

分布クラックによる散乱減衰量の計測と解析

(株)大林組 正員 高橋拓馬
 東北大学工学研究科 正員 北原道弘

1 はじめに

散乱体が分布して存在する無限弾性体中を波動が伝播するとき、この波動場は分散と減衰を生じ、これら二つの物理量は因果律により関係している¹⁾。散乱体がクラックである場合の最近の研究²⁾において、クラックが有限な厚さの層内に分布していても、この層内を伝播する波動場は分散と減衰を生じ、これらの量は層厚に依存しないことが明らかにされている。ここでは、円形コイン状の分布模擬クラックを有するセメントペースト製供試体を作成し、この分布模擬クラックによる散乱減衰量を計測し、分布円形クラックによる散乱減衰量を数値解析的に求めた結果と比較した結果について報告する。

2 散乱減衰

図-1に示すように、三次元弾性母材内に半径 a の円形クラックがランダムに分布している場合を考える。このとき、各クラック面の法線は x_3 軸と一致しているとする。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ものとする。

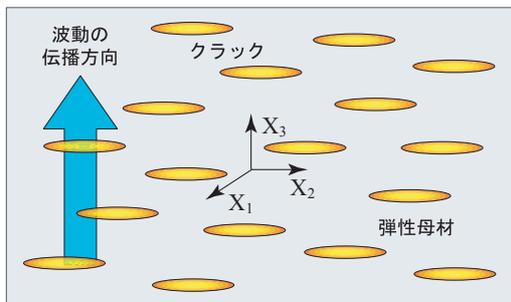


図-1 分布クラックモデル

弾性母材中に上記のようにクラックが分布して存在する場合、 x_3 軸方向に伝播する波動場は次のように書ける。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{u}}(x_1, x_2) e^{i[(\omega/c_L(\omega))x_3 - \omega t]} e^{-\alpha(\omega)x_3} \quad (1)$$

上式において、 $c_L(\omega)$ は位相速度、 $\alpha(\omega)$ は散乱減衰係数である。この散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ は、単位体積中に含まれるクラックの平均個数 N を用いて次のよう

に表される¹⁾。

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{2} N P(\omega) \quad (2)$$

ここで、 $P(\omega)$ は一つのクラックにより散乱された散乱波が有する総エネルギーを幾何学的な断面積に換算表現した散乱断面積である。いま、半径 a の円形クラックに対して、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(2)を次のように書き直すことができる。

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

上式(3)より、散乱断面積 $P(\omega)$ を数値解析により求めておき、クラックの分布率 ϵ を与えれば、クラックが分布して存在する材料中を伝播する波動場の散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ が算定できる。逆に、散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ が計測でき、かつ散乱断面積 $P(\omega)$ が算定できれば、クラックの分布率 ϵ を推定できる可能性がある。

以下、散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ の計測法と計測結果を示す。また、数値解析により散乱断面積 $P(\omega)$ を求め、クラックの分布率 ϵ を与えて式(3)により算定した散乱減衰係数 $\alpha(\omega)$ の値とここで得た計測結果を比較する。

3 散乱減衰計測

3.1 計測概要

本研究では、図-2に示すように、透過法による水浸超音波計測を行った。

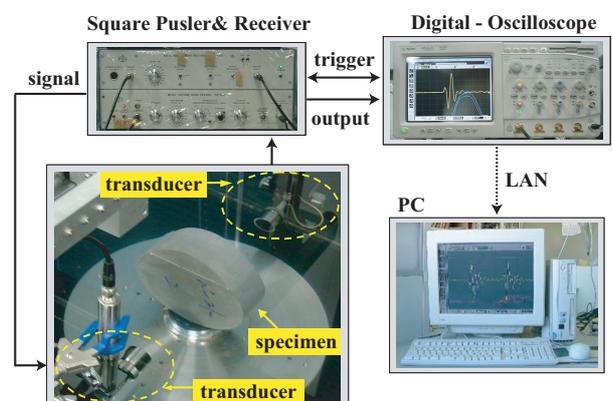


図-2 透過法による散乱減衰計測

キーワード：散乱減衰，分布欠陥，超音波計測，散乱断面積

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06, TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127, URL: <http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/>

3.2 供試体

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，分布クラックの存在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，コイン状の模擬クラックを含む部分（左半分）と含まない部分（右半分）を有するセメントペースト供試体を作成し，模擬クラックを含まない部分で参照波形を計測し，この参照波形を利用して，以下に示すデータ処理を行うことにより，分布模擬クラックによる散乱減衰量を算定することとした．作成したコイン状模擬クラックの半径 a は2mmである．

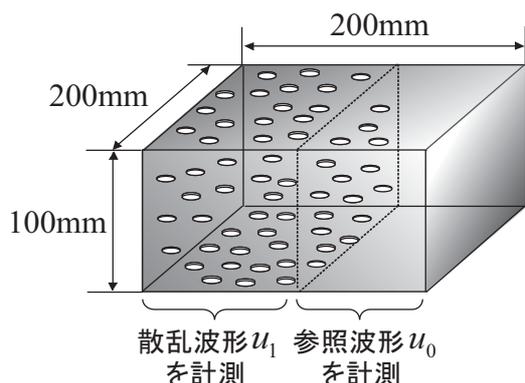


図-3 コイン状模擬クラックを有する供試体

3.3 計測による散乱減衰係数の算定式

模擬クラックを含まない部分で計測した波動を u_0 ，含む部分で計測した波動を u_1 とすると， u_0 と u_1 は次のように表される．

$$u_0(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_0(\omega)x_3} e^{i[(\omega/c_{L0}(\omega))x_3 - \omega t]} \quad (4)$$

$$u_1(x) = \bar{u}(x_1, x_2) e^{-\alpha_1(\omega)x_3} e^{i[(\omega/c_{L1}(\omega))x_3 - \omega t]} \quad (5)$$

上記両式の絶対値を取った後に式(4)を(5)で除し，自然対数を取れば，模擬クラックの存在による散乱減衰係数の表現式を次のように得る．

$$\alpha(\omega)a \equiv \{\alpha_1(\omega) - \alpha_0(\omega)\}a = \frac{a}{d} \ln \frac{|u_0(\omega)|}{|u_1(\omega)|} \quad (6)$$

ここで，波動の伝播方向に沿う伝播距離 x_3 は供試体の厚さ d となる．また，上式中の a はコイン状模擬クラックの半径である．

4 数値解析結果と計測結果との比較

式(3)を基に数値解析的に散乱減衰係数を求めるには，クラックの存在による散乱断面積 $P(\omega)$ を求める必要がある．ここでは，境界要素法によりクラック面上の開口変位を求めた後，散乱波動場の遠方積分表現を利用した散乱振幅³⁾から散乱断面積を計算した．

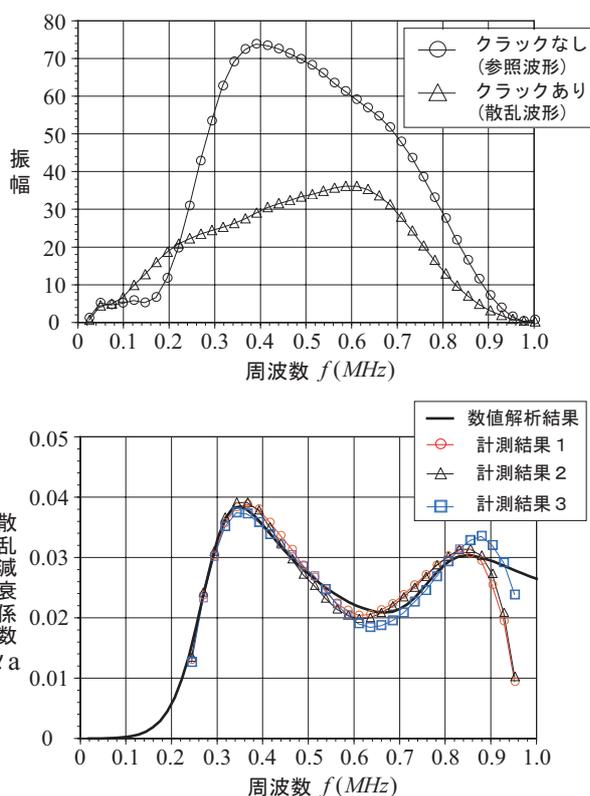


図-4 円形クラックによる散乱減衰係数
($f_c = 0.5\text{MHz}$, $\epsilon \equiv Na^3 = 0.008$)

図-4の上部に，模擬円形クラックを含む部分で計測した前方散乱波形と含まない部分で計測した参照波形を示した．図-4の下側は，式(3)に基づいた数値解析により得た散乱減衰係数と式(6)の波形処理を行って得た計測による散乱減衰係数を比較したものである．ここで，計測に使用したセンサーは，公称中心周波数 $f_c = 0.5\text{MHz}$ の広帯域水浸探触子である．

図-4より，計測結果と数値解析結果は，探触子の有効周波数帯域内において周波数依存性の傾向，絶対値ともほぼ一致していることがわかる．

5 おわりに

超音波計測を基に算定した散乱減衰量が解析による散乱減衰量とセンサーの有効周波数帯域内でほぼ一致することが確認された．今後は，ある有限域に分布して存在するクラックの分布密度の推定に応用することが課題となる．

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.
- [2] Angel, Y.C. and Bolshakov, A.: In-plane waves in an elastic solid containing a cracked slab region, *Wave Motion*, Vol.31, pp.297-315, 2000.
- [3] Kitahara, M., Kishi, N. and Nakagawa, K.: Multiple scattering effect of cracks, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol.18, pp.37-44, 1999.