

# 穿孔法による CFRP 積層体の応力測定試験

郡 亜美<sup>\*1</sup> 鈴木 優平<sup>\*1</sup> 三上 隆男<sup>\*2</sup>  
*Kohri Ami Suzuki Yuhei Mikami Takao*

穿孔法は等方性材料に有効な残留応力測定方法であるが、Schajer らが理論解析によって導き出した直交異方性材料の穿孔時の解放ひずみと残留応力を関係づける校正定数を用いることにより、直交異方性材料の残留応力測定も可能である<sup>(1)</sup>。本稿では、直交異方性を有する CFRP 製平板試験体の 1 軸引張試験を実施し、負荷応力と Schajer らによる残留応力測定方法により算出した応力を比較した結果を報告する。

キーワード：残留応力、穿孔法、CFRP、直交異方性材料、解放ひずみ

## 1. はじめに

穿孔法は ASTM E837-13a で規格化された残留応力測定技術であり、種々の材料の測定に広く使われている<sup>(2)</sup>。この規格は、等方性材料を対象としたものであるが、直交異方性材料への穿孔法理論の拡張についての研究が、Schajer と Yang によって報告されている<sup>(1)</sup>。

Schajer らは、9つの影響係数（解放ひずみコンプライアンス）を定義し、これらを使って応力と解放ひずみの関係を式(1)のように定義した<sup>(1)</sup>。

$$\frac{1}{\sqrt{E_x E_y}} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$E_x$ 、 $E_y$  は主軸方向の弾性定数であり、 $C_{11} \sim C_{33}$  は影響係数、 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_3$  はゲージ受感部方向の解放ひずみである。影響係数は、解放ひずみと残留応力を関係づける無次元の定数であり、Schajer らが円孔を有する直交異方性平板モデルに対する理論解

析によって導き出しており、弾性定数やポアソン比などをパラメータとする数値表で与えられている。この穿孔法による直交異方性材料の残留応力測定方法については、IIC REVIEW No.61 にて三上が詳細に解説しており、こちらを参照していただきたい<sup>(3)</sup>。

Schajer らが算出した影響係数は、米国 Vishay 社製のロゼットひずみゲージに対応している。このロゼットひずみゲージは、当社で使用している東京測器研究所製のものとは受感部の寸法が若干異なる。そのため、当社で頻繁に使用している東京測器研究所製のロゼットひずみゲージ FRS-2 型の影響係数を FEM 解析によって導き出し、前号の IIC REVIEW No.62 で報告した<sup>(4)</sup>。

本稿では、直交異方性を有する CFRP 製平板試験体の 1 軸引張試験を実施し、負荷応力と FRS-2 型の影響係数を使用して算出した応力を比較した結果を報告する。

\*1：計測事業部 計測技術部 磯子グループ

\*2：元フェロー 博士(工学)、技術士(機械部門)、環境計量士(騒音・振動関係)、一般計量士、JSNDI ひずみ測定・レベル 3

## 2. 実験方法

### 2.1 試験体と試験体の機械特性

試験には、熱硬化性 CFRP の一方向強化材を用いた。異方性材料を残留応力解析する場合は、X、Y 方向の弾性係数 ( $E_x$ 、 $E_y$ )、ポアソン比 ( $\nu_{xy}$ )、せん断弾性係数 ( $G_{xy}$ ) が必要である。これらの値は引張試験で測定された応力、ひずみ、弾性率、ポアソン比を用いて式 (2) ~ (4) から算出した<sup>(5)</sup>。

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_1}, \nu_{xy} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2)$$

$$E_y = \frac{\sigma_y}{\epsilon_2}, \nu_{yx} = -\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (3)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{\frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y} + \frac{2\nu_{xy}}{E_x}} \quad (4)$$

機械特性測定用試験体の写真を図 1 に、各試験

体の積層条件と引張試験より求めたヤング率、ポアソン比を表 1 に示す。繊維方向は、試験体長軸方向が  $0^\circ$  となっている。せん断弾性係数を算出するためには、 $E_x$  の測定に用いる試験体を  $45^\circ$  傾けた積層状態の試験体の弾性係数  $E_{45}$  が必要になる。無限に長い  $45^\circ$  方向試験体に引張負荷を与えれば、理想的なせん断ひずみが発生するが、実際は有限の長さであり、試験体末端の回転を固定すると、無限板とは異なった変形が起り、真の弾性係数と測定されるみかけの弾性係数の間に相違が生じてしまう。この影響を小さくするためには、試験体の細長比  $L/2b$  ( $L$ : 試験体長さ、 $b$ : 試験体半幅) が  $10 \sim 20$  程度なければならない<sup>(5)</sup>。そのため機械特性測定用の寸法を、 $250 \times 25 \times 3.12\text{mm}$  とした。表 1 の結果と、式 (2) ~ (4) より求めた各試験体の材料特性を表 2 に示す。これらの値を用いて、応力測定を行った。



図 1 機械特性測定用試験体

表 1 機械特性測定用試験体の積層条件と引張試験結果

No.	積層条件 [繊維方向]	ヤング率 (GPa)	ポアソン比 —	備考
1	[0] 13ply	131.7	0.30	$E_x$ 測定用
2	[90] 13ply	8.8	0.02	$E_y$ 測定用
3	[45] 13ply	12.1	0.44	$E_{45}$ 測定用

表 2 一方向強化 CFRP 試験体の物性値

$E_x$ (GPa)	$E_y$ (GPa)	$\nu_{xy}$	$G_{xy}$ (GPa)
131.7	8.8	0.30	4.2

## 2.2 負荷応力と測定応力の比較試験

負荷応力と測定値の比較検証を、1軸引張試験にて行った。試験体の残留応力の影響をキャンセルして、引張荷重により作用している応力のみを評価に使用するため、試験は以下の手順で行った<sup>(6)</sup>。

(手順)

- ① 試験体にロゼットひずみゲージを貼りつける。
- ② 穿孔していない状態で試験体に荷重を負荷し、ひずみ ( $\epsilon^{nd}$ ) を測定する。
- ③ 荷重を除荷し、試験体を貫通穿孔する。
- ④ 貫通穿孔した試験体と同じ荷重を与え、ひずみ ( $\epsilon^d$ ) を測定する。
- ⑤ 負荷荷重により発生した応力にのみ関係する解放ひずみ ( $\epsilon$ ) を式 (5) により求める。

$$\epsilon = \epsilon^d - \epsilon^{nd} \quad (5)$$

この手順から得られた解放ひずみ  $\epsilon$  を用い、式 (1) より応力を算出する。

試験は図2に示す島津製作所社製の AUTOGRAPH 50kN引張試験機を用いて実施した。試験体寸法は  $250 \times 40 \times 3.12\text{mm}$  である。試験体の中心に  $\epsilon_1$  が引張荷重方向に、 $\epsilon_2$  が  $45^\circ$  方向に、 $\epsilon_3$  がその直交方

向に向くようにロゼットひずみゲージを貼りつけた。また、このほかに表と裏にそれぞれ2枚ずつ単軸ひずみゲージを試験体中心部に貼りつけた。試験体写真を図3に示す。今回の実験では、2kN、3kN、4kN 時の荷重条件で応力を算出した。

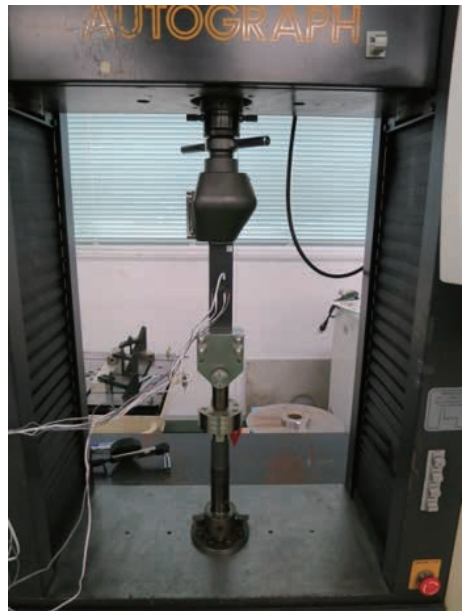
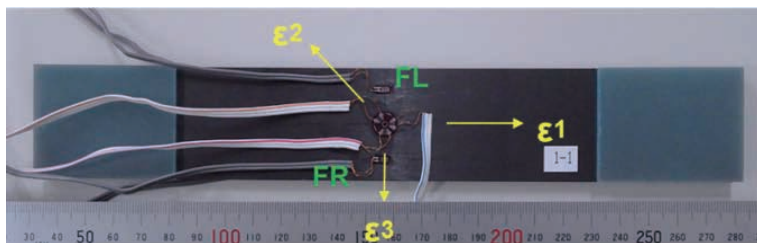
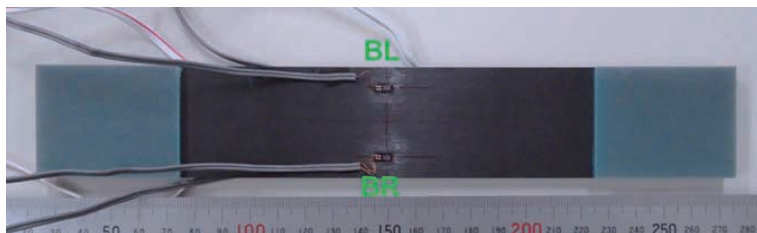


図2 引張試験機



(a) 表面



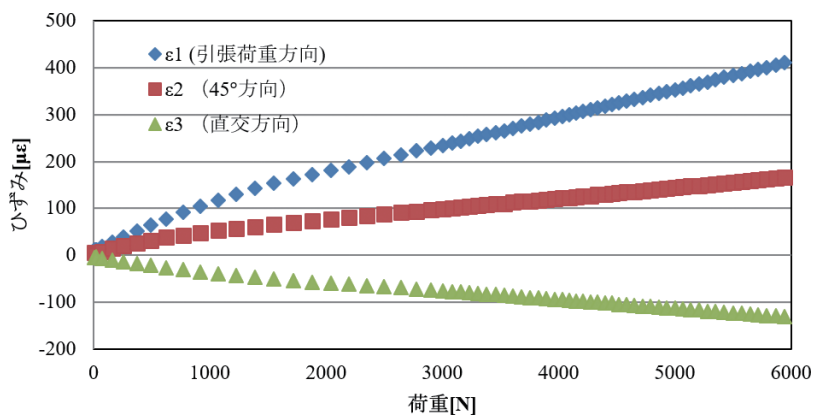
(b) 裏面

図3 試験体とひずみゲージ

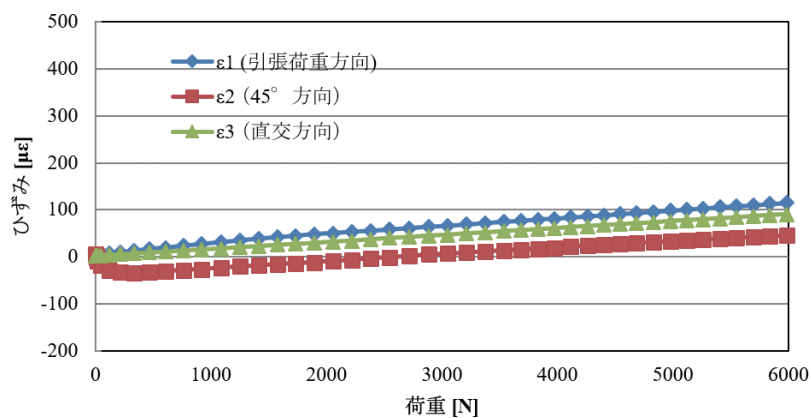
### 3. 実験結果

引張試験結果（穿孔前、貫通穿孔後）を図4に、一例として3kN荷重をかけた時のひずみ測定結果

と式(5)により計算した解放ひずみを表3に示す。単軸ひずみの測定結果は、穿孔前、穿孔後で同等の値を示しており、試験体のセッティングは穿孔前後で正しく再現されていることが確認できる。



(a) 穿孔前



(b) 穿孔後

図4 引張試験のひずみ測定結果

表3 3kNの荷重をかけた時のひずみ測定結果

	ロゼットひずみゲージ			単軸ひずみ			
	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	FR	FL	BR	BL
穿孔後 $\epsilon^d$	66.0	6.8	46.6	237.7	239.6	162.3	161.3
穿孔前 $\epsilon^{nd}$	248.5	120.4	-73.8	247.2	267.0	150.9	168.9
解放ひずみ $\epsilon$	-182.5	-113.6	120.4				

[ $\mu\epsilon$ ]

表4に各荷重での解放ひずみを示す。この解放ひずみと表5に示すFRS-2型ひずみゲージの影響係数を用いて式(1)より測定応力を算出した。測定応力と負荷応力の結果を表6に示す。負荷応力は負荷荷重を試験体の断面積で除して算出している。測定応力は、負荷応力と比較するため、引張方向の成分のみを用いた。

応力解析する際に影響係数は穴径の補正を行う必要がある。積層材の場合は、St. Venantの原理により、穴境界から約1層厚さ分(本稿では0.24mm)の範囲では連続体の仮定を乱しやすいため、有効穴径は実測したものより大きくなるといわれている<sup>(1)</sup>。そのため、実測値の穴半径に1層分の厚みを足した値を使用し、影響係数の補正している。その結果、負荷荷重と今回算出した測定応力は良

く一致しており、相対誤差は13%以下であった。Schajerらの論文では、直交異方性積層材について同様な試験を実施した際の誤差は10~20%程度であると記述があり<sup>(1)</sup>、これよりも高い精度で応力評価ができた。

#### 4. まとめ

FEM解析によって導き出したFRS-2型ひずみゲージの影響係数を使用し、直交異方性を有するCFRP製平板試験体の引張試験を実施した。その結果、負荷応力と測定応力は良く一致し、相対誤差は13%以下であった。これにより、穿孔法による直交異方性材料の残留応力測定方法と、FRS-2型の影響係数の有効性を確認することができた。

表4 各荷重での解放ひずみ値

負荷荷重	負荷応力 (MPa)	$\epsilon_1$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_2$ ( $\mu\epsilon$ )	$\epsilon_3$ ( $\mu\epsilon$ )
2 k N	17.6	-138.8	-105.8	87.4
3 k N	26.0	-182.5	-113.6	-120.4
4 k N	32.1	-214.6	-119.4	148.5

表5 FRS-2型ひずみゲージの影響係数<sup>(4)</sup>

	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{21}$	$C_{22}$	$C_{23}$	$C_{31}$	$C_{32}$	$C_{33}$
貫通孔(2D)	-0.1657	0	0.0868	-0.0470	0.8041	-0.3857	0.1420	0	-0.9452

表6 負荷応力と測定応力の比較

負荷応力 (MPa)	測定応力 (MPa)	相対誤差
17.6	19.9	13%
26.0	26.1	0%
32.1	30.2	6%

## 参考文献

- (1) G. S. Schajer and L. Yang : Residual-stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method, Exp. Mech., 34, 1994
- (2) ASTM E837-13a : Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gauge Method, 2013
- (3) 三上隆男:穿孔法による直交異方性材料の残留応力測定技術、IIC REVIEW、No.61、2019/04、pp.13-23
- (4) 三上隆男、前田朝樹、郡亜美 : 穿孔法による直交異方性材料の残留応力測定技術 (FEM による影響係数の検討)、IIC REVIEW、No.62、2019/10、pp.23-32
- (5) 日本複合材料学会監修、末益博志編著 : 入門 複合材料の力学
- (6) P. Pagliaro and B. Zuccarello : Residual Stress Analysis of Orthotropic Materials by the Through-hole Drilling Method, Exp. Mech., 47, 2007



計測事業部  
計測技術部  
磯子グループ

郡 亜美

TEL. 045-759-2085  
FAX. 045-759-2119



計測事業部  
計測技術部  
磯子グループ

鈴木 優平

TEL. 045-759-2085  
FAX. 045-759-2119



元フェロー 博士(工学)、  
技術士(機械部門)、  
環境計量士(騒音・振動関係)、  
一般計量士、JSNDI ひずみ測定・  
レベル3

三上 隆男