多重反射波及び定在波モデルに基づく 超音波センサによるコンクリート構造物の非破壊検査

田 中 正 吾*

Non-Destructive Inspection of Concrete Structures by Ultrasonic Sensor
Based on Multi-Reflected-Wave and Stationary Wave Models

Shogo TANAKA*

The non-destructive inspection of cracks in concrete structures has been attempted using electromagnetic wave, infrared ray, sound wave and so on. Inspection using electromagnetic wave sometimes did not detect cracks, since concrete structures contain iron bars. The infrared ray was hard to use in tunnels, because difference in temperature was hardly observed before and behind the cracks. It was also difficult to detect cracks using an ultrasonic wave because of the reflected waves strictly superposing on each other.

This paper proposes two non-destructive inspection methods using ultrasonic wave which detect the cracks in concrete structures. One is based on a multi-reflected-wave model, the other a stationary wave model. The methods enable not only detection of the cracks but also an accurate measurement of their positions. These methods should be selected depending on the sensor to be used and the object to which the inspection is applied.

Key Words: concrete structures, internal cracks, exfoliation, ultrasonic sensor, non-destructive inspection, multi-reflected-wave model, stationary wave model

1. 緒 言

トンネル、橋梁など多くのコンクリート構造物に対し、コンクリートの剥離による事故がしばしば見受けられる。最近起こった山陽新幹線のトンネル壁面の度重なる崩落事故はまだ記憶に新しい。応急処置として人海戦術による打音検査が行われたが、これはあくまでも一時的なものであり、今後もこのような事故を予防すべく抜本的な対策が迫られている。もちろん、この種の非破壊検査の対象としては、トンネル壁面だけでなく、橋梁やビルディングなど数多くの既成のコンクリート構造物に対しても、災害の予防および長寿命化の観点から内部の正確な非破壊検査が求められている^{1)~4)}。

これらのコンクリート構造物に対する非破壊検査手法としては、これまで熟練者がハンマーで衝撃を与え、そのときの反力や音などにより異常を検知・診断する方法がよく用いられて来たが、本来この手法は信頼性が低いのに加え、主観的なものであり、個人差が大きい欠点をもっている。更に、近年熟練者の数が急減したり、あるいは既成建造物を長寿命化する観点から診断対象の数が急増するなどの背景があり、非

熟練者でも高精度な診断が行える診断装置の開発が渴望されて来た^{2)~4)}。

このため、打音に代わる診断手法として、①X線法、②電磁波法、③赤外線法、④超音波法などの検査手法の開発が試みられて来たが^{1)~4)}、①のX線法は取り扱いが煩わしく、有資格者しか使用できず、かつリスクが伴ない高コストである。また、②の電磁波法は、鉄筋が内部にある場合、探査が不可能になる場合が多い。更に、③の赤外線法では、剥離の前方と後方の温度差により剥離の有無の検出を行うため、トンネル内部では日照がなく、そのため剥離の検出が困難である。なお、バーナーでコンクリート表面を熱することも考えられるが、コンクリート構造物に(疲労)損傷を与えるため、余り推奨されない。

一方、④の超音波法は、表面と剥離までの往復音波伝播時間により剥離の有無の検出や位置の計測を行う手法であるが、剥離と表面の間に多重反射波が生じ、これらが重畳し合うため、従来のように剥離からの第一反射波を抽出する方式では剥離までの往復音波伝播時間の計測が困難となる。更に、計測に際しては、この重畳反射波に送波信号が重畳したり、あるいは外乱が重畳したりするため、事態はもっと深刻になる。しかしながら、超音波は人体に無害で取り扱いやすく、そのため非破壊検査システムの媒体としては捨てがたい。

以上のことから、本論文では、超音波センサを用いること

* 山口大学工学部 宇部市常盤台 2-16-1

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received October 6, 2000)
(Revised March 7, 2001)

を前提に、まずコンクリート中に小石や鉄筋などの骨材が含まれていない場合、超音波センサの物理特性を考慮することにより、剥離等からの受波信号波形（多重反射波）の予測波形を作り、これと実際の受波信号波形とのパターンマッチングにより剥離からの往復音波伝播時間を計測し、これにより剥離の有無の検出や剥離の位置決定を行う手法を提案する。なお、骨材が含まれている場合でも、骨材のサイズに比べて波長の長い（すなわち中心周波数の低い）超音波センサを用いれば、同一の原理で剥離の有無の検出および位置決定が可能となる。この計測原理に基づく計測法をここでは「多重反射波モデルによる計測法」と呼ぶことにする。

なお、骨材が含まれており、かつ利用できる超音波センサの超音波の波長が骨材のサイズに比べてそれほど長くはない場合は、超音波は伝播に際し骨材の影響を受ける。つまり、超音波センサより発信された超音波は途中の骨材に衝突し、散乱を繰り返す。したがって、この場合、超音波センサに受波された受波信号に対し、剥離と表面との間の多重反射波モデルは適用できず、剥離の検出に際しては異なった計測原理を使用する必要がある。

そのため、本論文では、次に、このような場合に対し、表面と剥離との間の定在波を用いる方法を提案する。これは、通常の超音波センサを用いる場合、短時間に多数のパルスが発射され（たとえば後述の実験で用いるセンサでは16ms間隔で発射）、これがトリガ（引き金）となり、表面と剥離の間に多くの定在波を生じさせるからである。この定在波の周波数と剥離までの距離には一対一の関係があり、この原理を用いた計測をここでは「定在波モデルによる計測法」と名付ける。いずれもコンクリート構造物の非破壊検査には欠くべからざるものである。もちろん、検出対象としては、いずれも崩落事故を引き起こしやすい（表面に対向する）面性状の剥離とする。

なお、超音波を用いた方法としては、他に衝撃弾性波法や弾性波伝達関数法なるものもあるが^{3), 4)}、前者は超音波センサの代わりにハンマー等でコンクリート表面に衝撃を与え、剥離等からの反射波を受信するものであり、原理はこれまでの超音波法と同様、ディスプレイ上の受波信号波形から（剥離からの）第1反射波を目視で検出し剥離位置を推測するものである。また後者は、ハンマーによる入力信号と反射信号を異なる受信器で採取し、これらの間の伝達関数を周波数スペクトルとしてパターンのながめ、剥離等の有無および位置計測を行うものであるが、そのためには（密度や成分など）コンクリートの材質を始め、剥離の位置や形状などを種々変えた膨大な周波数スペクトルのデータベースを用意しなくてはならず、余り実用的ではない。また、定在波の概念を用い、連続加振機の周波数を変え、このとき共振する周波数により剥離位置を推測する方式も一部市販されているものの、精度上の難点だけでなく、計算時間が5分以上かかるなどの欠点をもつ。

提案方式は、これら検査担当者の主観に頼らず、かつ計算

Fig. 1 Overview of the inspection system

時間を大幅に短縮化するものであり、以下これらの2つの手法について順次説明を加える。Fig. 1に、参考のため提案システムの外観図を示す。

2. 多重反射波モデルによる剥離の検出・計測

骨材がない場合、あるいは骨材のサイズに比し波長が十分長い超音波センサを用いる場合、剥離の有無の検出および剥離の位置決定に際しては、剥離までの正確な音波往復伝播時間を計測することが基本となる。しかしながら、超音波センサには、一般にセンサ設置面と剥離との間の反射波が重畳して観測される（多重反射波の重畳）だけでなく、（特に初期時間帯では）外乱が加わり、反射波が孤立波として得られず、結局、第1反射波を検出し、剥離までの往復音波伝播時間を正確に計測することはまず不可能である。

そこで本論文では、まず、得られた受波信号波形と理論的に予測できる受波信号波形のパターンマッチングにより往復音波伝播時間を計測することを考える。つまり、「多重反射波モデルによる計測法」を考える。この方法では、機構的に送波器が電気信号を音圧信号に、また受波器が音圧信号を電気信号に変換する音響振動子を有する変換器であることを考慮し、 $U(s)$ を送波器に入力する電気信号 $u(t)$ のラプラス変換として、受波器に出力される電気信号を

$$r(t) = \mathcal{L}^{-1}[G_0(s)G_1(s)G_2(s)U(s)] \quad (1)$$

でモデル化することを考える。これを、ここでは基本反射波形と呼ぶ。なお、

$$G_0(s) = e^{-sT_0} \quad (2)$$

$$G_i(s) = \frac{K_i}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + (\omega_i)^2} \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

である⁵⁾。ここに、 ω_i , ζ_i , T_0 はそれぞれ送受波器の固有角周波数、減衰係数および音波伝播時間を表す。

このモデルに現れる減衰係数や固有角周波数は、使用する音響振動子の形状や材質およびこれにつながる電気回路の特性により定まる未知パラメータであるが、これらは実際の受波信号と(1)式により求められる予測信号 $r(t)$ とのパターンマッチングにより求められる。よって、一度実験により算出しておけば、それ以降はセンサごとに定数として扱える。

Fig. 2 Fundamental reflected wave

参考のため、Fig. 2に、小石や鉄筋より成る骨材を有する通常のコンクリート供試体に対し、40kHz相当の中心周波数をもつ超音波センサを用いたときの受波信号波形およびこれに基づき（パラメータ調整して）求めた基本反射波形（予測波形）を示すが、モデル波形により実際の受波信号がかなり正確に表現できていることがわかる。なお、頭部と尾部の一部のみ、実波形を表しきれない部分があるが、これは実波形の方は一連の反射波が絶え間なく重畳して観測されていることによる。もちろん、本実験における入力としてはインパルス状のものを考えている。

以上、剥離からの単一反射波形のモデル化を行ったので、次に、これに基づく剥離の検出および位置計測を考察する。

通常の剥離の検出を考える場合、超音波センサ直下の剥離の数は1つと仮定して差し支えない。このとき受波器に得られる反射波は、最初の時間帯では、センサ設置面での表面波（つまり、圧電素子で表面を叩くときに表面に生ずる振動波（横波））が観測されるが、ある程度時間が経過すると、今度は剥離とセンサ設置面との間の縦波が観測される。しかしながら、この縦波は表面と剥離の間を何回も（減衰しつつ）往復するので、超音波センサにはこれらを重ね合わせたものが観測される。しかも、このとき重ね合わされる単位とも言うべき基本反射波は、Fig. 2に示すような紡錘形振動波形となるので、先述したように、剥離からの孤立波（単一反射波）を見出し、これにより表面と剥離との間の音波往復伝播時間を求める従来法では、どの時間帯のデータを用いても、往復音波伝播時間の計測は困難である。

したがって、本章では、先に導入した基本反射波形を用い、受波信号から単一の孤立した反射波（基本反射波）を見出すのが困難なくらい、複雑に重なり合った受波信号波形データから、剥離までの往復音波伝播時間を求める方式を提案する。

まず、反射波の受波状況であるが、センサ設置面での表面波やその他の外乱などが無いと仮定すれば、剥離が1個なので、剥離とセンサ間の往復音波伝播時間を T とすると、 T 、 $2T$ 、 $3T$ 、 $\dots$ なる周期的な時刻に反射波が受波される。また、最初に得られる反射波の振幅は入射時のものに剥離での反射率 γ_1 (< 0) および途中の減衰率 α (> 0) を掛けたものとな

るので、入射信号の振幅に $\alpha\gamma_1$ を乗じた大きさのものが観測される。2番目以降の反射波については、さらにセンサ設置面で反射し、センサ設置面と剥離との間で同様な多重反射を繰り返すので、センサ設置面での反射率を γ_2 (< 0) とすれば、直前に得られた反射波の大きさに対し更に p ($= \alpha\gamma_1\gamma_2$) 倍ずつ減衰することがわかる（なお、 p は $0 < p < 1$ の値をとる）。なお、剥離には空気や水が含まれているので、反射率 γ は常に負となる。反射率が負とは反射波の位相が入射波の位相と逆相になることを意味する。

したがって、送波後、表面波（横波）の影響がなくなった頃の適切な幅のデータウィンドウ D を考え、この中に剥離からの反射波（多重反射波）が m 個含まれているとすれば、受波信号 $r_x(t)$ は (1) 式の基本反射波形 $r(t)$ を用いて、スカラー倍の自由度を考慮して、次のようにモデル化される。

$$r_x(t) = \sum_{i=k}^{k+m} p^i r_0(t - iT) \quad (4)$$

なお、 $r_0(t)$ は (1) 式において T_0 をゼロとした基本反射波形を表す。また、 k はこのデータウィンドウに最初に含まれる反射波が第 k 反射波であることを意味している（もちろん部分的に含まれる場合も含む）。このとき、この予測受波信号波形と実際の受波信号波形 $\tilde{r}(t)$ との最適パターンマッチングを実現する p, k, T を求めれば、このときの T が求める剥離までの往復音波伝播時間となる。この最適パターンマッチングを実行するための評価関数としては、ここでは次式を採用する。

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{(\tilde{r}, r_x)}{\|\tilde{r}\| \cdot \|r_x\|} \right] \quad (5)$$

ここで、 $(\cdot, \cdot)$ および $\|\cdot\|$ はヒルベルト空間内での内積およびノルムを表す。なお、計測に際しては所定のサンプリング周波数でデータを収録することから、 θ の計算に当たっては、 $\tilde{r}(t)$ 、 $r_x(t)$ をそれぞれ数ベクトルに置き換え、通常のユークリッド空間内の内積およびノルムの計算に置き換えることになる。

したがって、剥離までの往復音波伝播時間 T は、この θ を最小化する p, k, T を求めることにより得られる。なお、最適化に際しては（つまり p, k, T の探索に当たっては）、効率的な探索が可能な Powell 法⁶⁾ が便利である。こうして求めた θ の最小値が所定のしきい値より小さくなれば、剥離があったと判断され、このときの伝播時間 T の $(1/2)$ 倍にコンクリート構造物中の音速 V を乗じれば、剥離までの距離が次式で求まる。

$$L = (T/2)V \quad (6)$$

ところで、(5) 式の最小化に当たっては、 p, k, T が最適化変数となるが、 p, T は連続的な値をとるものの、 k は 1, 2, $\dots$ などの離散的な値（整数）をとる。したがって、実際の最適化に際しては、まず k に適切な値を与え、次に固定した各 k に対し p, T の最適化を行うことが望ましい。

Fig. 3 Orthogonal projection

なお、この最適化に対しては、先に物理的な背景を考慮したため、未知パラメータが p, T の2変数になり、(5)式の最小化に多少の時間がかかる。そこで、計測に要する時間を短縮する方法として、次に $r_0(t-iT)$ ($i = k, k+1, \dots, k+m$) の一次結合係数に (4) 式のような条件を付けずに、単なる $r_0(t-iT)$ ($i = k, k+1, \dots, k+m$) の一次結合とし、 $r_x(t)$ と $\tilde{r}(t)$ のパターンマッチングを考える方法を提案する。つまり、 $r_0(t-iT)$ ($i = k, k+1, \dots, m$) を $r_k(t), r_{k+1}(t), \dots, r_{k+m}(t)$ とすれば、これらの各反射波で張られる空間に実波形 $\tilde{r}(t)$ を直交射影したときの最適近似誤差（ノルム）は

$$\delta = \frac{g(r_k, r_{k+1}, \dots, r_{k+m}, \tilde{r})}{g(r_k, r_{k+1}, \dots, r_{k+m})} \quad (7)$$

のように与えられ (Fig. 3), マッチング角 θ は

$$\theta = \sin^{-1}[\delta/\|r\|] \quad (8)$$

と近似され、 θ の最小値は T だけで行えることになる。なお、 $g(\cdot, \dots, \cdot)$ は引数に対するグラム行列式を表す。

この簡易法では、 k を離散的な値に何回か変えつつ (8) 式を T について最小化し、このとき得られた最小値を最小にする k, T を選べば、求める剥離までの往復音波伝播時間が求まる（もちろん、そのときの最小値がしきい値より小さくならなければならないが）。なお、受波信号を可視化するようにプログラム化すれば、検査担当者は k の値を直読でき、 T の決定が一層容易となる。

この簡易法は p の値を用いないため、若干信頼度が失われる嫌いがあるが、後述の実験例によると、上記の厳密な方法とほとんど同一精度の計測結果が得られる。したがって、計算時間の観点からこの簡易法を使用することもできるが、この簡易法により求めた解の近くで、上記の厳密な方法を使用するようにすれば、短時間で高精度計測がなされることになる。

3. 定在波モデルによる剥離の検出・計測

次に、骨材等による散乱で前章の多重反射波モデルが効果的に適用できない場合などを念頭に、多重反射波でなく定在波を活用した計測法を述べる。

いま、超音波センサ等によりコンクリート表面に（度重なる）パルス衝撃を加えれば、剥離と表面との間には Fig. 4

に示すような定在波が生じる。このときの基本モードの定在波の周波数は $f_1 = V/(2L)$ (Hz) である。ここに、 V はコンクリート中の音速、 L は剥離の深さである。したがって、他の倍モードの定在波の周波数は f_1 の整数倍の $f_j = jf_1$ ($j = 2, 3, \dots$) である。よって、超音波センサによる超音波の発振などにより、表面と剥離の間に

$$f_j = (jV)/(2L) \quad (j = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

なる周波数の定在波が生じる。したがって、超音波センサに受波される音圧変動データを周波数分析して得られる周波数スペクトルのピークから、(9)式により剥離までの深さ L が求められることになる。

なお、周波数分析を行う方法としては汎用のFFT（高速フーリエ変換）やMEM（最大エントロピー法）⁷⁾などがよく知られているが、ここでは計測対象の音圧変動データが (9) 式のような整数倍の周波数をもつことが知られているため、より高精度で、かつ安定な計測が可能となるよう、現象を利用した計測法、つまり音圧変動をモデル化した計測法を提案する。つまり、剥離との間に生ずる定在波のうち高周波成分ほど減衰が大きいことから、短い時間区間を考えれば、センサに観測される音圧変動 $z(t)$ は、次のように基本モードから第4モードまでの4つのモードの正弦波の一次結合により近似できるとした。

$$\begin{aligned} z(t) &= \sum_{j=1}^4 x_j(t) \\ &= \sum_{j=1}^4 \{a_j \sin(\omega_j t) + b_j \cos(\omega_j t)\} \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、 $\{\omega_j\}$ は剥離までの深さ（距離） L に対する定在波の第 j モードの角周波数であり、 $\omega_j = j \times 2\pi V/(2L)$ ($j = 1, 2, 3, 4$) により与えられる。(10)式の $x_j(t)$ は微分方程式

$$\frac{d^2 x_j}{dt^2} = -\omega_j^2 x_j \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (11)$$

を満足するので、いま、 $\mathbf{x}(t) = (x_1(t), \dot{x}_1(t), x_2(t), \dot{x}_2(t), x_3(t), \dot{x}_3(t), x_4(t), \dot{x}_4(t))^T$ なる状態ベクトルを導入すれば、定在波の第4モードまでの音圧変動に関わる状態方程式は次のように表される。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (12)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} A_1 & & & 0 \\ & A_2 & & \\ & & A_3 & \\ 0 & & & A_4 \end{bmatrix}, \\ A_j &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_j^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 $\mathbf{w}(t) = (0, w_1(t), 0, w_2(t), 0, w_3(t), 0, w_4(t))^T$ は遅移雑音であり、 $w_j(t)$ ($j = 1, 2, 3, 4$) はそれぞれ平均値ゼロ、

Fig. 4 Stationary waves generated

分散 σ^2 の互いに独立な白色ガウス雑音とする。このような遷移雑音を考えたのは、いま考えている短い時間区間内での音圧変動の減衰を補償するためである。

一方、センサ自らに発生するノイズおよび第5モード以上のすべての高次モードの定在波をまとめたものを雑音とみなせば（付録参照），超音波センサにより与えられる観測方程式は次式となる。

$$y_k = Hx_k + v_k \quad (k = 0, 1, \dots) \quad (14)$$

ここで、 $H = [1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0]$ であり、 y_k, v_k はそれぞれサンプリング時刻 $k\Delta T$ (ΔT はサンプリング周期) における観測値および観測雑音を表す。このとき、観測のサンプリング時刻にあわせて (12) 式をサンプル値化すれば

$$x_{k+1} = Fx_k + w_k \quad (15)$$

ここで、 x_k, w_k はそれぞれサンプリング時刻 $k\Delta T$ における状態ベクトルおよび遷移雑音ベクトルを表し、それぞれ

$$x_k = x(k\Delta T) \quad (16)$$

$$w_k = \int_{k\Delta T}^{(k+1)\Delta T} \Phi((k+1)\Delta T - \tau) w(\tau) d\tau \quad (17)$$

である。なお、 F は次式で定義される遷移行列である。

$$F \triangleq \Phi(t) |_{t=\Delta T} = \mathcal{L}^{-1}[(sI_8 - A)^{-1}]_{t=\Delta T} \quad (18)$$

ただし、 I_8 は 8×8 単位行列である。また、上記の w_k は平均値ゼロの白色ガウス雑音であり、その共分散行列 W は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W &= E[w_k w_k^T] \\ &= \int_0^{\Delta T} \Phi(\Delta T - \tau) \Sigma \Phi(\Delta T - \tau)^T d\tau \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、 Σ は遷移雑音 $w(t)$ の共分散行列 $\Sigma = E[w(t)w(t)^T]$ を表し、先の条件より $\Sigma = \text{diag}\{0, \sigma^2, 0, \sigma^2, 0, \sigma^2, 0, \sigma^2\}$ となる。ここに、 $\text{diag}\{\cdot, \cdot, \dots, \cdot\}$ は引数を要素とする対角行列を表す。

以上述べたように、第5モード以上の定在波とセンサ本来の雑音を加えたものを観測雑音としているが、多数のモードの定在波を一次結合したものは統計的に白色ガウス雑音に近い性質を持つ（付録参照）ので、定在波の第4モードまでの音圧変動に関わる状態ベクトル x_k の推定は、次のカルマンフィルタによりなされる⁸⁾。

$$\hat{x}_{k/k-1} = F\hat{x}_{k-1/k-1} \quad (20)$$

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k \gamma_k \quad (21)$$

$$\gamma_k = y_k - H\hat{x}_{k/k-1} \quad (22)$$

$$P_{k/k-1} = FP_{k-1/k-1}F^T + W \quad (23)$$

$$P_{k/k} = P_{k/k-1} - K_k HP_{k/k-1} \quad (24)$$

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

ただし

$$K_k = P_{k/k-1}H^T\Lambda_k^{-1} \quad (25)$$

$$\Lambda_k = HP_{k/k-1}H^T + R \quad (26)$$

であり、 R は観測雑音 v_k の分散を表す。

しかしながら、剥離までの深さ L および観測雑音分散 R は未知であるため上のカルマンフィルタは直接には使用できず、これら2つのパラメータを $\theta = (L, R)^T$ と表し θ に候補を与えれば、上記のカルマンフィルタが適用できる。なお、この θ の推定に際しては、実現した音圧変動に最近接する音圧変動を（予測値として）生成できるパラメータが真のパラメータとみなせることから、剥離までの深さ計測は結局、次のような尤度関数の最大化に帰着される。

$$J(\theta) = \prod_{k=1}^K p(y_k/\theta, Y^{k-1}) \quad (27)$$

ここで、 $p(y_k/\theta, Y^{k-1})$ は観測情報 $Y^{k-1} = \{y_j; 0 \leq j \leq k-1\}$ および θ の下での観測値 y_k の条件付密度関数であり

$$\begin{aligned} p(y_k/\theta, Y^{k-1}) &= \frac{1}{[2\pi\Lambda_k(\theta)]^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2\Lambda_k(\theta)} \right. \\ &\quad \left. \times \{y_k - H\hat{x}_{k/k-1}(\theta)\}^2 \right] \end{aligned} \quad (28)$$

ただし、 $\hat{x}_{k/k-1}(\theta)$ および $\Lambda_k(\theta)$ はそれぞれパラメータ θ の下での（カルマンフィルタによる）状態推定値 $\hat{x}_{k/k-1}$ および観測予測誤差共分散行列 Λ_k を表す。なお、(27) 式の最大化に当っては、 (L, R) 空間ではなく、 R に自然対数をとった $(L, \ln R)$ 空間で探索した方が効率的である。もちろん、探索には Powell 法が効果的である。

この方法は、結局のところ、所定の個数の定在波を状態変数として選び、これらを一次結合したものが最大尤度で観測信号（センサ出力）に一致するように剥離の深さを求めるようにしたものである。本論文では、状態変数として定在波の第1～第4モードの4モードを用いたが、計算時間は若干増加するものの、第1～第5モードの5モードを用いれば、より高精度な計測が可能である。

4. 実験および検討

提案システムの有効性を確認するため、ここでは中心周波数が 400kHz の超音波センサを用い、骨材（小石より成る）の入っているものとそうでないものへ、それぞれ提案方式「多重反射波モデルによる計測法」および「定在波モデルによる計測法」を適用し、各々の有効性を示す。

なお実験では、コンクリート供試体中に剥離を設けることが困難であったので、剥離の代りに供試体底面の位置検出、つまり厚み計測を行うことにより、その有効性を示す。

4.1 多重反射波モデルによる剥離の検出・計測

ここでは、縦、横、厚みがそれぞれ 600mm, 250mm, 48mm の直方体形状の骨材の入っていないコンクリート供試体 (Fig. 5 参照) を用いた。この供試体の表面中央にセンサ (中心周波数 400kHz) を設置したときの受波信号波形を Fig. 6 に示す。図より、送波直後はセンサ設置面での表面波などが観測されるが、送波後しばらくして底面からの多重反射波がはっきり確認できる (D_1 の部分) ことがわかる。

いま、 D_1 (データウィンドウ [49.0 ~ 117.6 μ s] に相当) の部分のデータに多重反射波モデルを適用したときのマッチング角の推移波形を Fig. 7 に、横軸に往復音波伝播時間 T をとり、示す。なお、解析の結果、マッチング角が p , T に対し多くの局所解 (極小値) を有することがわかったため、ここでは計測の信頼度を上げるため、 T をパラメータとして T を少しずつ変え、各 T に対し p のみを最適化し最小マッチング角を実現する T を求めることにした。なお、 k に対しては $k=2$ が Fig. 6 より直ちに直読できたので、ここでは $k=2$ とし、 k を未知パラメータより除外した。

このようにして、 $k=2$ に対し Fig. 7 のようなマッチング角の推移波形が得られたが、図では多くの小さなリップルが生じている。これは、基本反射波形が紡錘形振動波形であるため超音波センサの振動周波数の半周期ごとにマッチングが局所的に改善されるからである。結局、深い極小値、つまり最小の極小値を与える時間 T が求める剥離 (ここでは底面) までの往復音波伝播時間を与えることになる。なお、この伝播時間のたとえば (1/2), (1/3) のような伝播時間を与えれば、それだけ多重反射波の数も増加し実波形とのマッチング角も必然的に小さくなるので、結局は『 T を大きい値から小さくしていったときに初めて得られる深い極小値 (Fig. 7 の A に相当) を与える時間』 $T = 25.8\mu$ s が供試体底面までの一往復音波伝播時間に相当することになる。

いま、音速をコンクリート中の標準的な音速 3,500m/s とし、底面までの距離を計算すると、 $(1/2) \times 25.8\mu$ s $\times$ 3,500m/s = 45.2mm となり、実測距離 48mm に非常に近いものが得られる (計測誤差率にして 5.83%)。このときの計算時間は、たとえばノート型パソコン Dell inspiron 7500 ではほぼ 9 秒である。簡易手法を用いれば、計測値は 45.0mm, 計算時間は

Fig. 5 Test specimen O_1 (without aggregate) and sensor location

Fig. 6 Received signal wave for the test specimen O_1

Fig. 7 Transition of the optimal matching angle (for the test specimen O_1)

5 秒となり、計測精度をほとんど変えずに計算時間を短縮化できる。

4.2 定在波モデルによる剥離の検出・計測

次に、骨材の入っている供試体 (Fig. 8 参照) に対し定在波モデルによるコンクリート供試体の厚み計測を行ってみる。このときの骨材は直径 1cm 程度の小石である。但し、直径が 10mm 程度の 2 本の鉄筋が水平方向にほぼ均一に配されている。つまり、供試体の中央付近で、前面と後面との間をほぼ 3 等分する点に配置されている (図には鉄筋の頭の部分が右側面に示されている)。このとき得られた受波信号波形を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 をみると、受波信号波形の前半部分は Fig. 6 の場合と異なり多重反射波がよく読みとれない。これは、センサ設置面に生ずる表面波のみならず、鉄筋や小石などによる多重反射波が複雑に重畳しているからであると思われる。それだけでなく、これらが減衰した後も、Fig. 6 のような多重反射波が読みとれない。したがって、この場合は、多重反射波モデルが適用しにくいことがわかる。したがって、ここでは、ウィンドウ D_2 ([73.0 ~ 193.0 μ s] に相当) の部分のデータに対し定在波モデルを適用し、供試体の厚みを計測してみる。

このとき、第 1 ~ 第 4 モードの定在波を状態変数、それ以外のモードをまとめたものを観測雑音と見なすため、超音波センサから得られる原データをそのまま使用すれば、センサの中心周波数付近 (400kHz 前後) に大きな信号が現れるため SN 比が劣化し計測誤差が増大する恐れがある。そのため、ここでは原データを、カットオフ周波数が 50kHz 程度の

Fig. 8 Test specimen O_2 (with aggregate) and sensor location

Fig. 9 Received signal wave for the test specimen O_2

低域通過型パワースフィルタに通し、センサ中心周波数付近の周波数成分を除去することにした。なお、その際、バイアスが若干現れたので、バイアス分を除去することにした。

以上の前処理を行った後、定在波モデルに基づく計測方法を適用し、厚み計測を行ってみた。このときに得られた尤度関数を等高線にて Fig. 10 に示す。図より、等高線は $\ln R$ 軸（縦軸）とほぼ平行となっており、尤度関数値は R からほとんど影響を受けないことがわかる。試みに、 $\ln R$ の値を -6.5 においてみると、このときの等高線を最大にする L は 181.6mm となる。図では等高線を粗に描いているが、密に描けばどのような $\ln R$ を与えても最適な L は $L = 181.6\text{mm}$ と求まる。よって、最大値を与える厚みは実際の厚み 184mm に極めて近い値（計測誤差率にして -1.30% ）が得られる。

なお、このときの計算時間は、前節と同一のノート型パソコン（Dell inspiron7500）で9秒程度である。この計算時間のほとんどは等高線の計算を行うのに費やしている。ディスプレイ上に等高線を描かせる時間（1秒程度）を加えても十分高速計測可能であることがわかる。

ここでは、検査担当者の安心感を高めるため等高線を描き、視覚に訴える方法を示したが、実際には、本文で述べたように Powell 法（最適化手法）により尤度関数を最大化する L を自動探索すれば、等高線の粗密に関係なく、自動（automatic）にわずか1秒未満で剥離の検出、計測が可能になる。ところで、参考のため第1～第5モードの5モードを使用して上記線形ダイナミックモデル波により計測を行ってみると、計測値は 182.4mm （計測誤差率： -0.86% ）となり、4モード使用のときに比べて計算時間は若干（10%程度）

Fig. 10 Contour lines of the likelihood function (for the test specimen O_2)

増加するが、更に高精度な計測が可能になることがわかる。

以上、提案システムの有効性をコンクリート供試体の底面の検出により示したが、参考のため剥離の入った実際のコンクリート塊を入手し、これについても試してみた。その結果、断面部に現れた剥離の表面からの深さが 41mm 、 130mm の二つの（表面に対向する）面性状剥離に対して、多重反射波モデル、定在波モデルいずれの方式でも、 35mm 、 112mm 位の計測値がそれぞれ得られ、比較的良好な計測値が得られることがわかった。また、剥離を模擬した供試体（その後作成）によると、剥離（発泡スチロールで作成）は表面に対して 40 度くらい傾いても、提案方式は有効であることがわかったと共に、超音波が当たった箇所の深さが計測されることがわかった。つまり、表面より浅い方は 103mm 、深い方は 136mm の傾斜角がほぼ 40 度の 50mm 平方の模擬剥離の位置計測に対しては、多重反射波モデルでは 133.5mm が、また定在波モデルでは同一データに対し（多重反射波モデルの場合より短かめの） 107.3mm の値が得られた。

更に、検出可能な剥離のサイズについても情報を得るため、上記のコンクリート供試体に設けた表面から 130mm 下方の 10mm 平方の剥離に対し位置計測を試みたところ、多重反射波モデルでは 139.5mm が、また定在波モデルでは 110.0mm の値が計測され、提案方式により超音波の波長程度の剥離の検出および位置計測がほぼ満足のいく形でなされることがわかった（ちなみに、コンクリート中の音速を $3,500\text{m/s}$ として 400kHz の超音波センサの波長は 8.75mm ）。また、剥離の面積がこのように小さい場合は、多重反射波モデルの方が定在波モデルの方法より優れていることもわかった。これは剥離が小さいと、低次モードの定在波が生じにくいことと関係があるものと思われる（ちなみに、4次モードの定在波の波長は 65mm ）。

今後、剥離の位置、傾斜およびサイズを種々変えた実験を行い、多重反射波モデルおよび定在波モデルの方法の適用範囲およびそれらの得失など更に詳細な検討を加えて行きたい。

5. 結 言

本論文では、多重反射波モデル、定在波モデルに基づくそれぞれ2つのコンクリート構造物の非破壊検査手法の方式およびそれらの有効性を示した。なお実験では、コンクリート供試体の底面や中に設けた発泡スチロール製の擬似剥離の検出・位置計測により提案方式の有効性を示したが、一部、実際の剥離のあるコンクリートブロックに対しても有効性を確認した。

以上により、提案方式は、従来、超音波センサの適用が困難であると言われていたコンクリート構造物の剥離の非破壊検査に超音波法として新境地を開くものとして有意義であると共に、本手法により現在あるいは将来に亘って大きな問題となっているコンクリート構造物の非破壊検査に大きな指針を与えることができた。

なお、実用化に当たっては、コンクリートの剥離とコンクリートの底面（地山との接触面あるいは煙突の内面）との識別も重要になる場合もあるが、設計時のデータ等をデータベースとしてパソコンに組み込むようにしておけば、これらの識別は容易である。また、本システムを用いるに当って、コンクリート中の音速も計測精度に影響を与えるが、現場では深さによっても異なるが、10～20mm程度の誤差はメンテナンス上許容範囲と言われており、特に問題になるとは思われない。

今後は、提案システムを実際の非破壊検査に使用し、どのようなサイズや形態のものまで検出できるか、更に検討を押し進めたい。更に、本論で提案した2つの方式はいずれも時間領域の方法であるが、(位相情報がなくなるものの)これらの手法を簡易化した周波数領域の方法も考えられる。これらについては、手法の間で、また時間域・周波数域の領域の間で計測方式の得失を比較しつつ、稿を改めて報告したい。

最後に、本研究の遂行に際し、助成を賜った「財団法人東日本鉄道文化財団」および「中国電力技術研究財団」に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 魚本, 加藤, 広野: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版 (1990)
- 2) 日本道路公団試験研究所試験研究推進委員会材料施工研究会: 材料施工資料 (第8号) 非破壊検査法, 日本道路公団試験研究所, 試験研究所技術資料第128号 (1996)
- 3) JTA 保守管理委員会編: トンネルの新しい検査手法, トンネルと地下 (シリーズ), 27-1～11 (1996)
- 4) 大島, 吉岡: コンクリート構造物の非破壊検査の適用例—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)
- 5) 田中, 武居, 山根: 超音波センサによる溶鉱炉の炉壁異常診断, 計測自動制御学会論文集, 34-12, 1791/1799 (1998)
- 6) J. コワリック, M.R. オスボン (山本・小山共訳): 非線形最適化問題, 培風館 (1978)
- 7) 南 茂夫 編著: 科学計測のための波形データ処理, CQ出版 (1988)
- 8) 田中正吾: 計測システム工学, 朝倉書店 (1994)

Fig. A Autocorrelation function

Fig. B Histogram of the amplitude

《 付 録 》

A. 観測雑音の白色ガウス性について

本文で述べたように、提案手法においては、第5モード以上の定在波成分およびセンサ本来の雑音をまとめたものを観測雑音とみなしているの、この統計的性質について考える。

いま、厚さ 200mm のコンクリート内に生じる定在波の第5から第40モードまでの周波数の正弦波を、振幅をすべて1として加え合わせた $z(t) = \sum_{j=5}^{40} \sin(\omega_j t)$ に対し自己相関関

数 $\phi_{zz}(\tau)$ を求めると、Fig. A のような波形となる。ただし、 $\phi_{zz}(0)$ の値を1に規格化している。図より、最大値を与える時刻 $\tau = 0$ からわずか $11\mu s$ 後 (基本モードの周期長の10%値) の自己相関関数値は最大値 $\phi_{zz}(0)$ のわずか5%以下となり、白色雑音の自己相関関数 (デルタ関数) に酷似していることがわかる。なお、定在波の周期性により、 $\tau = 0$ 以外に、基本モードの周期長の整数倍の時刻ごとに強い相関を持つが、これはごく短い時間区間に限られるため全体的に白色とみなして問題はない。

また、ガウス性については、 $z(t)$ を 5MHz でサンプリングしたときの振幅の時系列データに対し、微小な間隔 Δz (ここでは 0.01) で分割したときの頻度分布を求めれば、Fig. B のようになり、近似的にガウス分布とみなせる。

以上の2つの考察に加え、観測雑音にはセンサ本来の雑音も含まれるため、さらに観測雑音の白色ガウス性は強められる。

[著者紹介]

田中正吾（正会員）

1976年、九州大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年同大学助手を経て、80年山口大学工学部電気電子工学科助教授。91年同大学電気電子工学科教授、現在に至る。インテリジェント計測、異常診断、非破壊検査などの理論および応用研究に従事(工学博士)。電気学会、システム制御情報学会などの会員。