

レーザー超音波可視化試験を用いた擬似等方性積層板に対する弾性定数の推定と有限要素法による検証

群馬大学 大学院理工学府 学生会員 ○大芦健太
 群馬大学 大学院理工学府 学生会員 前原 佑
 群馬大学 大学院理工学府 正会員 斎藤隆泰

1. はじめに

近年, 構造材料として炭素繊維強化プラスチック (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) の利用が進んでいる. CFRP は, 軽量で高い引張り強度を有する等, 力学的に優れた特性を示すものの, 任意の積層構造を持つため, 複雑な音響異方性の性質を示す. そのため, CFRP 中の欠陥を通常の超音波非破壊評価法で探傷した場合, 音響異方性の影響で, 探傷精度が大きく低下する可能性がある. CFRP の音響異方性の性質を明らかにするためには, 弾性定数を決定する必要がある. 従来の異方性材料に対する弾性定数推定手法は, 試験体の一部の切断や, 水浸探傷が必要となる等の方策が取られており, 比較的手間のかかる方法となっている. そのような中, 著者らのグループでは, レーザー超音波を用いて弾性定数を効率よく求める新たな方法を提案している¹⁾²⁾. そこで, 本研究では, その方法を用いて擬似等方性積層板に対して, 弾性定数を推定することを試みる. また, 推定した弾性定数を用いて, 有限要素法 (FEM) による3次元超音波シミュレーションを実行し, その結果をレーザー超音波可視化試験結果と比較することで, 推定結果の妥当性について検討する.

2. レーザー超音波可視化試験

(1) レーザー超音波可視化試験と擬似等方性積層板の概要

まず, レーザー超音波可視化試験について説明する. レーザー超音波可視化試験は, 図 1(a) のような LUVE (Laser Ultrasonic Visualization Equipment) と呼ばれる計測装置を用いて実施した. 受信探触子は積層板上部に垂直に設置し, その中心周波数は 200KHz と設定した. レーザー超音波可視化試験では, パルスレーザーを対象とする材料の表面に照射し, 熱膨張を発生させることで, 超音波を伝搬させる. レーザー超音波可視化試験の様子は図 1(b) に示す通りである. また, 研究対象とする擬似等方性積層板は, 図 2(a) のような東邦テナックス社製のものであり, 密度は $\rho = 1560\text{kg/m}^3$ である. 大きさは x_1 方向, x_2 方向の幅 300mm, x_3 方向の深さが 13.6mm である. この時, 弾性定数 $C_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, 6$) は不明であるが, 炭素繊維は図 2(a) のように $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ の順で配向され, 擬似等方性の性質を持つことだけは既知であるとする.



図 1 レーザー超音波可視化試験 (a) 計測装置 LUVE (Laser Ultrasonic Visualization Equipment) (b) 実際のレーザー超音波可視化試験の様子.

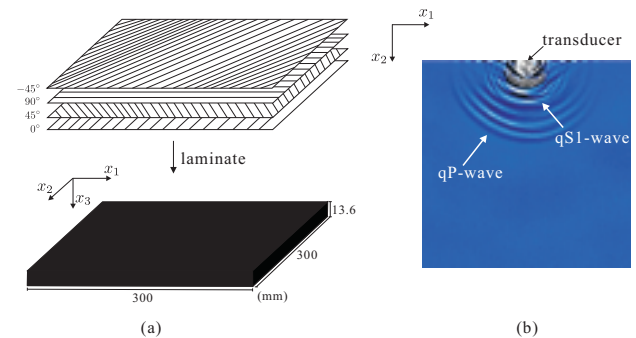


図 2 CFRP 中を伝搬する超音波の可視化 (a) 擬似等方性積層板 (b) レーザー超音波可視化試験結果.

(2) レーザー超音波可視化試験結果

図 2(b) にレーザー超音波可視化試験結果の一例を示す. 図 2(b) は図 2(a) における x_1 - x_2 面での擬似等方性積層板を伝搬する超音波を可視化した結果を示している. 擬似等方性積層板を伝搬する超音波として, およそ等方に伝搬する擬似 P 波 (qP 波), および対応する擬似 S 波 (qS 波) を確認することができる. 擬似等方性積層板を伝搬する超音波は, x_1 - x_2 面については異方性の影響をさほど受けてはなく, およそ等方に伝搬していることがわかる. また, 図 2(b) より, 超音波の波長は, 炭素繊維径に比べて十分大きいため, 炭素繊維自体による散乱波は見受けられず, マクロレベルでは, その影響はさほど考えなくて良いことがわかる.

3. 画像解析による弾性定数の推定

(1) 弾性定数推定のための基礎式

レーザー超音波可視化試験では, 擬似等方性積層板を伝搬する超音波を可視化することができる. そのため, レーザー超音波可視化試験で示される qP 波や qS 波を用いて, 次節で述べる画像解析により弾性定数を決定できるよう工夫す

Key Words: 擬似等方性積層板, 弾性定数推定, レーザー超音波可視化試験, 有限要素法

〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1 群馬大学 大学院理工学府 TEL. 0277-30-1610 FAX. 0277-30-1610

る必要がある。擬似等方性積層板中を伝搬する超音波の伝搬速度を、次節で述べる画像解析により決定できれば、弾性定数 $C_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, 6$) は、Christoffel 方程式を解くことで次のように求めることができる。

$$C_{11} = \rho V_{L-L}^2 \quad (1)$$

$$C_{22} = \rho V_{L-C}^2 \quad (2)$$

$$C_{33} = \rho V_{L-Z}^2 \quad (3)$$

$$C_{44} = \rho V_{T \perp ZL-Z}^2 = \rho V_{T \perp LC-C}^2 \quad (4)$$

$$C_{55} = \rho V_{T \perp ZC-Z}^2 = \rho V_{T \perp LC-L}^2 \quad (5)$$

$$C_{66} = \rho V_{T \perp ZL-L}^2 = \rho V_{T \perp ZC-C}^2 \quad (6)$$

$$C_{23} + C_{44} = \sqrt{(4\rho V_{L-ZC}^2 - C_{22} - C_{33} - 2C_{44})^2 - (C_{22} - C_{33})^2} / 2 \quad (7)$$

$$C_{13} + C_{55} = \sqrt{(4\rho V_{L-ZL}^2 - C_{11} - C_{33} - 2C_{55})^2 - (C_{11} - C_{33})^2} / 2 \quad (8)$$

$$C_{12} + C_{66} = \sqrt{(4\rho V_{L-LC}^2 - C_{11} - C_{22} - 2C_{66})^2 - (C_{11} - C_{22})^2} / 2 \quad (9)$$

ここで、 V_{L-L} , V_{L-C} , V_{L-Z} は、それぞれ x_1 , x_2 , x_3 方向に伝搬する縦波位相速度を表す。 $V_{T \perp ZL-Z}$ ($= V_{T \perp LC-C}$) は x_2 方向に振動し、 x_3 方向に伝搬する横波位相速度 (x_3 方向に振動し、 x_2 方向に伝搬する横波位相速度)、 $V_{T \perp ZC-Z}$ ($= V_{T \perp LC-L}$) は x_1 方向に振動し、 x_3 方向に伝搬する横波位相速度 (x_3 方向に振動し、 x_1 方向に伝搬する横波位相速度)、 $V_{T \perp ZL-L}$ ($= V_{T \perp ZC-C}$) は x_2 方向に振動し、 x_1 方向に伝搬する横波位相速度 (x_1 方向に振動し、 x_2 方向に伝搬する横波位相速度) を表す。そして、 V_{L-ZC} , V_{L-ZL} , V_{L-LC} は、それぞれ x_2 - x_3 , x_1 - x_3 , x_1 - x_2 面内を 45° 方向に伝搬する縦波位相速度を表している。

(2) 画像解析による弾性定数の推定

弾性定数 $C_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, \dots, 6$) を推定するためには、密度 ρ は既知であることから、式 (1)-(9) の超音波の位相速度 V を各々、求めればよい。本研究では、レーザー超音波可視化試験結果を画像解析し、これら超音波の位相速度を推定し、その結果を式 (1)-(9) に代入することで弾性定数を決定する。本研究での弾性定数の推定手順は次の通りである。まず、レーザー超音波可視化試験結果のデータは、映像で出力されるので、それらを各時間ステップ毎の画像データとして出力する。次にそれらの画像について、エッジ処理を行うことで、画像データから超音波の波面を抽出する。このとき、時刻が異なる 2 つの画像データを用意し、それぞれの画像について 1 つの着目画素を設定する。そして、それぞれのケースについて、qP 波、qS 波がどのように伝搬したかを画像の差分結果から割り出す。その結果を用いて、2 枚の画像の着目画素位置の差から各超音波の伝搬距離を計算し、データ測定点における時間差から超音波の位相速度を測定する。以上より、画像解析で求めた弾性定

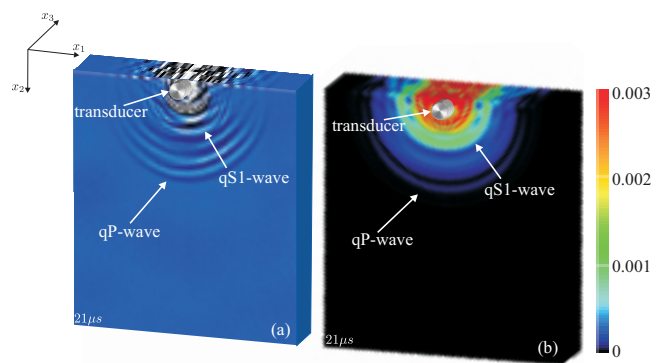


図3 超音波伝搬の様子 (a) レーザー超音波可視化試験結果 (b) FEM による超音波伝搬解析結果。

数は、 $C_{11}=C_{22}=52.3$, $C_{33}=13.8$, $C_{12}=21.7$, $C_{13}=C_{23}=4.16$, $C_{44}=C_{55}=5.43$, $C_{66}=17.6$ (単位は GPa) である。

4. FEM による超音波シミュレーションの実行

(1) 有限要素法 (FEM : Finite Element Method)

3 節で求めた弾性定数を用いて FEM による 3 次元超音波シミュレーションを実行し、解析結果をレーザー超音波可視化試験結果と比較し、本手法の妥当性の確認を行う。FEM は解析領域を微小領域に分割し、その分割した各々の要素について近似的に変位を求める手法である。また、本解析では、Galerkin 法を用いて解析領域の空間の離散化を行い、陽解法を用いて逐次的に変位を算出した。FEM 解析に関しては、例えば文献³⁾等を参照されたい。

(2) 数値解析結果

2 節で説明したレーザー超音波可視化試験結果の一例を図 3(a) に示す。また、それと同時刻における超音波伝搬解析結果を図 3(b) に示す。また、解析条件として、図 2(a) の擬似等方性積層板を有限要素数 $m=1055925$ のボクセル要素で離散化し、時間増分 Δt は $\Delta t=5.0\text{ns}$ 、密度は $\rho = 1560\text{kg/m}^3$ とした。解析モデル表面の境界条件は表面力フリーとし、入射波は 200KHz の正弦波を一波とした。なお、解析結果は、 x_1 , x_2 , x_3 方向の変位の絶対値を可視化している。図 3(a) と図 3(b) より、両結果の波動伝搬の傾向は概ね一致しており、推定した弾性定数は概ね妥当であると考えられる。

5. おわりに

擬似等方性積層板のおよその弾性定数を推定した。また、弾性定数の推定結果から FEM を用いた 3 次元超音波シミュレーションを行い、レーザー超音波可視化試験結果と比較することで推定した弾性定数の妥当性を示した。今後は、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) やその他の積層角を有した CFRP に対しての弾性定数の推定を行う予定である。

参考文献

- 1) T. Saitoh and A. Mori : Development of new elastic constant estimation method using the laser ultrasonic visualization testing, Civil, Architecture and Environmental Engineering, vol.1, pp. 669-674, DOI:10.1201/9781315116259-118, 2017
- 2) 溝上尚弥・中畑和之・黄木景二・堤三佳・森亜也華・斎藤隆泰 : レーザースキャンによる音響異方性を有する CFRP 中の超音波の可視化と弾性スティフネスの推定, 土木学会論文集 A2(応用力学), vol.72, No.2, pp.115-124, 2017
- 3) 矢川基元・吉村忍共著 : 計算力学と CAE シリーズ 1 有限要素法, 培風館, 1991