

518 CFRP 積層板の硬化温度の同定

Estimation of Curing Temperature on CFRP

正 清水 理能(富山大) ○学 山本 成章(富山大) 正 五嶋 孝仁(富山大)

Masayoshi SHIMIZU, Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama
Nariaki YAMAMOTO, Toyama University
Takahito GOSHIMA, Toyama University

In the present paper, curing temperature of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates was estimated from room-temperature shapes which were calculated theoretically and compared with experimental results. The analyzed model was CFRP laminate plate having a stacking sequence $[0^0/90^0]$, and the specimens were made of unidirectional carbon fiber/epoxy prepreg. And room-temperature shapes of CFRP laminates are analyzed theoretically by means of classical lamination theory, correspondence principle and anisotropic thermoviscoelastic constitutive equations. Deflections were compared with experimental results under various conditions.

Key Words : Structural Analysis, Composite Material, Reinforced Plastics, Anisotropy, Thermal Visco Elasticity, Thermal Environment

1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は航空宇宙分野などさまざまな分野で使用されている。しかしながら長繊維で強化した CFRP は繊維方向と繊維に垂直方向で機械的特性が異なるため繊維配向によっては変形をおこしたり、層間で残留応力が発生し層間の強度が低下するという問題があり、CFRP の変形解析や残留応力解析が重要となる。このとき CFRP はマトリックスに樹脂を用いているため解析には粘弾性を考慮する必要があり、また変形や残留応力が 0 となる CFRP の硬化温度を知る必要がある。このとき硬化温度は CFRP 成形時の保持温度ではなく成形前は液体状態であった樹脂の高分子鎖が橋架けにより固体状態になる温度を硬化温度として考えるべきである。

そこで本研究では、非対称に積層した CFRP 積層板がたわみを生じる事を利用し、非対称に積層した CFRP 積層板を作成し、生じたたわみと、解析により求めたたわみの値を比較し、硬化温度を同定することを目的とする。

2. CFRP の機械的特性

2.1 CFRP の熱粘弾性特性

試験片には炭素繊維とエポキシ樹脂から成る一方向ブリプレグシートを加圧成形したものを用い、動的粘弾性測定器(オリエンテック製, RHEOVIBRON DDV-III-EA)を用いて熱粘弾性特性の測定を行った。このとき繊維方向では値が変化しないことが知られているため、繊維に垂直方向のみ測定を行った。得られた実験結果から 20℃ を基準温度として換算した動的弾性率 E' 、損失弾性率 E'' のマスターカーブをそれぞれ周波数 f に対してまとめたものを図 1 に示す。

2.2 CFRP の線膨張係数

線膨張係数の測定には横型熱膨張計(真空理工, DL-7000Y-H)を用いて線膨張係数を求めた。その結果、繊維方向については一定の値となった。それに対して、繊維に垂直方向については値が変化し、表 1 に示す値となった。ここで α_L は繊維方向の線膨張係数、 α_T は繊維に垂直方向の線膨張係数を示す。

3. CFRP 積層板の構成方程式

CFRP を一定温度下の横等方性熱粘弾性体とすれば、応力成分 $\bar{\sigma}_{ij}$ とひずみ成分 $\bar{\epsilon}_{kl}$ の関係は複素弾性率 C_{ijkl} を用いて、

一般的に次式のように表す事ができる。

$$\bar{\sigma}_{ij}(t) = C_{ijkl}(0, a_{T_0}) \bar{\epsilon}_{kl}(t) + \int_0^t C_{ijkl}(t-\tau, a_{T_0}) \bar{\epsilon}_{kl}(\tau) d\tau \dots\dots\dots(1)$$

ここで t は時間である。

ここでは一定温度環境下 T にあることを仮定するため温度差により発生する項は無視されている。

複素弾性率は温度時間換算則に従い、通常シフトファクター a_{T_0} により温度 T あるいは時間 t に対して変化する。

式(1)を Laplace 変換すると次式のように表される。

$$\bar{\sigma}_{ij}(f) = \bar{C}_{ijkl}(f, a_{T_0}) \bar{\epsilon}_{kl}(f) \dots\dots\dots(2)$$

また \bar{C}_{ijkl} は次式のように表される。

$$\bar{C}_{ijkl} = C_{ijkl}(0, a_{T_0}) + \bar{C}_{ijkl}(p, a_{T_0}) \dots\dots\dots(3)$$

以上のように熱粘弾性体の構成方程式は対応原理より Laplace 変換領域では弾性体と同様に表すことができる。

4. CFRP 積層板の理論解析

4.1 熱粘弾性定数の同定

CFRP において繊維に垂直方向のみに粘弾性特性が顕著にみられることから CFRP を、炭素繊維を等方性弾性体、マトリックス樹脂を等方性熱粘弾性体により構成されているものとする。そのため複合則により CFRP の複素弾性率は繊維の弾性定数 E_F とマトリックスの弾性定数 \bar{E}_M および炭素繊維の体積含有率 V_F を用いて次の式(4)のように表すことができると仮定する。

$$\bar{E}_L = E_F V_F + \bar{E}_M (1 - V_F), \quad \frac{1}{E_T} = \frac{V_F}{E_F} + \frac{(1 - V_F)}{\bar{E}_M} \dots\dots(4)$$

その他の弾性定数及び熱粘弾性定数は E_F と \bar{E}_M により次式(5)のように表すことができる。

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_F}{G_F} + \frac{(1 - V_F)}{G_M}, \quad G_F = \frac{E_F}{2(1 + \nu_F)}, \quad \bar{G}_M = \frac{\bar{E}_M}{2(1 + \nu_M)} \dots\dots\dots(5)$$

4.2 CFRP 積層板の変形解析

ひずみエネルギー密度を式(6)とすると、ひずみエネルギー U は式(7)のように表すことができる。

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} \bar{C}_{ijkl} \bar{\epsilon}_{ij} \bar{\epsilon}_{kl} - \bar{\beta}_{ij} \bar{\epsilon}_{ij} \Delta T \dots\dots\dots(6)$$

$$\bar{U} = \int \bar{\omega} dx dy dz \dots\dots\dots(7)$$

このとき ΔT は温度変化、 $\bar{\beta}_{ij}$ は弾性定数と線膨張係数により

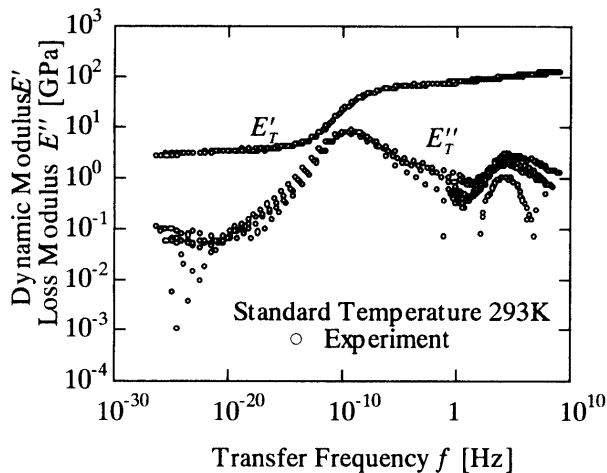


Fig. 1 Master Curves of Dynamic Modulus E' and Loss Modulus E''

Table . 1 Thermal expansion coefficient of CFRP

	~107°C	107°C~
α_L	1.35×10^{-6}	
α_T	4.00×10^{-5}	1.10×10^{-4}

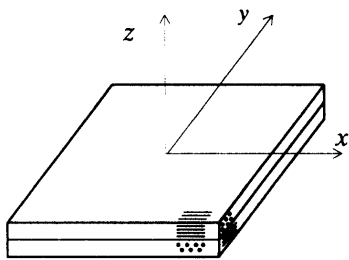


Fig. 2 Analytical Model of CFRP Laminate

求まる定数である。

ここでひずみエネルギーは未定係数 $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4$ 及び CFRP の機械的特性を用いた関数を使うことで次式(8)のように表せる。

$$\bar{U} = \int_{x=-a}^a \int_{y=-b}^b \int_{z=-h}^h \omega(\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4, \bar{C}_i, \bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y, \Delta T, x, y, z) dx dy dz \quad \dots \dots \dots (8)$$

またひずみエネルギーの変化量は次式(9)のように表せる。

$$\delta \bar{U} = \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{g}_1} \right) \delta \bar{g}_1 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{g}_2} \right) \delta \bar{g}_2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{g}_3} \right) \delta \bar{g}_3 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{g}_4} \right) \delta \bar{g}_4 \quad \dots \dots \dots (9)$$

式(9)の 4 つの項がそれぞれ 0 となるように未定係数 $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4$ を求める。未定係数 $\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3, \bar{g}_4$ を用いると各方向の $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ は次の式(10)のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{u}(x, y) &= \bar{g}_3 x - \frac{\bar{g}_1^2 x^3}{6} - \frac{\bar{g}_1 \bar{g}_2 xy^2}{4} \\ \bar{v}(x, y) &= \bar{g}_4 y - \frac{\bar{g}_2^2 y^3}{6} - \frac{\bar{g}_1 \bar{g}_2 x^2 y}{4} \quad \dots \dots \dots (10) \\ \bar{w}(x, y) &= \frac{1}{2} (\bar{g}_1 x^2 + \bar{g}_2 y^2) \end{aligned}$$

5. 硬化温度の同定

5.1 数値計算条件

解析モデルには上の図 2 に示すような繊維配向が $[0^0_n/90^0_n]$

であるモデルを用いた。また厚さが、3.2mm, 1.6mm, 0.8mm である 3 種類の CFRP 積層板を成形しそれぞれ 200×200 [mm], 100×100 [mm], 50×50 [mm] に切断した。

5.2 温度条件

温度条件として CFRP 積層板を作成した時の時間 - 温度履歴を分割し、それぞれ近似曲線で表し、硬化温度を設定し成形温度である 130°C まで上昇し室温である 25°C まで冷却するものとして解析を行い、解析によるたわみと実際に測定したたわみが等しくなるような硬化温度を求める。

6. 数値計算結果

図 3 に繊維配向 $[0^0_n/90^0_n]$ で 200×200 [mm] の CFRP 積層板の室温での解析による変形の結果、また図 4 に成形時の CFRP 積層板のたわみの時間履歴を示す。図 3 において原点と積層板の角ではたわみは 0 となり、 $x=100, y=0$ で最大値を、 $x=0, y=100$ で最小値をとる。また、たわみの最大値を比較すると、 $w_{max} = -w_{min}$ であった。また、解析結果のたわみの最大値と測定したたわみの最大値が等しくなるような硬化温度は 95.296°C となった。また、それぞれの試験片の寸法、実験および解析によるたわみの値、硬化温度を表 3 に示す。これらの硬化温度を平均化することにより求めた積層板の成形時における硬化温度は 93.009°C となった。

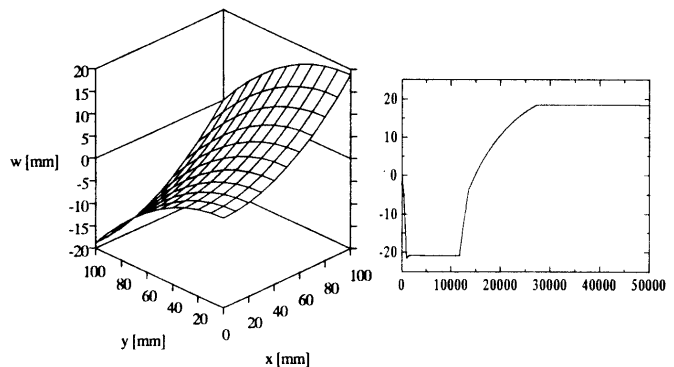


Fig. 3 Room-Temperature Shape Fig. 4 Distribution Histories Of Deflection on CFRP Laminate

Table . 3 Curing Temperature on CFRP Laminate Plates

Stacking Sequence	Size [mm]	Experimental results [mm]	Analytical results [mm]	Curing temperature [°C]
$[0^0_4/90^0_4]$	200	4.78	4.781	95.30
	100	1.15	1.152	92.35
	50	0.30	0.299	95.20
$[0^0_2/90^0_2]$	200	8.72	8.723	90.47
	100	2.25	2.251	90.88
$[0^0_1/90^0_1]$	50	0.58	0.579	92.32
	200	18.51	18.509	93.72
	100	4.75	4.751	94.45
	50	1.15	1.151	92.30

文献

- (1) Shimizu, M., Adachi, T., Arai, M., Matsumoto, H., Experimental Mechanics (ed. Allison, I. M), 2(1998) 1387-1392.
- (2) Hyer M. W., J. Composite Materials, 15(1981), 296-310.