光弾性実験用複合材料の開発に関する研究*
(第2報, 光弾性感度による物性値の測定法)黄 在 錫^{*1}, 島 本 聡^{*2}
高 橋 賞^{*3}, 崔 善 浩^{*4}A Study on the Development of Photoelastic
Experimental Composite Material
(2nd Report, A Method of Measuring Physical Properties
from Stress Fringe Values)Jai-sug HAWONG, Akira SHIMAMOTO,
Susumu TAKAHASHI, and Sun-ho CHOI

Physical properties ($E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$) are necessary for analyzing the plane problems and fracture mechanics of orthotropic material, and measurements of physical properties and stress fringe values (f_x, f_y, f_{xy}) for orthotropic material are needed for each photoelastic experiment on orthotropic material. Strain gages are generally used to measure the physical properties of orthotropic material, but errors due to various factors are common. Therefore, relationships between physical properties and stress fringe values are suggested in this paper. These can be utilized instead of the strain gage to measure physical properties with stress fringe values. This is confirmed by experiment in this paper. Specimens of C. D. are better than those of B. M. for measurement of the stress fringe value of an orthotropic material. Stress fringe value f_{xy} can be obtained from equation (19) with f_x, f_y, f_θ , and θ ; in this case, θ is between 40° and 65° . The optimum value is $\theta=45^\circ$.

Key Words: Anisotropy, Experimental Stress Analysis, Material Testing, Physical Properties, Stress Fringe Values

1. 緒 言

近年複合材料の発展と使用の増加にともない、複合材料で構成された構造物の応力解析が極めて必要となってきた。したがって従来等方性材料に用いられてきた光弾性実験法が、このような構造物を実験的に解析する場合に使用されるようになってきた。

現在まで光弾性実験用複合材料に使用されたファイバの大部分は E-grass である。そこで著者らは、先に銅線をファイバとして用いることにより、光弾性実験用複合材料を開発し、この複合材料を C. F. E. C. と称した⁽¹⁾。

直交異方性材料の平面問題⁽²⁾, もしくは平面破壊力学の問題など⁽³⁾を解析する場合は、少なくとも四つの物性値 ($E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$) が必要である。したがってこのような直交異方性材料を光弾性実験に用いる場合は、実験のたびに四つの物性値と、三つの応力フリンジ

ジ値 (f_x, f_y, f_{xy}) を測定せねばならない。これまで四つの物性値を測定する場合は、一般的にひずみゲージを使用してきた⁽⁴⁾。しかしこのような場合には試験片固定箇所の影響⁽⁵⁾⁽⁶⁾と縁効果⁽⁷⁾などにより多くの誤差が生じる恐れがあった。また、等方性材料と複合材料の横弾性係数および応力フリンジ値などの測定は非常に困難であった。複合材料の横弾性係数の測定には O'Brien⁽⁸⁾, Iosipescu⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, Arcan⁽¹¹⁾, Chamis⁽¹²⁾, Pindera⁽¹³⁾などによるせん断実験法がある。この中でも Arcan と Iosipescu のせん断実験法が主に用いられてきた。そとで本研究では、Iosipescu のせん断実験法を改良した装置と、Arcan のせん断実験法により直接測定した応力フリンジ値 f_{xy} と、Sampson⁽¹⁴⁾の応力-光法則により求めた f_{xy} とを互いに比較し、Sampson の応力-光法則を C. F. E. C. に適用して f_{xy} を求めるのに用いられるかを検討した。また、直交異方性材料を光弾性実験により解析する場合に、最も必要な物性値 (E_x, E_y, G_{xy}) と応力フリンジ値 (f_x, f_y, f_{xy}) の関係を求め、直接物性値を測定するかわりに、応力フリンジ値により物性値を求める方法を開発した。

2. 基 礎 理 論

2.1 応力フリンジ値と物性値の相似性 等方性

* 平成元年8月25日 東北支部盛岡地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年9月9日。

^{*1} 正員、嶺南大学校(〒632 慶北慶山郡大洞)。

^{*2} 正員、埼玉工業大学(〒369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

^{*3} 正員、関東学院大学工学部(〒236 横浜市金沢区六浦町4834)。

^{*4} 正員、嶺南大学校。

材料の場合は、各方向による応力フリンジ値と物性値は一定であるが、複合材料である場合には、物性値と応力フリンジ値は方向により異なる。しかし直交異方性材料の場合には、応力フリンジ値および物性値は図1のように測定することができる。すなわち図1のモデルにひずみゲージを接着せずに荷重を負荷し等色線しま次数を測定し、式(1)により図1(a)~(d)それぞれの場合の応力フリンジ値 f_x, f_y, f_{xy} および f_θ が求められる。

$$f_x = \frac{\sigma_x}{N} t, f_y = \frac{\sigma_y}{N} t, f_{xy} = \frac{2\tau_{xy}t}{N}, f_\theta = \frac{\sigma_\theta t}{N} \quad \cdots (1)$$

ただし、 N はしま次数、 t は試験片厚さである。

また直交異方性材料の物性値 $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ などは図1のモデルにひずみゲージを接着し得られたひずみと式(2)により求められる。

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\epsilon_x}, E_y = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y}, G_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\epsilon_1 - \epsilon_2}, E_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\epsilon_\theta} \quad (2)$$

ν_{xy}, ν_{yx} は図1(a)でおのおの測定された ϵ_x, ϵ_y を式(3)に代入して求める。

$$\nu_{xy} = -\epsilon_x/\epsilon_y, \nu_{xy}/E_x = \nu_{yx}/E_y \quad \cdots (3)$$

図1よりわかるように、同じ幾何学的条件と荷重条件下で E_x, E_y, G_{xy} はひずみゲージにより、 f_x, f_y, f_{xy} は等色線しま次数により測定することができる。したがって光弾性効果を持つ直交異方性材料の応力フリンジ値 f_x, f_y, f_{xy} は弾性係数である E_x, E_y, G_{xy} と相似し、これらの間には一定な関係があるものと思われる。

一般的に複合材料では物性値 E_x, E_y, G_{xy} と応力フリンジ値 f_x, f_y, f_{xy} などは式(4)により示される⁽¹⁵⁾。

$$E_x, E_y, G_{xy} = \phi_{1,2,3}(E_f, E_m, V_f, V_m, \nu_f, \nu_m) \quad \cdots (4 \cdot a)$$

$$f_x, f_y, f_{xy} = \varphi_{1,2,3}(E_f, E_m, V_f, V_m, \nu_f, \nu_m) \quad \cdots (4 \cdot b)$$

ただし、 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ は複合材料の応力とひずみに関する関数であり、添字、 f, m はファイバと母材を意味し、 V_f と V_m はファイバと母材の体積比率である。

式(4・a)と式(4・b)を比較した場合、様式と変数が同

図1 基本的な物性値および応力フリンジ値の測定モデル

じで、弾性係数と応力フリンジ値の間には一定な関係があるものと思われる。

2・2 光弾性直交異方性材料の物性値と感度の関係
ファイバが一方方向にだけ補強された複合材料の物性値は、この複合材料を構成している物質の物性値として、式(5)により示される⁽¹⁶⁾。

$$E_x = E_f V_f + E_m V_m \quad \cdots (5 \cdot a)$$

$$E_y = \frac{(E_f + E_m + (E_f - E_m) V_f) E_m}{E_f + E_m - (E_f - E_m) V_f} \quad \cdots (5 \cdot b)$$

$$\nu_{xy} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad \cdots (5 \cdot c)$$

$$G_{xy} = \frac{(G_f + G_m + (G_f - G_m) V_f) G_m}{G_f + G_m - (G_f - G_m) V_f} \quad \cdots (5 \cdot d)$$

光弾性複合材料の場合、ファイバと母材の体積比率 (V_f, V_m) は光弾性効果に影響をおよぼし、ひずみはファイバと母材に均一に作用する。

光学的法則による主応力差は式(6)のように光弾性しま次数で示される。

$$S = \sigma_1 - \sigma_2 = N_f/t \quad \cdots (6)$$

光弾性複合材料の光学的効果は式(7)のように複合材料構成物質の合計として示される⁽¹⁷⁾。

$$N = N_m + N_f \quad \cdots (7)$$

複合材料および複合材料の構成物をおのおの均一材料とみなし、式(6)と式(7)を用いれば光弾性複合材料の応力フリンジ値 f は式(8)により求まる。

$$f = \frac{S}{\frac{1}{t}(N_m + N_f)} = \frac{S}{\frac{1}{t}\left(\frac{s_m t_m}{f_m} + \frac{s_f t_f}{f_f}\right)} \quad \cdots (8)$$

ここで、母材とファイバの厚さ t_m と t_f は複合材料を通る光の平均経路を現し、この厚さの比率を体積比率におきかえれば、式(8)は式(9)となる。

$$f = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\frac{s_f V_f}{f_f} + \frac{s_m V_m}{f_m}} \quad \cdots (9)$$

図1(a)において(ひずみゲージが接着されていない場合) 応力フリンジ値と負荷される応力を式(9)に代入し、母材とファイバに生ずるひずみが同一という条件を用いれば式(9)は式(10)となる。

$$f_x = \frac{E_x f_m f_f}{E_f V_f f_m + E_m V_m f_f} \quad \cdots (10)$$

ファイバの応力フリンジ値が無限大の場合には、式(10)は式(11)となる。

$$f_x = E_x f_m / E_m V_m \quad \cdots (11)$$

また、図1(b)で(ひずみゲージが接着されていない場合) 応力フリンジ値と負荷される応力を式(9)に代入し、ファイバの垂直方向に生ずるひずみが同じであると仮定すれば式(12)が得られる。

$$f_y = \frac{E_y f_m f_f}{E_f V_f f_m + E_m V_m f_f} \quad \cdots (12)$$

ここで、ファイバの応力フリンジ値が無限大であれば式(12)は式(13)となる。

$$f_y = E_y f_m / E_m V_m \dots\dots\dots (13)$$

図1(c)の場合は発生する光弾性しま次数と作用する応力との関係を用い、複合材ファイバのせん断ひずみと母材のせん断ひずみが同じである条件を用いれば式(14)が得られる。

$$f_{xy} = G_{xy} f_m f_f / (G_f V_f f_m + G_m V_m f_f) \dots\dots\dots (14)$$

またファイバの応力フリンジ値が無限大であれば式(14)は式(15)となる。

$$f_{xy} = G_{xy} f_m / V_m G_m \dots\dots\dots (15)$$

以上の結果を図1(d)に用いると f_θ と E_θ の関係は式(16)と同じである。

$$f_\theta = E_\theta f_m / E_m V_m \dots\dots\dots (16)$$

ファイバの感度が有限の場合には式(10), (12), (14)を用いて光弾性複合材料の応力フリンジ値によりその複合材料の物性値を求めることができ、ファイバの感度が無限大の場合、本研究で導いた式(11), (13), (15), (16)は応力フリンジ値により光弾性複合材料の物性値を求める場合に用いられる。このようにして得られた物性値と応力フリンジ値を式(17)に代入すれば ν_{xy} は求まる⁽¹⁵⁾。

$$\frac{1}{f_{xy}} = \frac{1}{f_x} - \left(\frac{1}{f_x} - \frac{1}{f_y} \right) \frac{1 + \nu_{xy}/E_x - 1/2 G_{xy}}{\frac{1}{E_x} - \frac{1}{E_y}} \dots\dots\dots (17)$$

また、光弾性感度より求めた E_x, E_{45}, E_y, G_{xy} などを式(18)に代入すると複合材料の ν_{xy} は求められる⁽¹⁸⁾。

$$\frac{1}{G_{xy}} = \frac{4}{E_{45}} - \left(\frac{1}{E_x} + \frac{1}{E_y} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x} \right) \dots\dots\dots (18)$$

直交異方性の平面問題を解析するときに必要な $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ などは、光弾性感度 f_x, f_y, f_{xy} を測定することにより求められる。ただし、母材の物性値 E_m, G_m, V_m を測定せねばならない。また、図1(a)に示すようにひずみゲージにより測定した E_x と計算により求めた V_m, V_f を式(5・a), (11)に代入して E_m と E_f

を求められる。母材の $E_m, G_m, f_x, f_y, f_{xy}$ などを式(13), (15), (17)に代入すると、平面直交異方性物体の解析に必要な $E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$ などが求まる。

図1(c)に示すように純せん断応力状態の荷重を負荷することが困難であるため複合材料では式(18)を適用して G_{xy} が求められる。しかし精度上に難点がある。また f_{xy} も測定することが難しいため式(19)を用いて求める⁽¹⁴⁾⁽¹⁹⁾。

$$f_\theta = f_x \left\{ \left(\cos^2 \theta - \frac{f_x}{f_y} \cos^2 \theta \right)^2 + \left(\frac{f_x}{f_y} \sin 2\theta \right)^2 \right\}^{-1/2} \dots\dots\dots (19)$$

図1(a), (b)で直接 f_x, f_y を求め、任意の角度により得られた f_θ と θ を式(19)に代入して f_{xy} を求める。この f_{xy} を式(15)に代入すれば G_{xy} は求まる。また、O'Brien⁽⁸⁾, Iosipescu⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾, Arcan⁽¹¹⁾, Chamis⁽¹²⁾, Pindera⁽¹³⁾らのせん断試験法により直接 f_{xy} と G_{xy} を測定することができる。したがって、本研究で導いた式(11), (13), (15), (16)を用い、光弾性感度により物性値を求め、かつ f_{xy} を求める場合は式(19)を用いれば良いことが確かめられた。

3. 荷重装置および実験方法

本実験で使用した試験片は著者らが開発したEpoxy板の中に銅線ファイバが入っている光弾性実験用直交異方性材料(Copper Fiber Epoxy Composite)により製作した。ただし、銅線ファイバの直径は約0.5, 1.0, 1.5 mm, ピッチは2.44 mm一定、体積比率はそれぞれ1.34, 1.38, 5.5, 5.546, 14.1%である。

光弾性感度 f_θ の測定方法には種々の方法があるが、本研究では図2(a)と同様な圧縮荷重を受けるDiamond形と、図2(b)と同様な純曲げモーメントを受ける単純支持ばりの試験片を用いた。

従来、はりに純モーメントを負荷する場合ははりの外縁に集中荷重を負荷し純曲げモーメントが生ずるようにした。しかし、このとき純曲げモーメントが生ずる範囲 a の長さが十分に長くないと光弾性零次しまは、はりの中立軸上に現れず、上下のしま次数が異なるのが一般的である。そこで、本研究では図2(b)に

(a) Compressed diamond (C.D.) (b) Neutral bending moment (N.B.M.)

図2 応力フリンジ値測定用試験片

(a) loading device (b) fringe pattern(p=940.8N)

図3 荷重装置と等色線しま写真

示すように中立軸上にピンホールを加工し、このピンホールに集中荷重を負荷し、純曲げモーメントが生ずるようにした。また応力集中をできる限り少なくするためにピンホールの直径を3mm程度とした。

以上の結果にもとづいて製作した装置〔図3(a)〕を用いて得られた等色線しま写真を図3(b)に示す。図3(b)よりわかるように光弾性しま模様は中立軸を中心に完全に対称に現れている。したがって本装置を用いて中立軸上に荷重を負荷すれば外縁に荷重を負荷するよりも純曲げモーメントが得られ、この装置の有効性が確かめられた。

図2(a), (b)に示す試験片を用いて本実験装置より求めた応力フリンジ値は圧縮荷重を受けるC.D.形の f_θ とB.M.形の f_θ は式(20・a)と式(20・b)によりそれぞれ表すことができる。このときの θ は0, 15, 30, 45, 60, 75, 90°である。

$$f_\theta = \frac{P}{bN} \quad (20 \cdot a)$$

$$f_\theta = \frac{3P(b-a)}{2Nh^2} \quad (20 \cdot b)$$

本実験では、図4(a), (b)に示すArcan(A.C.D.)と、Iosipescu⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾のせん断試験片を改良して用いることにより式(19)より求めた f_{xy} 値の正確さを検定することができる。

図4(a), (b)と同じ状態のA-B断面上に発生す

図4 f_{xy} , G_{xy} 測定用試験片

図5 従来の方法と本実験により求めた等色線しま写真

る応力状態を式(21・a), (21・b)に示す。

$$\tau_{xy} = \frac{P}{S_1} \cos \alpha \quad (21 \cdot a)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{S_1} \cdot \frac{a-b}{a+b} P \quad (21 \cdot b)$$

ただし、 S_1 はA-B断面の断面積である。

図4(a), (b)の断面A-Bに発生する応力状態は図1(c)と同じである。したがって式(21)を式(1)に代入し、各試験片の応力フリンジ値 f_{xy} を求めた。また、各試験片にひずみゲージを接着して $\epsilon_1 - \epsilon_2 = r_{xy}$ を測定し、得られた r_{xy} を $\tau_{xy} = G_{xy} \cdot r_{xy}$ に代入して G_{xy} を求めた。

従来、Iosipescu⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾のせん断試験は外縁に荷重を負荷した。しかし本研究ではこの方法を改良して中立軸線に応力集中が生じないようにできる限り小さいピンホールを加工し、図4(b)に示すごとく中立軸線上に荷重を負荷しA-B断面上にせん断力が生ずるようにした。従来の方法と本実験で得られた等色線しま写真の一例を図5(a), (b)に示す。

図5の光弾性しま模様からわかるように本実験で改良した装置が純せん断力試験に適した装置であることが確かめられた。

ただし、負荷荷重 P はおおの1189.8, 940.8 N, 切欠底断面ABは21.8, 21.2 mm, 厚さ $t=6.05, 4.55$

表1 応力フリンジ値

Dia. V_f	The. C.D. B.D.	Exp. C.D. B.D.	θ							f_{xy}
			0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	
0.5mm 1.38%	C.D.	Exp.	12.66	11.466	10.378	10.345	10.368	10.375	10.464	10.383
		The.	12.66	12.084	11.033	10.345	10.178	10.340	10.464	
	B.M.	Exp.	12.887	13.497	10.925	11.645	10.903	11.513	11.75	11.656
		The.	12.887	12.610	12.053	11.645	11.551	11.667	11.75	
1.0mm 5.5%	C.D.	Exp.	23.52	17.485	12.45	12.28	12.28	12.41	13.87	12.488
		The.	23.52	18.841	14.140	12.28	12.22	13.184	13.87	
	B.M.	Exp.	42.71	22.54	16.9	13.347	13.524	13.88	14.237	14.051
		The.	42.71	25.317	16.224	13.346	12.915	13.661	14.237	

θ : 荷重方向とファイバとの成す角度 The.: 方程式(19)により求めた理論値
 B.M.: Bending moment C.D.: Compressed diamond Dia.: ファイバの直径
 V_f : 複合体の体積に対するファイバの体積比率

図6 純曲げモーメントを受けるC.F.E.C.の等色線しま写真

mm, $a=59.7$ 一定であり, $b=148.4, 150.1$ mm である。

4. 実験結果および考察

純曲げモーメントを負荷した場合, 等方性材料に比較して複合材料は断面上中立軸を中心に光弾性しま次数が完全に対称になることは難しい。したがって本研究では図3(a)に示す純曲げモーメント装置を用いることにより, 中立軸を中心にほぼ対称な等色線しま次数を得た。ファイバ方向と荷重方向のなす角度 θ は 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90° で実験を行い, おのおのについて感度を求めた。その結果を表1と等色線しま写真の一例を図6に示す。図6よりわかるように断面の中立軸を基準にして等色線しま次数は, ほぼ上下対称であり, 純曲げモーメントが正確に作用していることが

わかった。ただし各試験片に負荷した荷重は $P=901.6$ N, 試験片厚さと幅はそれぞれ $t=5.6, 5.4, 5.0, 5.1$ mm, $h=36.13, 36.0, 36.13, 35.9$ mm, ファイバの直径とピッチは 0.5 と 2.434 mm, θ は 0, 45, 60, 90°, $a=150, b=80$ である。

また, 各値を比較した場合, N. B. M. と C. D. で求めた実験値は式(19)により求めた理論値とほぼ同じであるが, C. D. で求めた実験値のほうが最も理論値に近いことがわかった。よって曲げモーメントにより感度検定を行う場合には, ファイバの直径を 0.5 mm のみに限定した。図4(a), (b)に示す装置により求めた等色線しま写真を図7(a)~(c)に示す。ここで図7(a)は等方性材料, 図7(b), (c)はファイバ直径が 0.5 mm の C. F. E. C. の場合で, 負荷荷重はおのおの 411.6, 470.4, 1274 N でありせん断力が作用する断面 AB の長さは 12, 12.58, 22.5 mm, 厚さは 5.45, 5.75, 5.7 mm である。

図7(a)~(c)の断面 A-B よりわかるようにエポキシ(等方性材料)と C. F. E. C. の等色線しま模様はほぼ相似である。また表2に示すように方向により物性値が異なるために, C. F. E. C. が直交異方性の性質を持ち合せ, かつ光弾性材料としての機能も十分に満たしていることがわかった。

等方性材料とファイバの直径が 0.5, 1.0, 1.5 mm, ピッチが 2.434 mm の C. F. E. C. 板を用いて A. C. D. と D. I. S. T. の試験片を作成して光弾性感度 f_{xy} を測定した後に, ひずみゲージ (N 22-FA-5-120-11) を接着して物性値 G_{xy} を測定した。また同じ C. F. E. C. 板より引張りと C. D. 用試験片を作成し, E_x, ν_{xy} と感度 f_x, f_y, f_{45} を測定した(表2)。測定した実験値 f_x, f_y, f_{45} を式(19)に代入して求めた f_{xy} の値は A. C. D. と D. I. S. T. により直接測定した f_{xy} の値と非常に近似している。よって光弾性感度 f_{xy} を直接 A. C. D. と D. I. S. T. を用いて求めるよりも式(19)より求めることが容易である。また, 本研究において導いた, 式(15)を用いて求めた G_{xy} と A. C. D. に, ひずみゲージを接着して

表2 応力フリンジ値 (f_{xy}) と横弾性係数 ($G_{xy}=G_{12}$)

Dia.	f_x, G_y $(f_x)_{exp.}$ E_x (MPa)	θ	Exp. f_{xy} (KN/m)			Exp. G_{xy} (MPa)		Cal. $f_{xy} = \frac{G_{xy} f_x}{G_{xy}}$ (MPa)		
			f_x	A.C.D.	D.I.S.T.	A.C.D.	D.I.S.T.	f_x	A.C.D.	D.I.S.T.
0.5 (mm) 1.348 (%)	0°									
1.0 (mm) 5.546 (%)	0°									
1.5 (mm) 14.1 (%)	0°									

A.C.D. : Arcan circular disk D.I.S.T. : developed Iosipescu Shear Test
 f_x : f_{xy} obtained from equation(19) (f_x)_{exp} : Stress fringe Values measured by exp.

(a) A. C. D. from isotropic material

(b) A. C. D. from C. F. E. C

(c) D. I. S. T. from C. F. E. C

図7 純せん断力の等色線しま写真

表3 ひずみゲージおよび応力フリンジ値により測定した縦弾性係数

θ Dia. V_f	θ degree	Exp. E_x by Strain gage (MPa)	E_x from f_x of C.D. (MPa)	E_x from eqt. (5.a) or (5.b) (MPa)	Exp. f_x from C.D. (KN/m)
0.5 1.34 %	0 (Ex)	4,871	4,871	4,871	13.09
	45 (E ₄₅)	4,018	4,010		10.78
	90 (Ey)	4,092	4,155	4,045	11.17
1.0 6.545 %	0 (Ex)	8,438	8,438	8,438	26.12
	45 (E ₄₅)	3,963	3,799		11.76
	90 (Ey)	3,977	3,942	4,085	12.201
1.5 14.1 %	0 (Ex)	11,760	11,760	11,760	39.2
	45 (E ₄₅)	4,328	4,187		13.96
	90 (Ey)	4,694	4,581	4,700	15.27

0 : 荷重方向とファイバとの成す角度

C.D. : Compressed diamond

求めた G_{xy} が最も近似している。よってひずみゲージにより物性値を求める場合は D. I. S. T. よりも A. C. D. のほうがより正確で、荷重変化に対しては非常に敏感であるが感度測定の場合はどちらも類似している。また物性値 G_{xy} はひずみゲージにより求めるより f_x , f_y , f_{45} だけを直接測定して式(19)に代入し f_{xy} を求め、これを式(15)に代入すれば求められる。光弾性感度を有する複合材料をファイバ方向に平行なく矩形の試験片をつくりファイバ方向と垂直にひずみゲージを接着してファイバ方向に荷重を負荷し E_x と ν_{xy} を測定する。また、その試験片の感度 f_x と母材の感度 f_m を測定し、 V_f と V_m を求め、これらの値を式(5・a)と式(11)に代入して E_f , E_m を求めた。この値と各試験片より測定した感度 f_y , f_{45} を式(5・b), (11), (13), (16)に代入して物性値 (E_x , E_y , E_{45}) と、直接ひずみゲージを接着して測定した物性値 (E_x , E_y , E_{45}) を表3に示す。

図8 C.F.E.C.の物理的等傾線と応力フリンジ値の関係

図9 C.F.E.C.の物理的等傾線と応力フリンジ値の関係

図10 ファイバの体積比率と応力フリンジ値の関係

図11 物理的等傾線と縦弾性係数の関係 ($V_f=1.34\%$ の場合)

図12 物理的等傾線と縦弾性係数の関係

図 13 ひずみゲージと応力フリンジ値による横弾性係数

表 3 に示すように物性値 (E_x , E_y , E_{45}) はひずみゲージにより求めた物性値と非常に近似し, Sih の理論⁽¹⁶⁾とも近似している. 直交異方性の平面問題を解析する場合に必要な E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} などは光弾性感度 f_x , f_y , f_{xy} , f_{45} などを測定して式(11), (13), (15), (16)および式(17)または式(18)に代入して求められる. しかし誤差が大きいため, 光弾性効果を持つ複合材料の物性値は, ひずみゲージにより E_x と ν_{xy} だけを求め, 他の物性値 E_y , E_{45} , G_{xy} などは光弾性感度により求められることが本実験により確かめられた.

図 8, 9 は, 図 2 (a), (b) により求めた結果(表 1) と $f_x = f_0$, $f_{90} = f_y$, f_{45} と $\theta = 45^\circ$ を式(19)に代入して f_{xy} を求め再び f_{xy} , f_x , f_y を式(19)に代入して各角度に対する f_0 と実際に求めた f_0 を図示したものである. 図 8 はファイバの体積比率が $V_f = 1.38\%$ で, C. D. により測定した感度のほうが式(19)と良く一致することが確かめられた. 図 9 は $V_f = 5.5, 14.1\%$ の場合で, 体積比率が増加しても C. D. により測定した応力フリンジ値 f_0 が式(19)と良く一致している.

図 10 は体積比率 $V_f = 1.348, 5.548, 14.1\%$ の場合で, 式(19)より求めた f_{xy} と, 図 4 (a) の A. C. D. および図 4 (b) の D. I. S. T. により測定した f_{xy} を図示したものである. 図 10 からわかるように最大の差は 12% 以下で, f_{xy} を測定する場合は, どれを用いても大差はない. したがって感度測定に際しては加工しやすい C. D. 試験と式(19)を用いれば, 直交異方性の平面問題を光弾性実験により解析するときに必要な光弾性感度 f_{xy} を簡単に求めることができる.

図 11 は $V_f = 1.348\%$ の場合で, C. D. により求めた感度と図 1 (a) にて直接測定した E_x を式(5・a), (11), (13), (16)に代入し得られた E_x , E_y , E_{45} と図 1 (a), (b), (d) にひずみゲージを接着して直接測定した E_x , E_y , E_{45} を示したものである. 図 12 は $V_f =$

図 14 応力フリンジ値 f_{xy} と物理的等傾線との関係

6.545% と 14.1% の場合で, 図 11 と同様な方法により E_θ を求めて示したものである(表 3). 図 11, 12 よりわかるようにひずみゲージを図 1 (a), (b), (d) に接着して測定した物性値 E_x , E_y , E_{45} は, 感度を式(5・a), (11), (13), (16)に代入して求めた E_x , E_y , E_{45} とほぼ等しいことがわかった. よって直交異方性材料の平面問題の解析に必要な物性値 E_x , E_y , E_{45} , ν_{xy} などは感度を測定すれば理論的に求めることが可能であるが, 精度上に難点がある. しかし図 1 (a) のように直接ひずみゲージにより E_x と ν_{xy} を測定し, 他の E_y と E_{45} は使用する試験片の光弾性感度により正確に求めることができる.

図 13 は図 1 (c) のようにひずみゲージを図 4 (a), (b) の試験片に接着して直接測定した G_{xy} と, 同じ V_f を持つ試験片の f_0 を利用して求めた f_{xy} および A. C. D. と D. I. S. T. により直接測定した f_{xy} を式(15)に代入して求めた G_{xy} を示す. しかし D. I. S. T. に直接ひずみゲージを接着して測定した G_{xy} は他とは差が大きい. よって G_{xy} を求める場合は A. C. D. にひずみゲージを接着して直接求めるか, または f_0 , A. C. D., D. I. S. T. などにより求めた感度 f_{xy} を式(15)に代入して G_{xy} を求めたほうが良い.

図 14 は直交異方性の性質を持つ光弾性材料により測定した f_x , f_y および任意の角度により測定した f_0 と任意の角度 θ を式(19)に代入して求めた f_{xy} と θ の関係および, A. C. D. により直接測定した f_{xy} を示す. 直交異方性の性質を持つ光弾性材料は各角度 θ においても f_{xy} 値は一定である. しかし図 14 からわかるように各角度により異なる. A. C. D. により直接測定

した f_{xy} と式(19)により求めた f_{xy} を比較した場合、 θ は $40^\circ < \theta < 65^\circ$ の範囲では非常に近似し、その誤差は $\pm 5\%$ 以内である。

5. 結 論

直交異方性の性質を持つ光弾性実験用材料を用いて、光弾性感度と物性値を調べた結果、次の知見が得られた。

(1) 直交異方性材料を光弾性実験により応力解析するときに必要な E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} は、ひずみゲージを使用して E_x と ν_{xy} だけを求め、これを式(5・a), (11)に代入し、まず E_f と E_m を求め、この値と光弾性感度 f_y , f_{45} , f_{xy} を式(13), (15), (16)に代入して E_y , E_{45} , G_{xy} を求めることができた。

(2) 応力フリンジ値 f_{xy} は、図4(a), (b)のA. C. D. と D. I. S. T. および式(19)により求められる。しかし式(19)を適用すればより正確で簡便に f_{xy} 値を求めることができる。

(3) 直交異方性性質を持つ光弾性実験用材料の f_θ を測定する場合は図2(b) (N. B. M.) 試験片よりも、図2(a) (C. D.) 試験片を使用するほうが良い。

(4) 応力フリンジ値 f_{xy} を式(19)により求める場合、直接測定した f_x , f_y , f_θ と θ を式(19)に代入して求めることができる。ただし、 θ は $40^\circ < \theta < 65^\circ$ の範

囲で選ぶのが良い。特に $\theta = 45^\circ$ と f_{45} を用いればより正確な f_{xy} が求まる。

(5) 正確な純曲げモーメントとせん断力状態を得るためには図2(b)と図4(b)のように中立軸線上に荷重を負荷するのが最も良いことが確かめられた。

文 献

- (1) 黄・ほか3名, 機論, 55-509, A (1989), 11.
- (2) Lekhnitskii, S. G., *Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic-body*, (1963), Holden-Day, Inc.
- (3) Sih, G. C., ほか2名, *Int. J. Fract. Mech.*, 1-3 (1965), 189.
- (4) Charles, W. B., *Exp. Mech.*, 9 (1985), 288.
- (5) Pagano, N. J., ほか1名, *J. Comput. Math.*, 2-1 (1968), 18.
- (6) Rizzo, R. R., *J. Comput. Math.*, 3-4 (1969), 202.
- (7) Oplinger, D. W., ほか2名, *Exp. Mech.*, 9 (1974), 347.
- (8) O'Brien, T. K., ほか1名, *Exp. Mech.*, 5 (1980), 145.
- (9) Walrath, D. E., ほか1名, *Exp. Mech.*, 3 (1983), 105.
- (10) Sullivan, J. L., ほか2名, *Exp. Mech.*, 9 (1984), 223.
- (11) Arcan, M., ほか2名, *Exp. Mech.*, 4 (1978), 141.
- (12) Chamis, C. C., ほか1名, *Exp. Mech.*, 9 (1977), 339.
- (13) Pindera, M. -J., ほか1名, *Exp. Mech.*, 3 (1986), 103.
- (14) Sampson, R. C., *Exp. Mech.*, 5 (1970), 210.
- (15) Prabhakaran, R., *Exp. Mech.*, 5 (1980), 178.
- (16) Sih, G. C., ほか1名, *J. Comput. Math.*, 7 (1973), 230.
- (17) Dally, J. W., ほか1名, *Exp. Mech.*, 8 (1971), 346.
- (18) 林, 航空学会誌, 8-79 (1941), 601.
- (19) Prabhakaran, R., *Exp. Mech.*, 1 (1975), 29.