

境界要素法を用いた超音波ノイズの解析

東京工業大学 学生員 永井 浩二
東京工業大学 正 員 廣瀬 壮一

1. はじめに

もともと不均質な材料に対して超音波探傷試験を行った場合、観測される波形には検出すべき欠陥からの応答だけでなく、同時に材料の不均質性に起因する応答も含まれている。本研究では欠陥からの応答をシグナル、材料の不均質性による応答をノイズとし、その比を S/N 比と定義する。このノイズの特性を調べ、ノイズを低減させ S/N 比を向上できれば超音波探傷試験の精度向上につながると考えられる。

不均質な材料には、複合材料や合金などの金属材料等がある。本研究では、コンクリート中に存在する粗骨材などのように、図-1 に示すように母材中に物理定数の異なる介在物が存在する材料を扱うものとする。

2. 多重散乱の概念²⁾

図-1 に示すように平面波 ϕ^{inc} が N 個の介在物からなる介在物群に入射すると仮定する。散乱体 i について、入射波があたかも他の介在物が存在しないかのように介在物 i によって散乱すると仮定する。この散乱波を介在物 i による 1 次散乱波 $\phi_i^{(1)}$ と呼ぶ。定常状態では、介在物 j 自身

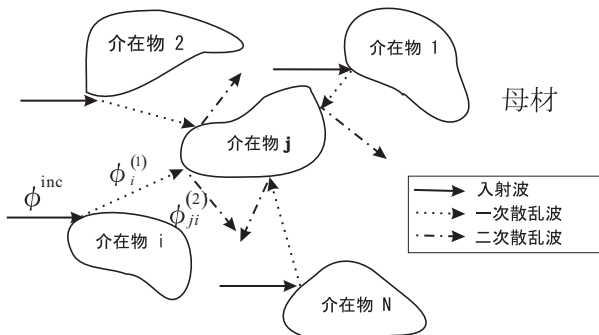


図-1 多重散乱の概念図

で散乱した散乱波を除いてすべての 1 次散乱波は介在物 j に影響を与える。介在物 i によって散乱された 1 次散乱波 $\phi_i^{(1)}$ が介在物 j によって散乱された 2 次の散乱波を $\phi_{ji}^{(2)}$ とすると、介在物 j による 2 次散乱波の合計 $\phi_j^{(2)}$ は、式 (1) で表される。

$$\phi_j^{(2)} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \phi_{ji}^{(2)} \quad (1)$$

より高次の散乱波も同様に発生し、介在物 j による p 次の散乱波は次式によって示される。

$$\phi_j^{(p)} = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N \phi_{ji}^{(p)} \quad (2)$$

そして、波動場全体の波は入射波およびすべての介在物から発生するすべての次数の散乱波を合計することによって次のように表される。

$$\phi^{total} = \phi^{inc} + \sum_{i=1}^N \sum_{p=1}^{\infty} \phi_i^{(p)} \quad (3)$$

不均質材料中の散乱過程は複雑であるため、全体系を一度に解析することは難しい。そこで本研究では、全体の波動場に入射波 ϕ^{inc} と 1 次散乱波 $\sum_{i=1}^N \phi_i^{(1)}$ のみ存在するものとして解析を行う 1 次散乱波近似、入射波 ϕ^{inc} 、1 次散乱波 $\sum_{i=1}^N \phi_i^{(1)}$ および 2 次散乱波 $\sum_{i=1}^N \phi_i^{(2)}$ が存在するものとして解析を行う 2 次散乱波近似を取り扱う。

次項においてはまず、1 次散乱波のみを考慮した 1 次散乱波近似による散乱解析をおこなう。1 次散乱波近似を用いた解析ではその近似の適用性を検討し、その後、モンテカルロシミュレーションを行い、発生する散乱波の振幅とその発生確率を求める。また、1 次散乱波と 2 次散乱波まで考慮する 2 次散乱波近似との比較を最も単純な多重散乱問題について行い、2 次散乱波近似の適用性を検討する。本研究の数値解析で扱う波動は、2 次元 SH 波とする。

3. 1 次散乱波近似による数値解析

まず 2 つの楕円形の介在物が無限媒質中に存在するものとも単純な散乱問題を用いて、1 次散乱波近似の適用性を検討する。介在物の配置および物理定数を図-2 に示す。1 次散乱波近似および境界要素法を用いて図-2 の観測点における散乱波の変位を解析し、その両者の解を比較した。その際、2 つの介在物間の距離を変化させ、1 次散乱波近似による解と境界要素法¹⁾による数値解との相対誤差が 10 % 以下となる最小の介在物間距離 d_{min} を無次元化波数 ak の関数として図-3 に示した。波数が増加するにつれて相対誤差を許容範囲内に抑えるためには、介在物間距離を大きくとらなければならないことがわかる。

次に、多数の楕円体の介在物が存在する場合に発生する観測点における散乱波変位とその発生確率を、1 次散乱波近似を用いたモンテカルロシミュレーションにより解析した。介在物は図-4 に示す $50a \times 50a$ の領域にランダムに配置するものとした。しかし、本解析で行うもっとも大き

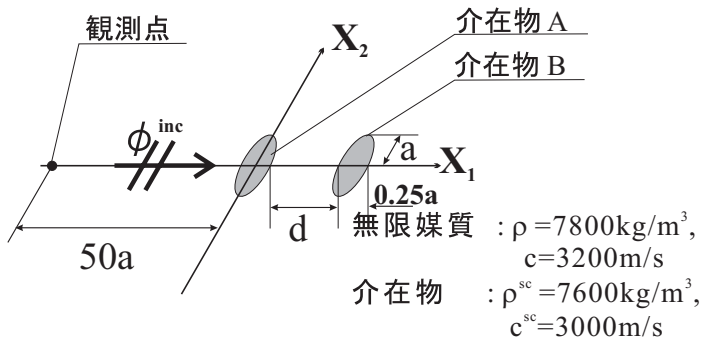
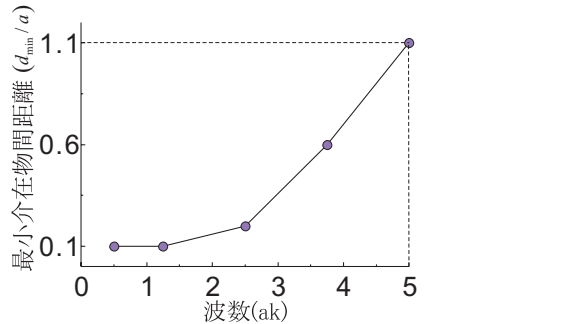


図-2 介在物配置図

図-3 波数 ak と最小介在物間距離 d_{min} の関係

い波数 ($ak = 5.0$) の解析においても境界要素法の数値解との相対誤差を 10% 以内とする為に、図-3 から平均散乱体間距離 $d_{ave} = 1.1a$ という制約条件を付け加えた。また材料の持つ材料依存性を考慮するために、各介在物の長軸方向が X_2 軸に対して $\pm 5^\circ$ の範囲で分布するという条件も制約条件として付け加えた。観測点における散乱波変位およびその発生確率の関係をいくつかの波数について図-5 に示す。波数の増加に伴い、発生するノイズの振幅、分散ともに大きくなっているのがわかる。

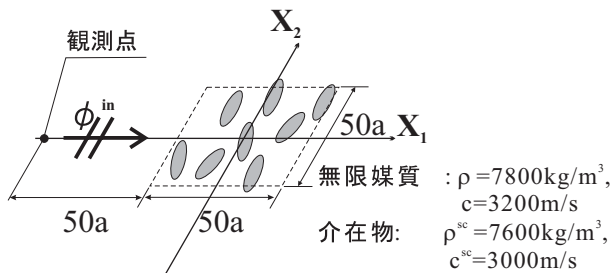


図-4 解析モデルの一例

4. 1次散乱波近似および2次散乱波近似の比較

2次散乱波を考慮することにより近似精度がどの程度向上するか検討するために、もっとも単純な多重散乱問題である図-2 に示す介在物を考える。このときに観測点における散乱波変位を1次散乱波近似、2次散乱波近似によって解析し、境界要素法による数値解析解と比較した。

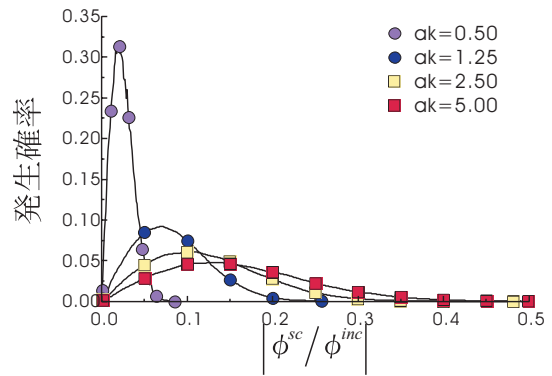


図-5 散乱波ノイズの発生確率分布

境界要素法による解との相対誤差が 10% 以下となる最小の介在物間距離を無次元化波数の関数として図-6 に示す。比較的波数の小さい領域では1次散乱波近似と2次散乱波近似の最小の介在物間距離に違いは見られない。しかし、波数が増加するにつれて1次散乱波近似に比較して2次散乱波近似が、許容誤差を満たす最小の介在物間距離が短くなっていることがわかる。これは、波数の大きい領域では高次の散乱波が、全体の散乱波に大きな影響を及ぼしているためであると考えられる。

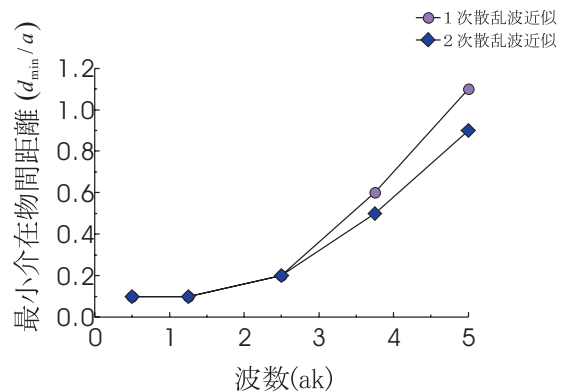


図-6 1次散乱波近似と2次散乱波近似の比較

5. 結論

本研究では、境界要素法による1次散乱波近似および2次散乱波近似を用いて、超音波ノイズの解析を行った。その結果として、1次散乱波近似による解析では、その適用範囲内において発生する散乱波変位の振幅とその発生確率を求めることができた。また1次散乱波近似と2次散乱波近似を比較することにより、高周波の領域では2次散乱波を考慮した解析が必要であることがわかった。

参考文献

- 1) 小林 昭一, 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, 2000.
- 2) Liang-Wu Cai, James H. Williams Jr: Large-scale multiple scattering problems, *Ultrasonics* Vol.37, pp.453-462, 1999.