

# 電磁波レーダを用いた鉄筋コンクリートにおける 鉄筋のかぶりと腐蝕の高精度非破壊検査

田中正吾\*

Highly Accurate Non-Destructive Inspection of Cover and Corrosion of Reinforcing Bars  
in Concrete Using an Electromagnetic Wave Radar

Shogo TANAKA\*

Non-destructive inspection of the cover(depth) and corrosion of the reinforcing bars in concrete is very important to keep the strength of concrete structures. However, no effective methods have been developed until now because of their difficulty and complexity. The paper proposes a creative method using an electromagnetic wave (EMW) radar. This method utilizes effectively the signal propagation model, which the author previously developed, and the Snell's law. The paper also develops methods to accurately measure the dielectric constants of concrete and corrosion in order to accurately measure the cover and the thickness of the corrosion. Lastly, the validity of the method is demonstrated by a field test.

**Key Words:** non-destructive inspection, electromagnetic wave radar, reinforcing bar, concrete, cover(depth), corrosion, high accuracy

## 1. 緒 言

国内には、高度成長期に建造された多くのコンクリート構造物が築後 30~50 年を迎え、コンクリートの中性化による鉄筋腐蝕やアルカリ性骨材反応などにより、クラックが頻発するようになった<sup>1),2)</sup>。先の山陽新幹線の 200kg 余りのコンクリート塊の崩落・車輻直撃事故はまだ記憶に新しい。幸い大きな事故には至らなかったが、これを契機として、一層、信頼度の高い非破壊検査手法の開発が望まれて来た。

コンクリート構造物の耐久性に最も強い影響を与えるものとしては、鉄筋のかぶり(深度)がある。これは、かぶりが浅いと、中性化により鉄筋が早く腐蝕し、構造物の強度が低下するだけでなく、この鉄筋の腐蝕・膨張によりコンクリートにクラックが生じるからである。よって、鉄筋のかぶりを測ることは、メンテナンス上重要であり、これまで電磁誘導法や電磁波レーダ法が使用されて来た<sup>3)</sup>。しかしながら、電磁誘導法では、鉄筋の深度が深かったり腐蝕が進んでいたりすると、測れない、あるいは計測精度が落ちるなどの欠点があった。また電磁波レーダ法では、受信信号の B モード濃淡画像目視に基づき、かぶりを計測(推測)する等の方法が採用され

ていたため、最大計測誤差率は 20% と精度は低かった。

そのため、前川らは比誘電率の深さ方向の分布を考慮することにより、電磁波レーダでかぶりを精度よく求めることを考えた<sup>3)</sup>。しかしながら、この方法でも、依然 B モード濃淡画像を利用しているため、最大計測誤差率は 10% 程度と、まだ十分高い精度は得られていない。

一方、鉄筋腐蝕の検査法としては、これまで自然電位法や 2 電極法などが知られているが<sup>4)</sup>、どちらかと言うと、「腐蝕がほとんど認められない」、「腐蝕がかなり進んでいるようだ」等の定性的な計測がなされ、定量的な計測は困難であった。かつ、一部コアリングしなければならぬなど、完全な非破壊検査方式ではなく、検査に手間がかかった。

これに対し、著者は先に、B モード濃淡画像目視の方法では本質的に高信頼度の非破壊検査は困難であるとの観点から、コンクリート構造物の非破壊検査に対し信号伝播モデルに基づく電磁波レーダ法を提案し、コンクリートのクラックや空洞が高精度・高信頼度に検知・計測できることを示した<sup>5)~8)</sup>。

本論文でも、同様に電磁波の伝播状況および伝播過程を厳密に考慮することにより、鉄筋のかぶりや腐蝕厚が高精度にリアルタイムで非破壊検査(計測)できることを示す。本検査システムの基本コンセプトは、先に提案した信号伝播モデル法<sup>5)~8)</sup>に基づき、レーダの A モード受信信号(つまり、生信号)を、表面からの反射波と各反射面(or 反射点)からの反射波の和として各反射波を正確に分離し、当該反射波の伝播時間の違いにより、鉄筋のかぶりや腐蝕厚を高精度に測るこ

\* 国立大学法人 山口大学 大学院理工学研究科  
宇部市常盤台 2-16-1

\* Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2-16-1, Tokiwadai, Ube

(Received June 9, 2009)

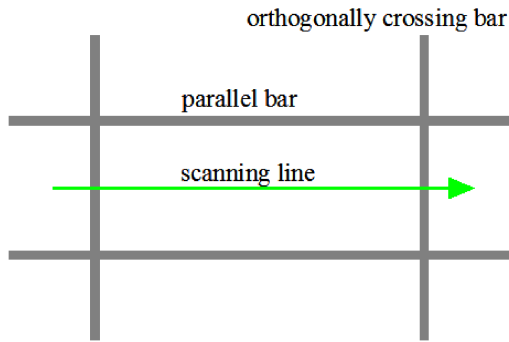


Fig. 1 Scanning of the electromagnetic wave radar

とである。

この結果、かぶりについては計測誤差率が平均 1.7%(最大 2.8%), 腐蝕厚については誤差が 0.02mm の極めて高精度な計測がなされる。なお本論文では、鉄筋のかぶりや腐蝕厚を高精度に測るため、コンクリートと腐蝕部の比誘電率の求め方も合わせて提案している。

## 2. 従来の電磁波レーダ方式

従来の電磁波レーダ方式はいわゆる B モード濃淡画像目視方式とも称される。つまり、受信器に得られる受信信号波形そのもの (A モード信号) を活用するのではなく、その受信信号の時空間的強度分布 (濃淡画像で表示) を使用していた (後述の図)。具体的に言えば、各測定ポイントで得られた受信信号波形を全波整流し、得られた全波整流波形の振幅の変化に合わせ波形を深度方向に濃淡で表示 (輝度変調) したものをレーダの走行方向につなげ、濃淡画像を作成し、これを目で見ることにより非破壊検査をしていた<sup>5)</sup>。

したがって、非熟練者はもちろんのこと、熟練者ですら信頼度の高い検査は困難であった。つまり、検査対象内にクラックや空隙、空洞があっても、濃淡画像からはこの異常内容 (つまり種類、数、位置、深度、厚み) の決定は困難であった。当然のごとく、0.1mm~1 mm オーダーの鉄筋の腐蝕厚の計測は不可能であった。

## 3. 鉄筋のかぶり計測

### 3.1 直交交差の場合

鉄筋は通常 Fig.1 のように格子状に配置されている。ここではまず、図に示すように、2本の鉄筋の間を電磁波レーダにより走査し、走査方向に直交する鉄筋のかぶりを計測することを考える。いま、電磁波レーダが直交交差鉄筋の真上にあるとすれば、このときレーダから発射された電磁波が交差鉄筋で反射しレーダに受信されるまでの電磁波伝播経路は Fig.2 のようになる。鉄筋の真上に来たか否かは、受信信号の大きさで容易にわかる。

送信器から送信された電磁波は、一部はコンクリート表面

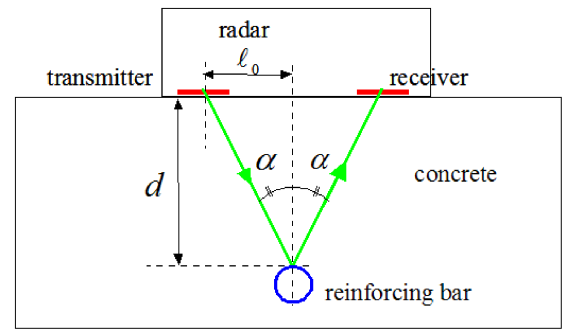


Fig. 2 Propagation path of the electromagnetic wave

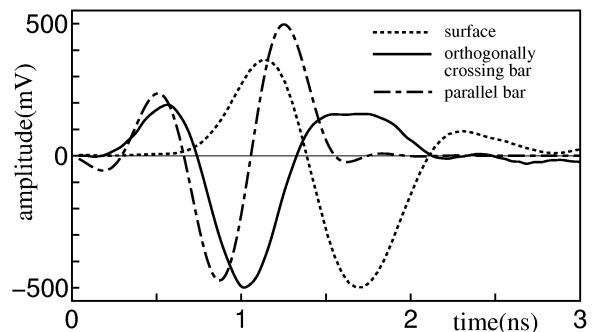


Fig. 3 Difference between the fundamental waves

において反射され受信器に受信されるが、残りの電磁波はコンクリート表面を透過し、鉄筋の表面において反射し、その反射波が受信器に受信される。その際、スネルの法則により、鉄筋表面での入射角、反射角は当然等しくなる。

いま、コンクリート表面における反射波を  $r_0(t)$ 、直交交差鉄筋からの反射波を  $r_p(t)$ 、平行鉄筋からの反射波を  $r_q(t)$  とすれば (Fig.3 参照)、電磁波レーダに得られる受信信号  $y(t)$  は次式でモデル化される (4 反射波モデル)<sup>5)</sup>。ただし、Fig.3 において、表面波の方は後述のレーダに得られた受信信号をそのままに、また直交交差鉄筋および平行鉄筋からの反射波は、反射波の立ち上がり時刻をゼロ時刻に推移して示している。

$$y(t) = c_0 r_0(t - T_0) + c_1 r_p(t - T_1) + c_2 r_q(t - T_2) + c_3 r_q(t - T_3) \quad (1)$$

ここで  $T_0, T_1$  はそれぞれ表面波 (表面からの反射波) および直交交差鉄筋からの反射波の往復伝播時間を、 $T_2$  および  $T_3$  はそれぞれ隣接平行鉄筋 (2 本) からの反射波の往復伝播時間を表す。また、 $c_i (0 \leq i \leq 3)$  は各反射波の影響の度合いを表わす一次結合係数である。

いま、(1) 式で表わされる信号伝播モデルにおいて、表面波の伝播時間  $T_0$  は、レーダとコンクリート表面までの距離が常に一定であることから、あらかじめ実験により求められる。したがって、求めるべき未知パラメータは直交交差鉄筋および 2 つの平行鉄筋からの反射波の往復伝播時間  $T_1, T_2, T_3$  およびすべての反射波の一次結合係数  $c_i (0 \leq i \leq 3)$  である。

したがって、実際の受信信号  $\tilde{y}(t)$  とモデル波形  $y(t)$  とのパターンマッチング角 (類似度)<sup>5)</sup>

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{(\tilde{y}, y)}{\|\tilde{y}\| \cdot \|y\|} \right) \quad (2)$$

を最小とするパラメータ  $T_i (1 \leq i \leq 3)$  および  $c_i (0 \leq i \leq 3)$  を求めれば、そのときの直交交差鉄筋からの反射波の往復伝播時間  $\hat{T}_1$  を用いて、当該鉄筋のかぶりが  $d = \sqrt{\{(\hat{T}_1/2)(c/\sqrt{\epsilon_1})\}^2 - l_0^2}$  ( $c$ :光速) により求まることになる。ここに  $\epsilon_1$  はコンクリートの比誘電率である。なお、コンクリートの比誘電率であるが、コンクリートが均一媒質であればそのときの均一比誘電率を採用することになるが、一般に誘電率はコンクリート表面から深度方向に層状に連続的に変わる。コンクリート表面に近い方は小さく、深いところほど水分含有率が高いため一般に大きい<sup>3)</sup>。このときも、鉄筋頭部までの等価的な比誘電率である

$$\epsilon_0 = \left[ (1/Y) \int_0^Y \sqrt{\epsilon_1(y)} dy \right]^2 \quad (3)$$

を採用すれば、上と同じ議論が可能である。ここに、 $Y$  は鉄筋頭部までの距離 (つまり、かぶり) を表わす。均一媒質としたときの等価的な比誘電率あるいは均一媒質のときの比誘電率は、異なる2点あるいは複数の測定点での (直交交差鉄筋からの) 反射波往復伝播時間を計測し、かぶりと比誘電率について代数方程式を解くことにより求まる (詳細は後述)。

なお、(2) 式の最適化に際し、最適な一次結合係数  $\{\hat{c}_i\}$  は、直交射影の原理により、任意の  $T_1, T_2, T_3$  に対し

$$\mathbf{c} = W^{-1} \mathbf{y} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c} \\ \mathbf{y} \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_0, c_1, c_2, c_3)^T \\ ((\tilde{y}, r_0), (\tilde{y}, r_1), (\tilde{y}, r_2), (\tilde{y}, r_3))^T \\ [(r_{i-1}, r_{j-1})] \end{bmatrix} \quad (5)$$

により解析的に求められる<sup>5)</sup>。ここに、 $W$  は  $(r_{i-1}, r_{j-1}) (1 \leq i, j \leq 4)$  を  $(i, j)$  要素とする  $4 \times 4$  の行列である。よって、(2) 式の最適化は  $T_i (1 \leq i \leq 3)$  についてのみ数値的に行なえばよい。ただし、(5) 式において、 $\tilde{y} = \tilde{y}(t), r_0 = r_0(t - T_0), r_1 = r_p(t - T_1), r_2 = r_q(t - T_2), r_3 = r_q(t - T_3)$  とした。また、(2), (5) 式における  $(\cdot, \cdot), \|\cdot\|$  はヒルベルトの内積・ノルムを表わすが、実際には受信信号はサンプリング周期ごとに収録されるので、サンプリング数を次元とするユークリッドの内積・ノルムとして計算することになる。

Fig.1 では走査ラインは平行鉄筋の中央を走っているが、平行鉄筋に平行であれば必ずしも中央でなくてもよい。また、完全に平行でなくても、少し位 (15 度位) は方向が狂ってもよい。

### 3.2 平行走査の場合

前節の走査方法では、直交交差した鉄筋上の (交差した) 1

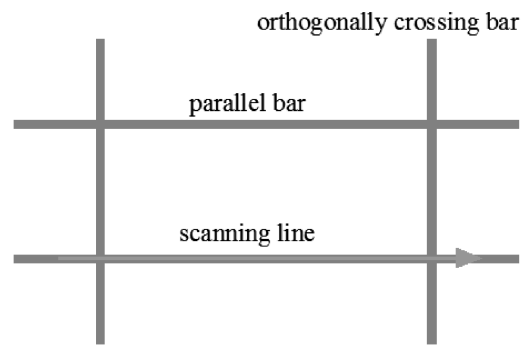


Fig. 4 Scanning of the electromagnetic wave radar

点での鉄筋のかぶりしか測れない。したがって、鉄筋がコンクリート面に対し平行であれば問題はないが、ときおり傾いている場合がある。このときの傾斜状況を全体的に測りたいという場合は、直交交差点を何度も変えるのではなく、レーダを当該鉄筋の真上に沿って走査する方式が便利である (Fig.4 参照)。この方式は、鉄筋の腐蝕を1点ではなく連続的に測りたい場合にも有用である。

このような走査方式では、反射波として、表面波、平行鉄筋 (真下の鉄筋のこと) からの反射波が1つずつ、直交交差鉄筋からの反射波が1つ得られる。したがって、この場合の受信信号は

$$y(t) = c_0 r_0(t - T_0) + c_1 r_q(t - T_1) + c_2 r_p(t - T_2) \quad (6)$$

とモデル化される (3 反射波モデル)。よって、(1) 式に対して反射波が1つ減るだけで、解析は前述と全く同様である。

## 4. 鉄筋の腐蝕計測

### 4.1 直交走査の場合

前章で述べたように、直交交差を行なう場合、レーダに受信される信号は (1) 式でモデル化される。したがって、評価関数 (2) 式を最小化することにより、直交交差鉄筋の真上ではかぶりに関係する未知パラメータ  $\hat{T}_1, \hat{T}_2, \hat{T}_3, \hat{c}_0, \hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3$  が求まる。

しかしながら、鉄筋が腐蝕していれば、鉄筋からの反射波は腐蝕部の前面と後面 (鉄筋導体表面) からの反射波に分離される。よって、直交交差鉄筋の上部 (頭部) の腐蝕部の厚みを求めるには、直交交差鉄筋からの反射波をこれら2つの反射波の和に分離しなければならない。よって、このときの受信信号のモデルは次式で与えられる (5 反射波モデル)<sup>11)</sup>。

$$y(t) = c_0 r_0(t - T_0) + c_{11} r_c(t - T_{11}) + c_{12} r_p(t - T_{12}) + c_2 r_q(t - T_2) + c_3 r_q(t - T_3) \quad (7)$$

ここに、 $r_c(t)$  は腐蝕部前面からの反射波であり、反射波形としてはクラックからの反射波 (つまり異なった2つの媒質境界面からの反射波) が利用できる。また、 $T_{11}, T_{12}$  はそれぞれ腐蝕部前面および後面からの反射波の往復伝播時間を表わす。

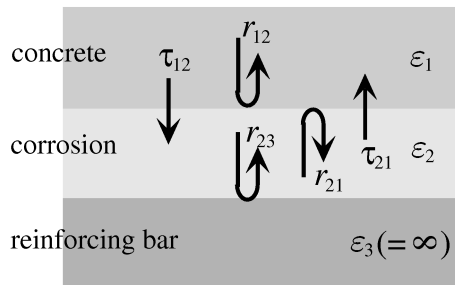


Fig. 5 Reflectance and transmittance at the boundaries of the media

したがって、未知パラメータの探索に際しては、まず (1) 式のモデルを使用し、最適な往復伝播時間  $\hat{T}_i (1 \leq i \leq 3)$  およびそのときの最適一次結合係数  $\hat{c}_i (0 \leq i \leq 3)$  を求める。つぎに、(7) 式のモデルに対し、 $\hat{T}_2, \hat{T}_3, \hat{c}_0, \hat{c}_2, \hat{c}_3$  を固定し、 $\hat{T}_1$  の近傍で評価関数 (2) 式を最小化するパラメータ  $T_{11}, T_{12}$  を求めればよい。なお、 $c_{11}, c_{12}$  は前述したように  $T_{11}, T_{12}$  を与えれば解析的に求まるので、未知パラメータから除外できる。

ところで、データ収録は所定のサンプリング周期  $\Delta T$  の整数倍で行なわれるため、 $T_{11}, T_{12}$  の探索はサンプリング周期  $\Delta T$  では十分な分解能が得られない。そこで、実際には適切な補間法を使用することにより、 $T_{11}, T_{12}$  をサンプリング周期より小さな  $(\Delta T/N)(N: \text{適切な整数})$  の刻みで探索し、腐蝕部前面および後面からの反射波の往復伝播時間  $T_{11}^*, T_{12}^*$  を極めて高精度に求めるようにしている<sup>13)</sup>。

したがって、これら 2 つの往復伝播時間の差により腐蝕厚が求められることになるが、その際、腐蝕部の電磁波速度を求めるため、腐蝕部の比誘電率も合わせて計測する必要がある。いま、話を簡単にするため、電磁波が Fig.5 のように、鉄筋に垂直入射したとしよう。コンクリート、腐蝕部、鉄筋導体部分の比誘電率をそれぞれ  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 (= \infty)$  とすれば、各境界面における反射率  $r_{12}, r_{21}, r_{23}$  および透過率  $\tau_{12}, \tau_{21}$  は次式で表わされる。

$$r_{12} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} = -r_{21}, r_{23} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_3}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_3}} = -1 \quad (8)$$

$$\tau_{12} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \tau_{21} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}}, \quad (9)$$

一方、Fig.5 より、腐蝕部前面および後面からの反射波の大きさの比  $(c_{11}/c_{12})$  はつぎの関係式

$$\frac{c_{11}}{c_{12}} = \frac{r_{12}}{\tau_{12}r_{23}T_{21}} \quad (10)$$

を満たすので、(10) 式に上記の最適パターンマッチングの際に求めた  $c_{11}^*, c_{12}^*$  およびコンクリート、鉄筋導体部分の比誘電率  $\varepsilon_1, \varepsilon_3 (= \infty)$  を代入すれば、腐蝕部の比誘電率  $\varepsilon_2^*$  が得られる。よって、腐蝕厚は  $x = \{(T_{12}^* - T_{11}^*)/2\}(c/\sqrt{\varepsilon_2^*})$  として求まる。

Table 1 The level of corrosion with the eye

the level of corrosion	the situation of corrosion
no corrosion	no corrosion
A	pointwise surface corrosion
B	entire surface corrosion
C	slight corrosion of shallow sectional deficit
D	extraordinary corrosion of deep sectional deficit

ただし、上記のことは、電磁波が鉄筋の真上から垂直入射した場合のことであり、実際はある角度  $\beta$  をもって入射するため (Fig.2 参照)、上で求めた腐蝕厚に  $\cos\beta$  を乗ずればよい。なお、入射角  $\beta$  は、レーダ中心から送信器までの距離  $l_0$  とかぶりの計測値  $\hat{d}$  を用いて  $\beta = \tan^{-1}(l_0/\hat{d})$  として求まる。

上記の反射率、透過率に対しては、厳密に言えば、スネルの法則により入射角、屈折角の余弦が分子の項に乗算の形で現れる。しかしながら、考えている電磁波の波長に比し腐蝕厚が極めて小さいので、屈折せず、そのため入射角と屈折角がほぼ等しくなり、分母で約分される。よって、入射角、屈折角の影響は現れない。

#### 4.2 平行走査の場合

この場合も、考え方は前節と全く同様である。ただ、腐蝕厚を計測する際の受信信号モデルは、(6) 式の代わりに

$$y(t) = c_0 r_0(t - T_0) + c_{11} r_c(t - T_{11}) + c_{12} r_q(t - T_{12}) + c_2 r_p(t - T_2) \quad (11)$$

(4 反射波モデル) を考えなくてはならない。したがって、(6) 式のモデルで求めたパラメータ  $\hat{c}_0, \hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{T}_1, \hat{T}_2$  のうち、 $\hat{c}_0, \hat{c}_2, \hat{T}_2$  を固定して、 $\hat{T}_1$  の近くで  $T_{11}, T_{12}$  の局所的最適化を図れば、平行鉄筋の腐蝕部前面および後面からの反射波往復伝播時間  $T_{11}^*, T_{12}^*$  が求まり、測定ポイント直下の鉄筋の腐蝕厚は  $x = \{(T_{12}^* - T_{11}^*)/2\}(c/\sqrt{\varepsilon_2^*}) \cos\beta$  により測れる。なお、腐蝕部の比誘電率  $\varepsilon_2^*$  は、上記の局所的最適化により求まる  $c_{11}^*, c_{12}^*$  およびコンクリートの比誘電率 (あるいは等価的比誘電率)  $\varepsilon_1$  と鉄筋導体部分の比誘電率  $\varepsilon_3 (= \infty)$  を (10) 式に代入し、 $\varepsilon_2$  について解くことにより求められる。

#### 5. 平行走査による腐蝕自動判定法

鉄筋の腐蝕判定には、(社)日本コンクリート工学協会『コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針 (2003)』によると、Table1 に示すような 5 段階表示の判定がなされる。そのため、4.2 節に述べた方式で鉄筋腐蝕を鉄筋方向に厳密に連続的に求めたとしても、これを人間の感覚に沿うよう、つまり Table1 の判定が正確になされるよう定量化することが必要である。その際、各鉄筋に対し常に 1 つのランクを与えるよりは、腐蝕厚が鉄筋方向に大きく異なる場合は、それに

対応したいいくつかのランクを提示できれば、それに超したことはない。この観点から、ここでは、そのような定量化法を示す。

### 腐蝕度自動判定則

前述したように、提案方式によれば、鉄筋に沿って腐蝕厚が連続的に測れる。つまり、計測ピッチを  $\Delta L$  とすれば、 $c(k\Delta L)$  ( $k=1, 2, \dots, N$ ) のように腐蝕厚が  $\Delta L$  ごとに測れる。

いま、A, B, C, D なる4段階の腐蝕度の判定を考えることにしよう(腐蝕なしは明らかであるから)。これらを識別するための腐蝕厚のいき値として  $c_1, c_2, c_3$  ( $c_1 < c_2 < c_3$ ) を考える。このとき、検査対象の鉄筋に対し計測された腐蝕厚分布  $\{c(k\Delta L)\}$  に対し、 $c(k\Delta L) < c_1$  なる個数を  $N_1$ ,  $c_1 \leq c(k\Delta L) < c_2$  なる個数を  $N_2$ ,  $c_2 \leq c(k\Delta L) < c_3$  なる個数を  $N_3$ ,  $c_3 \leq c(k\Delta L)$  なる個数を  $N_4$  とすれば、当該鉄筋の腐蝕判定は、A, B, C, D に対しそれぞれ  $(N_1/N)$ ,  $(N_2/N)$ ,  $(N_3/N)$ ,  $(N_4/N)$  の割合(重みと言うべきか)が賦与される。したがって、割合の数値が大きいものに対応する判定を採用すればよい。なお、割合の数値が大きいものが2つ以上ある場合は、それらの判定を並記すればよい。

## 6. コンクリートの等価的比誘電率の計測法

いま、コンクリートの比誘電率が深度方向に連続的に層状に変化しているとして、これを  $\varepsilon_1(y)$  で表わそう。いま、鉄筋のかぶり  $Y$  として、電磁波が鉄筋に向けて垂直入射したとする。このとき、鉄筋までの(片側)伝播時間は

$$T = \int_0^Y \frac{dy}{c/\sqrt{\varepsilon_1(y)}} \quad (12)$$

で表わされる。上式を変形すれば、

$$T = Y \times \frac{1}{Y} \int_0^Y \frac{dy}{c/\sqrt{\varepsilon_1(y)}} = Y/(c/\sqrt{\varepsilon_0}) \quad (13)$$

ここに、

$$\sqrt{\varepsilon_0} = (1/Y) \int_0^Y \sqrt{\varepsilon_1(y)} dy \quad (14)$$

であり、ここではこのようにして求まる比誘電率  $\varepsilon_0$  を(コンクリート表面から鉄筋までの)等価的比誘電率という。

よって、(13)式のように、かぶり  $Y$  をこれに相当する電磁波速度  $(c/\sqrt{\varepsilon_0})$  で割ることにより片側伝播時間  $T$  が求まる。ここでは、垂直入射の場合を考えたが、斜め入射の場合も、 $\varepsilon_1(y)$  の変化が余り大きくなく伝播経路が直線で近似できる場合は、同様に、伝播経路上の等価的比誘電率は上記のそれと同一になる。

このような等価的比誘電率  $\varepsilon_0$  を導入することにより、鉄筋のかぶり  $d$  およびコンクリートの比誘電率  $\varepsilon_0$  が通常の均一媒質のように求められるが、以下、この等価的比誘電率  $\varepsilon_0$  の求め方を示そう。

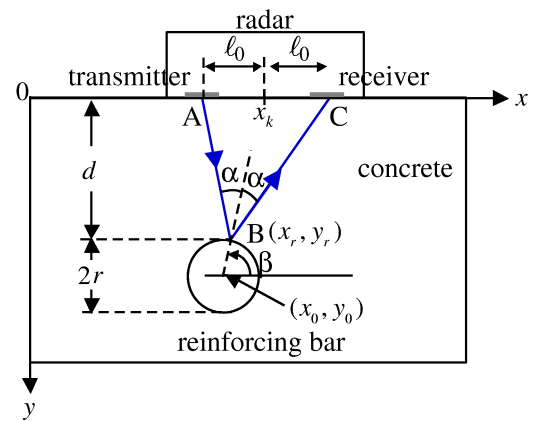


Fig. 6 Propagation path of the electromagnetic wave

まず、Fig. 6 に電磁波の伝播経路を示す。図で、 $x_k$  はレーダ中心の位置を表わし、送信器および受信器からレーダ中心までの距離は共に  $l_0$  とする。また、 $y_0$  および  $r$  はそれぞれコンクリート表面から鉄筋の中心までの深度および半径である。通常、鉄筋の直径は設計図等によりわかるので、 $y_0$  が求まれば、かぶり  $d$  は求められる。

図に示すように、送信器より発射された電磁波は、鉄筋の表面で反射し送信器に受信されるので(図中 ABC の経路)、反射点の座標を  $(x_r, y_r)$  とすれば、理論的な電磁波伝播時間は次式により与えられる。

$$T(x_k) = \frac{\sqrt{(x_r - x_k + l_0)^2 + y_r^2} + \sqrt{(x_r - x_k - l_0)^2 + y_r^2}}{c/\sqrt{\varepsilon_0}} \quad (15)$$

ただし、 $c$  および  $\varepsilon_0$  はそれぞれ光速 ( $= 3.0 \times 10^8$  m/s) およびコンクリートの等価的比誘電率である。

一方、鉄筋の中心座標を  $(x_0, y_0)$  とすると、反射点  $(x_r, y_r)$  は  $x_r = x_0 + r \cos \beta$ ,  $y_r = y_0 + r \sin \beta$  で与えられる。このとき、鉄筋表面の反射点においてスネルの法則が満たされることから、 $\beta$  は次式を満たす<sup>9)</sup>。

$$\tan^{-1} \left( \frac{-y_r}{x_k - l_0 - x_r} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{-y_r}{x_k + l_0 - x_r} \right) = 2\beta \quad (16)$$

よって、(16)式を満たす  $\beta$  により、鉄筋中心  $(x_0, y_0)$  に対し反射点の位置  $(x_r, y_r)$  が求まる。これを(15)式に代入すれば、レーダ中心が  $x_k$  にあるときの電磁波の理論的往復伝播時間  $T(x_k)$  が求まる。

いま、レーダの走査開始点を  $x_s$  とし、レーダを鉄筋に直交交差する方向にピッチ  $\Delta x$  で走査したとする。このとき、各走査点  $x_k = k\Delta x + x_s$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) において、(15)式により電磁波の理論的往復伝播時間  $\{T(x_k)\}$  が求まるので、これらと実際の伝播時間  $\{T^{\#}(x_k)\}$  の誤差二乗和を  $\{x_0, y_0, \varepsilon_0\}$  について最小化することにより、当該鉄筋に対する深度  $y_0^*$  お

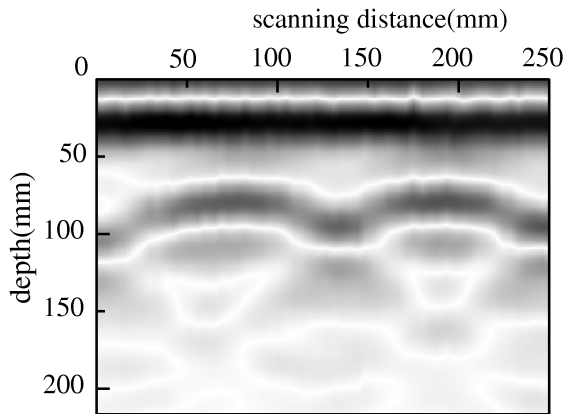


Fig. 7 B-mode image when a bar is orthogonally crossed (case 1)

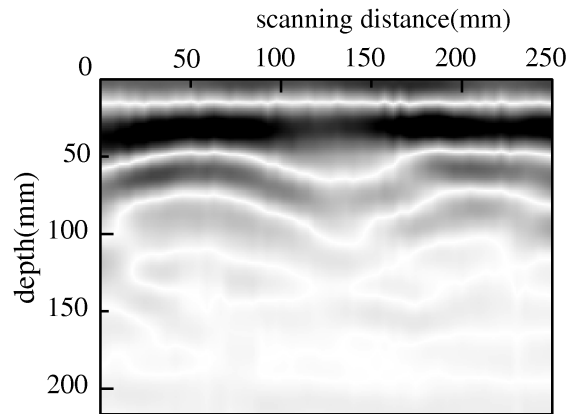


Fig. 8 B-mode image when a bar is orthogonally crossed (case 2)

よび等価的比誘電率  $\epsilon_0^*$  (延いては、かぶり  $d^* = y_0^* - r$ ) が得られる。なお、走査開始点  $x_s$  は鉄筋のほぼ真上とし、 $x_N$  は反射波が得られる範囲でできるだけ遠ざけることが望ましい。

以上のようにして、かぶりおよび等価的比誘電率が求められるが、検査ポイントのすべてでこの方式を採用するのは効率が悪い。したがって、所要所で、この方式によりかぶりと等価的比誘電率を求めるが、いったん等価的比誘電率が求まったなら、その周辺ではこれを固定して、第3章の方式によりかぶりを求めることが望ましい。

また、ここでは鉄筋径  $r$  は既知としたが、これは、検査対象の鉄筋径は設計図よりわかること、あるいは未知であっても著者の方式で非破壊検査できたり<sup>12)</sup>、1箇所コアリングすることによりわかることを念頭においたからである。

## 7. 実験及び検討

開発したシステムの有効性をみるため、フィールドテストを行なった。検査対象は、ある都市の地下道側壁である。使用したレーダは日本無線(株)製(NJJ-85A, 中心周波数800MHz)であり、データ収録時のサンプリング周期は  $\Delta T=0.04\text{ns}$ 、計測ピッチは  $\Delta L=5\text{mm}$  である。また、レーダ中心と送受信器の距離は34.5mmである。使用したレーダはパルス方式で、アンテナ直下方向を最大強度として、この方向から(偏位角に応じて急速に減衰するものの)ほぼ70度の放射特性をもっている。

検査対象であるコンクリート壁の鉄筋ピッチは、場所によって異なるが、ほぼ縦140mmピッチ、横600mmピッチの長方形格子状配筋である。特に縦方向のピッチについては、120mm~160mmの間で変化し、最小値は120mmの値をとる。なお、縦筋、横筋のサイズは、設計図によると共にD13であった(つまり径は13mm)。

参考のため、この中の2本の鉄筋(横筋)にレーダを直交交差して走査したときのBモード濃淡画像をFig.7に示す。ただし、反射面(or 反射点)深度が目視しやすいように、市販のレーダと同じように受信信号の第一極大値の時刻を原点(ゼ

ロ時刻)として濃淡画像を描いている。現在市販されているレーダではカラー表示となっているが、本稿では黒白表示しているので、黒は受信信号が正の部分、白は負の部分を表わしている。また、黒白の濃度はそのときの信号の大きさ(絶対値)に比例したリニア表示となっている。

波面の深度がFig.7の方がFig.8に比べて深いので、鉄筋のかぶりはFig.7の方が深いことがわかる。しかし、これらの図では、両者ともかぶりがどれほどの値をもつのか正確にはわからない。これは、この画像はコンクリート表面、直交交差鉄筋および平行鉄筋からの3つの反射波を加えた合成波形の濃淡画像を表わしているので、直交交差筋からの反射波がある程度はつきり見えても、目視によるその立ち上り深度は実際の深度とは大きく異なるからである。加えて、Bモード画像では、深度換算はコンクリートの標準的な比誘電率9を用いて行なっているので、比誘電率が標準値と異なる場合にはさらに誤差が大きくなる(ちなみに、通常のコンクリートの比誘電率は6~12の間の値をとる)。

一方、Fig.7をみるとBモード画像がはっきりした円弧状であるのに、Fig.8の方は一部が扁平になっている。よって、Fig.8の鉄筋の方が腐蝕が進んでいることが推測できるが、濃淡画像からだけでは腐蝕レベルは正確にはわからない。

### 7.1 鉄筋のかぶり計測結果

Fig.7,8に示したBモード濃淡画像に対する2本の鉄筋(横筋)に対し4反射波モデルによりかぶり計測値を求めたところ、それぞれ96mm, 63mmであった。これらに対する実測値はそれぞれ98mm, 61mmであった。これらの鉄筋を含む多くの縦筋、横筋について、直交交差方式の4反射波モデルにより鉄筋のかぶりを計測してみた結果を、実測結果と比較して示したものがFig.9である。図より、極めて精度の高い計測がなされていることがわかる。なお、このときのコンクリートの等価的比誘電率としては、計測で求めた9.1を用いている。

参考のため、縦筋、横筋、[縦筋と横筋の全体]の3グループに分けて、計測誤差率の平均値を求めてみると、それぞれ

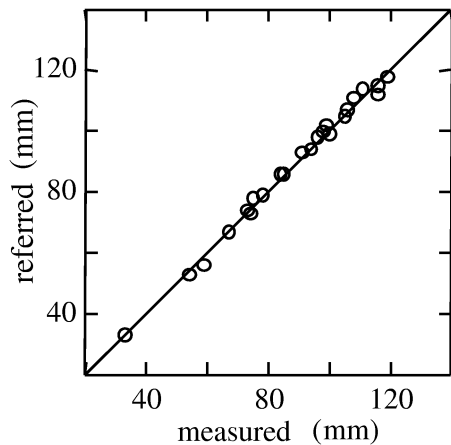


Fig. 9 Relation between the measured and referred values of the cover

1.7%, 2.1%, 1.9%となった。また、最大誤差率は、縦筋では2.8%, 横筋では3.8%であった。かぶりの実測に際しては、当該鉄筋部分を中心として手打ち式ブレーカーで50cm平方を剥った後、周辺の未剥りの部分に水平方向に定規を渡し、当該鉄筋のかぶりを測っている。そのため、剥る前の壁面の凹凸や剥りの際の鉄筋のたわみなどは考慮に入れておらず、実測値にも最大数mm程度の誤差が考えられる。よって、実際にはもっと精度が高いことが推測されるが、上記の全体的平均誤差率1.9%ということから、十分高精度なかぶり計測がなされていることがわかる。

なお、縦筋に対し横筋の計測誤差率が大きいのは、横筋が縦筋の手前にあり、しかも縦筋のピッチが横筋のその4倍くらいあるため、剥りの際に横筋にたわみが生じ、そのため実測値に誤差が生じたものと思われる。よって、実際には、横筋に対しても、縦筋に対するのと同程度の平均誤差率1.7%の精度でかぶり計測が行われていると考えられる。

## 7.2 直交交差による鉄筋の腐蝕厚計測結果

つぎに、かぶりを測った鉄筋について、直交交差方式の5反射波モデルにより腐蝕厚を計測してみた。なお、サンプリング周期の分割数  $N$  は  $N=20$  としている。このときの計測値と実測値を比較したものが Fig.10 である。なお、図中の数字は、計測実験において重複したものの数を表わす。また、図中A, B, C, Dなる記号は、目視による鉄筋腐蝕の判定結果である (Table1 参照)。ここで、計測値は、当該鉄筋の中央部を直交交差した走査ライン上、鉄筋の真上の位置に来たときの受信信号を解析して求めたものである。また、実測値は、当該箇所のコンクリートを剥った後で当該鉄筋直交交差点近くの2ポイント(7mm程度の隔たり)で計測したものの平均値をとったものである。

実測に際しては、まず上記2ポイントでノギスで当該鉄筋の径を測る。しかる後に、当該箇所の表面側の錆をやすりで削り落とし、同一ポイントで再び径を測る。そして、おのこのポイントでそれらの差をとり、各ポイントでの当該鉄筋

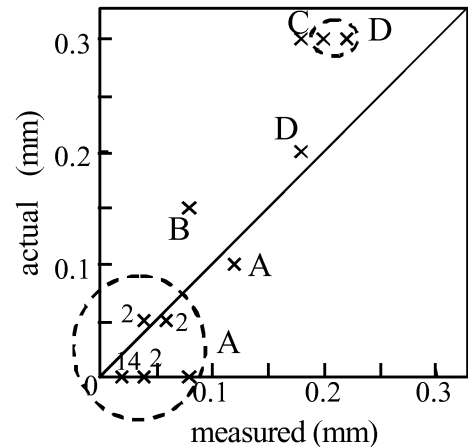


Fig. 10 Relation between the measured and referred values of the corrosion thickness

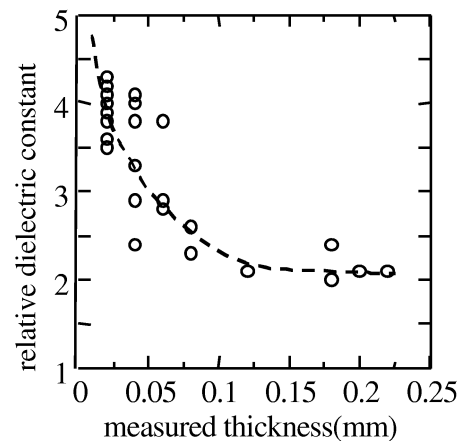


Fig. 11 Relation between the measured thickness of the corrosion and the relative dielectric constant

頭部の腐蝕厚とした。したがって、実測の際の計測誤差要因として、まずノギス本体の誤差 ( $\pm 0.05\text{mm}$  の誤差) が考えられる。つぎに、手打ち式ブレーカーで当該鉄筋を中心として50cm平方の面積のコンクリートを剥るときに、程度の差こそあれ、鉄筋に微小な数多くのコンクリート塊が付着することが考えられる。微小コンクリート塊については、鉄筋表面側は目視できるため、これを落とすことが可能であるが、後側は目視できないため、ノギスで測る際1mm~2mm場所がずれると、この微小塊の径も腐蝕厚に算入されることになる。図中Dの一部やBなど、実測値が計測値より一部大きめに測定されていることが、このことを裏付けている。

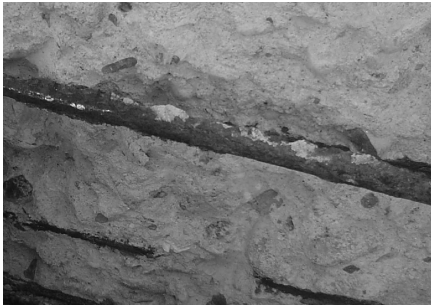
よって、正当な比較のためには、このような計測環境を考慮する必要があるが、このことを差し引いても、実測値と計測値の間に(ほぼ傾きが1の)強い相関がみられる。

Fig.10 より、開発したシステムによる計測値で腐蝕厚0.02mm~0.08mmのものは、目視判定基準で言えばA判定に当たる。さらに、この計測の際、腐蝕部の比誘電率も同時に求められるが、この比誘電率と腐蝕厚計測値の関係を示し





**Fig. 12** Photograph of a reinforcing bar with little corrosion (level A)



**Fig. 13** Photograph of a reinforcing bar with an extraordinary corrosion (level D)

たものが **Fig.11** である。図より、腐蝕厚が大きくなるほど（つまり腐蝕が進んで時間の経つほど）腐蝕部の比誘電率が小さくなる（つまり金属の性質がうすらぐ）という合理的な結果が得られる。

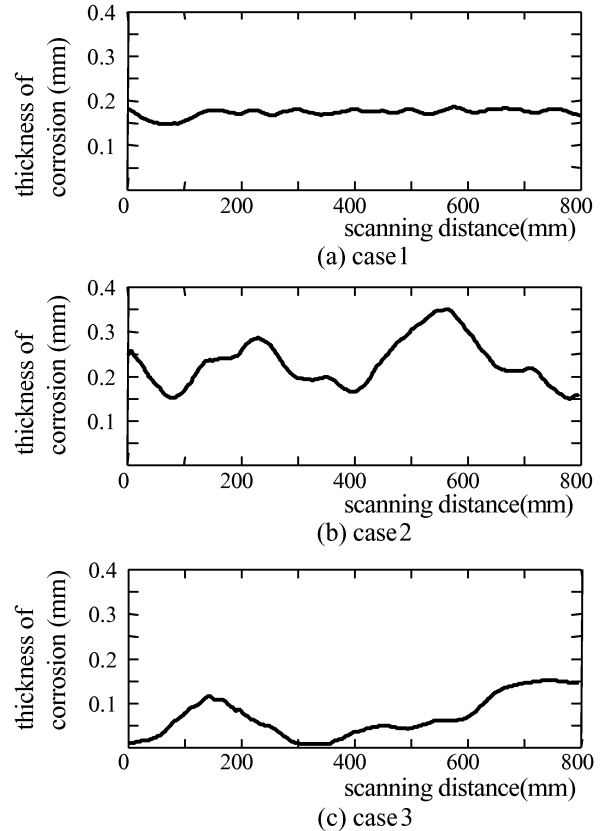
参考のため、コンクリートを剥って鉄筋を露出させたときの2本の鉄筋の写真を **Fig.12, 13** に示す。Fig.12は腐蝕がほとんど認められないものを、Fig.13は腐蝕がかなり進んだものを示す。それぞれ目視判定では、A判定およびD判定であった。いずれの写真からも、鉄筋のあちこちに多数のコンクリート微小塊がまつわりついていることがわかる。

以上のように、開発したシステムにより、鉄筋の腐蝕厚が非破壊で高精度に定量的に測れることを示したが、ポイントにより腐蝕厚が変わる場合もあり得るので、実際には鉄筋に沿ってレーダを走査し、腐蝕厚を連続的に測り、[腐蝕なしおよびA～D] 5段階目視判定基準と対応させることが望まれる。この観点から、次節では、レーダを鉄筋に沿って走査した場合の5段階腐蝕判定法について述べる。

### 7.3 平行走査による鉄筋腐蝕厚計測結果

鉄筋の腐蝕状況をより正確に把握するため、つぎに鉄筋に沿ってレーダを走査する方式（平行走査4反射波モデル）の有効性を、前節で扱った縦筋、横筋について検討してみる。

いま、2本の鉄筋（横筋）に対し、鉄筋に沿った方向の腐蝕厚分布を求めたものを **Fig.14** に示す。縦筋と直交交差した前後では、この縦筋からの反射波が大きくなり、横筋からの反射波に外乱として加わるが、提案方式では、このような大きな外乱にも拘わらず、縦筋の近くでも横筋の腐蝕厚が安定



**Fig. 14** Measurement of corrosion along the bars

して測れることがわかる。Fig.14(a)では鉄筋に沿って腐蝕厚はほとんど一定であるが、同図(b), (c)では、鉄筋に沿って腐蝕厚は大きく変化し、鉄筋中央の1点だけでの（直交交差による）腐蝕厚計測では、鉄筋の全体的な腐蝕判定は困難であることがわかる。

これに対し、先に掲げた腐蝕度自動判定則の有効性を示そう。いま、A～Dの4段階を決めるためのいき値  $c_1, c_2, c_3$  として、ここでは  $\{0.025, 0.07, 0.25\}$  を採用してみる。このとき、A, B, C, Dの欄に、これらの判定のための根拠ともなるべき割合（あるいは重み）の数値  $(N_1/N), (N_2/N), (N_3/N), (N_4/N)$ （ただし、 $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ ）を記入したものを **Table2** に示す。ただし、紙面の都合上一部のみを示す。Fig.14 (a), (b), (c) は、それぞれ検査箇所 W15 上段、W17 中段、W2 中段の鉄筋（いずれも横筋）の腐蝕分布を示したものである。

Table2の右欄には、検査後、コンクリートを剥り、専門家がTable1に従い鉄筋の腐蝕判定を行なったときの判定結果も示している。表中にたとえばC～Dとあるのは、鉄筋の一部がC、残りの部分がDと判定されたことを表す。これによると、(省略した他の23箇所も含め)「大きな割合の数値をもつ腐蝕ランクの箇所」が、右側に示した「目視による判定結果」と全く一致していることがわかる。しかも、この提案した方式では、腐蝕がいくつかのランクにまたがっていても、それぞれのランクに対する腐蝕の拡がりの割合もわかる利点がある。さらに、計測された腐蝕厚分布を参照すれば、鉄筋の



Table 2 Corrosion level automatically judged by the proposed method

inspection point	horizontal or vertical bar	position	measurement of corrosion when crossing the bar (mm)	corrosion level automatically judged (%)				corrosion level judged by an inspector
				A	B	C	D	
W2	horizontal	upper	0.09	2	97	1	0	B
		middle	0.09	16	39	45	0	A~C
	vertical	center	0.05	34	64	2	0	A~B
		right	0.06	0	9	91	0	C
W5	horizontal	middle	0.10	0	4	96	0	C
		lower	0.13	0	0	100	0	C
	vertical	center	0.05	0	67	33	0	B~C
		right	0.05	0	8	92	0	C
W8	horizontal	upper	0.02	75	24	1	0	A~B
		middle	0.02	67	32	1	0	A~B
		lower	0.03	63	35	2	0	A~B
	vertical	center	0.02	99	1	0	0	A
right		0.09	98	2	0	0	A	
W9	horizontal	upper	0.07	61	39	0	0	A~B
		middle	0.06	66	33	1	0	A~B
		lower	0.07	67	32	1	0	A~B
	vertical	center	0.03	99	1	0	0	A
right		0.02	100	0	0	0	A	
W15	horizontal	upper	0.18	0	1	99	0	C
		middle	0.16	0	0	100	0	C
		lower	0.18	0	0	100	0	C
	vertical	center	0.09	0	8	92	0	C
right		0.10	0	6	94	0	C	
W17	horizontal	upper	0.28	0	0	67	33	C~D
		middle	0.26	0	0	70	30	C~D
	vertical	center	0.17	0	3	97	0	C
		right	0.10	0	6	94	0	C

どの辺りがその腐蝕ランクに対応するかもわかる。総じて、縦筋にAランクが多いのは、この検査対象では、縦筋が横筋の後方(つまり、奥の方)にあり、横筋より腐蝕が進展しにくかったからである。

なお、本方式では0.02mm程度の腐蝕厚計測誤差はあり得るので、Aランクの腐蝕と腐蝕なしは識別困難であることに注意して戴きたい。

最後に、一測点ポイントでのかぶり、腐蝕厚計測に要する計算時間は、ASUS製ノートPC(CPU:Core2Duo2, クロック周波数:2.0GHz)で、それぞれわずか0.8sおよび1.1sである。また、鉄筋が丸棒、異形棒のいずれでも、かぶりや腐蝕厚が高精度に測れることも確かめられている。

## 8. 結 言

本論文では、これまでのBモード濃淡画像方式に代わり、Aモード信号を用いる新しい方式(信号伝播モデル法)により、鉄筋コンクリートにおける鉄筋のかぶりと腐蝕厚がリアルタイムに高精度に測れることを示した。

本方式の考え方は、もちろん他の関連あるコンクリート構造物にも、そのまま、あるいは少し手直しして適用できる。たとえば、橋梁床版には上段、下段と2段にわたって鉄筋が配筋されているが、上段鉄筋に対するのと同様、下段鉄筋に対しても鉄筋からの反射波をモデルに組み込むことにより、上段だけでなく下段の鉄筋のかぶりや腐蝕厚も同時に高精度に測れる。それも、アスファルトを剥さずに、アスファルトの上をレーダで走査させることにより、自動で高精度・高速に

測れる。しかも、著者らが先に開発した電磁カップリング装置を装着すれば、レーダを車に搭載して高速度で走行させながら、非接触に検査・計測することも可能である。

本論文では、このように新しい考え方に基づく電磁波レーダの使用により、鉄筋のかぶりだけでなく、鉄筋表面上の極めて薄い腐蝕厚が高精度に測れることを述べたが、この後者の計測システムの拡張として、種々の対象への適用が考えられる。ひとつは、これまで非破壊検査が不可能とされた合成樹脂製のタンクやパイプの内側耐蝕層(設計厚:1mm程度)の減厚計測である。これについては稿を改めて報告したい。

## 参 考 文 献

- 1) 大島, 吉岡: コンクリート構造物の非破壊調査の適用例—鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの厚さと背面空洞調査, コンクリート工学, **127-3** (1989)
- 2) 渡辺, ほか: コンクリートのはく離検査, 非破壊検査, 「コンクリート構造物の劣化診断技術の開発」特集, **51-3**, 129/133 (2002)
- 3) 前川, 森濱, 佐藤: 電磁波による鉄筋のかぶり厚さ測定, 非破壊検査, **56-1**, 16/22 (2006)
- 4) たとえば, JR EAST Technical Review, No.2, 11/17 (2003)
- 5) 田中, 山田: 信号伝播モデルに基づく電磁波レーダによるコンクリート構造物の非破壊検査, 計測自動制御学会論文集, **39-5**, 432/440 (2003)
- 6) 田中正吾: 平成14, 15年度地域新生コンソーシアム開発事業「電磁波及び超音波を用いた高信頼度非破壊検査システムの開発」成果報告書, 中国経済産業局 (2003, 2004)
- 7) 田中正吾: 電磁波レーダを用いたトンネルの高精度リアルタイム非破壊検査, 計測と制御, **44-3**, 173/179 (2005)
- 8) 田中正吾: 『コンクリート構造物及びそれ以外の構造物の非破壊検査方法』, 特許第3962627号(米国特許 US7,075,315B2)

- 9) 田中正吾：電磁波レーダを用いた先端的非破壊検査技術，計測と制御，**47-5**，437/444 (2008)
- 10) 田中，岡本，ほか：電磁波レーダを用いた埋設管のかぶりおよび径の計測，計測自動制御学会論文集，**44-8**，629/638 (2008)
- 11) 田中正吾：『電磁波レーダを用いた媒質中の異性物の変質状態の検知方法及び検知システム』，特願 2008-90584 号
- 12) 田中・大村：電磁波レーダを用いた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋径の計測，非破壊検査，**57-7**，321/326 (2008)
- 13) 田中正吾：『電磁波による非破壊検査装置及び方法』，特許第 4002982 号
- 14) 田中・高橋：電磁波レーダ高速走行のための最適電磁カップリング，計測自動制御学会論文集，**44-7**，545/551 (2008)
- 15) 中島，篠原，田中：電磁波レーダによる非金属材料の損傷評価，日本非破壊検査協会平成 20 年度秋季大会講演概要集，277/278 (2008)

## [著者紹介]

## 田中正吾 (正会員)



1949 年 1 月 1 日生。71 年九州大学工学部電子工学科卒業。76 年九州大学大学院工学研究科博士課程 (電気工学専攻) 修了，同年同大学助手を経て，80 年山口大学工学部電子工学科助教授，91 年同大学電気電子工学科教授，2006 年改組により同大学大学院理工学研究科教授，現在に至る。動的計測，知的音響応用計測，非破壊検査，生体医用計測などの理論および応用研究に従事 (工学博士)。中国文化賞 (2003)，文部科学大臣賞 (2004, 2009)，日本工学教育協会賞 (2004)，本会技術賞 (2005)，同教育貢献賞 (2006)，同功績賞 (産業応用, 2006) などを受賞。電気学会，日本非破壊検査協会などの会員，本会フェロー。