熱残留応力を受けた二方向積層板のそり変形と界面応力[†]

平井 恒夫* 片山 傳生*

篠原 正浩** 三浦 嘉良***

Distortion Behavior and Interface Stress of Bi-directional
Laminate under Thermal Residual Stress

by

Tsuneo HIRAI*, Tsutao KATAYAMA*, Masahiro SHINOHARA**
and Kazuyoshi MIURA***

The required properties of fiber reinforced composites such as bi-directional laminates may be obtained by changing the ply angle of laminae. But these laminates have distinct interfaces and so their properties are affected by the state of these interface stresses. Therefore, in the design of bi-directional laminates, it is very important to grasp the situation of interface stress.

In this paper, the distortion behavior of bi-directional laminates under thermal residual stress, whose angle of principal axis in material properties was not 0° , was made clear by the experiments. In order to clarify the distribution of interface stresses, numerical analysis by finite element method (FEM) was carried out and the results were verified by the actual distortion behavior. A hybrid modeling with triangular shell and prismatic elements was used in the analysis. In the past, this modeling was found to be effective in the case of bi-directional laminates whose angle of principal axis in material properties was 0° .

The following conclusions are obtained.

(1) In the case that the angle of principal axis in material properties of laminates was not 0° , the experimental and numerical results showed quantitative accordance. So the hybrid modeling with triangular shell and prismatic elements was also effective in this case.

(2) By using this modeling, the distribution of interface stress and the distortion behavior can be guessed in bi-directional laminates whose angle of principal axis in the material properties was not 0° .

Key words : Bi-directional laminates, Distortion behavior, Interface stress, Thermal residual stress, Finite element method

1 緒 言

繊維強化複合材料 (FRP), なかでも二方向積層板は, 各層を構成するプライの配向を変化させることにより, 慣用材料には期待できない種々の力学的特性が生まれ, 要求に応じた積層設計が可能である. このような性質をもつ積層板の最適設計に関する研究は, S. W. Tsai, 三木ら^{1), 2)}によって近年盛んに行なわれている. しかしながら, それらの手法は積層板の巨視的挙動の最適化を図ろうとするものであり, 接着層に生じる界面応力の分布の不均一性に関しては考慮されていない. 積層板を主要構造部材としてのみではなく, 例えば電気・電子回路の基板のような付加価値の高い補助構造部材として適用する場合, この界面応力の不均

一分布は, 積層板の力学的特性や変形挙動に対し大きな影響を与えるものであり, 界面応力の分布状態を把握することはきわめて重要な課題となっている.

過去の研究^{3), 4)}では, 界面応力の分布の不均一性が積層板の変形挙動におよぼす影響を明らかにするために, 熱残留応力による面外変形挙動を測定および数値解析によって求め, さらに界面応力の分布状態を数値解析によって明らかにしてきた. しかしながら, 材料主軸角が 0° である積層板しか対象とされていなかった. そこで今回の研究では, 材料主軸角が 0° でない積層板を対象とし, その面外変形挙動を測定し, さらに巨視界面での界面応力の分布状態を数値解析によって明らかにした.

[†] 原稿受理 平成2年6月1日 Received June 1, 1990

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区今出川通烏丸東入, Faculty of Engineering, Doshisha University, Karasuma-Imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

** 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区今出川通烏丸東入, Graduate Student, Doshisha University, Karasuma-Imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

*** 同志社大学大学院 京都市上京区今出川通烏丸東入, Graduate Student, Doshisha University, Karasuma-Imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

2 試料および熱残留応力による面外変形の測定方法

2・1 試験片

本研究で用いた二方向積層板は、ガラス繊維にエポキシ樹脂を含浸させプリプレグ状態にしたレジテープ (TR19-200EC, 日東紡績(株)製) を使用し、ハンドレイアップ法により試料形状が正方形となるように積層し、加熱加圧成形した。その際の温度および時間は以下のように変化させた。まず、プリプレグ中のエポキシ樹脂が融解する温度 100°C で5時間加熱し、次に完全硬化のために 100°C から 150°C まで1時間で昇温する。更に、アフタキュアとして 150°C の状態を12時間維持し、その後自然放冷した。

各プライの配向角が熱残留応力におよぼす影響を明らかにするために、配向角は反時計回りを正の方向とし、Fig. 1に示す θ_1 については 15° , 30° , 45° , 60° ,

(a) Ply angle in bi-directional laminate.

(b) Laminate construction.

Fig. 1. Definition of ply angle and laminate construction.

75° , 90° と 15° 刻みに変化させ、 θ_2 を 0° に固定した計6パターンとした。また、積層枚数が熱残留応力におよぼす影響を明らかにするため、上側の θ_1 層は2層のものと4層のものを、下側の θ_2 層を2層のみとしたものをそれぞれの配向角において作製した。作製した積層板の厚さは、2層/2層のものが 1.1 mm 、2層/4層のものが 1.6 mm であった。

2・2 熱残留応力による面外変形の測定方法

本研究で用いたような二方向積層板に熱残留応力が作用するとカップリング効果により面外変形が生じる。過去の研究では、モアレトポグラフィ法によりその面

Fig. 2. Measuring system by laser displacement system.

外変形挙動を計測していた。この方法は定性的には比較しやすいが、定量的には比較し難いため、本研究ではFig. 2に示すような非接触型レーザー変位測定システムを用いてその面外変位量を測定した。

3 有限要素法による二方向積層板の数値解析モデル

二つのプライグループから成る二方向積層板には、厚さが有限の接着層がラミナ間に存在する。そこでこの積層構造の実態に基づいたモデル化を行なうため、過去の研究ではFig. 3に示すようなモデル化を行なった。

要素としては同一の繊維配向のプライグループを均質異方性を有する三角形シェル要素に置き換え、接着層を均質等方性を有するプリズム要素で表現し、それぞれを接合する。ただし、接着層の厚さは、ラミナのそれに比べ極めて薄いものとし、接着層に生じる平面ひずみの板厚方向の変化は無視しうる程度の微小であると仮定した。また、すべての要素は降伏にはいたらないものとして弾性計算を行なった。

計算を行う際に用いた数値をTable Iに示す。この表中において添え字 L および T はそれぞれ繊維の配向方向と、それに垂直な方向を表す。ラミナを仮想するシェル要素の厚さは、2層のものが 0.5 mm 、4層

Fig. 3. Hybrid modeling with triangular shell and prismatic elements.

Table I. Material properties of each element.

	Young's modulus E_L (GPa)	Young's modulus E_T (GPa)	Shearing modulus G_{LT} (GPa)	Poisson's ratio ν_{LT} (-)
Shell element	35.0	8.2	3.2	0.32
Prism element	5.0	5.0	1.92	0.30

のものが1.0 mmとし, 接着層を仮想するプリズム要素の厚さは0.1 mmとした. また, 熱残留応力を求めるために必要なラミナの線膨張係数は, $\alpha_L = 2.143 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_T = 10.543 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ とした.

この数値解析法によって求められた界面応力を実験的に検証するのは不可能であるので, 実験で求めた面外変形を用いて解析法の検証とした.

本研究では, このモデル化が材料主軸角が 0° でない積層板にも適用できるかどうかを検証し, 界面応力分布の検討を行なった.

4 熱残留応力による面外変形の測定結果および数値解析結果

4・1 各プライの配向角が面外変形におよぼす影響

ここでは各プライの配向角が熱残留応力による面外変形挙動にどのような影響をおよぼすかを明らかにす

るため, 2層/2層の積層板について検討する.

Fig. 4~Fig. 6 はさきに述べた測定法および数値解析法によってえられた面外変形の等高線の代表的な例として, $[+30^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+45^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+75^\circ_2/0^\circ_2]_T$ のものをそれぞれ示したものである.

これらの図からわかるように, 測定結果, 計算結果ともに各プライの配向角の二等分線を漸近線とした面外変形がみられる. また, 図には示していないが, $[+15^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+60^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+90^\circ_2/0^\circ_2]_T$ の場合も同様な面外変形挙動がみられた.

さらに, 面外の最大変位量は, 測定結果, 計算結果ともに $[+45^\circ_2/0^\circ_2]_T$ を中心として変化している. すなわち, $[+15^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+30^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+45^\circ_2/0^\circ_2]_T$ となるにつれ変位量が大きくなり, $[+60^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+75^\circ_2/0^\circ_2]_T$, $[+90^\circ_2/0^\circ_2]_T$ となるにつれ変位量が小さくなっている.

以上のことより, 面外変形挙動の様相, 面外の最大変位量からみて, 計算結果は測定結果と定性的により一致を示している.

4・2 積層枚数が熱残留応力変形におよぼす影響

ここでは積層枚数の違いが熱残留応力による面外変

Fig. 4. Contour line illustrating the distortion mode of $[+30^\circ_2/0^\circ_2]_T$ laminate.

Fig. 5. Contour line illustrating the distortion mode of $[+45^\circ_2/0^\circ_2]_T$ laminate.

Fig. 6. Contour line illustrating the distortion mode of $[+75^\circ/0^\circ]_T$ laminate.

形挙動におよぼす影響を明らかにするため、2層/2層の積層板と4層/2層の積層板について比較検討する。

Fig. 7 ~ Fig. 9 は $[+30^\circ/0^\circ]_T$, $[+45^\circ/0^\circ]_T$, $[+75^\circ/0^\circ]_T$ の面外変形の測定結果、および計算結果の等高線をそれぞれ示したものである。

2層/2層の場合と4層/2層の場合とを比較すると測定結果、計算結果ともに4層/2層の方が2層/2層よりも積層枚数の多いプライの繊維配向方向の等

高線の幅が広くそりがゆるやかになっていることがわかる。また、そり変形の漸近線は、各プライの配向角の二等分線よりも積層枚数の多いプライの繊維配向方向にかたよっている。

これらの図からもわかるように、面外変形挙動についての測定結果と計算結果は定性的によい一致を示している。また、図には示していないが、 $[+15^\circ/0^\circ]_T$, $[+60^\circ/0^\circ]_T$, $[+90^\circ/0^\circ]_T$ の場合についても同様であった。

Fig. 7. Contour line illustrating the distortion mode of $[+30^\circ/0^\circ]_T$ laminate.

Fig. 8. Contour line illustrating the distortion mode of $[+45^\circ/0^\circ]_T$ laminate.

(a) By laser displacement system.

(b) By finite element method.

Fig. 9. Contour line illustrating the distortion mode of $[+75^\circ/0^\circ]_T$ laminate.

以上のことより, 積層枚数を変えた場合にも測定結果と計算結果は定性的によい一致を示しており, 本研究で用いたモデル化は材料主軸角が 0° でない二方向積層板にも十分応用できることが明らかとなった。

5 有限要素法による界面応力の解析結果

さきに述べたように, 材料主軸角が 0° でない積層板に関しても本解析モデルの妥当性が示されたので, ここでは数値計算により界面応力を算出し, その分布状態について検討を行なう。

解析モデルに表したように, 二方向積層板には繊維層と繊維層の間に界面が存在し, そこにはたらく界面応力は積層板の機械的特性に大きな影響を与える。例えば, 界面応力が集中していれば, その位置から破壊が起こり得ると考えられるし, 不均一であれば積層板の部分によって応力伝達等の材料特性が変わると推測できるからである。

材料に依存する応力の評価法はいろいろあるが, 今回の場合, Hillの降伏条件式を用いてプリズム要素に

作用する応力から相当応力を求め, 界面応力とした。

5・1 各プライの配向角が界面応力におよぼす影響

ここでは各プライの配向角が界面応力にどのような影響をおよぼすかを明らかにするため, 2層/2層の積層板について検討する。

Fig. 10~Fig. 13は界面応力分布の代表的な例として $[+15^\circ/0^\circ]_T$, $[+45^\circ/0^\circ]_T$, $[+75^\circ/0^\circ]_T$, $[+90^\circ/0^\circ]_T$ の場合の界面応力の等高線を示したものである。

これらの図から, $[+15^\circ/0^\circ]_T$ では, 応力集中の度合いが低く, 試料全体にわたって比較的均一な応力分布を示しているが, $[+45^\circ/0^\circ]_T$, $[+75^\circ/0^\circ]_T$ となるにつれて応力集中の度合いが高くなっていき, $[+75^\circ/0^\circ]_T$ の場合が最も応力集中が顕著で, 不均一な分布を示している。 $[+90^\circ/0^\circ]_T$ になると, 応力集中はやや緩和されているのがわかる。

また, 材料主軸角が 0° である二方向積層板の場合, 自由端近傍, 特に試験片四隅に応力集中が起こることが過去の研究で明らかにされている。今回対象と

Fig. 10. Contour line illustrating the interface stress of $[+15^\circ/0^\circ]_T$ laminate by finite element method. Fig. 11. Contour line illustrating the interface stress of $[+45^\circ/0^\circ]_T$ laminate by finite element method.

Fig. 12. Contour line illustrating the interface stress of $[+75^\circ_2/0^\circ_2]_T$ laminate by finite element method.

した積層板の場合も、自由端近傍に応力集中が起こっているが、試料片四隅で起こっているわけではなく、各プライの配向角の鋭角側の二等分線上で応力集中が起こっている。また、材料主軸角が 0° である二方向積層板の場合、応力の分布は材料内部でほとんど変化することなく、ほぼ均一であることが明らかにされているが、今回の場合は、材料内部で均一というわけではなく、各プライの配向角の鈍角側の二等分線方向では比較的均一であるが、鋭角側の二等分線方向では応力の集中がみられ、不均一な分布をしている。

5・2 積層枚数が界面応力におよぼす影響

ここでは積層枚数の違いが界面応力におよぼす影響を明らかにするため、2層/2層の積層板と4層/2層の積層板について比較検討する。

Fig. 14~Fig. 17 は界面応力分布の代表的な例とし

Fig. 14. Contour line illustrating the interface stress of $[+15^\circ_4/0^\circ_2]_T$ laminate by finite element method.

Fig. 13. Contour line illustrating the interface stress of $[+90^\circ_2/0^\circ_2]_T$ laminate by finite element method.

て $[+15^\circ_4/0^\circ_2]_T$, $[+45^\circ_4/0^\circ_2]_T$, $[+75^\circ_4/0^\circ_2]_T$, $[+90^\circ_4/0^\circ_2]_T$ の場合の界面応力の等高線を示したものである。

これらの図より、応力分布の様相は2層/2層の場合と同様に $[+15^\circ_4/0^\circ_2]_T$ の場合が等高線の間隔が広く、応力集中の度合いが最も低く、比較的均一な分布をしている。 $[+45^\circ_4/0^\circ_2]_T$, $[+75^\circ_4/0^\circ_2]_T$ となるにしたがって応力集中の度合いが高くなっていく。2層/2層の場合は、 $[+75^\circ_2/0^\circ_2]_T$ の積層板が最も応力集中が顕著であったが、4層/2層の場合は、 $[+90^\circ_4/0^\circ_2]_T$ のとき最も応力集中が顕著で分布が不均一である。さらに全体として、2層/2層の場合よりも4層/2層の場合のほうが応力分布の不均一性は高い。

応力集中を起こしている位置は2層/2層の場合と同様に、各プライの配向角の鋭角側の二等分線上の自

Fig. 15. Contour line illustrating the interface stress of $[+45^\circ_4/0^\circ_2]_T$ laminate by finite element method.

Unit:[MPa]

Fig. 16. Contour line illustrating the interface stress of $[+75^\circ/0^\circ]_T$ laminate by finite element method.

Unit:[MPa]

Fig. 17. Contour line illustrating the interface stress of $[+90^\circ/0^\circ]_T$ laminate by finite element method.

由端付近である。また、2層/2層の場合は各プライの配向角の鈍角側の二等分線上では応力は比較的均一な分布を示していたが、4層/2層の場合は鈍角側の二等分線上にも応力の集中がみられ、不均一な分布をしている。

6 結 言

今回の研究では、材料主軸角が 0° でない二方向積層板を対象とし、熱残留応力による面外変形を測定し、さらに過去に用いたモデル化がこの場合にも有効であるかを面外変形挙動によって検証し、界面応力の分布状態を明らかにした。

結果として、以下のことが明らかとなった。

(1) 今回用いた材料主軸角が 0° でない二方向積層板において、二つのプライグループの積層枚数が等しい場合はプライの配向角の二等分線を漸近線としたそり変形挙動がみられ、 $[+45^\circ/0^\circ]_T$ の積層板のそり変形が最も著しい結果が得られた。

(2) 二つのプライグループの積層枚数が異なる積層板では、積層枚数が等しい積層板に比べ、積層枚数が多いプライグループの繊維配向方向のそりがゆるやかになることがわかった。また、そり変形の漸近線は、各プライの配向角の二等分線よりも積層枚数の多いプ

ライの繊維配向方向にかたよっている。

(3) 過去の研究で用いていたシェル要素とプリズム要素のモデルは、今回対象とした材料主軸角が 0° でない二方向積層板にも適用できることが明らかとなった。

(4) 材料主軸角が 0° でない二方向積層板の界面応力は、各プライの鋭角側の二等分線上の自由端付近に集中することがわかった。また、二つのプライグループの積層枚数が異なる積層板では、積層枚数の等しい積層板に比べ、応力集中の度合が高く、応力の分布の不均一性が高い。

(平成2年3月15日 第19回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) S. W. Tsai, "COMPOSITE DESIGN 1986" (1986) THINK COMPOSITES, Dayton Ohio
- 2) 三木光範, 強化プラスチック, 27, 377 (1981).
- 3) T. Hirai, A. Inoue, T. Senba and M. Hirai, Mechanical Behaviour of Materials IV, Vol. 2, 1039 (1984) Pergamon Press
- 4) 平井恒夫, 片山傳生, 楊 朱憲, 大歳卓男, 第15回 FRP シンポジウム前刷集, p.125 (1986).