqrt{l'^2 + 2d'l'} \cdot e^{-\lambda l'} dl' - \lambda^2 e^{-\lambda d'} \int_0^{\infty} \frac{\partial(\sqrt{l'^2 + 2d'l'})}{\partial d'} \cdot e^{-\lambda l'} dl' \right]_{d'=d} \\ &= \left[\lambda^2 e^{-\lambda d'} \left\{ \lambda L(g(l')) - L\left(\frac{\partial g(l')}{\partial d'}\right) \right\} \right]_{d'=d} \quad \text{--- (12)} \quad \text{ここで } L: \text{ラプラス変換子} \\ &\quad g(l') = \sqrt{l'^2 + 2d'l'} \end{aligned}$$

式(12)より $f(d)$ を算出することができる。しかし式(12)を厳密に計算することは困難であるので本研究

では $g(l') \approx C_1 l'^{C_2}$ --- (13) $\frac{\partial g(l')}{\partial d'} \approx C_1' l'^{C_2}$ --- (14) とおき式中の定数は $f(d)$ を求める d の座標毎に於て最小二乗法を適用することにより決定した。式(13), (14)を式(12)に代入して

$$f(d) = \left[\lambda^2 e^{-\lambda d'} \left\{ C_1 \frac{\Gamma(C_2+1)}{\lambda^{C_2}} - C_1' \frac{\Gamma(C_2+1)}{\lambda^{C_2+1}} \right\} \right]_{d'=d} \quad \text{--- (15)} \quad \text{ここで } \Gamma(x): \text{ガンマ関数}$$

図-2 は $\lambda = 0.5 \sim 4.0$ に対して式(15)より算出した $f(d)$ の値である。

4. 空気量の解析⁽¹⁾

平均気泡球半径 $\bar{r}$, 平均気泡球間隔 $\bar{l}$, 空気量 P のモルタルコンクリートにおいて空気量 P はどの部分においても確率的に一定であると考えらる。今、1個の気泡球とそれをとりまく実質部(モルタルコンクリート相)からなる空気量 P の単位要素を考える。

そしてモルタルコンクリート(空気量 P) をこの単位要素に分割できるものとし、

また近似的にこの単位要素を半径 $\bar{l}/2$ の球に換算できるものとすれば、この場合隣接球の中心間隔は $\bar{l}$ であると考えることができる。従って単位要素の体積を V とすれば

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\bar{l}}{2} \right)^3 = \frac{1}{6} \pi \bar{l}^3 = \frac{\pi}{6 \lambda^3} \quad \text{--- (16)} \quad \text{一方、単位要素内の}$$

気泡球の体積を V' とすれば $P = V'/V$ --- (17) とおき、

今、気泡球半径 r の確率密度曲線を $f(r) = \lambda' e^{-\lambda' r}$ とすれば

$$\bar{r} = \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda' \int_0^{\infty} r f(r) dr} \quad \text{--- (18)} \quad \text{(文献(1)を参照されたい)}$$

$$\text{従って } P = \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^3 \cdot \left[\frac{108}{\pi} \left(\frac{\sqrt{36\pi}}{\lambda'} \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{3/2} \right)^{-1} \right] \quad \text{--- (19)}$$

文献(1)

大沢、森本、工学会第31回年次講演集 No.5, 1971, PP.36~37

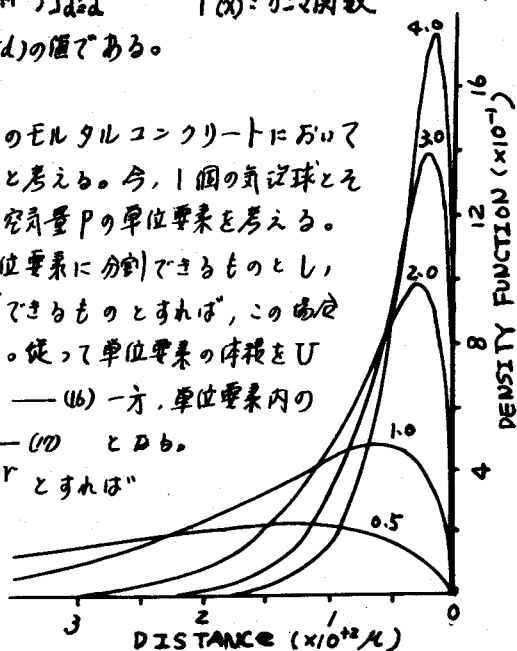


図-2. $f(d)$