

境界要素法による板波解析に関する研究

東京工業大学情報環境学専攻廣瀬研究室 学生会員 グナワン・アリーフ

1. はじめに

板波探傷法は鋼板など板状の部材における非破壊検査として用いられている。板波は減衰が小さいので、単一の探触子で鋼板全域にわたって検査できるという利便性がある。しかし板波について未知な部分が多く、欠陥の形状や位置、そして使用した板波モードによっては検出されにくい欠陥が存在している。そのため、板波探傷が最適な条件下で適用されているとはいえない。高品質な材料を製造するために板波の性質を解明することが必要であるが、板波の解析がたいへん複雑なので、板波を解析的に解明するのは困難である。そこで本論文では境界要素法を用いて数値的に板波の散乱解析を行う。

まず、板波の発生と伝播の特性に着目した新しい板波の散乱解析法を述べる。そしてその散乱解析法を用いて内部欠陥による散乱解析を行った。欠陥の形状や位置を変化させた6つのケースのモデルについて解析を行い、各ケースの結果を比較し、板波の散乱形態に対する欠陥の形状や位置の影響を考察した。

2. 散乱解析法

板波とは薄い板に時間調和な外乱を与えたとき、その外乱がP波とSV波として板の上下面で繰返し反射し、互いに重ね合っできた定常波である。板波には、どんな時間調和な外乱を与えてもある程度の距離を伝播すると必ず板波が出現するという発生特性と、一度出現した板波が新たな外乱がない限り無限遠まで伝播し続けるという伝播特性をもつ。

例えば、Fig.1のようなモデルでBEM解析を行ってみよう。簡単のため、欠陥の形状は左右対称であるとする。境界条件として、板の上下面及び欠陥表面に $t=0$ 、板の両端に適切な境界条件を入れる。この解析モデルにおいて外乱となるのは欠陥と適切な境界条件を入れた板の両端である。このモデルで

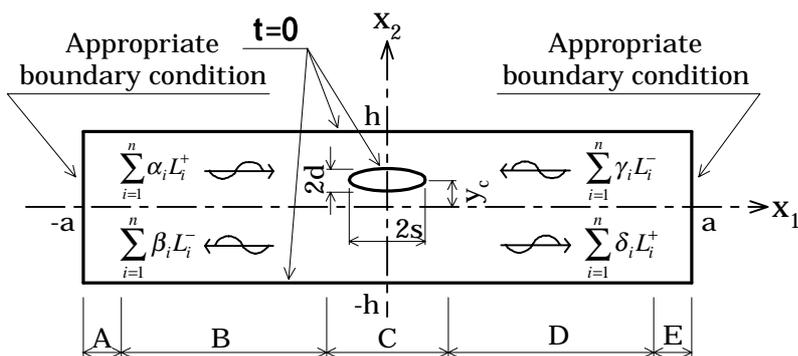


Fig.1 Analysis Model

BEM解析を行い、得られた波動場を各板波モードに分解すると、外乱の影響でA, C, E区間内では各モードの振幅が乱れるが、B, D区間内では振幅が一定になることを確認できる。ただし、一定の振幅値を得るためにはB, D区間を十分長く取らなければならないが、外乱と外乱の距離を、発生し得る板波モードの内、最も長い波長の1~2倍を取ればよいといわれている。

さて、B, D区間の波動場を各板波モードに分解したところ、Fig.1のように波の向きと欠陥に対する位置によって、4種類の板波 ${}_i L_i^+$, ${}_i L_i^-$, ${}_i L_i^+$, ${}_i L_i^-$ ($i=1, \dots, n$)を得たとする。 L_i は板波モードの種類、 ${}_i$, ${}_i$, ${}_i$ は振幅、 n は発生し得る板波モードの個数、 \pm は x_1 の \pm 方向の波を示す。適切な境界条件によってA, E区間内の振幅が乱れるが、これらの外乱がなければ、板波の伝播特性に従ってB, D区間内に収束した板波が x_1 の \pm 方向に向かって無限遠まで続くはずである。よって、 ${}_i L_i^+$ と ${}_i L_i^-$ を入射波、 ${}_i L_i^-$ と ${}_i L_i^+$ を散乱波とみなせる。

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i L_i^+ + \sum_{i=1}^n \gamma_i L_i^- \xrightarrow{\text{散乱}} \sum_{i=1}^n \beta_i L_i^- + \sum_{i=1}^n \delta_i L_i^+ \dots$$

一方、求めたいのは振幅1の入射波 L_i^+ に対する散乱波である。入射波 L_i^+ に対する反射散乱波 L_j^- モードの振幅

Table 1 The size and vertical position of inner defects analyzed in this paper

Case	s/h	d/h	y_c/h	comp. with case 0
0	0.50	0.10	0.00	-
1	0.75	0.10	0.00	longer
2	0.50	0.15	0.00	thicker
3	0.50	0.10	0.15	eccentric
4	0.50	0.10	0.30	eccentric
5	0.50	0.10	0.60	eccentric

板波、発生・伝播特性、互いに独立な適切な境界条件、BEM、板波の分解

目黒区大岡山2-12-1 情報環境学専攻廣瀬研究室, 03-5734-2692

を r_j^i , 通過散乱波 L_j^- モードの振幅を t_j^i とすると, その関係を書き表すことができる. r_j^i と t_j^i はそれぞれ反射散乱係数と透過散乱係数という.

$$1 \times L_i^+ \xrightarrow{\text{散乱}} \sum_{j=1}^n r_j^i L_j^- + \sum_{j=1}^n t_j^i L_j^+ \quad \dots$$

左右対称な欠陥なので, 右側からの入射波 L_i^- に対しても反射散乱係数と透過散乱係数が左側からの入射波のものと等しく, r_j^i と t_j^i である.

$$1 \times L_i^- \xrightarrow{\text{散乱}} \sum_{j=1}^n t_j^i L_j^- + \sum_{j=1}^n r_j^i L_j^+ \quad \dots$$

を (1) に代入すると, (2) が得られる.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i r_j^i + \sum_{i=1}^n \gamma_i t_j^i = \beta_j, \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i t_j^i + \sum_{i=1}^n \gamma_i r_j^i = \delta_j \quad \dots$$

($j=1, \dots, n$)

r_j^i, t_j^i の $2n^2$ 個の係数は未知数であり, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ は BEM 解析より得られた板波モードの振幅である. (1) の方程式は $2n$ 個あるので, 互いに独立した n 組の「適当な境界条件」のもとで BEM 解析を行い, n 組の $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ が求めれば, $2n^2$ 個の方程式を構成でき r_j^i, t_j^i を完全に求められる.

3. 解析結果と考察

以上の解析方法を用いて内部欠陥による散乱解析を行った. 欠陥の寸法や位置を変化させて Table 1 に示す 6 つのケースについて解析した. 解析対象となる材料は鋼板(密度 $\rho=7.8\text{g/cm}^3$, P 波速度 $c_p=5.94\text{mm}/\mu\text{s}$, S 波速度 $c_s=3.20\text{mm}/\mu\text{s}$) である.

単一探触子を用いた板波探傷法の探傷感度は, 入射波のエネルギーに対してどれくらい反射エネルギーが戻ってくるかに依存している. 各ケースにおける各モードの入射波に対する反射エネルギー比(反射されるモードのエネルギーの合計 / 入射波のエネルギー)を Fig.2(a)-(f) に示す. それらを考察すると, 次のことがいえる.

- a) 欠陥の位置が板の中心でその長さが板厚の 0.5 倍以上のとき, $h/c_t < 3.0$ では A0 と S0 モード, $h/c_t > 3.0$ では S2 モードを入射波として用いた方が良い. A1 と S1 モードは中心欠陥の検出に対して不適である.
- b) 欠陥の厚さが板厚の 10% 変化しても, その影響は小さい.
- c) 欠陥が長いほど, 検出しやすくなる.
- d) 欠陥の位置が板の中心から離れるほど, A1 と S1 モードを入射波として用いた欠陥検出感度は上がるが, S2 モード及び低周波数 A0 と S0 モードを入射波として用いた欠陥検出感度は下がる.

4. 結論

- a) 板波の発生と伝播の特性を利用した板波の散乱解析法を開発した.
- b) その散乱解析法を用いて内部欠陥による散乱解析を行い, 欠陥の大きさや位置による影響を調べた.

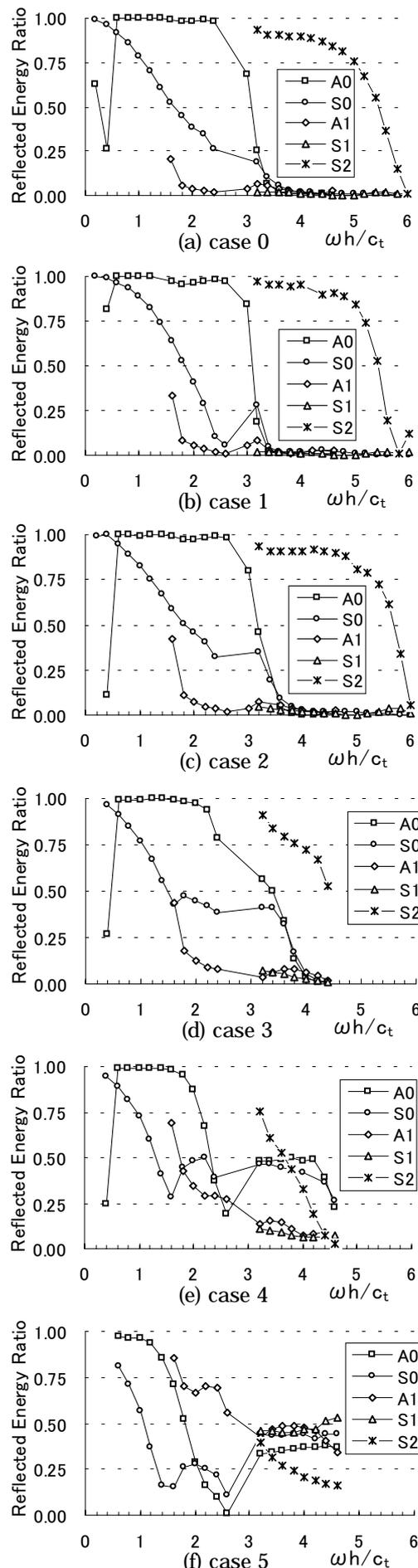


Fig.2 Efficiency of using Lamb wave to detect inner defect