研究論文

CFRP 積層板の成形時熱変形に対する曲面成形板の影響

小山 昌志*, 岡崎 宏康**, 横田 峰***, 福田 博*

(2008年3月7日受付)

Effect of Curved Mold for Thermal Deformation of CFRP Laminates

Masashi KOYAMA,* Hiroyasu OKAZAKI,** Takashi YOKOTA*** and Hiroshi FUKUDA*

(Received March 7, 2008)

Fiber reinforced plastics are often made by laminating unidirectional prepreg sheets in various directions. Large deformation during cure process of asymmetric CFRP is caused by mechanical and thermal anisotropic properties of unidirectional prepreg. Several reports have been released concerning flat mold processing. Experimental and FEM study on thermal deformation of orthogonal asymmetric laminates cured on curved mold have also been reported, although the area of survey was somewhat limited. In this paper, systematic experiments on thermal deformation of laminates were performed using flat and curved molds and some new findings were obtained.

1. 緒 言

樹脂系複合材料では一方向プリプレグを色々な角度に積層して成形することが多いが、一方向プリプレグは機械的、熱的に大きな異方性をもつため、非対称積層をすると大きな面外変形を生じることがある。この現象は古くから知られており、Hyerの初期の報告¹⁾でもすでに先行研究のレビューがなされているほどである。Hyer¹⁾はまず各種積層構成の積層板を成形し、成形温度から常温に戻したときの熱変形を観察・計測し、曲率、ねじり率をMohrの円によって整理している。続いてHyer^{2,3)}は、[0/90]直交非対称積層板の熱変形を有限変形理論のもと、全ポテンシャルエネルギー最小の原理を用いて解析した。文献2)では[0₂/90₂]、[0₄/90₄]の逆対称積層構成について、文献3)では4層に限定し、たとえば[0₂/90/0]といった積層構成も扱っている。Hamamotoら⁴⁾はHyerの一連の研究を受けて、変位の近似に改良をほどこし、また温度を変化させて変形形状を連続的に計測し、成形温度まで戻すとほぼ元の形(平板)に戻ることを確

認するなど、[0/90]逆対称積層板の理論をほぼ完成させた。その後もJunら⁵⁾、元木ら⁶⁾、Choら⁷⁾などが、成形時の残留熱ひずみを導入した解析、コーナー部のめくれ現象の解析、型のあらさ(摩擦係数)が熱変形に及ぼす影響の検討などを行っている。

以上の論文はHyerの最初の論文¹⁾を除き、[0/90]直交非対称積層平板を扱っている。一方Fukudaら^{8,9)}は[0/90]逆対称積層板に広げて熱変形実験を行い、変形後の主曲率方向についてHyer¹⁾と異なった見解を提出している。Hyer²⁾の流れを汲む解析および有限要素解析も行っている。

文献8)では曲面(円筒形)型上で成形した[0/90]直交非対称積層曲面板の熱変形実験結果も報告されており、曲面型を扱った初期のものであるが、現象論的段階にとどまっている感はぬぐえない。Renら¹⁰⁾は同じ課題についてFEM解析を行い、いくつか興味ある結果を得ている。

筆者らは引き続き、曲面型上で成形した積層板の熱変形実験を系統的に行い、いくつかの興味ある現象、特に新しい形のスナップスルー現象も見出したので、報告する。

2. 方 法

2.1 CFRP 積層材の作製

本実験で用いた基材は、旭化成工業社製の炭素繊維一

* 東京理科大学
Tokyo University of Science

** マツダ株式会社
MAZDA motor corporation

*** 東京理科大学大学院
Graduate Student, Tokyo University of Science

Fig. 1 Definition of angle on curved mold.

Fig. 2 Schematic illustration of forming method.

方向プリプレグ (AUT125533A 硬化温度 180°C 厚さ 0.125 mm) である。このプリプレグを 100×100 mm の寸法に切り出し積層した。プリプレグの積層数を 4 枚に限定し、積層構成は 0°, 90° の組み合わせで、 $[0_4]_T$, $[0_3/90_1]_T$, $[0_2/90_2]_T$, $[0_1/90_3]_T$, $[90_4]_T$, $[90_3/0_1]_T$, $[90_2/0_2]_T$, $[90_1/0_3]_T$ の全 8 種類とした。なお、積層順序は上から数えたものとした (Fig. 1 参照)。

また、型の曲率が積層板の熱変形状に与える影響を調査するため、成形に用いる型は、①平面型 (曲率 0 m⁻¹) (以後 RF)、②部分円柱形曲面型 (曲率半径 $R=180$ mm (曲率 5.56 m⁻¹) (以後 R180))、③同上 (曲率半径 $R=450$ mm (曲率 2.20 m⁻¹) (以後 R450)) の 3 種類のアルミ製の型を用意した。なお、曲面型の上で成形した積層板は、配置角度を 90° ずらすと、熱変形後の曲率に違いが生じることから、Fig. 1 に示すように、円柱の長さ (母線) 方向を積層材の 0° 方向、円筒の周方向を 90° 方向と定義して積層構成を区分した。

この各型上に作製したプリプレグスタックを乗せ、簡易オートクレーブ内で、温度 120°C で 1 時間保持後、温度 180°C、圧力 0.58 MPa の条件下で加熱成形を行った。製作数は、各積層構成につき 2 枚ずつとした。成形法には、Fig. 2 に示すように型の上に順次離型フィルム、プリプレグスタック、ブリーザを重ね、ナイロンバッグで覆い真空を引き、余分な樹脂をブリーザに吸収させるブリー

Fig. 3 Three-dimensional shape measurement device.

ド成形法を採用した。

2.2 熱変形の形状測定

成形した積層板の熱変形状の測定は、Fig. 3 に示す試料台の水平に対する試料変形量を測定するレーザ式変位計を備えた 3 次元形状測定器を用いて行った。測定点は、縦横 10 mm 間隔で 64 (8×8) 点とした。

なお、積層板の主曲率、主曲率方向は、本研究室で開発したプログラムに形状測定で得られた値を代入して算出した。

3. 結果および考察

3.1 成形後の熱変形状

RF 上で成形した一方向材および R180 上で成形した $[0_1/90_3]$ 以外のすべての積層板において、Fig. 4 に示す 4 つの円筒形状 (a)～(d) のいずれかに属する熱変形を生じた。ここで、Fig. 4 の各形状の説明をする。形状 (a)、(b) は上に凸の形状で、(a) は曲面型と同じ主曲率方向 0° を有する形状である。形状 (b) は形状 (a) を法線周りに 90° 回転した形状、すなわち主曲率方向を 90° としたものである。形状 (c)、(d) は下に凸の形状で、互いに主曲率方向が 90° 異なっている。以後の結果、考察の記述は、Fig. 4 の各形状 (a)～(d) を用いて行う。なお、本実験の熱変形状は円筒形状であり、主曲率の片方はほぼ 0° であるので、今後主曲率および主曲率方向は、主曲率の絶対値が大きい方についてのみ取り扱うことにする。

唯一、R180 上で成形した $[0_1/90_3]$ のみ、積層構成が 0°, 90° の組み合わせに関わらず円筒形状がねじれ主曲率方向が 20°～25° ずれた特異な形状となった。この挙動については別途後述する。

3.2 平面型 (RF) 上で成形した積層板の変形挙動

積層に偏りを持たせた積層板を RF 上で成形すると、積層数の多い層の形状を維持する力が支配的となるた

め、積層数の少ない層の変形は打ち消され、影響の大きい繊維方向に曲がる変形挙動を示した。

また、 0° 層と 90° 層の積層数が同じである逆対象積層板からは、2つの安定形状 (bs: before snap-through と as: after snap-through) を有するスナップスルー現象が確認できた。スナップスルー現象では、凹凸が上下入れ替わり、主曲率方向も 90° ずれることになる。例えば Fig. 4 の (a) の形状をスナップスルーさせると、(d) の形状になるということである。

3.3 曲面型上で成形した積層板の変形挙動

曲面型上 (R180, R450) の積層板の変形挙動は、型の影響を受け形状の曲率の大きさに違いが生じたが、基本的には、RF 上で成形した場合と同様に、 0° 層と 90° 層の積層数が異なる場合、積層数の多い層の変形が支配的となった。また、スナップスルーが生じ、凹凸の上下が入れ替わると、主曲率方向が 90° ずれるという点も同様 (Fig. 4 の (a) をスナップスルーさせると (d) の形状になる) であった。

R450 上のいずれの積層構成の積層板も、RF 上と同様の変形挙動を呈した。

$[0_3/90_1]$, $[90_3/0_1]$ は、RF 上で成形すると、下に凸 (Fig. 4 の (c), (d)) の形状に変形するが、このように下に凸となる積層構成の積層板を曲面型上で成形する場合の変形挙動は注意が必要であった。なぜなら、曲面型の曲率がある値以上になると、これらの積層構成の積層板の成型後の変形形状は、型の曲率が支配的となり、上に凸の形状へと変化することがあるためである。

Fig. 4 Thermal deformation mode of CFRP laminates.

特に R180 上で成形した $[90_3/0_1]$ においては興味深い変形挙動を示した。その変形挙動とは、積層板が曲面型の影響によって強制的にスナップスルーさせられており、下に凸から上に凸へ、そして主曲率方向もおおよそ 90° 変化していた (Fig. 4 の (d) → (a))。これは繊維配向による下に凸の形状を維持する効果を、型の影響が超えたためと考えられる。

また、曲面型は上に凸であることから、スナップスルー現象を生じ2つの安定形状を有する逆対称積層板は、上に凸の形状が優先的に現れる。現に、R450 上で成形した逆対称積層板は、二つの安定形状を有しているのに対し、R180 上で成形した逆対称積層板は上に凸の1形状しか現れなかった。

3.4 曲面型の曲率が変形形状の主曲率に与える影響

各型の上で成形した2枚の積層板の主曲率の結果の平均を求めたものを Table 1 に示す。

曲面型上では、同じ積層構成でも積層角が 90° 異なると、変形後の主曲率に差異が生じることが見て取れる。

Fig. 5 に一方向積層材の熱変形後の主曲率と型の曲率の関係を示す。いずれの一方向材の主曲率も、型の曲率に比例するという結果が得られた。特に、 $[90_4]_T$ は曲面型の影響を素直に受けており、型の曲率と積層板の主曲率の値が一致しているのが見て取れる。また、一方向材の熱変形形状は、いずれも Fig. 4 の (a) の形状であった。

Fig. 6 に 90° 層を1枚とした積層板の熱変形後の主曲率と型の曲率の関係を示す。いずれの積層板も、一方向材の結果と同様に、主曲率の変化量と型の曲率が線形関係にあり RF 上で成形した積層板の主曲率に曲面型の曲率を足した値が、その曲面型上で成形した積層板の主曲率とほぼ一致するという結果が得られた。しかしこの関係において、曲面型の曲率が大きくなるにつれ、誤差

Table 1 Principal curvature of each laminate.

Stack sequence	RF (m^{-1})	R450 (m^{-1})	R180 (m^{-1})
$[0/0/0/0]$	-0.21	1.76	4.85
$[0/0/0/90]$	-13.8	-11.3	-7.2
$[0/0/90/90]$ bs	-6.23	-3.54	—
$[0/0/90/90]$ as	6.22	5.86	6.11
$[0/90/90/90]$	13.3	12.5	15.2
$[90/0/0/0]$	13.3	15.9	21.3
$[90/90/0/0]$ bs	6.22	8.81	12.0
$[90/90/0/0]$ as	-6.32	-5.92	—
$[90/90/90/0]$	-13.8	-14.8	6.99
$[90/90/90/90]$	-0.21	2.13	5.38

Fig. 5 Principal curvature of unidirectional laminates vs. curvature mold (0/0/0/0 & 90/90/90/90).

Fig. 7 Principal curvature of unidirectional laminates vs. curvature mold (bs: before snap-through, as: after snap-through) (0/0/90/90 & 90/90/0/0).

Fig. 6 Principal curvature of unidirectional laminates vs. curvature mold (0/0/0/90 & 90/0/0/0).

Fig. 8 Principal curvature of unidirectional laminates vs. curvature mold (0/90/90/90 & 90/90/90/0).

は少しずつ大きくなるという傾向がみられた。[0₃/90₁]の熱変形状は Fig. 4 の(a), [0₁/90₃]の熱変形状は Fig. 4 の(c)であった。

Fig. 7 に逆対称積層板の熱変形後の主曲率と型の曲率の関係を示す。逆対称積層板はスナップスルー現象を生じ、2つの安定形状を有するが、RF 上で成形した逆対称

積層板の二つの安定形状の主曲率を比較すると、値がほぼ一致していることがわかる。本実験で用いた簡易オートクレーブは Fig. 2 のように熱板(型)からの熱伝導によりプリプレグを加熱する方式で、板厚方向の温度分布の影響が懸念されたが、Fig. 7 の RF の結果に見られるように、温度分布の影響は無いものと推測できる。

(a) Before Snap-through

(b) After Snap-through

Fig. 9 Photographs after $[0_1/90_3]$ was deformed.

スナップスルー現象は、RF および R450 の上で成形した $[0_2/90_2]$, $[90_2/0_2]$ で確認されたが、曲率の大きい R180 上では生じなかった。これは、型の曲率が大きくなるにつれその影響が支配的となり、2つの安定形状の主曲率に差が生じ、やがて片方のモードしか現れなくなるものと推測される。

$[90_2/0_2]_{bs}$ の熱変形形状は Fig. 4 の (c), $[0_2/90_2]_{as}$ の熱変形形状は Fig. 4 の (a) であり、その主曲率方向はいずれも、曲面型の周方向 (90° 方向) であった。これらの積層板は、型の影響を素直に受け、その熱変形形状の主曲率は、型の曲率と比例関係を呈した。一方、 $[90_2/0_2]_{as}$ の熱変形形状は Fig. 4 の (b), $[0_2/90_2]_{bs}$ の熱変形形状は Fig. 4 の (d) であり、熱変形後の主曲率方向は、いずれも 0° 方向であった。これらの積層板においては、曲面型の影響を素直に受けなかった。

以上のことから、一方向材や $[0_3/90_1]$, $[90_2/0_2]_{bs}$ 等、変形後の主曲率方向が、曲面型の周方向となる (RF 上では Fig. 4 の (a), (c) の形状となる) 積層構成の積層板を、

曲面型上で成形すると、型の曲率の影響が支配的となり、型の曲率に比例した熱変形を生じるといえる。逆に、 $[0_2/90_2]_{as}$, $[0_1/90_3]$ 等、熱変形後の主曲率方向が、 0° 方向でかつ、変形形状が上に凸となる (RF 上では Fig. 4 の (b) の形状となる) 積層構成の積層板を、曲面型上で成形しても、曲面型の影響はあまり受けないと考えられる。また、 $[0_3/90_1]$, $[90_3/0_1]$ 等、変形形状が下に凸となる (RF 上では Fig. 4 の (c), (d) の形状となる) 積層構成の積層板を、曲面型上で成形する場合は、曲面型の曲率によって、変形形状の凸の向きが決定されると考えられる。

3.5 $[0_1/90_3]$ における特異変形形状

R180 上で成形した $[0_1/90_3]$ のみ、Fig. 9 に示すように、円筒形状がねじれ、主曲率方向が $20^\circ \sim 25^\circ$ ずれるという特異な形状を示した。さらに本変形においては、二つの安定形状を有するスナップスルーも確認された。ここでいうスナップスルーは、通常の上に凸から下に凸へとび移るものではなく Fig. 9 のように、上に凸のまま主曲率方向がとび移るものである。この変形は、 $0^\circ/90^\circ$ の積層材では確認された報告は無く、非常に興味深いものであると考えられる。本変形が生じた要因は、積層材の変形後の主曲率方向と曲面型の主曲率方向が 90° ずれており、かつ本来積層材に生じる変形の曲率の大きさと、曲面型の曲率の大きさが近い値となることだと考えられる。変形が生じる際に熱変形による曲率と曲面型の曲率の優位差が有る場合には、どちらかが支配的になり前述している Fig. 4 (a) ~ (d) の円筒型となるが、互いの曲率に優位差が生じない場合、積層の際の積層角のずれ等の何らかの影響を受け、変形は Fig. 9 のように主曲率方向がずれたものとなると考えられた。本変形については現在 FEM 解析を進めている。

4. 結 言

・曲面型上で成形したクロスプライ積層板の変形形状は一般に円筒形状で、成形時に曲率が受ける影響は、その積層構成によって異なることが確認された。

・R180 上で成形した $[0_1/90_3]$ のみ円筒形状がねじれ主曲率方向が $20^\circ \sim 25^\circ$ ずれた特異な形状が確認され、また、同時にスナップスルー現象も確認できた。この変形については FEM 解析等により要因を明らかにしていく必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) M.W. Hyer : *J. Compos. Mater.*, **15** (1981), 175-

- 194.
- 2) M.W. Hyer : *J. Compos. Mater.*, **15** (1981), 296-310.
- 3) M.W. Hyer : *J. Compos. Mater.*, **16** (1982), 318-340.
- 4) A. Hamamoto & M.W. Hyer : *Int. J. Solids Struct.*, **23**, (1987) 919-935.
- 5) W.J. Jun & C.S. Hong : *Compos. Sci. Tech.*, **38** (1990), 55-67.
- 6) 元木信弥, 福田武人 : 材料, **46** (1997), 349-353.
- 7) M. Cho, M.-H. Kim, H.S. Choi, C.H. Chung, K.-J. Ahn & Y.S. Eom : *J. Compos. Mater.*, **32** (1998), 460-482.
- 8) H. Fukuda, K. Takahashi & S. Toda : Proc. ICCM-10, Whistler (1995), Vol. III, pp. 141-148.
- 9) H. Fukuda & T. Kaneko : 1st Asia-Australasian Conference on Composite Materials, Osaka (1998), Vol. 1, pp. 307-1-307-4.
- 10) L. Ren & A. Parvizi-Majidi : *J. Compos. Mater.*, **37** (2003), 1801-1819.