

## 論 文

## [1079] コンクリートのマイクロ波特性値測定法に関する研究

正会員○太田 福男(大同工業大学 建設工学科)

正会員 齊藤 辰彦(大同工業大学 建設工学科)

柴田 長吉郎(大同工業大学 応用電子工学科)

午来俊晴(大同工業大学 大学院)

## 1. はじめに

コンクリートのような透過減衰量の多い材料に対するマイクロ波特性値の測定方法は、きわめ難しく一般的な測定方法はいまのところ確立していない。コンクリートに比べマイクロ波損失量の少なく、しかも、粉体あるいは小さい断面( $1\text{cm} \times 2\text{cm}$ )の導波管内に容易に設置することができる材料の測定方法については、インピーダンスを求める方法(以下、定在波法という)が一般的になっている。この方法は複雑な計算部分が図表化されており、ある限られた範囲の材料に対しては非常に便利である。コンクリートの場合、必要な値が図表外になることもしばしばあり、不都合ことが多い。このため筆者等は火害コンクリートのマイクロ波による劣化診断法に関する研究を遂行するにあたって、測定が簡易な測定方法として後述する直接法(一般的な呼称ではない)を用いてきた。最近になってこの直接法と定在波法では、同一のコンクリート試験体を用いても、マイクロ波特性の測定値がかなり異なり、しかも、両者の測定値の差異はコンクリートの種類によって大きくなるなど、一定の傾向があることが判った。この原因是、いまのところ不明である。

本報では、この点を明らかにするために、直接法と定在波法との理論的整合性を検討し、次に実験結果に基づいて両者の測定方法(誤差)について検討する。

## 2. 測定理論の整合性

ここでは、直接法の測定理論が定在波法の測定理論に整合しているかどうかを検討する。

## 2. 1 直接法の測定原理 [1]

Maxwellの方程式において、電磁波の電界(E)又は磁界(H)が $e^{j(\omega t - kx)}$ で変化するものとするとき、これを微分方程式に代入することにより伝搬定数( $\gamma$ )は

$$\gamma = j\sqrt{(\omega^2 - \omega_c^2)} \varepsilon_0 \mu_0 \quad (1)$$

となる。ここに $\omega_c$ は遮断角周波数をあらわす。

$$\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2 = 1/(\omega / 2\pi \cdot \lambda)^2$$

$$\omega_c^2 \varepsilon_0 \mu_0 = (2\pi / \lambda_c)^2 \quad (\lambda_c = \text{遮断波長})$$

試験体の比誘電率を $\varepsilon_r$ とすると( $\mu_r = 1$ )

$$\omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 = (2\pi / \lambda / \sqrt{\varepsilon_r})^2 = \varepsilon_r (2\pi / \lambda)^2$$

$$\gamma = j \sqrt{\epsilon_r - (2\pi/\lambda)^2 - (2\pi/\lambda_c)^2} \quad (2)$$

また、 $\gamma = \alpha + j\beta$  であるから試験体中では、 $\gamma = \alpha + j\beta = j \sqrt{-(2\pi/\lambda)^2 \epsilon_r - (2\pi/\lambda_c)^2}$

$$\gamma^2 = (\alpha + j\beta)^2 = \alpha^2 - \beta^2 + 2j\alpha\beta = -(2\pi/\lambda)^2 \epsilon_r + (2\pi/\lambda_c)^2 \quad (3)$$

また、 $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$  の関係から、

$$\begin{aligned} \epsilon_1' &= \{(2\pi/\lambda_c)^2 + \beta^2 - \alpha^2\} / (2\pi/\lambda)^2 \\ \epsilon_1'' &= 2\alpha\beta / (2\pi/\lambda)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

## 2. 2 定在波法の測定原理[2]

図-1に定在波法の測定原理を示す。図中の導波管内の電磁界は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} E(x)_1 &= A_{i1} e^{rx} + A_{r1} e^{-rx} = A_{i1} (e^{rx} + r_0 e^{-rx}) \\ H(x)_1 &= (A_{i1}/Z_1) e^{rx} - (A_{r1}/Z_1) e^{-rx} = (A_{i1}/Z_1) (e^{rx} - r_0 e^{-rx}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに  $A_{i1}$  と  $A_{r1}$  は入射波と反射波の振幅を示す。ここで、 $A_{r1}/A_{i1} = r_0 \equiv e^{-2(\rho + j\psi)} = e^{-2\phi}$   
負荷インピーダンス

$$\begin{aligned} Z(0) &= E(0)/H(0) = Z_1 (1+r_0)/(1-r_0) \\ &= Z_1 (1+e^{-2\phi})/(1-e^{-2\phi}) = Z_1 \coth \phi \end{aligned}$$

導波管内の伝搬定数  $\gamma$  は減衰定数  $\alpha = 0$  とみなせるから、

$$\gamma_1 = j\beta_1 = j(2\pi/\lambda_1) \quad (\lambda_1 = \text{管内波長})$$

ここに  $|e^{rx}| = 1$  であるから式(5)より、

$$\begin{aligned} E_{max} &= |A_{i1}| (1 + |r_0|) = |A_{i1}| (1 + e^{-2\rho}) \\ E_{min} &= |A_{i1}| (1 - |r_0|) = |A_{i1}| (1 - e^{-2\rho}) \\ E_{min}/E_{max} &= (1 - e^{-2\rho}) / (1 + e^{-2\rho}) = \tanh \rho \end{aligned}$$

負荷面から最初の  $E_{min}$  で表す位置を  $x_0$  とすると、

$$2\pi x_0 / \lambda_1 = -2\psi - (2\pi x_0 / \lambda_1) - \pi_1, \quad \psi = 2\pi (1/4 - x_0 / \lambda_1) \quad \text{したがって } Z(0) \text{ は、}$$

$$\begin{aligned} Z(0) &= Z_1 (\tanh \rho - j \cot \psi) / (1 - j \tanh \rho \cot \psi) \\ &= Z_1 \{E_{min}/E_{max} - j \tan(2\pi x_0 / \lambda_1)\} / \{1 - j(E_{min}/E_{max}) \tan(2\pi x_0 / \lambda_1)\} \end{aligned} \quad (6)$$

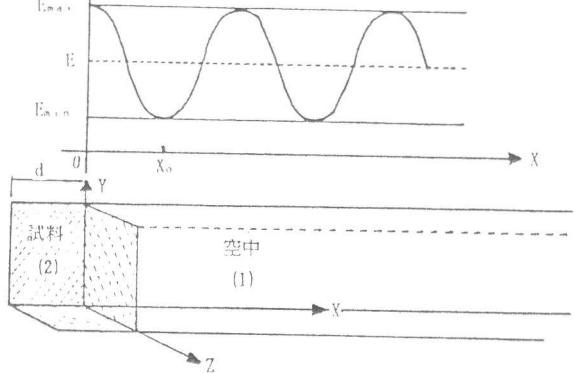


図-1 定在波法の測定原理

伝搬定数  $\gamma_2$ 、試験体厚dの試験体側をみたZ(0)は、

$$Z(0) = Z_2 \tanh \gamma_2 d = Z_1 (\gamma_1 / \gamma_2) \tanh \gamma_2 d \quad (\gamma_2 Z_2 = j\omega \mu_0 = \gamma_1 Z_1) \quad (7)$$

式(6)と式(7)から、

$$\begin{aligned} \tanh \gamma_2 d / \gamma_2 d &= -j \lambda_1 / 2\pi d \cdot \{E_{min}/E_{max} - j \tan(2\pi x_0/\lambda_1)\} / \{1 - j E_{min}/E_{max} \tan(2\pi x_0/\lambda_1)\} \\ &= a + jb \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)は、d、 $\lambda_1$ 、 $E_{min}/E_{max}$ 、 $x_0$  がわかれば a および b を求めることができる。式(8)を解いて、 $\gamma_2 d = A + jB$ を求める。

$$\begin{aligned} \varepsilon_2' &= (B^2 - A^2) / (2\pi d / \lambda_1)^2 + (\lambda_1 / \lambda_c)^2 \\ \varepsilon_2'' &= 2AB / (2\pi d / \lambda_1)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

## 2. 3 測定理論の整合性

直接法では減衰定数( $\alpha$ )と位相定数( $\beta$ )を測定することによって、比誘電率( $\varepsilon_1'$ )ならびに複素誘電率( $\varepsilon_1''$ )を求めることができる[式(4)]。定在波法は、定在波比すなわち負荷インピーダンスを測定することによって比誘電率( $\varepsilon_1'$ )ならびに複素誘電率( $\varepsilon_1''$ )を求めることができる[式(9)]。式(9)は  $A = \alpha/d$ 、 $B = \beta/d$ を代入すると式(4)に一致する。以上のことから、直接法の測定原理は理論的には定在波法の測定原理と一致し、整合性のあることがわかる。

## 3. 測定方法とその結果の考察

### 3. 1 測定方法

#### (1) 直接法

減衰定数( $\alpha$ )は、図-2に示すように、9.3 GHzのガンオシレーターから発したマイクロ波がアイソレーター、スタブチューナーを経て試験体に照射され、反射波の減衰量を電圧で直接測定し、次式で算出する。

$$\alpha = \ln(\sqrt{P/P_0})/d \quad (\text{Neper/cm}) \quad (10)$$

d=試験体の厚さ、 $P_0$ =空中透過率、P=試験体中の透過率、 $P/P_0 = (V/V_0)^2$ 、V=測定電圧、 $V_0$ =マイクロ波発射時電圧

位相定数( $\beta$ )は、図-3に示すように、検波電流が最小になる点の可動短絡板位置から管内波長 $\lambda$ 。および空中伝搬マイクロ波と試験体通過後のマイクロ波の位相差を

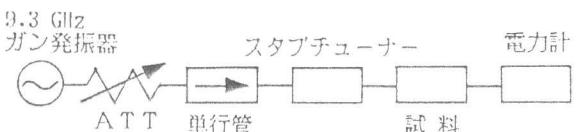


図-2 減衰定数( $\alpha$ )の測定回路

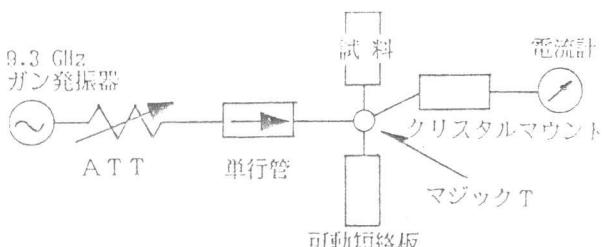


図-3 位相定数( $\beta$ )の測定回路

求め、次式により算出した。

$$\beta = \{ (d + \Delta d) / d \} \beta_0 \quad (\beta_0 = 2\pi / \lambda_0) \quad (11)$$

## (2) 定在波法

定在波法の測定法は図-4に示す測定回路に試験体のかわりに短絡板をとりつけ、定在波測定器のスロットを動かして検波電流を読みとり、空中部分の定在波形を求める。次に試験体を設置して同様の定在波形を求める。その定在波より、 $x_0$ 、 $\lambda_0$ 、 $d$ 、定在波比  $\rho = E_{max} / E_{min}$  を読み取り式(8)に代入して、式(8)中のa、bを求める。

次に  $\gamma_0 d = x + jy$  とおき、分母を払って実数部、虚数部をそれぞれ0とする。

ただし、 $x = A = \alpha d$ ,  $y = B = \beta d$

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= e^{j\gamma_0 d} \{ (ax - by - 1) \cos 2y - (bx - ay) \sin 2y \} + ax - by + 1 = 0 \\ f_2(x, y) &= e^{j\gamma_0 d} \{ (bx - ay - 1) \cos 2y - (ax - by - 1) \sin 2y \} + bx - ay = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)の連立方程式を解いてx、yを求める。本報では近似解法(Newton-Raphsonの方法)を用いたが収束が悪かったので、次のような方法で解を求めた。すなわち、xy平面内に探索領域を選び、領域内に  $f_1 = 0$ 、および  $f_2 = 0$  の曲線の概形を求め、解の分布と近似値を調べる。次に、一つの解を選んで、その近似値を入力する。近似値を中心にもつ長方形領域内に  $11 \times 11$  個の格子点をとり、 $f_1^2 + f_2^2$  の値が最小の点を探す。得られた点を中心にx方向、y方向とも  $1/10$  の領域で同時に探索を行い、誤差が  $10^{-4}$  以下になるまで繰り返し、これを解とした。この方法で得られた解が正解か否かを検証するために、一般的に行われている HIPPEL[2]の図表を用いて、x、yを次の手順で求めた。まず式(8)を式(13)のように定義すると、

$$\tanh \gamma_0 d / \gamma_0 d = \tanh T e^{j\tau} / T e^{j\tau} = C e^{j\xi} \quad (13)$$

cおよびξは次のようになる。

$$c = \sqrt{a^2 + b^2},$$

$$\xi = \cos^{-1}(a/c)$$

または  $\sin^{-1}(b/c)$ 、このcとξを用いて HIPPELの図表からTとτを求め、

$$T e^{j\tau} = \gamma_0 d = x + jy$$

よりx、yを算出した。近似解法より求めたx、yと良く一致することが確認できたので以後の測定値はすべて近似解法により求めた。

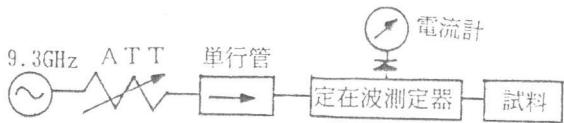


図-4 定在波測定回路

### 3. 2 測定結果とその考察

#### (1) 減衰定数 ( $\alpha$ )

マイクロ波のエネルギーを水が最も良く吸収することから、試験体の含水率の大小によって、減衰定数 ( $\alpha$ ) は大きく異なる。図-5は含水率のみ異なる水セメント比60%のコンクリートのマイクロ波減衰定数 ( $\alpha$ ) を直接法と定在波法とで測定した結果について示したものである。この図から、直接法によって算出する  $\alpha$  は含水率の変化に敏感に呼応するのに対して、定在波法によって算出する  $\alpha$  は含水率の変化に対して鈍感である。これは、直接法では、 $\alpha$  を試験体を透過したマイクロ波の損失電圧から直接測定することができるのに対して、定在波法は式(6)および(8)から判るように、 $\alpha$  を定在波比から間接的に算出することに起因しているものと思われる。すなわち、定在波比  $E_{max}/E_{min}$  を読み取る場合、 $E_{max}$  の読み取りは数値が大きいので簡単であるが、 $E_{min}$  の値は非常に小さいため、数値の読み取りがきわめて難しい。また、定在波比は  $E_{max}$  を非常に小さい数値の  $E_{min}$  で除すために、読み取り誤差が増幅される。

#### (2) 位相定数 ( $\beta$ )

含水率の影響を除去するために、一定重量になるまでコンクリートを乾燥 (80°C、48時間) した後、直接法と定在波法とによって位相定数 ( $\beta$ ) を測定した。図-6は水セメント比の異なるコンクリートの位相定数 ( $\beta$ ) の測定結果を示したものである。この図から、直接法によって求められる  $\beta$  は定在波法によって求められる  $\beta$  よりコンクリートの水セメント比の相違に敏感に反応することがわかる。ただし、直接法は電圧の最小点のみ読み取るために、式(11)中の  $\Delta d$  の中に 1/2 波長単位で何波長の誤差が入っているかの判断が難しい。定在波法は測定値を図-1に示すように波形基点がはっきりしておりオシロスコープなどにより図示したうえで  $\beta$  を算出するために正確である。このため直接法は材料の位相定数があ

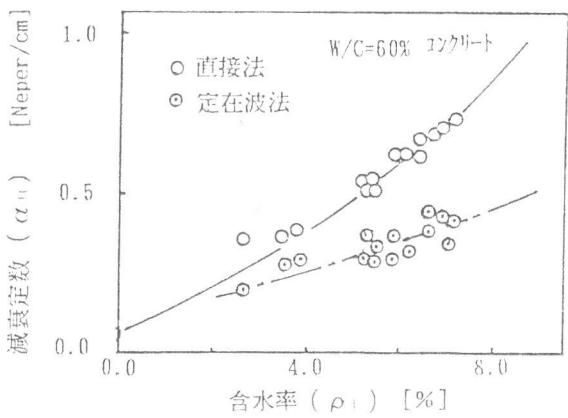


図-5 直接法と定在波法とによって測定した減衰定数 ( $\alpha_i$ ) とコンクリートの含水率 ( $\rho_w$ )との関係

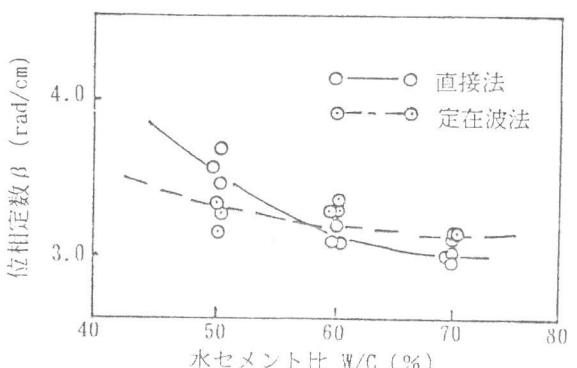


図-6 直接法と定在波法とによって測定した位相定数 ( $\beta$ ) とコンクリートの水セメント比 (W/C) との関係

る程度既知であるか、もしくは材厚の異なる試験体を2~3種類必要とする。

### (3) 比誘電率 ( $\epsilon'$ )

図-7は比誘電率( $\epsilon'$ )とコンクリートの水セメント比との関係を示したものである。この図から、比誘電率 $\epsilon'$ は直接法、定在波法どちらの測定法で求めてても、コンクリートの水セメント比による品質変化には、 $\alpha$ あるいは $\beta$ に比して鈍感であることがわかる。したがって、乾燥状態にあるコンクリートの $\epsilon'$ は測定法による差異は明確でない。

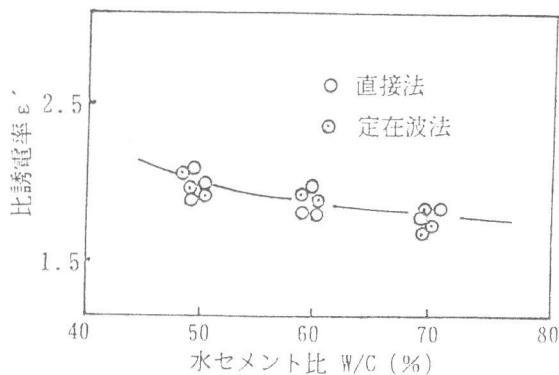


図-7 直接法と定在波法とによって測定した比誘電率( $\epsilon'$ )とコンクリートの水セメント比(W/C)との関係

## 4. 結論

マイクロ波測定法のうち、直接法と定在波法との理論的な整合性ならびにコンクリートのようにマイクロ波損失量の多い材料のマイクロ波特性の特徴について調べた結果をまとめるとおよそ次のようになる。

- (1) 直接法の測定原理は理論的には定在波法の測定原理と一致し、整合性がある。
- (2) 直接法はコンクリートの含水率、水セメント比などの変化を判定するために有効な減衰定数( $\alpha$ )、位相定数( $\beta$ )は敏感に測定できるが、 $\beta$ の測定はおおよその値が既知の場合は正確に測定できるが、未知の場合は大きな測定誤差を含む可能性が高い。
- (3) 定在波法は $\alpha$ が直接法に比して鈍感であるが $\beta$ の測定に対してはおおよその値は間違いない測定できる利点がある。
- (4) 一般的に材料の品質判定に使われる比誘電率( $\epsilon'$ )はコンクリートの水セメント比による品質変化には鈍感であるため、どちらの測定方法を用いても大差はない。

### [謝辞]

本学応用電子工学科岡部隆博元教授には本研究の細部に渡り御指導頂きました謝意を表します。また本学技術員山本清太君をはじめ多くの卒研生には実験に協力頂いた。

### 参考文献

- 1) 岡部隆博、太田福男：“マイクロ波による灾害コンクリートの劣化診断に関する研究”電気関係学会東海支部連合大会、PP.S-4~S-7、1987年10月
- 2) S.ROBERTS and A.VON HIPPEL; “A New Method for Measuring Dielectric Constant and Loss in the Range of Centimeter Waves”, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol.17, PP. 610~616, JULY, 1946
- 3) 太田福男：“マイクロ波による灾害コンクリートの劣化診断法に関する実験的研究”セメント・コンクリート論文集、No.43、PP.400~405、1989
- 4) 太田福男：“断面内加熱温度勾配を持つコンクリートのマイクロ波特性”日本建築学会大会学術講演梗概集、PP.791~792、1989年10月