

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. はじめに

板波は、比較的薄い固体平面層内を平面に沿って伝播する弾性体である。この板波を超音波探傷に利用すると、単一の探触子によって鋼帯の全面検査が可能になり、オンライン探傷に適している。この理由により、超音波板波探傷法は薄鋼帯を対象に圧延工程に導入され、品質管理の一方法として、鉄鋼各社で利用されている。しかし、超音波板波探傷法では、板厚、欠陥位置、周波数、板波モード等によって欠陥検出感度が大きく変化するため、場合によっては、板波探傷法の不感帯による欠陥の見逃しもあり得る。このような問題を解決するには、板内に存在し得る欠陥に対して、最適な板波モードや周波数の組み合わせを明らかにする必要がある。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. シミュレーション解析法

一般に鋼板の板厚並びに欠陥の大きさは数mmのオーダーであるのに対して、変換子と欠陥の距離 l は数十cmのオーダーであるので、特に遠方場での散乱場の計算に重点を置く。

ここでは、解析法として境界要素法を用いる。境界要素法は境界型の数値解析法であり、有限要素法に代表される領域型解法よりも少ない計算容量で解析を行うことができる。しかしながら、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。

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

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。

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

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、 $\bar{U}_k^\alpha = ik_\alpha^2 / (4\pi\mu k_s^2) d_k^\alpha \exp^{-ik^\alpha \cdot y} / \nu_\alpha$ である。 $G(x, y)$ は $x \in S_f$ において表面力0 ($\vec{T}(\partial_x)G(x, y) = 0$)の境界条件を満足する。これにより、式(2)における $\bar{G}_k^\beta$ は次のように表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{G}_k^{p+} \pm \bar{G}_k^{p-} \\ \bar{G}_k^{s+} \mp \bar{G}_k^{s-} \end{array} \right\} = \frac{1}{D^{sym, asym}} \left[\begin{array}{l} A^{sym, asym} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \bar{U}_k^{p+} \pm \bar{U}_k^{p-} \\ \bar{U}_k^{s+} \mp \bar{U}_k^{s-} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $D^{sym, asym}$ は

$$D^{sym, asym} = -(2k^2 - k_s^2)^2 \begin{Bmatrix} \cos \nu_p h \sin \nu_s h \\ \sin \nu_p h \cos \nu_s h \end{Bmatrix} - 4k^2 \nu_s \nu_p \begin{Bmatrix} \cos \nu_s h \sin \nu_p h \\ \sin \nu_s h \cos \nu_p h \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

によって与えられる Rayleigh-Lamb 方程式である。(A^{sym, asym}は2×2の正則なマトリックスである。)

式(3)により求められた $\bar{G}_k^\beta$ を式(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。

$$G_{ik}^{far}(x, y) \approx \sum_{\beta=p, s, \pm} \left(\sum_m \frac{R_k^{\beta: sym}(k, y)}{\partial D^{sym} / \partial k} d_i^\beta e^{ik^\beta \cdot x} \Big|_{k=k_m^{sym}} + \sum_m \frac{R_k^{\beta: asym}(k, y)}{\partial D^{asym} / \partial k} d_i^\beta e^{ik^\beta \cdot x} \Big|_{k=k_m^{asym}} \right) \dots\dots (5)$$

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(5)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(5)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_s 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、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2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、さらに解析を進めていくことにより、板波探傷法のが確立されるものと思われる。

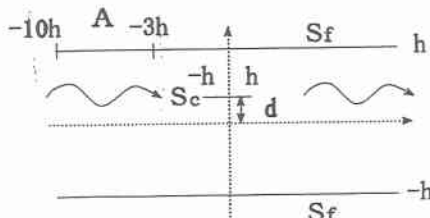


図1 解析モデル

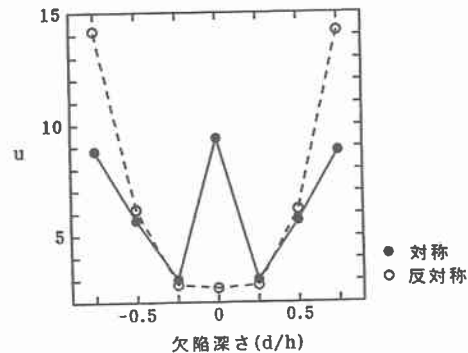


図2 解析結果