

I-24

散乱減衰計測による欠陥の分布密度の推定

東北大学大学院 学生員 ○高橋拓馬
東北大学大学院 正 員 北原道弘

1. はじめに

土木構造材料中に分布して存在する欠陥による損傷度評価を超音波を利用して定量的かつ非破壊的に行うための一手法について考える。

ここでは、損傷度を評価するための指標として欠陥の分布密度に着目し、超音波の散乱減衰量を計測することにより、欠陥の分布密度を推定するための基礎計測について報告する。

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散乱体がランダムに分布している欠陥モデルを考える。また、各散乱体間の距離は多重散乱の影響を無視できる程度に離れているものとする。

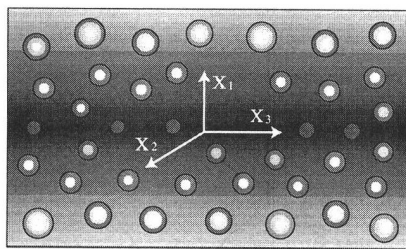


図-1 欠陥モデル

ここで、散乱体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。

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

上式において、 $c_L(\omega)$ が位相速度、 $\alpha(\omega)$ が散乱減衰係数である。 x_3 軸方向に伝播する平面波動場は式(1)を用いて次のように書ける。

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

上式(2)において $e^{-\alpha(\omega)x_3}$ が減衰項を表し、散乱減衰係数は次のようになる¹⁾。

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{2}NP(\omega) \quad (3)$$

ここで、 N は単位体積中の散乱体の平均個数であり、 $P(\omega)$ は一つの散乱体による散乱断面積である。

面状欠陥として半径 a の円形クラックを考えると、単位体積中のクラックの平均個数 N を無次元化したパラメータを $\epsilon \equiv Na^3$ と定義すると、式(3)を以下のように書き直すことができる。

$$\alpha(\omega)a = \frac{\pi}{2}\epsilon \frac{P(\omega)}{\pi a^2} \quad (4)$$

また、体積型欠陥として半径 a の球形散乱体の場合、平均個数 N を無次元化したパラメータを $\phi = \frac{4}{3}\pi a^3 N$ とし、式(3)をここで定義した体積分布率 ϕ を用いて書き直すと次のようになる。

$$\alpha(\omega)a = \frac{3}{8}\phi \frac{P(\omega)}{\pi a^2} \quad (5)$$

式(4)、(5)において、散乱断面積 $P(\omega)$ を数値解析により求め、散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ を計測等により決定できれば、散乱体の平均個数 N や体積分布率 ϕ の推定が可能となる。

3. 散乱減衰計測

3.1 計測装置概要

本研究では、図-2に示すように透過法により水浸超音波計測実験を行った。ここで、供試体表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。

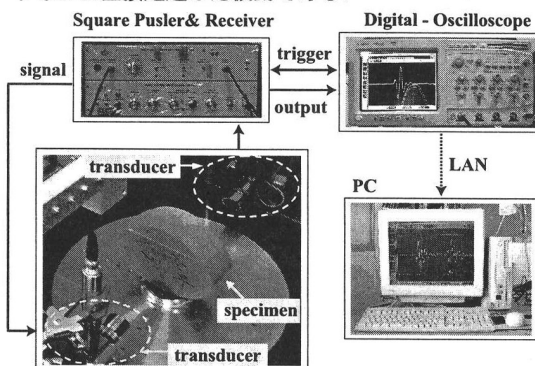


図-2 計測装置

3.2 供試体の作製方法

散乱減衰計測において、探触子や水中などの伝播経路の影響を取り除き、分布欠陥による散乱減衰のみを取り出す必要がある。そこで、図-3に示すようにセメントペースト供試体に円形クラックを含まない部分を作り、また、図-4に示すように球形散乱体を含む供試体と寸法の同じセメントペーストを作り、この部分で参照波形を計測する。ここで、図-4では、体積型欠陥としてボイドの作成が困難なため、代わりにガラスビーズを使用した。

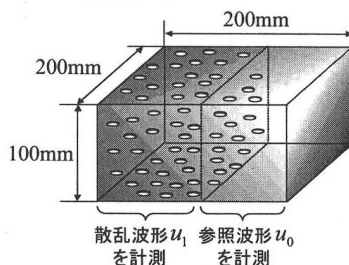


図-3 円形クラック入り供試体の概略図

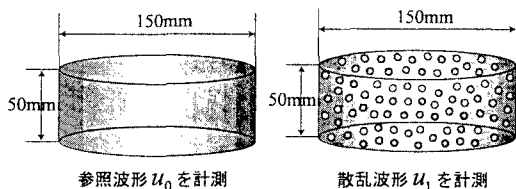


図-4 球形散乱体入り供試体の概略図

3.3 散乱減衰係数の導出

散乱体を含まない部分で計測した透過波を u_0 、含む部分での透過波を u_1 とすると、波動場 u_0 と u_1 は式 (2) より、それぞれ次のように表される。

$$u_0(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_0(\omega)x_3} e^{i[(\omega/c_{L0}(\omega))x_3 - \omega t]} \quad (6)$$

$$u_1(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_1(\omega)x_3} e^{i[(\omega/c_{L1}(\omega))x_3 - \omega t]} \quad (7)$$

式 (6) を (7) で除し、自然対数を取ることで、散乱体のみによる散乱減衰係数が求められる。

$$\alpha(\omega)a \equiv \{\alpha_1(\omega) - \alpha_0(\omega)\}a = \frac{a}{d} \ln \left| \frac{u_0(\omega)}{u_1(\omega)} \right| \quad (8)$$

ここで、 d は供試体の厚さで、 a は散乱体半径である。

3.4 数値解析結果と計測結果との比較

a) 円形クラックによる散乱減衰

図-5 は、円形クラックを含む供試体で計測した参照波形と散乱波形による周波数域波形と、その波形を用いて式 (8) より得られた計測結果および式 (4) に基づく数値解析結果との比較を示したものである。ここでは、公称中心周波数 $f = 0.5\text{MHz}$ の探触子を用いて計測を行った。

図-5 を見ると、計測結果と数値解析結果は、探触子の周波数帯域内において周波数依存性の傾向、絶対値ともにほぼ一致している。

b) 球形散乱体による散乱減衰

図-6 も同様に、球形散乱体を含む供試体で計測した参照波形と散乱波形による周波数域波形と、その波形を用いて式 (8) より得られた計測結果および式 (5) に基づく数値解析結果との比較を示したものである。ここでは、公称中心周波数 $f = 1.0\text{MHz}$ の探触子を用いて計測を行った。

図-6 に関しても同様に、計測結果と数値解析結果は、探触子の周波数帯域内において周波数依存性の傾向、絶対値ともにほぼ一致している。

4. 結論

これにより、図-1 に示すような理想的なモデルにおいてではあるが、散乱断面積 $P(\omega)$ を数値解析により求め、超音波計測により得られた散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ を近似的に式 (3) に適用することにより、欠陥の分布密度を推定するための一手法が提案できる。

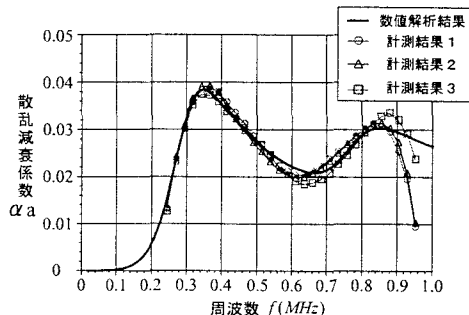
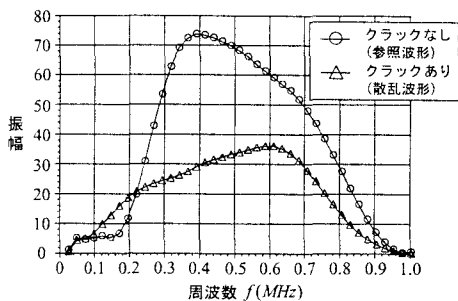


図-5 円形クラックによる散乱減衰係数 ($f = 0.5\text{MHz}$, $\epsilon \equiv Na^3 = 0.008$)

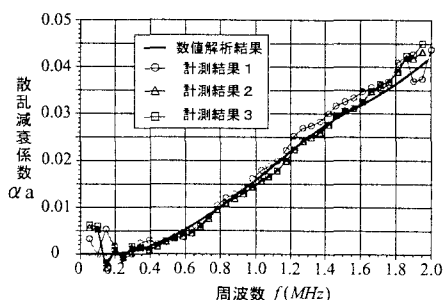
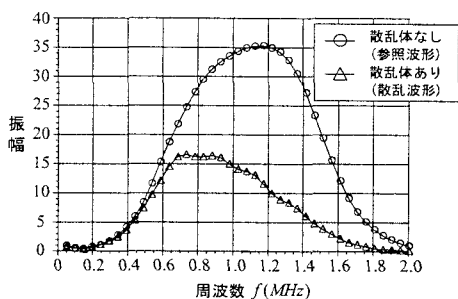


図-6 球形散乱体による散乱減衰係数 ($f = 1.0\text{MHz}$, $\phi = 5\%$)

参考文献

- 1) Beltzer, A.I.: The effective dynamic response of random composites and polycrystals - a survey of the causal approach. *Wave Motion*, Vol.11, pp.211-229, 1989.