

欠陥のモデル化と散乱波形特性

東海大学海洋学部 学生員 ○有吉 央
 東海大学海洋学部 学生員 川上篤史
 東海大学海洋学部 正員 北原道弘

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、基礎実験と得られた波形の時間一周波数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、受信側探触子で検出される超音波信号を時間一周波数解析して得られる瞬時スペクトルが、被測定材料の内部情報を含んでいることに着目し、欠陥形状と瞬時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、時間一周波数解析の方法としてウィグナー分布を採用した。

2. ウィグナー分布

超音波信号 $x(t)$ のウィグナー分布は次式により定義される。

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

ここに、 x^* は x の複素共役である。いま、非定常信号 $x(t)$ に対して拡張された(自己)相関関数 R_x を

$$R_x(t, \tau) = x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) \quad (2)$$

と書くことにすると、ウィグナー分布 W_x はこの R_x のフーリエ変換と見ることができる。

$$W_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

ここで注目すべきは、 τ 軸は時間軸 t に独立と見なすことができ (Fig.1), 各時刻 t に対し R_x のフーリエ変換を実行できる点にある。即ち、スペクトログラムのように時間ウィンドウをずらしながらフーリエ変換を行う必要はない。これが、ウィグナー分布が高い時間一周波数分解能を有する所以であり、ここで非定常信号の解析に採用する理由でもある。

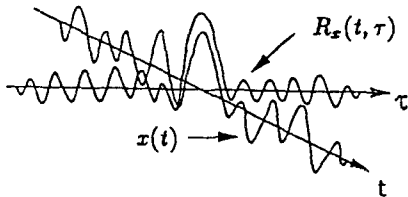


Fig.1 Schematic view of Wigner distribution

3. ウィグナー分布の特性

ウィグナー分布は多くの有用な特性を有するが、非破壊評価の観点から有用と思われるいくつかの特性を列挙すると次のようになる。

(a) 周波数に関する積分は瞬時パワーに等しい。

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) df = |x(t)|^2 \quad (4)$$

(b) 時間に関する積分はパワースペクトルに等しい。

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) dt = |X(f)|^2 \quad (5)$$

(c) 周波数軸に関する重心は群遅延に等しい。

$$\int_{-\infty}^{\infty} t W_x(t, f) dt / \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) dt = t_g(f) \quad (6)$$

(d) 時間軸に関する重心は瞬時周波数に等しい。

$$\int_{-\infty}^{\infty} f W_x(t, f) df / \int_{-\infty}^{\infty} W_x(t, f) df = f_i(t) \quad (7)$$

これより、ウィグナー分布は時間一周波数域における信号 $x(t)$ のエネルギー分布と解釈することができる。

4. 計測システムと欠陥モデル

前方散乱場の計測システムを Fig.2 に示す。ファンクションジェネレーターで入力波形を作り、パワーアンプで増幅する。送信側探触子よりコンクリート供試体に波形を入力し、受信側探触子で前方散乱波を受信する。この波形を記録し、パソコン上でウィグナー分布のアルゴリズムに従い時間一周波数解析を実行する。コンクリート供試体は計 10 個作成した。1 個は欠陥のない供試体であり、参照信号を得るために用いられる。残りの 9 個は欠陥を含む供試体である。欠陥の種類として、(a) シリンダー状の空洞、(b) 球状ポイド、(c) 貫通クラックを選び (Fig.3), それぞれに対し、欠陥の大きさ $2a$ を $2a = 4.2\text{cm}$, 2.8cm , 1.4cm とした。供試体の大きさ b はすべて $b = 20\text{cm}$ である。Fig.2(B) における水槽中の水中マイクロホンには送信側探触子から実際に出力される波形を確認するために用いられる。

5. 前方散乱場のウィグナー分布

欠陥を含まない供試体を通じた波形を参照信号 $n(t)$ とし、そのフーリエ変換を $N(f)$ とする。Fig.3 に示した欠陥を含む供試体の前方散乱場を $x(t)$ とし、そのフーリエ変換を $X(f)$ とする。周波数域において、散乱信号 X の参照信号 N によるデコンボリューションを次のように行う。

$$H(f) = \frac{X(f)N^*(f)}{N(f)N^*(f)} \quad (8)$$

$H(f)$ を再びフーリエ逆変換し、修正時間信号 $h(t)$ を得る。この $h(t)$ のウィグナー分布を Fig.4 ~ 6 に示す。シリンダー状欠陥 (Fig.4)、ボイド状欠陥 (Fig.5)、クラック状欠陥 (Fig.6) それぞれのエネルギー分布に特徴があることがわかる。各図中右上に物理的意味を図示したが、この詳細は当日報告する。

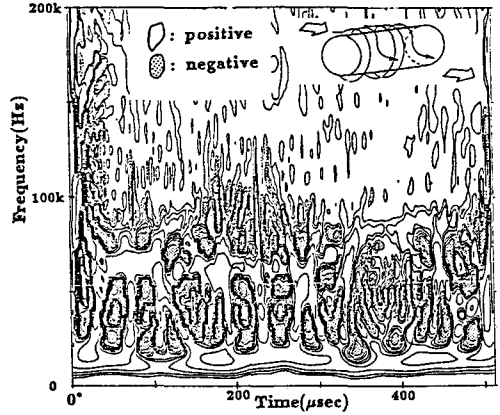


Fig.4 Wigner distribution of processed signal (4.2cm cylinder)

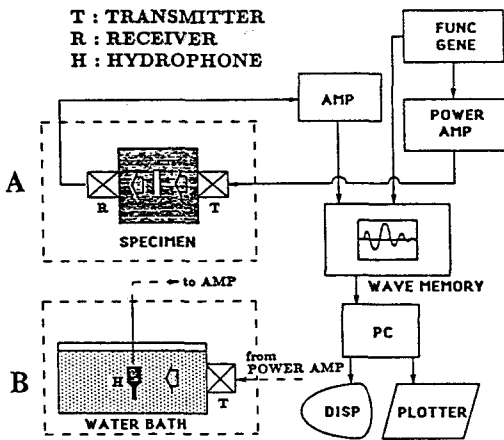


Fig.2 Measuring system of forward-scattered waves

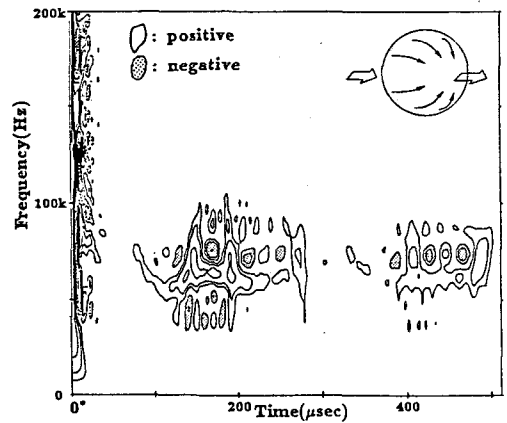


Fig.5 Wigner distribution of processed signal (4.2cm void)

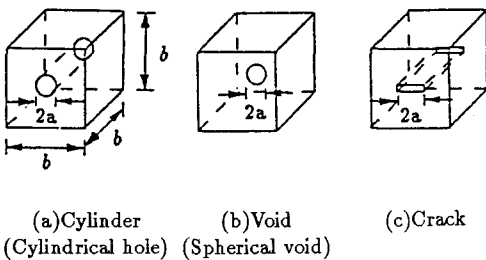


Fig.3 Specimens with defects in concrete

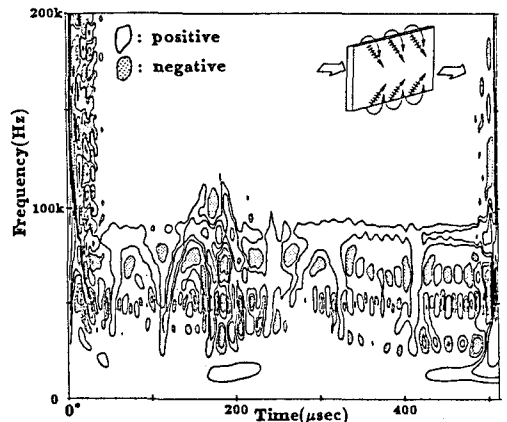


Fig.6 Wigner distribution of processed signal (4.2cm crack)