

パッチ補強構造の力学特性評価に向けた弾性ガイド波斜角入射法の研究

Study of elastic guided wave obliquely incidence technique for the mechanical characterization of patch reinforced structures

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 助教 森 直樹
Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering,
Osaka University, Naoki Mori

要 旨

薄肉構造の補強や補修の際に、パッチ（補強板）が構造に接合される場合がある。近年の接着技術の進歩に伴って接着補強構造が普及しつつある一方、接着条件のばらつきが接合部の特性に大きく影響する点が課題として挙げられる。本研究では、パッチ補強構造の健全性評価に向けて、薄肉構造を伝わる弾性ガイド波の一種であるラム波を用いた接着特性評価法の検討を行った。理論モデルに基づく波動伝搬解析を行い、補強部に入射するラム波の入射角や周波数が反射特性に影響することを明らかにした。特に、反射波の振幅スペクトルは干渉の影響で周波数変化に伴い増減を示した。この性質を用いて接着部の接線剛性評価法を提案し、アルミニウム合金の接着試験片に対する実験によってその妥当性を検証した。実験で得られた反射ラム波の振幅スペクトルが数値解析結果によって概ね再現され、接着部の剛性が推定できる可能性が示唆された。

1. はじめに

接着剤の高機能化に伴って、接着接合の適用が拡大している。締結具を使用する機械的接合に比べ、接着接合では軽量化と応力集中の緩和が期待できる。このため、省エネルギー化などの観点から軽量の構造が要求される航空機や自動車などの構造に対して接着が積極的に利用されている。構造の製造以外でも、薄肉構造の座屈防止や損傷部の補修のため、補強板（パッチ）が構造に接着されることがある。

接着接合が有する課題として、接着状態のばらつきが大きい点が挙げられる。接着前の被着体の表面状態や、接着剤の硬化条件の違いによって、作製された継手の特性が大きく変化する。構造の安全性を担保するためには、作製した接着継手に対する健全性評価が必要となる。

接着接合部の代表的な非破壊検査法として、超音波法が挙げられる。接着層内に発生した空孔や被着体のはがれは、パルスエコー法による従来の超音波探傷法で検出可能である。しかし、接着剤の未硬化部や接着界面の異常の検出は容

易ではない。これらに対して、超音波を用いた接着部の特性評価法が注目されている。接着部を表現する適当な構造モデルに基づき、超音波伝搬特性を用いることでモデルの特性値を推定することが可能となる。近年では、弾性ガイド波による健全性評価に向けた研究が積極的に進められている¹⁻³。

本研究では、薄肉構造の接着補強構造に対して、ガイド波を用いた特性評価法の提案に向けた検討を行った。ラム波 0 次反対称 (A0) モードを用いた先行研究の評価法³を拡張し、接着部の剛性を推定するための評価原理を構築した。

2. 接着補強部における 3 次元ガイド波伝搬解析

2.1 解析モデル

図 1 に示すように、板厚 $d=2$ [mm] の長方形基板 (Plate 1) が接着補強された構造を考える。板の幅方向に x 軸、長手方向に y 軸、板厚方向に z 軸を取り、3 次元直交座標系 xyz を定義する。基板と同じ材質で厚さ 2 mm の長方形板 (Plate 2) が補強板として接着されており、補強部材の y 方向長さを L とする。平板中を伝わ

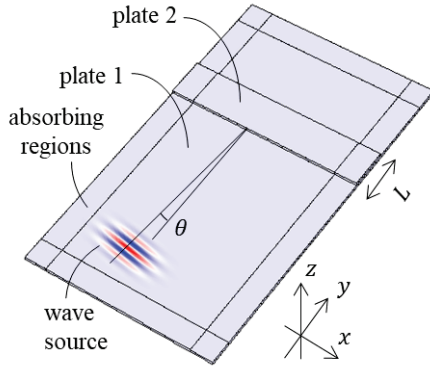


図 1 接着補強構造の解析モデル

るガイド波の伝搬挙動は、線形な等方弾性体のナビエの式に従うとする。

接着補強部は Plate 1, Plate 2 とそれらを結合する接着層から構成されるが、本研究では接着層を等価な分布ばね界面でモデル化する⁴。このモデルでは、Plate 1 と Plate 2 の表面に作用する応力が連続で、それらは両表面の変位差に比例すると仮定する。すなわち、

$$\begin{aligned}\sigma_z &= K_z [u_z^{(2)} - u_z^{(1)}], \\ \tau_{zx} &= K_x [u_x^{(2)} - u_x^{(1)}], \\ \tau_{yz} &= K_y [u_y^{(2)} - u_y^{(1)}],\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 σ_z , τ_{zx} , τ_{yz} は界面における応力成分であり、 $u_x^{(j)}$, $u_y^{(j)}$, $u_z^{(j)}$ は Plate j の表面における変位成分を表す ($j=1, 2$)。 K_z は接着部の垂直剛性、 K_x と K_y はそれぞれ x (幅) 方向と y (長手) 方向の接線剛性であり、これらは接着層の粘弾性係数、厚さおよび被着体/接着層界面の剛性に依存する。このモデル化は、ガイド波を構成する部分波成分の波長が接着層厚に比べて十分に小さい場合に妥当となる。

被着体と接着層の界面で変位と応力が連続である場合、例えば厚さ 10 μm のエポキシ接着剤層の剛性は理論式から $K_z = 1.0 [\text{GPa}/\mu\text{m}]$, $K_x = K_y = 0.2 [\text{GPa}/\mu\text{m}]$ と概算される。本解析では、表 1 のように接線剛性が異なる 4 種類の場合について検討を行った。

表 1 接着剛性のモデル値 (単位: $\text{GPa}/\mu\text{m}$)

Model	K_z	K_y	K_x
A	1.0	0.2	0.2
B	1.0	0.02	0.02
C	1.0	0.2	0.02
D	1.0	0.02	0.2

本研究では、空気結合超音波探触子で発生させたガイド波の伝搬を模擬した周波数領域解析を実施した。Plate 1 の表面上で波源をモデル化し、板を伝わるガイド波の中でラム波 0 次反対称 (A0) モードが支配的に発生するように設定した。補強部に対する A0 モードの入射角を θ とする。解析結果の解釈を容易にするため、構造の周囲には吸収領域を設定した。

数値解析には、汎用の有限要素解析ソフトウェア COMSOL を使用した。解析により構造表面における板厚 (z) 方向変位の分布 $u_z^s(x,y)$ を求め、その結果に対して 2 次元フーリエ変換による波数解析を実施した。これにより、入射波と反射波の振幅を抽出し、補強部における反射特性の周波数依存性を求めた。波形の解析には数値解析ソフトウェア MATLAB を用いた。

2.2 解析結果

補強板長さが $L = 30 [\text{mm}]$ の場合について、周波数 250 kHz, 入射角 $\theta = 10 \text{ deg}$ で A0 モードを入射し、解析で得られた波動場を図 2 に示す。ただし、図 2 は基板表面における面外 (z) 方向変位を表している。接着補強部の手前では、入射波と反射波が重畳していることがわかる。

各周波数に対して得られた波動場に対して 2 次元フーリエ変換を適用し、反射係数を算出した。入射角 $\theta = 10 \text{ deg}$ の際に得られた反射係数の周波数依存性を図 3 に示す。図 3 には、表 1 で示した 4 種類の接着剛性に対する結果を示している。いずれの接着剛性の場合でも、周波数が増えると反射係数は極値を示すことがわかる。この挙動は、接着補強部の手前の端部で反射した成分と、補強部の奥の端部で反射した成分が干渉することに由来すると考えられる。

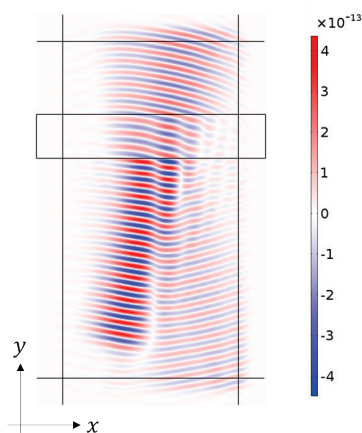


図 2 基板表面における波動場の解析結果の例 ($\theta=10 \text{ deg}$ の場合における面外方向変位)

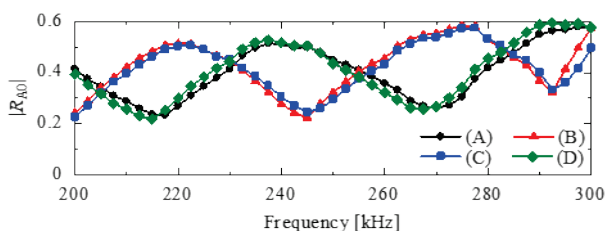


図 3 反射係数の周波数依存性 (入射角 $\theta = 10 \text{ deg}$)

図 3 より、反射係数が示す周波数依存性は接着剛性によって変化することがわかる。具体的には、条件 A と B の結果は異なる傾向を示す一方、A と D、および B と C の差はそれぞれ小さい。この結果は、反射係数の周波数依存性に及ぼす K_x の影響は小さく、 K_y の影響が支配的であることを示唆している。これ以降、反射係数の極値が現れる周波数（極値周波数）と、隣り合う極値の周波数間隔に注目する。

入射角 $\theta=10 \text{ deg}$ の際に K_x の影響が小さい理由として、入射角が小さいことが挙げられる。そこで、 $\theta = 20 \text{ deg}$ の場合について同様の解析を行った。得られた反射係数の周波数依存性を図 4 に示す。図 3 に比べ、4 種類の条件に対する反射係数の差が増大していることがわかる。以上の数値解析により、接着補強部に斜角入射したラム波の反射波を取得し、その特性を解析することで補強部の剛性を推定できる可能性が示唆された。

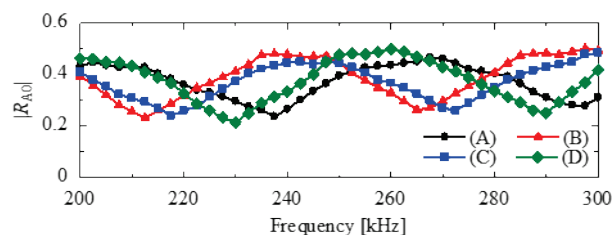


図 4 反射係数の周波数依存性 (入射角 20 deg)

3. 弾性ガイド波による接着補強部の特性評価

3.1 弾性ガイド波斜角入射法の提案

前節の数値解析結果に基づき、接着補強部で反射したラム波 A0 モードのスペクトル特性を用いた接着剛性の評価法を検討する。ここでは、反射スペクトルが極大・極小を示す周波数が接線接着剛性に依存することに注目する。

数値解析では単一周波数の A0 モードを入射した場合を検討したが、実際の測定では有限長さの時間波形を入射波とすることに注意が必要である。すなわち、測定波形のスペクトル解析は空間方向だけでなく時間方向にも必要となる。具体的な評価法として以下の手順が考えられる。

- (A) 周波数帯を考慮して設定した時間波形を送信用の超音波トランスデューサに入力する。
- (B) 入射角 θ を設定し、ラム波 A0 モードを発生させ接着補強部に入射する。
- (C) 入射波の伝搬経路を基に、入射波と接着部からの反射波の両方が存在する空間範囲を指定し、多点で超音波を測定する。
- (D) 測定波形に対して、接着部での往復波成分を含む時間窓を適用し、時間-空間の 3 次元で高速フーリエ変換を行う。各周波数の振幅スペクトルにおいて、波数成分から入射波と反射波の成分を抽出し、比をとることで反射係数を算出する。
- (E) 反射係数の周波数依存性から、特徴的な周波数を抽出し、数値解析結果との比較によって接着剛性の推定を行う。

上の手順 (E) では、実験的に得られた極大・極小周波数が良好に再現されるモデルパラメータを決定する必要がある。例えば、文献 3 では

実験値と数値解析結果の差の2乗和に基づく評価関数を設定し、その関数が最小となるパラメータを推定値として採用している。本研究でも、類似した方法でパラメータを決定できると考えられる。

3.2 実験による妥当性検討と考察

理論モデルと提案手法の有効性を検証するため、実験的な検討を行った。アルミニウム合金製の長方形基板（幅 200 mm，長さ 300 mm，板厚 $d = 2$ [mm]）に同じ材質の補強板（長さ $L = 30$ mm，板厚 2 mm）を接着し試験片を作製した。接着には、室温硬化型の二液混合エポキシ系接着剤を使用した。接着層厚を調整するため、基板上の接着面では端部に公称厚さ $10 \mu\text{m}$ のフッ素樹脂テープを挿入した。なお、基板と補強板の表面に対して特別な接着前処理は実施していない。

接着補強板にラム波 A0 モードを励起する際には、パルサから空気結合超音波探触子（ジャパンプローブ，公称周波数 400 kHz）に電圧を入力した。入力した波形は、320 kHz の正弦波 5 サイクルである。A0 モードの位相速度とスネルの法則から、基板表面に対する超音波入射角度を 10 deg と設定し、接着補強部に対する A0 モードの入射角は $\theta = 10 \text{ deg}$ とした。

ラム波の受信にはレーザ・ドップラー振動計（小野測器）を使用した。測定感度を向上させるため、接着補強部の端部から 10 mm 離れた位置において、再帰反射テープ（長さ 50 mm，幅 90 mm）を基板表面に貼り付けた。なお、本実験の周波数域において、再帰反射テープがラム波の伝搬に及ぼす影響は無視できることを予備検討で確認している。レーザ・ドップラー振動計を 2 軸ステージにより走査し、長さ・幅方向ともに 0.5 mm 間隔で多点測定を行った。各点では 200 回の同期加算平均を行い、得られた波形を PC に保存した。波形のスペクトル解析には数値解析と同様に MATLAB を使用した。

測定された波動場に対して窓関数を設定し、スペクトル解析を実施した。得られた振幅スペクトルを用いて求めた反射係数の周波数依存性

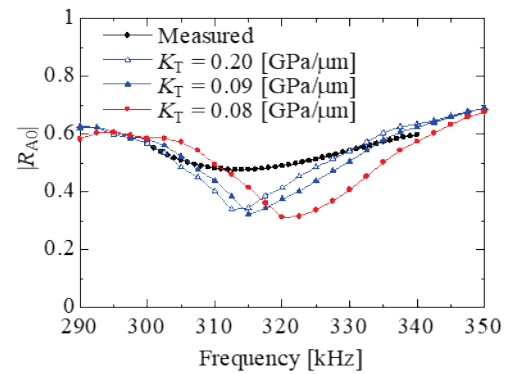


図 5 反射係数の測定結果。数種類の接着剛性に対する数値解析結果も併せて示す。

を図 5 に示す。この図から、測定された反射係数は 314 kHz において極小を示すことがわかる。

この実験結果と数値解析結果の比較を行う。2 節において、厚さ $10 \mu\text{m}$ のエポキシ接着剤層の接線接着剛性を $0.2 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ と概算した。しかし、実際の接着層厚が異なる場合や被着体と接着剤の結合が不十分な場合には接着剛性の値が変化すると考えられる。そこで、図 5 には接線接着剛性が $0.2 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ ， $0.09 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ ， $0.08 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ の 3 種類に対する反射係数を併せて示す。なお、本解析では x 方向と y 方向の接着剛性が等しい ($K_x = K_y$) と仮定している。反射係数の数値解析結果が極小を取る周波数は 300–330 kHz の範囲に存在し、接線剛性の減少とともに単調減少する。実験で得られた反射係数の極小周波数は、 $0.09 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ の解析結果と概ね一致しており、本試験片の接線接着剛性は $0.09 \text{ GPa}/\mu\text{m}$ と推定できる。

以上の結果は、理論モデルと提案手法の有効性を示唆しており、接着条件を変化させた試験片に対する検討が今後の課題となる。特に、幅 (x) 方向の特性を意図的に変化させた試験片に対する評価可能性について検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究では、パッチ補強構造における弾性ガイド波の伝搬特性について理論モデルに基づく数値解析を実施し、得られた知見を用いた特性

評価法の提案を行った。ラム波0次反対称(A0)モードを接着補強部に斜角入射した場合の反射スペクトル特性を示し、極大・極小を示す周波数が入射角や接着剛性に依存することを明らかにした。提案手法の妥当性を検証するため、アルミ合金板の接着試験片に対する実験的検討を行い、測定された反射スペクトルが数値解析結果で概ね再現されること、および提案手法による接線接着剛性の推定可能性を示した。

謝 辞

本研究は、大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻の豊田純也 氏、林 高弘 教授との共同研究として行われました。本研究の実施に際し、ご支援いただきました公益財団法人 京都技術科学センターに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1 P. D. Wilcox, A. Velichko, B. W. Drinkwater, A. J. Croxford, and M. D. Todd, *J. Acoust. Soc. Am.* **128**, 2715–2725 (2010).
- 2 M. V. Golub, A. A. Eremin, A. N. Shpak, and R. Lammering, *Appl. Acoust.* **155**, 442–452 (2019).
- 3 N. Mori, D. Wakabayashi, and T. Hayashi, *Int. J. Adhes. Adhes.* **113**, 103071 (2022).
- 4 N. Mori, N. Matsuda, and T. Kusaka, *J. Acoust. Soc. Am.* **145**, 3541 (2019).

本研究に関する成果発表

- (1) J. Toyota, N. Mori, T. Hayashi, “Three-dimensional analysis of reflection characteristics of Lamb waves at an adhesively bonded stiffener in a plate,” *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics* **43**, 3Pa2-7 (2022).
- (2) 森 直樹, 「超音波による接着接合部の非破壊評価法—欠陥評価と特性評価—」, 接着・接合コンソーシアム 第18回企業ワークショップ, 2022年11月10日.
- (3) 豊田純也, 森 直樹, 林 高弘, 「薄板接着補強部におけるラム波反射係数に周波数と入射角が及ぼす影響の三次元数値解析」, 日本

非破壊検査協会 第30回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp. 55–56 (2023).