開口合成法を用いた 円形ポリスチレン中の欠陥の逆解析

1. はじめに

構造物内部の欠陥を非破壊評価する代表的な方法の一つ として,超音波探傷法が知られている.超音波探傷法を配管 などの検査に適用することは検査精度の向上に繋がると考 えられるが,検査領域が広範囲であること,試験体が複雑な ことから,欠陥形状再構成が難しくなる.そこで本研究で は,円形ポリスチレン中のいくつかの人工欠陥に対する波 動解析を行い,その結果から,欠陥形状再構成を行うことを 試みる.

2. 開口合成法の原理

開口合成法は,超音波探傷データを画像化し欠陥形状の 再構成を行う代表的な手法¹⁾である.図1のように位置 (x_i, y_i) から超音波を送信し,位置 (x_j, y_j) で超音波を受信 したときに得られる時間波形を $A_{ij}(t)$ とすると,この $A_{ij}(t)$ を対応する空間位置にプロットすることで,超音波の散乱 源である欠陥形状を再構成することができる.欠陥により 散乱される超音波は,等方性材料の場合,波線理論より図1 に示すような伝搬距離 r_1, r_2 を伝搬経路として辿る.これ ら伝搬距離 r_1, r_2 は欠陥上の超音波散乱点X(x, y)を用い て,それぞれ次の式(1),(2)のように表すことができる.

$$r_1 = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \tag{1}$$

$$r_2 = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}$$
(2)

時刻 t において明瞭な散乱波が計測されたとすると, 超音 波伝搬距離 $r_1 + r_2$ に関して次の式が成り立つ.

$$c t = r_1 + r_2 \tag{3}$$

ここで, c は材料中を伝搬する開口合成の対象となる超音波 速度である. 式(3) を満たす散乱源である X(x,y) は, 送信 点 (x_i, y_i) , 受信点 (x_j, y_j) を焦点とする楕円上に存在する. この結果は他の送受信点の組み合わせについても同様であ るため, 異なる送受信点の組み合わせによる結果 S(x, y) は 次のように与えられる.

$$S(x,y) = \sum_{i} \sum_{j} A_{ij} \left(\frac{r_1 + r_2}{c}\right) \tag{4}$$





この S(x,y) をプロットすることにより, S(x,y) が相対的 に大きな値を示す箇所を欠陥位置と推定することができる.

3. FDTD 法による超音波散乱解析

先に述べたように、開口合成法では複数の素子で得られ た散乱波を用いる.本研究では、それら散乱波の模擬波形を 数値シミュレーションで求めるため、数多くの波形を簡易 的に求めること、対象材料が等方性であることを考慮して、 数値シミュレーション手法に FDTD 法(時間領域差分法)を 選択する.なお、簡単のため、ここでは SH 波のみを解析対 象とする.FDTD 法の解析に必要なフックの法則および運 動方程式はそれぞれ次のように表される²⁾.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} -T_4 \\ -T_6 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} c_{44} & 0 \\ 0 & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{v}}{\partial z} \\ \frac{\partial \dot{v}}{\partial x} \end{bmatrix}$$
(5)
$$\rho \frac{\partial \dot{v}}{\partial t} = -\left\{ \frac{\partial (-T_4)}{\partial z} + \frac{\partial (-T_6)}{\partial x} \right\}$$
(6)

ここで *T*₄, *T*₆ はそれぞれせん断応力 *T*_{zy}, *T*_{xy} であり, *c*_{ij} は 弾性定数, *v* は *y* 軸 (面外) 方向の粒子速度を示す.例とし て, 式 (5) の第1式, 式 (6) を FDTD 法のスキームで離散化 すると, それぞれ次の式 (7), (8) を得る.

$$\frac{2\Delta d}{2\Delta t} \left\{ T_4^{n+\frac{1}{2}} \left(i, k + \frac{1}{2} \right) - T_4^{n-\frac{1}{2}} \left(i, k + \frac{1}{2} \right) \right\}$$
(7)
= $-c_{44} \left\{ \dot{v}^n(i, k+1) - \dot{v}^n(i, k) \right\}$

$$\rho \frac{2\Delta d}{2\Delta t} \{ \dot{v}^{n+1}(i,k) - \dot{v}^{n}(i,k) \} \\
= -\left\{ T_{4}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, k \right) - T_{4}^{n+\frac{1}{2}} \left(i - \frac{1}{2}, k \right) \right\} \quad (8) \\
- \left\{ T_{6}^{n+\frac{1}{2}} \left(i, k + \frac{1}{2} \right) - T_{6}^{n+\frac{1}{2}} \left(i, k - \frac{1}{2} \right) \right\}$$

ここで, n は時間ステップ, ρ は密度, i, k は図 2 のように解



図2 FDTD 法における2次元格子点配置

析領域を2次元差分格子で離散化した場合のx, z方向の格 子位置を示している.また、 Δd は空間離散間隔、 Δt は時間 離散間隔を表す.式(7)、(8)、および式(5)、(6)の残りの式を 同様に離散化し、それぞれ時間と空間に関して交互に計算 することによって各時間ステップにおける応力 T_4, T_6 と粒 子速度iを求めることができる.

4. 数值解析結果

以下,数値解析結果を示す.解析モデルは図3のような 直径300mmの円を内包する正方領域で,中心に直径70mm の内孔が存在するポリスチレン試験体(図3(a))を基本と し,右上に気泡を模擬した直径12mmの円孔を有する試験 体(図3(b)),右上境界付近に剥離を模擬した幅18mm,厚さ 4mmのスリットを有するモデル(図3(c))の3種類を準備 した.材料定数は,それぞれ密度 $\rho = 1050[kg/m^3]$,横波速 度 $c_T = 2322[m/s]$ とした.なお,本解析では,多重反射を考 慮しないため円領域の外側に境界を設けず,解析領域の境 界には吸収境界を設けることで境界での多重反射が起こら ないようにした.入射波は,いずれも試験体中心直上から周 波数200kHzの正弦波を点波源として入射した.また,送信 素子は試験体上部1点で固定,受信素子は送信素子から周 方向に25°離れた点から5°ピッチで設けた.

(1) FDTD 法による SH 波動解析結果

図 3(a) - (c) の解析モデルに対する解析結果の一例を図 4(a) - (c) に示す. 図 4(a) - (c) はそれぞれ, 内孔, 円孔, スリッ トによって入射波が散乱される様子を示している. いずれ も SH 波の伝搬・散乱が確認でき, 図 4(a) - (c) の全てにお いて内孔から, 図 4(b) では円孔からの散乱波と回折波を確 認できる. また, 図 4(c) ではスリットの両端からの散乱波を 確認できる.

(2) 開口合成法による欠陥形状再構成

次に,前節の数値解析で得られた波形データを元に,開口 合成法を用いて欠陥形状再構成を行った結果を図 5(a)-(c) に示す.ただし,図 5(a)の開口合成では 25°から 105°,図 5(b)では,円孔からの散乱波が波の進行方向と逆方向に強 く反射することを考慮し,散乱波が開口合成に適用できる 範囲である 25°から 50°,同様の理由により図 5(c)では



図 3 円形ポリスチレンモデル (a) 欠陥なし (b) 円孔 (c) スリット を含むモデル



図4 波動解析結果 (a) 欠陥なし (b) 円孔 (c) スリットを含む場合



図5 欠陥形状再構成結果 (a) 欠陥なし (b) 円孔 (c) スリットを含む場合

25°から40°の波形データを用いた.ただし,いずれの場 合に対しても直達散乱波は考慮していない.図5(a)-(c)の 全てにおいて内孔の形状ははっきりと現れており,受信素 子の角度によらず内孔の境界が精度良く再構成されている ことが確認できる.また,図5(b)について,円孔の位置より 上にある受信素子のデータのみを用いているので,円孔上 部のみ比較的精度良く再構成されていることが分かる.図 5(c)については,スリット両端からの散乱波が大きいため, スリット端部が再構成されている.特に,送信側に位置する スリット左端がはっきりと再構成されていることが分かる.

5. 結論

円形ポリスチレンでの SH 波動解析を行うことによって 取得した波形データを用い,開口合成法によって欠陥形状 再構成を行った. 今後は,計測実験により得られたデータを 用いて開口合成を実施する予定である.

参考文献

- 1) 木本和志・松江剛士・廣瀬壮一: 数値シミュレーションを用 いた開口合成法の欠陥形状再構成能に関する研究,応用力学 論文集, Vol.7, pp.91-96, 2004.
- 2) 佐藤雅弘: FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門, 森北 出版株式会社, 2003.