

東北大学 学生員 ○高橋拓馬
 東北大学 学生員 岸部大蔵
 東北大学 正員 北原道弘

1. はじめに

欠陥が弾性体中に分布して存在する場合、この弾性体中を伝播する波動場は欠陥により散乱され、散乱に伴って波動場は減衰する。逆に、この散乱減衰量を計測できれば、欠陥の分布状態に関する情報を抽出できる可能性がある。散乱減衰を特徴付けるパラメータは波動場の振幅の減少を支配する散乱減衰定数であり、分布欠陥中の波動場において散乱減衰は周波数に依存する。

ここでは、分布欠陥による散乱減衰を計測するために超音波パルスエコー実験を行った。実際に、欠陥を含む供試体を作製し、計測結果と数値解析結果とを比較することで計測精度の確認と散乱減衰の周波数特性について調べた結果を報告する。

2. 散乱減衰

図-1に示すように、弾性母材内に形状と大きさの等しい円形クラックがランダムに分布している場合を考える。クラックの方向に関しては、クラック面の法線方向は同一方向（ x_3 軸方向）に揃っているとす。また、各クラック間の距離は多重散乱の影響が無視できる程度に離れているとする。

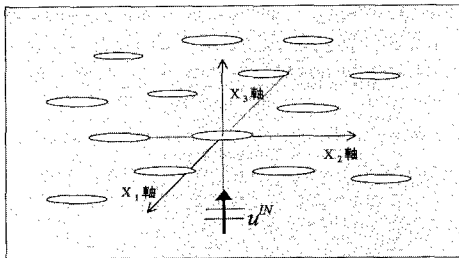


図-1 円形クラックと波動場 u

いま、円形クラックが分布した場合の波動特性を調べるために複素波数を次のように導入する。

$$k_L(\omega) = \omega/c_L(\omega) + i\alpha(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $c_L(\omega)$ が位相速度、 $\alpha(\omega)$ が散乱減衰定数である。このとき x_3 軸方向に伝播する平面波動場は次のように書ける。

$$u(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha(\omega)x_3} e^{i[(\omega/c_L(\omega))x_3 - \omega t]} \quad (2)$$

上記波動場 $u(x)$ の時間平均インテンシティーは次のように求まる。

$$\langle I \rangle = \langle I_0 \rangle e^{-2\alpha(\omega)x_3} \quad (3)$$

ここで、インテンシティーとは波動の伝播方向を表す単位ベクトル p に垂直な単位面積、単位時間当たり

のエネルギーである。また、 $\langle I_0 \rangle$ は基準点 $x_3 = 0$ における時間平均インテンシティーである。

一方、インテンシティーの変化量が、個々の散乱体により散乱されたパワーの減少量と等しいことと、散乱断面積の定義¹⁾により、波動の進行方向のインテンシティーの変化量を支配する微分方程式が得られる。

$$\frac{d\langle I \rangle}{dx_3} + NP(\omega)\langle I \rangle = 0 \quad (4)$$

ここで、 N は単位体積中の円形クラックの平均個数であり、 $P(\omega)$ は一個の円形クラックによる散乱断面積である。この方程式の解は次のように求まる。

$$\langle I \rangle = \langle I_0 \rangle e^{-NP(\omega)x_3} \quad (5)$$

式(3)、(5)から、散乱減衰定数は次のようになる。

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{2}NP(\omega) \quad (6)$$

上式より、散乱断面積 $P(\omega)$ を計算で求め、平均個数 N を与えることにより散乱減衰率 $\alpha(\omega)$ を決めることができる。逆に、散乱減衰率 $\alpha(\omega)$ を計測等により決定できれば、平均個数 N を推定できる可能性がある。

3. 散乱減衰計測

3.1 計測概要

本研究では、図-2に示すような装置構成のもとで水浸法により計測を行った。水浸法を採用した理由は、探触子の接触圧の影響を排除するためである。

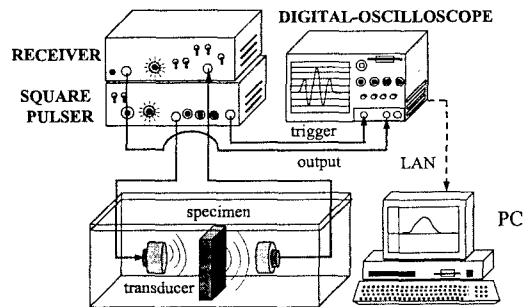


図-2 計測装置

スクエアパルサーにより発せられた電気信号は水浸探触子を駆動して、水中に超音波を送信する。この超音波は水を介して供試体内に伝播し、円形クラックによる散乱のため減衰し、また水を介して反対側の探触子により受信され、デジタルオシロスコープにより時間波形として表示される。この波形データをパソコンに転送し、フーリエ変換により波形処理する。ここで供試体界面により反射を繰り返した波も透過し測定されるが、今回計測するのは直接透過した波動である。

3.2 送信波形

ファンクションジェネレーターを用いて送信波形を生成することは可能であるが、ここではスクエアパルサーを採用した。図-3にこの装置による送信波形と受信波形の概要を示す。これにより、今まで以上に高電圧の電気信号を送信することができ、受信波形の感度の向上が期待できる。

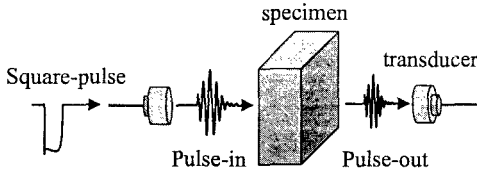


図-3 送信波形

3.3 供試体の作製方法

前節で示した装置により波形を計測するが、探触子や水中などの伝播経路の影響を取り除き、円形クラックによる散乱減衰のみを取り出す必要がある。そこで図-4に示したように、同供試体の板状のセメント表面に、円形のくぼみを与えない部分を作り、この部分で参照波形を計測する。なお、このセメントのポアソン比 ν はほぼ0.2である。

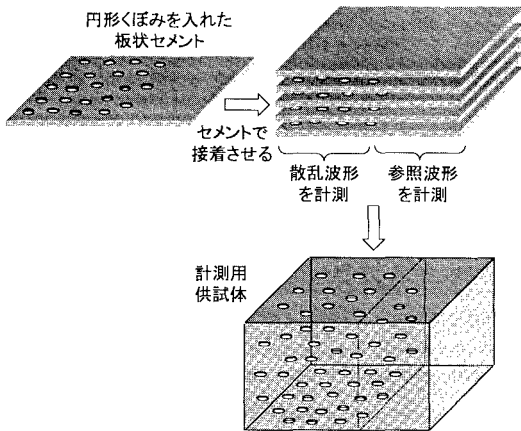


図-4 供試体の作製過程

3.4 散乱減衰定数の算出

円形クラックを含まない部分での供試体を用いた場合の透過波を u_0 、円形クラックを含む部分での透過波を u_1 とすると母材の波動場は式(2)より次のように表される。

$$u_0(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_0(\omega)x_3} e^{i(\omega/c_{L0}(\omega))x_3 - \omega t} \quad (7)$$

$$u_1(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_1(\omega)x_3} e^{i(\omega/c_{L1}(\omega))x_3 - \omega t} \quad (8)$$

式(8),(9)の絶対値の比を取り、伝播距離 x_3 に供試体の厚さ d を用い、さらに散乱減衰定数 α を円形ク

ラックの半径 a で無次元化すると、次式のように円形クラックによる散乱減衰以外の伝播経路の影響を除いた散乱減衰定数が求められる。

$$\alpha(\omega)a \equiv \{\alpha_1(\omega) - \alpha_0(\omega)\}a = \frac{a}{d} \ln \left| \frac{u_0(\omega)}{u_1(\omega)} \right| \quad (9)$$

3.5 数値解析結果と計測結果との比較

中心周波数0.5MHzのトランスデューサーを用いて計測し、得られた波形データをPC上でフーリエ変換した後の結果を図-5に示す。

この値を式(9)に代入して求めた散乱減衰定数と数値解析結果を比較したものを図-6に示す。実線が、式(6)に基づいて計算した数値解析結果であり、三角の白抜きで示した曲線が計測結果である。本供試体において、クラック半径 a で無次元化した単位体積中のクラックの平均個数は、 $\epsilon \equiv Na^3 = 0.0217$ である。

解析結果と計測結果を比較すると、低周波数域の第一ピーク付近の挙動は両者ともほぼ一致している。また、第二ピークの値と第二ピークを示す周波数は若干異なるが、散乱減衰の周波数依存性は両者ほぼ同じ傾向を示していることが確かめられた。

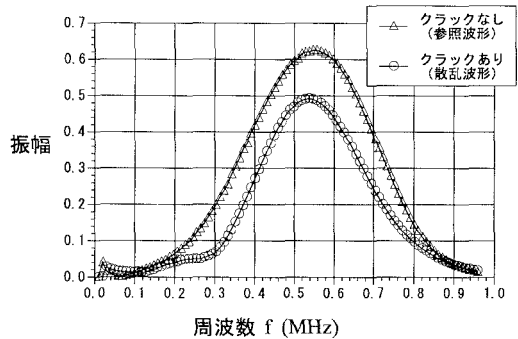


図-5 透過振幅の計測結果

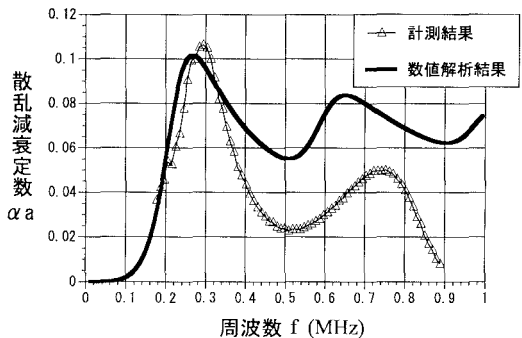


図-6 計測結果

参考文献

- 1) 岸部大蔵, 北原道弘: 分布欠陥による波動の分散特性について, 土木学会東北支部, pp.74-75, 1998