

I-101

超音波散乱非破壊評価へのウィグナー分布の応用

小野測器 音響技研 正員 武捨 貴昭
 東海大学 海洋学部 正員 北原 道弘
 東海大学 海洋学部 正員 迫田 恵三
 小野測器 音響技研 川浦 淳一

1. はじめに

構造部材内に存在する欠陥の定量的検出を目的として、基礎実験と瞬時スペクトル解析を行ったので報告する。欠陥を有する部材に超音波を送信し、受信探触子で検出される超音波信号を周波数変換して得られるスペクトルが、被測定材料の内部情報を含んでいることに着目し、欠陥形状とスペクトル特性の関係について考えた。対象はコンクリートとし、瞬時スペクトルとしてウィグナー分布を採用した。

2. 受信波形の解析モデル

送信側探触子から材料中に発信された超音波は、内部の欠陥により反射、屈折、回折され、様々なモードの弾性波となり受信側探触子により受信される。入力波形が通常用いられるパースト波でなくパルス波である場合、周波数帯域が広いと、欠陥により生じる各モード波について、異なった応答特性及び遅延特性を有する並列入出力系（Fig. 1）としてモデル化することができる。Fig. 1 で系が線型であると仮定すると、各モードごとのインパルス応答 $h_i(t)$ について、入力 x と出力 y の関係は次のように表わせる。

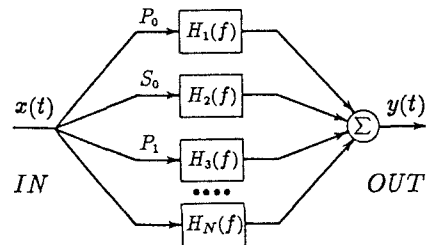


Fig.1 Input/output system with multiple paths

$$y(t) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\infty} h_i(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

これは、周波数領域で次のように書ける。

$$Y(f, T) = \sum_{i=1}^N H_i(f) X(f, T) \quad (2)$$

式（2）はフーリエ変換で考えると、 $T = 1/\Delta f$ （ Δf は F F T の分解能）なる関係があることから、時間的な分解能を上げると、周波数分解能が低下する（逆も言える）という問題点が存在する。

一般に、コンクリート等の材料では縦波の波速が 3 0 0 0 m/sec 以上となることから、求められる時間分解能は μ sec のオーダーであり、このため、周波数分解能が 1 0 0 kHz オーダーとなり、通常の F F T に立脚した周波数解析では、散乱波動のスペクトル特性を得るための十分な分解能が得られにくいのが現状である。

3. ウィグナー分布

パルス音のような非定常音について、その過渡的なふるまいを調べる手段として現在注目されている分析手法にウィグナー分布がある。これは非定常音に対して拡張された瞬時パワースペクトルという意味を持ち、時々刻々と波形が変化する信号についても高い分解能でスペクトル特性を把握できる。このウィグナー分布、 $W(f, t)$ は次式で定義される。¹⁾

$$W_y(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t + \frac{\tau}{2}) y^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

式（2）の応答出力 Y と、 y のウィグナー分布 W_y の関係は、ウィンドウ関数を $\omega(t)$ で表わすとき

$$|Y(f, t)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_y(\tau, g) W_{\omega}(\tau - t, f - g) d\tau dg \quad (4)$$

となる。上式は式（2）で述べた T あるいは Δf に直接関係しない。これより、ウィグナー分布は材料の欠陥により生じるモード波の特性を、分解能の制約を受けずに詳細に調べることが可能となることがわかる。

4. 実験

三種類の欠陥：(1)クラック状、(2)球形ボイド状、(3)円筒ボイド状、について実験を行った。

・試験体仕様： コンクリート供試体：20x20x20 cm

・欠陥の大きさ (2a)：1.4cm, 2.8cm, 4.2cm の 3 種類 (2a はクラック長、またはボイド直径)

・探触子： KarlDeutsch社製 S40HB 0.1-0.3 (送波)、 S40HB 0.04 (受波)

・実験方法： 超音波探触子からパルス幅 15 μ sec のパルス波を供試体内部に発信し、供試体の透過側で前方散乱波を超音波探触子により受信し、ウェーブフォーム・アナライザー (AF-550：小野測器) で A/D 変換を行った。このデータについてパソコン上でウィグナー分布を得るに必要な波形解析を実施した。

5. 解析結果 Fig. 2 に (a) 欠陥の無い供試体、(b) クラック状、(c) 球形ボイド状、(d) 円筒ボイド状の欠陥に対する透過散乱波に対するウィグナー分布を示す。この例では、欠陥の大きさは $2a=4.2$ cm である。図の横軸が時間 (μ sec)、縦軸が周波数 (kHz) である。応答レベル Max ~ -5 dB の範囲のウィグナー分布を白色で表示した。なお、データ解析は欠陥の大きさの異なるものとの比較を行うため、1.4 cm 及び 2.8 cm の大きさのものについても実施した。これらの解析結果から、欠陥形状によりスペクトル特性が変化することが確認された。この傾向は、概ね、次の通りである。

- (1) 球形ボイドの場合、パルス波に対する応答時間、周波数範囲共に広い。クリーピング波の生成のためと思われる。
- (2) クラック、円筒状ボイド共に、直接入射・到達 (P_0) 波のパワーが小さい。
- (3) クラックの場合、球形ボイド、円筒状ボイドに比較し、時間軸に対しても周波数軸に対しても、減衰の少ないスペクトル特性を示す。

5. まとめ ウィグナー分布を用いて超音波パルスによる散乱波のスペクトル特性を詳細に調べることにより、欠陥形状による応答特性に明確な差が存在することが確認できた。これはパルス波と各種欠陥との相互作用により発生する各種モード波の相違によるものと考えられる。この各モード波の詳細については現在検討中。

参考文献 1) T.A.C.M. Claasen, et al., The Wigner distribution - a tool for time-frequency signal analysis, Part I-III, Philips J. Res., 35, 1980.

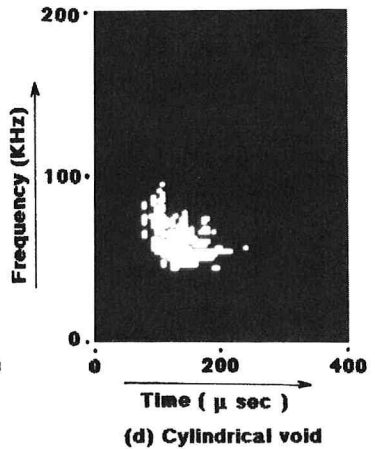
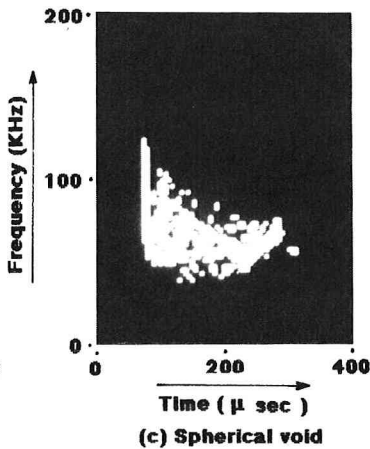
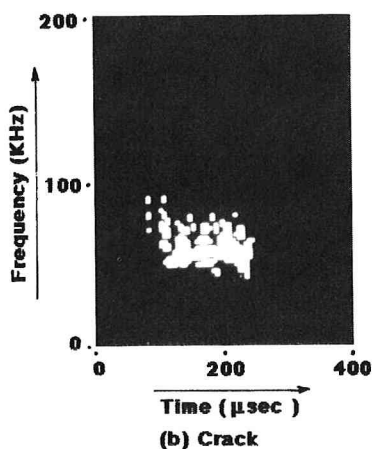
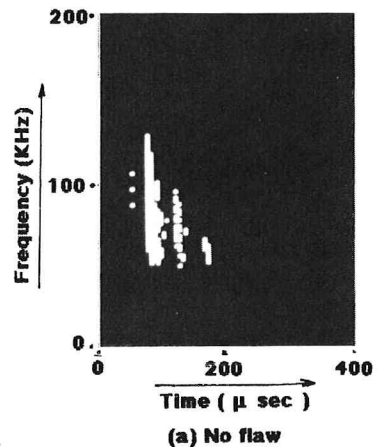


Fig. 2 Wigner distribution