

時間領域差分法を用いた極厚CFRP板中の欠陥 に対する弾性波動散乱解析および計測実験

○群馬大学理工学研究院	正会員	斎藤隆泰
群馬大学理工学研究院	学生会員	下田瑞斗
群馬大学理工学研究院	学生会員	森亜也華
愛媛大学理工学研究院	正会員	中畑和之
東京工業大学大学院	正会員	廣瀬壮一

1. はじめに

近年、種々の構造物内部の欠陥の有無を調べる方法として非破壊検査法が重要視されている。しかしながら、例えばCFRP等の異方性材料中の欠陥を超音波を用いて非破壊検査しようとしても、音響異方性によって検査したい場所に実際に超音波が行き届いていないという問題が生じる。超音波を欠陥部分に到達させるために、まずは異方性材料中を弾性波が伝搬する様子を数値解析によりモデル化することが必要となる。そこで本研究では、極厚CFRP板に貫通空洞を空けた試験体を用意し、数値シミュレーションにより波動伝搬特性を求める。次に、貫通横穴を検出するための計測実験を実施し、極厚CFRP板に対する超音波診断方法について検討する。

2. 異方性弾性波動問題の基礎

(1) Christoffel 方程式

まず、異方性弾性波動論の基礎式について簡単に説明しておく。一般の異方性弾性波動解析では、変位 $u_i(\mathbf{x}, t)$ は位置 \mathbf{x} , 時刻 t において、次の運動方程式を満たす。

$$C_{ijkl}u_{k,lj}(\mathbf{x}, t) + \rho b_i(\mathbf{x}, t) = \rho \ddot{u}_i(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

ここに、 $b_i(\mathbf{x}, t)$ は物体力成分、 ρ および C_{ijkl} は媒質の密度および弾性定数を表す。また、 $(\cdot)_{,i} = \partial/\partial x_i$, $(\dot{\cdot}) = \partial/\partial t$ である。式(1)の変位に平面波を代入し、物体力 b_i を無視すれば、次の Christoffel 方程式を得る。

$$(\Gamma_{ik} - \rho c_m^2 \delta_{ik})d_k = 0 \quad (2)$$

ここで、 δ_{ik} はクロネッカーデルタ、 d_k は偏向方向ベクトル成分を表す。弾性定数 C_{ijkl} の対称性を考慮すれば、波動の単位伝搬方向成分 n_i を含む Christoffel テンソル Γ_{ik} は正定値対称行列となる。したがって、式(2)は固有値問題に帰着され、その固有値問題を解くと最大で3つの固有値 $\lambda_m (= \rho c_m^2)$ ($m = 1, 2, 3$)、および対応する固有ベクトル d_{km} が得られる。各固有値 λ_m に対する位相速度 c_m は密度 ρ を用いて、 $c_m = \sqrt{\lambda_m/\rho}$ と求まる。よって、固有ベクトル d_{km} は、速度 c_m で伝播する波動の偏向方向を表す。このように、異方性媒質の場合、固有値に重解が含まれず、媒質を伝播する波動は3種類存在することになる。

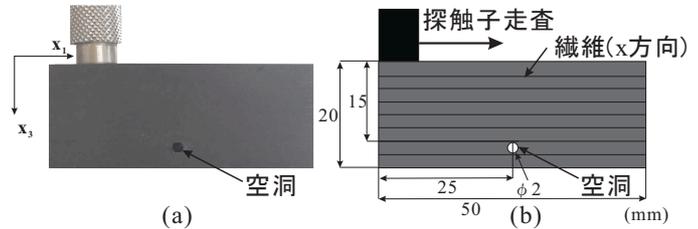


図1 超音波探傷実験。

(2) 群速度曲線

異方性材料中を伝搬する弾性波動は、伝搬方向によって速度が異なる。異方性材料中では、位相速度と群速度は一致せず、位相速度が異なる波動が複雑に干渉し、群速度で伝搬する波面が形成される。よって、数値解析結果の妥当性を確認の上では、材料中を伝搬する波動の波面を追跡できると便利である。異方性材料の場合、次の式を用いて群速度曲線を描くことができる。

$$g_{jm} = \frac{1}{\rho c_m} C_{ijkl} d_{im} d_{lm} n_k \quad (3)$$

ただし、式(3)では、 m に関して総和規約を適用しないことに注意する。式(3)において、伝搬方向ベクトル \mathbf{n} を任意に定めれば、対応する群速度 g_{jm} を求めることができる。

3. FDTD法による異方性弾性波動問題の定式化

本研究では、異方性弾性波動場の解析に時間領域有限差分法¹⁾(FDTD法)を用いる。今、図1(a)のような貫通空洞を有する厚さ2cmの極厚CFRP板に、右手座標系を定め、面外方向を x_2 とすると、面外波動場 $u_2(\mathbf{x}, t)$ に対する運動方程式、および構成方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\rho \ddot{u}_2 = \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_3} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{44} & C_{46} \\ C_{64} & C_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \end{pmatrix} \quad (5)$$

ただし、 σ_{ij} は応力であり、 $C_{\alpha\beta}$ はフォークト表記された弾性定数を示している。FDTD法では式(4)の運動方程式、および式(5)の構成方程式に対して、速度と応力を差分格子上で互い違いに計算することで、各時間ステップにおける差分格子上の未知量を求めていく方法である。面内波動問題

に対しても、同様に速度や応力を求めることが可能であるが、本概要では紙面の都合上、省略する。

4. 数値解析および計測実験結果

以下、数値解析例および計測実験結果を示す。試験片として、東レ製:T800S-2592 の CFRP を準備し、寸法(数値解析モデル)は図 1(b) に示す通りとする。また、繊維方向は水平方向に一致するとする。ただし、直径 2mm の貫通空洞を、深さ 15mm の位置に加工して設けている。このとき、弾性波動場は、横等方性となり、理想的には前節で示したように、面内および面外波動場に分離できる。そのため、以下の議論では、面内波動場における擬似縦波を qP 波、擬似横波を qS1 波とし、面外波動を qS2 波と呼ぶことで区別する。

(1) 数値解析例

まず、前節で述べた FDTD 法を用いた面外波動の数値解析例を示す。入射波は中心周波数 2MHz のリッカー波を試験体上部中心に与えた。一方、解析結果の妥当性を確認するために、式 (3) を用いた群速度曲線を図 2(a) に示した。比較のため、等方性鋼材に対する群速度曲線も図 2(b) に示してある。ただし、CFRP には、様々な規格が存在し、現時点では、図 1(a) の寸法を勘案すると、弾性定数 $C_{\alpha\beta}$ を決定することは難しい。したがって、ここでは、既往の研究により利用された一般的な CFRP の弾性定数²⁾を与えることで解析を実行している。解析結果の一部を図 3(a) に示す。図 3 は、ある時刻における qS2 波の変位速度の可視化結果を示している。比較のため、等方性鋼材に対する数値解析結果についても図 3(b) に示した。試験体中央上部からの入射波は、空洞により散乱されているが、散乱波の波面は図 2(b) の等方性の場合の群速度曲線のように、同心円状に広がることなく、図 2(a) のような楕円形の波面を保ち、伝搬している様子が見て取れる。このように解析結果は図 2(a) の群速度曲線に従って伝搬しており、解析結果は妥当であると考えられる。なお、面内波動解析による qP 波、qS1 波の結果については、ここでは紙面の都合上割愛する。

(2) 計測実験による欠陥画像化

次に、計測実験結果を示す。図 2 の群速度曲線の結果より、CFRP 中の超音波伝搬速度は方向依存性を示していることがわかる。そのため、例えば、斜角探傷や、複数の素子を並べて超音波を入射させるアレイ探傷器を用いて超音波ステアリングを行う場合等は、超音波の伝搬方向の速度を正しく求めて、欠陥像を再構成する必要がある。以上の理由から、本研究では、まず、一探触子法(横波垂直入射、中心周波数 5MHz)による超音波計測実験を行う。波形データは図 1(b) のように探触子を走査し、 x_1 軸方向に合計 32 点の超音波波形データを等間隔で取得した。得られた波形データより作成した B スコープ画像を図 4 に示す。なお、図 4 中の中央下部における白丸は、実際の欠陥位置を示している

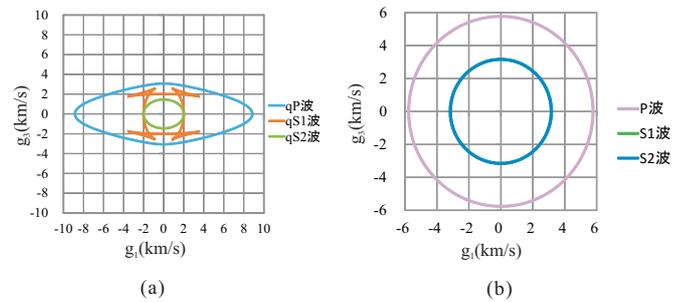


図 2 群速度曲線 (a)CFRP (b) 等方性鋼材。

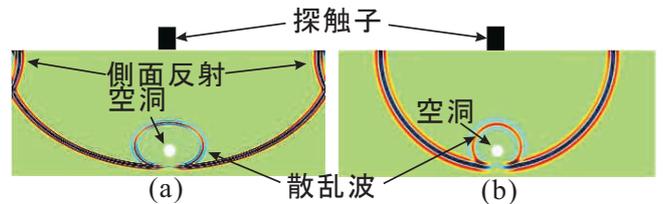


図 3 FDTD 法による弾性波動解析結果 (a)CFRP の場合 (b) 等方性鋼材の場合。

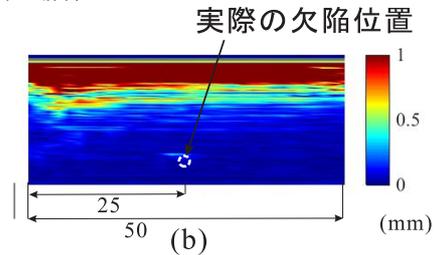


図 4 CFRP 中の欠陥に対する B スコープ計測波形結果。

ことに注意されたい。図 4 より、欠陥像深さ 15mm の位置に欠陥を検出できているものの、やや左に欠陥像が再構成されていることがわかる。これについては、さらなる検討が必要である。CFRP 中に存在する繊維の影響で、超音波計測波形にノイズが入る関係上、欠陥エコーは等方性に比べて明瞭ではないもの、およその欠陥位置を特定することができた。

5. まとめ

極厚 CFRP 試験片に貫通空洞を作成し、欠陥検出を試みた。異方性弾性波動論および FDTD 法を用いた超音波シミュレーションを駆使することで、CFRP 中の超音波伝搬を再現することを行った。また、計測実験をすることで、およその欠陥位置を特定することができた。当日の発表では、面内波動場(qP, qS1 波)解析の定式化および解析結果の詳細、開口合成法の適用結果等についても言及する予定である。

謝辞

本研究の一部は平成 26 年度三菱財団自然科学研究助成の支援を得て行われました。この場をお借りして、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤雅弘著：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。
- 2) Gaul, L., Kogl, M. and Wagner, M.: Boundary Element Methods for Engineers and Scientists, Springer, 2002.