

板波探傷法の2次元数値シミュレーション

岡山大学環境理工学部 正員 廣瀬壮一
岡山大学大学院 学生員 ○片岡秀起

1. まえがき

板波を超音波探傷に利用すると、比較的単純な検査システムにて、オンラインで広範囲な部材を探傷可能である。しかし、板波には、位相速度がモード、周波数、板厚によって変化するなど種々の特異性が存在するため、超音波板波探傷法の最適な探傷条件は理論的に解明されていない。本研究は、数値シミュレーションにより超音波板波探傷の最適な実験条件を再現し、板波探傷の定量化を図るものである。

2. 解析法

構造材料中に含まれる欠陥を超音波板波を用いて検出しようとする場合、入射波の欠陥による散乱場を計測することになる。通常、欠陥の大きさに比べてかなり離れた点において散乱波を検出する。従って、その波動解析では遠方（ $r/a \gg 1$, r : 欠陥と検出点の距離, a : 欠陥の代表値）における散乱波を評価する必要がある。ここでは、解析法として境界要素法を用いるが、遠方での変換子を含めた計算を行おうとすると相当数の境界要素が必要であり、大規模な連立一次方程式系を解かなければならない。本研究では、このような問題を回避するために、欠陥近傍の近距離波動場の計算と遠方での散乱波の計算を分離しておこなった。

(1) 近距離波動場の計算

図1に示すような弾性板内にある欠陥近傍の解析領域に対して境界積分方程式を構成し、離散化して解くことにより、欠陥に板波が入射したときの欠陥の境界 S_c 上の変位（あるいは表面力）を求める。

(2) 遠方波動場の計算

求められた欠陥の境界 S_c 上の全変位 u を次式に代入することにより、板内部の任意の点 x での散乱波変位 u^{sc} を計算することができる。

$$u^{sc}(x) = - \int_{S_c} \bar{T}(\partial_y) G(x, y) u(y) dS_y \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 G は弾性板における Green 関数を表す。Green 関数の成分 $G_{ik}(x, y)$ は、板内の点 y の k 方向に時間調和な集中力を強制振動源として与えたときの点 x での i 方向変位を表し、次のように積分表現できる。

$$G_{ik}(x, y) = \sum_{\alpha=p^{\pm}, s^{\pm}} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{U}_k^{\alpha}(y) d_i^{\alpha} \exp i k^{\alpha} \cdot x dk + \sum_{\beta=p^{\pm}, s^{\pm}} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{G}_k^{\beta}(y) d_i^{\beta} \exp i k^{\beta} \cdot x dk \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $k^{\alpha} = (k, \pm \nu_{\alpha})$, $\nu_{\alpha} = \sqrt{k_{\alpha}^2 - k^2}$, $d^{p^{\pm}} = (k/k_p, \pm \nu_p/k_p)$, $d^{s^{\pm}} = (\mp \nu_s/k_s, k/k_s)$, k_p, k_s は縦波と横波の波数, $\bar{U}_k^{\alpha} = i k_{\alpha}^2 / (4\pi \mu k_s^2) d_k^{\alpha} \exp -i k^{\alpha} \cdot y / \nu_{\alpha}$ である。 $G(x, y)$ は $x \in S_f$ において表面力 0 ($\bar{T}(\partial_x) G(x, y) = 0$) の境界条件を満足する。この境界条件を基に $\bar{G}_k^{\beta}$ を求め、式(2)に代入すれば Green 関数 G_{ik} の積分表現が完成する。しかし、変数 k についての積分は $(-\infty, \infty)$ の無限区間にあり、数値解析に適さない。さて、板内の欠陥による散乱波には実体波と表面波が含まれるが、実体波は $1/\sqrt{r}$ のオーダーで減衰するのに対し、表面波は距離に依存する減衰を示さない。従って、欠陥から十分離れた遠方場では、散乱波の内、表面波成分のみを考慮すればよいことになる。一般に、表面波は式(2)のように表された被積分関数の特異点からの寄与として、留数によって評価することができる。式(2)より $\bar{G}_k^{\beta}$ は次のように表される。

$$\bar{G}_k^{\beta}(k, y) = \frac{R_k^{\beta: sym}(k, y)}{D_k^{sym}(k)} + \frac{R_k^{\beta: asym}(k, y)}{D_k^{asym}(k)}$$

ここに、 $R_k^{\beta: sym}, R_k^{\beta: asym}$ は変数 k についての正則な関数である。従って、留数定理を用いれば、遠方での Green 関数 G_{ik}^{far} は次のように書ける。

$$G_{ik}^{far}(x, y) \approx \sum_{\beta=p\pm, s\pm} \left(\sum_m \frac{R_k^{\beta:sym}(k, y)}{\partial D^{sym}/\partial k} d_i^{\beta} e^{ik^{\beta} \cdot x} \Big|_{k=k_m^{sym}} + \sum_m \frac{R_k^{\beta:asym}(k, y)}{\partial D^{asym}/\partial k} d_i^{\beta} e^{ik^{\beta} \cdot x} \Big|_{k=k_m^{asym}} \right) \dots (3)$$

ここに、 k_m^{sym}, k_m^{asym} はそれぞれ板波の各モードの特性を決定する方程式 $D^{sym}(k) = 0, D^{asym}(k) = 0$ を満足する変数 k を表す。すなわち、式(3)は、板波の各モードの重ね合わせによってGreen関数が表現される。なお、式(2)の右辺第1項の積分は、実体波を表しており、遠方での波動場には寄与しない。式(3)を式(2)に代入すれば、遠方で卓越する散乱変位の表面波成分を容易に計算することができる。

3. 解析結果

解析モデルは図1に示すような欠陥を含んだ弾性板である。欠陥として板の上下面に平行なスリットを採用し、パラメータとして無次元化波数 hk_0 を5.0805445とし、板上面の区間Aでの変位を計算した。なお、板厚 $2h$ に対して、欠陥長 $2h$ (40分割)、上下の板長 $20h$ (各240分割)とした。

図2は、式(1),(3)をもとに得られた遠方波動場の計算結果と近距離波動場で板の上下面を十分に考慮した時の計算結果とを比較したものである。変位振幅が多少違うものの遠方波動場の解析は妥当であるといえる。

図3は、欠陥位置を板厚方向に変化させたときの遠方場の変位である。入射板波と欠陥との相互作用により複数のモードの散乱波が発生する。ここでは、対称、反対称0次モードの板波を入射させ、発生した散乱波のうち入射波と同じモードの散乱波が遠方において検出されたとして、その変位振幅をプロットしている。入射波が対称モードであれば、欠陥位置が板中央付近のとき検出感度が良く、入射波が反対称モードであれば、欠陥位置が板上下面付近のとき検出感度が良いという実験結果が得られている。図3にはその傾向が見られ、板波探傷法の定量化に一步近づいたと言える。今後、欠陥形状、板厚、周波数、板波モード等を変え、さらに解析を進めるとともに実験結果との比較を行うことにより、板波探傷法のが確立されるものと思われる。

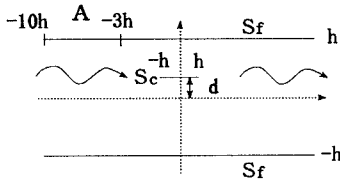


図1 解析モデル

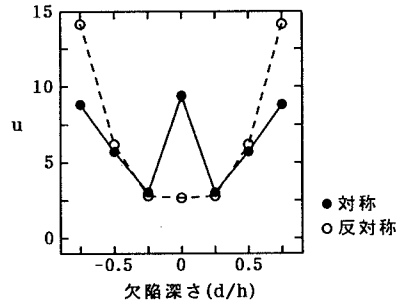


図3 解析結果

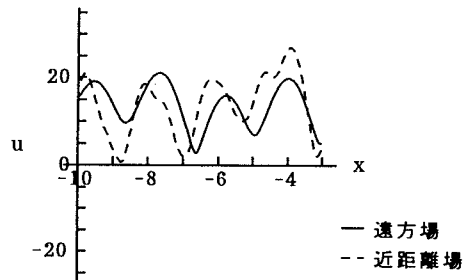
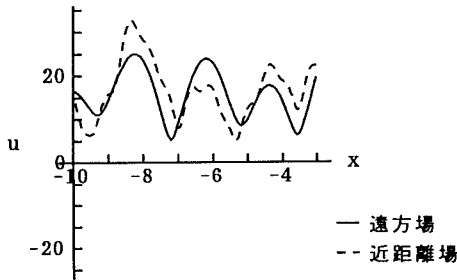


図2 解の比較