

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2008-232852

(P2008-232852A)

(43) 公開日 平成20年10月2日(2008.10.2)

(51) Int.Cl.
G01S 13/88 (2006.01)

F I
G O I S 13/88

テーマコード (参考)
5 J O 7 0

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2007-73353 (P2007-73353)
(22) 出願日 平成19年3月20日 (2007. 3. 20)

(71) 出願人 304020177
国立大学法人山口大学
山口県山口市吉田1677-1
(72) 発明者 田中 正吾
山口県宇部市常盤台2丁目16-1 国立
大学法人山口大学工学部内
Fターム(参考) 5J070 AC20 AE11 AH19 AH35 AH50
BE01

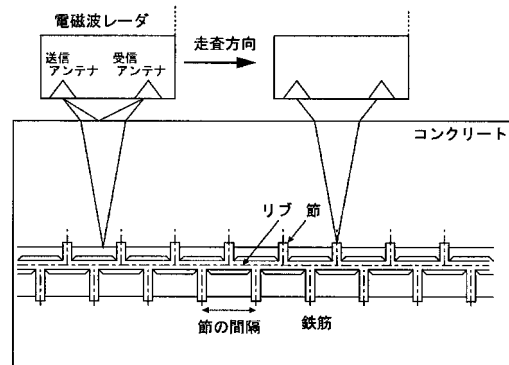
(54) 【発明の名称】 電磁波レーダによる鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋径の非破壊計測装置及び非破壊計測方法

(57) 【要約】

【課題】鉄筋コンクリート構造物中の異形鉄筋の径を簡便に計測する非破壊計測方式を提供すること。

【解決手段】送信アンテナと受信アンテナとを備えた電磁波レーダを異形鉄筋に沿って鉄筋コンクリート構造物表面を走査し所定ピッチ毎に電磁波の送受信を繰り返すステップと、前記異形鉄筋から反射される電磁波の伝播時間を時系列的に格納するステップと、前記格納された前記伝播時間の時系列データを周波数分析するステップと、前記周波数分析による最大ピーク位置に基づいて前記異形鉄筋の節の平均間隔を求めるステップと、前記平均間隔に従って、所定の対応表に基づいて鉄筋径を判断するステップと、を備える。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

鉄筋コンクリート構造物中に配設された異形鉄筋の鉄筋径の非破壊計測方法であって、送信アンテナと受信アンテナとを備えた電磁波レーダを前記異形鉄筋に沿って前記鉄筋コンクリート構造物表面を走査し所定ピッチ毎に電磁波の送受信を繰り返すステップと、前記異形鉄筋から反射される電磁波の伝播時間を時系列的に格納するステップと、前記格納された前記伝播時間の時系列データを周波数分析するステップと、前記周波数分析による最大ピーク位置に基づいて前記異形鉄筋の節の平均間隔を求めるステップと、

前記平均間隔に従って、所定の対応表に基づいて鉄筋径を判断するステップと、
を備えることを特徴とする鉄筋径の非破壊計測方法。

10

【請求項 2】

前記周波数分析は、最尤法により行われることを特徴とする請求項 1 に記載の鉄筋径の非破壊計測方法。

【請求項 3】

前記周波数分析は、高速フーリエ変換により行われることを特徴とする請求項 1 に記載の鉄筋径の非破壊計測方法。

【請求項 4】

前記周波数分析は、最大エントロピー法により行われることを特徴とする請求項 1 に記載の鉄筋径の非破壊計測方法。

20

【請求項 5】

鉄筋コンクリート構造物中に配設された異形鉄筋の鉄筋径の非破壊計測装置であって、前記鉄筋径の非破壊計測装置は、

送信アンテナと受信アンテナとを備えた電磁波レーダと、

前記電磁波レーダを前記異形鉄筋に沿って前記鉄筋コンクリート構造物表面を走査し所定ピッチ毎に電磁波の送受信を繰り返すことにより、前記異形鉄筋から反射される電磁波の伝播時間を時系列的に格納する格納手段と、

前記格納手段に格納された前記伝播時間の時系列データを周波数分析する分析手段と、

前記周波数分析による最大ピーク位置に基づいて前記異形鉄筋の節の平均間隔を求める

制御手段と、

前記平均間隔に従って、所定の対応表に基づいて鉄筋径を判断する判断手段と、

を備えることを特徴とする鉄筋径の非破壊計測装置。

30

【請求項 6】

前記周波数分析は、最尤法により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置。

【請求項 7】

前記周波数分析は、高速フーリエ変換により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置。

【請求項 8】

前記周波数分析は、最大エントロピー法により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置。

40

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、内部に鉄筋が埋め込まれた鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋径の非破壊計測装置及び非破壊計測方法に関する。

【背景技術】**【0002】**

近年、耐震偽装問題等の社会問題が発生する等からも、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の存在の有無のみならず、鉄筋径の計測にも関心が高まっている。

50

しかしながら、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋径の計測は極めて困難であり、これまで有用な方式は開発されていない。

【0003】

特許文献1には、送信アンテナと受信アンテナとを備え、媒体表面に沿って送信アンテナと受信アンテナを移動させつつ、送信アンテナから媒体に向けて電磁波を発信し、媒体中の不可視物体から得られる反射波を受信アンテナによって受信し、これを画面上に表示する装置を用い、主鉄筋に沿ってアンテナを走行させ、反射波の三日月形の第1、第2、第3の画像を求め、第2の画像の頂点と第3の画像の頂点から半波長時間 t_1 を求め、バンド状の画像の上辺と第2の画像の頂点からの時間 t_2 を求め、時間 $t_2 - t_1$ から推定する鉄筋径の電磁波往復伝播時間 T を求め、媒体中の比誘電率から求められる電磁波伝播速度を V とすると、 $V \times T / 2$ から鉄筋の直径を推定する鉄筋径の推定方法が開示されている。

10

【0004】

特許文献2には、本発明者により開発された、電磁波レーダの物理的特性と電磁波の媒質界面における反射及び屈折を含めた伝播特性に基づく予測受信信号波形と電磁波レーダによって測定した実際の受信信号とのパターンマッチングによって、コンクリート内の鉄筋の位置及び鉄筋の形状を求める計測方法が開示されている。

【特許文献1】特開平5 - 323026号公報

【特許文献2】特願2006 - 132996号

【発明の開示】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明の目的は、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋は、(1)異形鉄筋とって、鉄筋がコンクリート内に固定されやすいように鉄筋に沿って周期的に節が設けられていること、及び(2)この節の間隔が鉄筋の径によって定まっていることに着目し、鉄筋の径を簡便に計測する非破壊計測方式を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0006】

これらの目的を達成するため本発明は次のように構成する。

請求項1に係る発明は、鉄筋コンクリート構造物中に配設された異形鉄筋の鉄筋径の非破壊計測方法であって、送信アンテナと受信アンテナとを備えた電磁波レーダを前記異形鉄筋に沿って前記鉄筋コンクリート構造物表面を走査し所定ピッチ毎に電磁波の送受信を繰り返すステップと、前記異形鉄筋から反射される電磁波の伝播時間を時系列的に格納するステップと、前記格納された前記伝播時間の時系列データを周波数分析するステップと、前記周波数分析による最大ピーク値に基づいて前記異形鉄筋の節の平均間隔を求めるステップと、前記平均間隔に従って、所定の対応表に基づいて鉄筋径を判断するステップと、を備えることを特徴とする鉄筋径の非破壊計測方法である。

30

また、請求項2に係る発明は、前記周波数分析は、最尤法により行われることを特徴とする請求項1に記載の鉄筋径の非破壊計測方法である。

また、請求項3に係る発明は、前記周波数分析は、高速フーリエ変換により行われることを特徴とする請求項1に記載の鉄筋径の非破壊計測方法である。

40

また、請求項4に係る発明は、前記周波数分析は、最大エントロピー法により行われることを特徴とする請求項1に記載の鉄筋径の非破壊計測方法である。

さらに、請求項5に係る発明は、鉄筋コンクリート構造物中に配設された異形鉄筋の鉄筋径の非破壊計測装置であって、前記鉄筋径の非破壊計測装置は、送信アンテナと受信アンテナとを備えた電磁波レーダと、前記電磁波レーダを前記異形鉄筋に沿って前記鉄筋コンクリート構造物表面を走査し所定ピッチ毎に電磁波の送受信を繰り返すことにより、前記異形鉄筋から反射される電磁波の伝播時間を時系列的に格納する格納手段と、前記格納手段に格納された前記伝播時間の時系列データを周波数分析する分析手段と、前記周波数分析による最大ピーク値に基づいて前記異形鉄筋の節の平均間隔を求める制御手段と、前

50

記平均間隔に従って、所定の対応表に基づいて鉄筋径を判断する判断手段と、を備えることを特徴とする鉄筋径の非破壊計測装置である。

また、請求項 6 に係る発明は、前記周波数分析は、最尤法により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置である。

また、請求項 7 に係る発明は、前記周波数分析は、高速フーリエ変換により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置である。

さらに、請求項 8 に係る発明は、前記周波数分析は、最大エントロピー法により行われることを特徴とする請求項 5 に記載の鉄筋径の非破壊計測装置である。

【発明の効果】

【0007】

内部に鉄筋が埋め込まれた鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋径を非破壊検査により、簡便に確度よく、計測、判断することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0008】

鉄筋コンクリートとは、引張りに弱いコンクリートを補強するために鉄筋を配したコンクリートである。鉄筋には引張りが作用しても引き抜けないように、通常、図 1、図 2 のように周期的に節のある異形鉄筋と呼ばれる鉄筋が用いられる。

【0009】

この異形鉄筋は、鉄筋の径に応じて、節の間隔および高さが異なっており、表 1 に示すような規格がある (J I S G 3 1 1 2 - 7 5) 。

【表 1】

呼び名	単位重量 kg/m	公称直径 (d) mm	公称断面積 (S) cm ²	公称周長 (ℓ) cm	フシの許容限度			
					フシの平均間隔の 最大値(P) mm	フシの高さ(a)		フシのスキマの 和の最大値(2c) mm
						最小値mm	最大値mm	
D6	0.249	6.35	0.3167	2.0	4.4	0.3	最 小 値 の 2 倍	5.0
D10	0.560	9.53	0.7133	3.0	6.7	0.4		7.5
D13	0.995	12.7	1.267	4.0	8.9	0.5		10.0
D16	1.56	15.9	1.986	5.0	11.1	0.7		12.5
D19	2.25	19.1	2.865	6.0	13.4	1.0		15.0
D22	3.04	22.2	3.871	7.0	15.5	1.1		17.5
D25	3.98	25.4	5.067	8.0	17.8	1.3		20.0
D29	5.04	28.6	6.424	9.0	20.0	1.4		22.5
D32	6.23	31.8	7.942	10.0	22.3	1.6		25.0
D35	7.51	34.9	9.566	11.0	24.4	1.7		27.5
D38	8.95	38.1	11.40	12.0	26.7	1.9		30.0
D41	10.5	41.3	13.40	13.0	28.9	2.1		32.5

表 1 によると、節の間隔に対しては、各径に対し少し自由度があり、節間隔がとるべき最大値が定められている。例えば、径が 12.7 mm の鉄筋に対しては節間隔の平均値の最大値は 8.9 mm であり、間隔平均値は、強度上の観点からはこれより小さいものは幾らでも小さくて良いが、コストの観点からはこの径よりも 1 規格低い異形鉄筋である径が 9.53 mm の異形鉄筋の平均間隔の最大値 6.7 mm より大きくするのが合理的であり

10

20

30

40

50

、実際このように製造されていると考えられる。

【0010】

そこで、図1に示すように、電磁波レーダをコンクリート中の鉄筋に沿ってコンクリート表面を走査させる。

【0011】

電磁波レーダの送信アンテナから電磁波を発射すると、一部はまずコンクリート表面で反射され、受信アンテナに受信される(図1の経路A F E)。残りの電磁波は表面を通過し、コンクリート内部の鉄筋に到達し、ここで反射される。この時の反射波がコンクリート表面を再び透過して、受信アンテナに受信される(図1の経路A B C D E)。

【0012】

いま、図1において、電磁波の鉄筋における反射ポイントが節間の主軸部分にある場合と、節部分にある場合の経路をみると、節の部分で反射される場合の方が主軸部分で反射される場合よりも伝播経路が短いため、電磁波の往復伝播時間が短くなる。

【0013】

本発明は、この事実を利用して節と節との平均間隔を計測し、表1に示されるような鉄筋の径と節間隔の相関関係より径を割り出すものである。

【0014】

図3に示すように、鉄筋に沿ってレーダを走らせ、あるピッチごとに電磁波の送受信を繰り返すと、節がある間隔ごとに設けられているため鉄筋からの電磁波伝播時間が周期的に変化する。この伝播時間の時系列データを格納手段に格納すると共に、格納された伝播時間の時系列データを分析手段により周波数分析することにより、節の平均間隔が求められる。この周波数分析には、例えば、よく知られたFFT(高速フーリエ変換)やMEM(最大エントロピー法)等が利用できる。また、節が周期的に配置されていることを利用した物理モデルを利用した最尤法も考えられる。

【0015】

以下、この最尤法について説明する。

いま、往復伝播時間の時系列データの平均値を求め、各伝播時間よりこの平均値を差し引く。これによりプラス・マイナスに値が振れる周期的な時系列信号が得られる。なお、このとき差し引いた時系列信号のバイアスは完全にはゼロにならないため、この時系列信号は連続時間では次のようなモデル化される。

【数1】

$$z(x) = z_0 + z_1 \quad (1)$$

ここで、 $z_0 = a_0$

、 $z_1 = a_1 \sin(x + \phi)$ である。また、 $\phi = 2\pi f x$ で、 f は節の繰り返し周波数である。つまり、節の平均間隔が L であれば $f = 1/L$ で与えられる。

【0016】

いま、状態ベクトル

【数2】

$$z(x) = (z_0, z_1, \dot{z}_1)^T \quad (2)$$

を定義すれば、 $z(x)$ の従うダイナミックスは

【数3】

$$\frac{d}{dx} z(x) = Az(x) + w(x) \quad (3)$$

となる。ここで、(2)式のドットは x についての微分を表し、 A は次式で定義される。

10

20

30

40

50

【数4】

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \vdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \vdots & 0 & 1 \\ 0 & \vdots & -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

10

また、 $w(x)$ は $w(x) = (w_1, 0, w_2)^T$ なる遷移雑音であり、 $w_1(x)$ 、 $w_2(x)$ は平均値がゼロ、分散が σ_1^2 、 σ_2^2 の互いに独立な白色ガウス雑音とする。この雑音を導入したのは、計測に際してのデータウィンドウ内での時系列信号の(1)式によるモデル化誤差を補償するためである。(3)式を L でサンプリングすれば、次のサンプル値系表現が得られる。

【数5】

$$z_{k+1} = Fz_k + w_k \quad (5)$$

なお、 z_k, w_k はそれぞれサンプリング地点 $k(L)$ における状態ベクトル及び遷移雑音である。ここに、 F は次式で定義される遷移行列である。

20

【数6】

$$F = \Phi(\Delta L), \quad \Phi(x) = \mathcal{L}^{-1} [(sI - A)^{-1}] \quad (6)$$

ここに、 $\mathcal{L}^{-1} [\cdot]$ はラプラス逆変換を表わす。また、遷移雑音ベクトル w_k は平均値がゼロ、共分散行列が次式で与えられる白色ガウス雑音である。

【数7】

$$\begin{aligned} W &= E [w_k w_k^T] \\ &= E \left\{ \left[\int_0^{\Delta L} \Phi(\Delta L - x) w(x) dx \right] \right. \\ &\quad \left. \times \left[\int_0^{\Delta L} \Phi(\Delta L - x) w(x) dx \right]^T \right\} \\ &= \int_0^{\Delta L} \Phi(\Delta L - x) \Sigma \Phi^T(\Delta L - x) dx \quad (7) \end{aligned}$$

30

40

なお、

$$\Sigma \text{は } \Sigma = E [w(x)w(x)^T] = \text{diag}\{\sigma_1^2, 0, \sigma_2^2\}$$

なる対角行列である。

50

【 0 0 1 7 】

一方、この時系列信号 $\{y_k\}$ はレーダ走査により得られるので、状態ベクトル z_k の観測方程式として次式が与えられる。

【 数 8 】

$$y_k = Hz_k + v_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (8)$$

ここで、 H は $H=[1,1,0]$ である。なお、 y_k 及び v_k はサンプリング地点 k (L)における観測値(上記平均値を差し引いた時系列信号)及び観測雑音を表わす。

【 0 0 1 8 】

このようにして、上で定義された時系列信号のダイナミックモデルが得られた。よって、 z_k の推定はつぎのカルマンフィルタによりなされる。

【 数 9 】

$$\hat{z}_{k/k-1} = F\hat{z}_{k-1/k-1} \quad (9)$$

【 数 1 0 】

$$\hat{z}_{k/k} = \hat{z}_{k/k-1} + K_k\gamma_k \quad (10)$$

【 数 1 1 】

$$\gamma_k = y_k - H\hat{z}_{k/k-1} \quad (11)$$

【 数 1 2 】

$$P_{k/k-1} = FP_{k-1/k-1}F^T + W \quad (12)$$

【 数 1 3 】

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_kHP_{k/k-1} \quad (13)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

【 数 1 4 】

$$K_k = P_{k/k-1}H^T\Lambda_k^{-1} \quad (14)$$

【 数 1 5 】

$$\Lambda_k = HP_{k/k-1}H^T + V \quad (15)$$

なお、 V は観測雑音 v_k の分散である。

【 0 0 1 9 】

カルマンフィルタの初期値としては、

$$\hat{z}_{0/-1}=(0,0,0)^T、P_{0/-1}=\text{diag}\{c_1, c_2, c_2\omega^2\}$$

10

20

30

40

50

などを用いればよい。ここに c_1, c_2 は時系列信号の値の大きさをみて適切に与えればよい。また、 $\hat{z}_{k/k-1}$ は不明なため、 $P_{0/k-1}$ の計算に当っては、予めFFTなどで求めた $\Lambda_k(\omega)$ の概略値を使うなどすればよい。

【0020】

しかしながら本計測法で求められていることは真に正確な $\hat{z}_{k/k-1}$ を求めることである。しかしながら、カルマンフィルタのF、Wは ω の関数であり、しかも ω は未知であるため、状態ベクトルの推定には直接カルマンフィルタを適用することができない。しかしながら、 ω の候補を一旦与えれば、上記カルマンフィルタ適用することができ、そのパラメータの下での状態ベクトルの推定を行うことができる。

【0021】

このとき用いたパラメータ ω の確からしさは、観測値系列 $Y^{k-1} = \{y_1, y_2, \dots, y_{k-1}\}$ の下で得た次の尤度関数により評価できる。

【数16】

$$J(\omega) = \prod_{k=1}^K p(y_k/\omega, Y^{k-1})$$

$$= \frac{1}{(2\pi\Lambda_k(\omega))^{K/2}} \exp \left[- \sum_{k=1}^K \frac{(y_k - H\hat{z}_{k/k-1}(\omega))^2}{2\Lambda_k(\omega)} \right]$$

(16)

ここに、

$$\hat{z}_{k/k-1}(\omega) \text{ 及び } \Lambda_k(\omega)$$

はそれぞれパラメータ ω の下でのカルマンフィルタにより求めた状態ベクトルの予測値

$$\hat{z}_{k/k-1}$$

及び Λ_k を表す。従って、結局は、(16)式を ω について最大化することにより、最適な ω^* を求めることができ、これにより節間隔 $L^*(=2/\omega^*)$ を計算することができる。

【0022】

なお、ここでは、伝播時間よりその平均値を差し引いて定義される時系列信号のモデルとして、パイアスの加わった1つの正弦波関数を考えたが、2つ以上の正弦波関数を考えることもできる。また、注意すべきことは、電磁波の発射のピッチが小さければ小さいほど、節の繰り返し形状がよく把握できるため節間隔計測に対しては望ましい。そのため、レーダのピッチが粗ければ、例えばレーダを距離ベースではなく時間ベースの電磁波発射に切り換え、かつ十分小さな電磁波発射ピッチを実現するような速度で動かすようにすればよい。

【0023】

また、この最尤法のアプローチを採れば、レーダ走査を複数回行ったときに各時系列信号に対して求めた尤度関数を足し合わせ、これを ω について最大化することにより、信頼度を更に高めることもできる。

【0024】

なお、鉄筋コンクリート中の異形鉄筋が錆びた場合の径計測であるが、このときも本来の異形鉄筋の形状を留めたコンクリート形状からの反射波による伝播時間情報を採取し、

10

20

30

40

50

これを利用するようにすれば、鉄筋の本来の節間隔が計測でき、これにより鉄筋の径を計測できる。

【 0 0 2 5 】

次に、伝播時間の計測法について説明する。

鉄筋からの受波信号 $r(t)$ は、鉄筋からの反射波 $r_0(t)$ にコンクリート表面からの反射波 $r_s(t)$ が重なって観測される。よって、各観測点において鉄筋までの電磁波往復伝播時間を求めるには、受信信号からコンクリート表面からの反射波 $r_s(t)$ を差し引くことが合理的である（なお、 $r_s(t)$ は事前に求められる）。

【 0 0 2 6 】

この差信号

10

$$\tilde{r}(t) = r(t) - r_s(t)$$

から鉄筋までの電磁波伝播時間を求めるのであるが、何も正確な往復伝播時間を求める必要はない。つまり、往復伝播時間と連動する相対的な時間変化が重要なのである。

【 0 0 2 7 】

この観点から、ここでは往復伝播時間の変化状況を表す簡易法の一つとして、差信号

$$\tilde{r}(t)$$

20

の最大ピーク値を与える時刻の時系列を観測値として代用することを考える。そして、この時系列信号の平均値を求め、この平均値を各時系列信号から差し引いたものを、前節の $\{y_k\}$ とすればよい。

【 0 0 2 8 】

なお、

$$\tilde{r}(t)$$

30

のデータは所定のサンプリング周期ごとに与えられるため、より正確なピーク時刻を求めるには、例えば以下に示すパターンマッチングの方法がある。

【 0 0 2 9 】

いま、

$$\tilde{r}(k\Delta T) (k=0,1,2,\dots)$$

(ここで T はサンプリング周期) が与えられたとする。このとき、事前に鉄筋からの基準となる反射波信号 $s(k\Delta T)$ ($k=0,1,\dots$) を得ておき、より詳細な波形情報を与えるものとして、内挿法により $s(k\Delta T')$ ($k=0,1,2,\dots$) を作成しておく。但し、 T' は $T' = T/N$ (N は整数)。

40

【 0 0 3 0 】

$$\{\tilde{r}(k\Delta T)\} \text{ と } \{s(k\Delta T')\}$$

のパターンマッチングがなされるよう $\{s(k\Delta T')\}$ を動かせ、これらの最適パターンマッチングが実現するときの $\{s(k\Delta T')\}$ の最大ピーク位置により

50

$$\{\tilde{r}(k \Delta T)\}$$

の最大ピーク位置を (T のサンプリング時刻ではなく、 T の N 分割点の正確さ) で求めようとするものである。従って、 N = 10 とすれば、本来のサンプリング周期の (1 / 10) きざみで正確な最大ピーク位置が求まる。

【 0 0 3 1 】

注意すべきことは、パターンマッチングとしては k T (k = 0, 1, 2, ...) なる時刻での両波形のマッチング角

10

【 数 1 7 】

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{(\tilde{r}, s)}{\|\tilde{r}\| \cdot \|s\|} \right] \quad (17)$$

で評価することである。ここに、 (· , ·) 及び · はユークリッド空間の内積及びノルム記号である。

【 実施例 】

【 0 0 3 2 】

20

いま、径が 19.1mm、深度が 60mm (従って、かぶりが 50.45mm) の異形鉄筋の径の計測を考えてみる。

バイアスを差し引いた往復伝播時間の時系列信号を図 4 に示す。日本無線 (株) 製 NJJ - 95A (中心周波数 800MHz) レーダを用いて、電磁波発射は 1mm ピッチで計測を行った。なお、このピッチは、時間ベースで 0.05 s おきに電磁波を発射するレーダを鉄筋に沿ってできるだけ等速で走らせたときのデータである。

【 0 0 3 3 】

この時系列信号に対して、 (1) F F T、 (2) M E M、 (3) 最尤法の各方式を用いたときの周波数解析結果を図 5 ~ 図 7 に示す。 F F T、 M E M によるスペクトルの最大ピークは、それぞれ $f = 0.085 \text{ Hz}$ 、 $f = 0.069 \text{ Hz}$ で与えられる。節間隔 L (= 1 / f) を逆算すると、それぞれ 11.8mm、 14.4mm となる。

30

【 0 0 3 4 】

一方、最尤法による方法では、尤度の最大値を与える周波数 $f = 0.085 \text{ Hz}$ となる。なお、カルマンフィルタを用いる上で、 $c_1 = 0.06$ 、 $c_2 = 0.1$ 、 $c_1 = 0.1$ 、 $c_2 = 0.3$ を用いた。これより、最尤法による節間隔 L は $L = 1 / f = 11.8 \text{ mm}$ となる。これら 3 つの節間隔は、 F F T 及び最尤法では、径が 15.9mm に対する鉄筋の最大間隔 11.1mm より大きく、径が 19.1mm に対する鉄筋の最大間隔 13.4mm よりも小さく、また M E M では、径が 15.9mm に対する鉄筋の最大間隔 11.1mm より大きく、径が 19.1mm に対する鉄筋の最大間隔 13.4mm に極めて近く、いずれの方法でも鉄筋の径は 19.1mm であることが高い確度でいえる。

【 図面の簡単な説明 】

40

【 0 0 3 5 】

【 図 1 】 電磁波レーダの電磁波伝播経路である。

【 図 2 】 異形鉄筋の外見を示す図である。

【 図 3 】 鉄筋及びレーダの走査を示す図である。

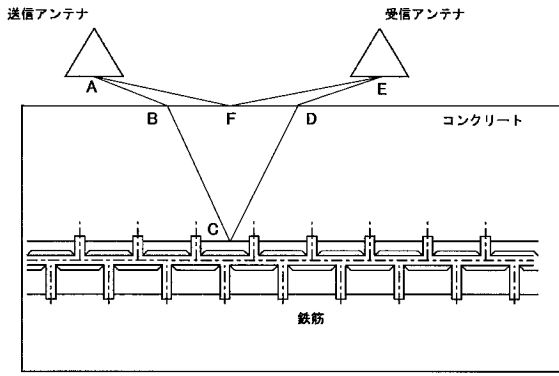
【 図 4 】 観測値系列を示す図である。

【 図 5 】 F F T によるスペクトルを示す図である。

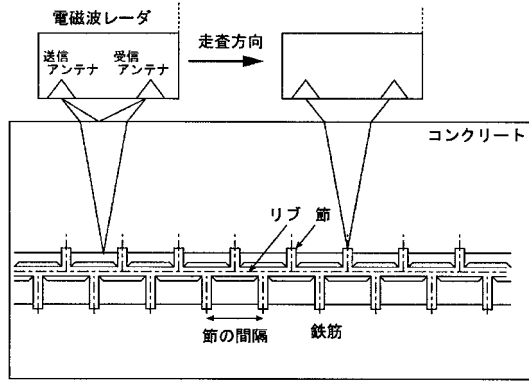
【 図 6 】 M E M によるスペクトルを示す図である。

【 図 7 】 最尤法による尤度関数を示す図である。

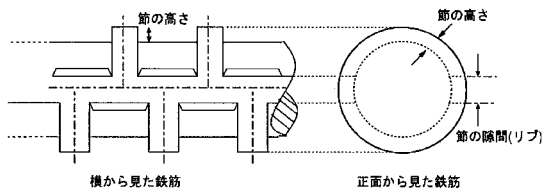
【 図 1 】



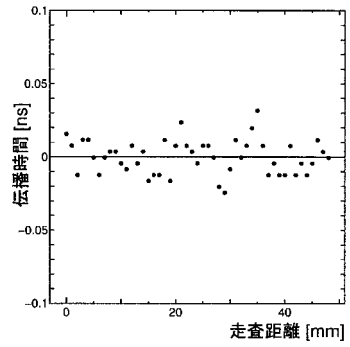
【 図 3 】



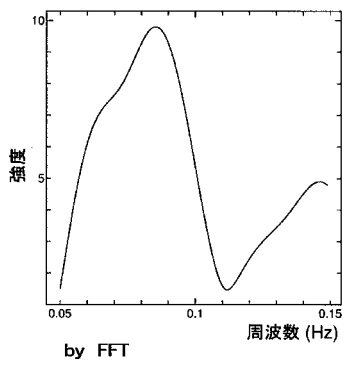
【 図 2 】



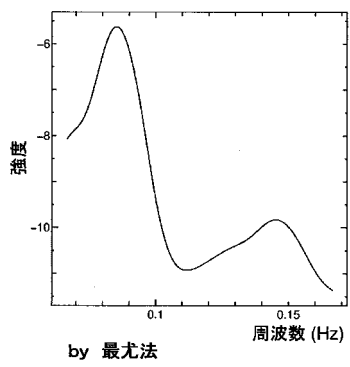
【 図 4 】



【 図 5 】



【 図 7 】



【 図 6 】

