研究論文

一方向ガラス繊維強化プラスチック材へのくさびの押込みにおける等色線の形状とガラス繊維の破損との関係について

井 上 久 弘*, 井 戸 守**

(1981年7月31日受付)

Relation between Isochromatic Fringe Pattern and Failure Pattern of Yarn in the Unidirectional Glass Fiber Reinforced Plastics at the Wedge Indentation

H. INOUE* and M. IDO**

(Received July 31, 1981)

The phenomena of the deformation of unidirectional glass fiber reinforced plastic materials at the wedge indentation were studied by means of photoelastic method. Irregular pattern of isochromatic fringe and failure pattern which occur and progress in the yarn were observed. These were considered in comparison with isochromatic numbers. The main results obtained are as follows: (1) The irregularity of isochromatic fringe depends on the irregular distribution of residual stress in the yarn. (2) The failure pattern in the yarn is predicted by the shape of envelope of isochromatic fringe for both yarn and matrix. (3) Interface debonding which appears between fiber and matrix occurs under the elastic deformation, whereas the micro fracture of fiber and matrix occurs during the plastic deformation. (4) The contour of whitening parts is very similar to the shape of isochromatic fringe except the fracture parts of yarn.

1. はじめに

一方向ガラス繊維強化プラスチック材へのくさびの押込みにおいて、くさび面下の試料内の歪分布を光弾性実験法によって観察し、試料内の歪状態とガラス繊維の剝離・破壊との相対的な関係を明らかにする。前報¹⁾ではくさびの押込み初期にヤーン部以外の母材中に発生する等色線、等傾線の形状および特異点の存在に対して、試料作製時に母材中に発生する方向性をもった残留応力によるものとして解析を行ない説明したが、ヤーン部における等色線の形状変化についてはふれていなかった。今回はこの考え方をヤーン部における等色線の不規則な変化の解析に適用した。さらにくさびを押し込むにつれて発生・進行するくさび面下のガラス繊維の破壊・剝離状

態およびそれと並行して変化する等色線の状態を同時に観察し、これらの相互関係からガラス繊維の破壊・剝離がどのような歪状態で発生・進行するか、また、くさび頂角およびヤーンの傾斜角の変化がこれらにいかなる影響を与えるかについて追求した。

2. 実験装置および実験試料

Fig.1 に光弾性実験用の装置を示す。くさびの押込みは図中のくさび押込み装置 (T) をインストロン万能試験機に設置し、クロスヘッドの移動によってくさびの押込みを行なった。くさび押込み中のガラス繊維の破損状態の観察は、カメラ側の偏光板 (P) と 1/4 波長板 (Q) を取りはずし、斜め前方から光を当ててガラス繊維および樹脂の破損部からの反射光を写真撮影することによって行なった。等色線と反射光による試料中の破損部の写真撮影は、くさびの押込みを一時的に停止することにより同じ押込み量の状態で両者の現象をとらえた。

実験に用いた試料材料および形状については Table 1 に示す。試料作製方法は前報¹⁾と同様であるが、樹脂を型に流し込み、278 K で 35 時間保持して硬化させた

*,** 大阪府立大学工学部機械教室(591 堺市百舌鳥梅町 4 丁 804)

Dept. of Mech. Eng., Coll. of Eng., University of Osaka Prefecture, 4-804, Mozu-Umemachi, Sakai 591, Japan

* 助手 Assistant, ** 教授 Professor

Fig.1 Experimental apparatus.

C : camera, S : light source, Q : quarter wave plate, P : polaroid plate, T : wedge indenting apparatus.

Table 1 Detail of specimen and experimental procedure.

Resin*	Unsaturated Polyester Polymal 6304, 6320F
Yarn**	ECG-75-1/2 3.3S·NA
Volume content of fibers	0.85%
Inclination angle of yarn	$\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$
After cure	390 K, 2 h $\rightarrow$ 360 K, 6 h $\rightarrow$ 330 K, 6 h
Size of specimen	48 $\times$ 70, $d = 6$ mm
Tool material	SKH-2, width $b = 6$ mm
Wedge angle	Symmetric wedge indenter $2\theta = 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 160^\circ$ Half wedge indenter $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 80^\circ$
Indenting depth	1 mm
Velocity of indentation	0.1 mm/min

* TAKEDA Chemical Industries Ltd.

** NITTO BOSEKI Co. Ltd.

後、試料を荒加工した。さらに 303 K で 20 時間保持してから所定の形状に仕上げた後、Table 1 に示す熱処理を行なった。

等色線の縞の変化の観察は押込み量 0.1 mm ごとに 1 mm までと、さらに除荷終了までを写真撮影によって行なった。一方、ガラス繊維の破損の観察は押込み量 0.1 mm ごとに 0.3 mm から 1 mm までと除荷終了時を写真撮影することによって行なった。

Fig.2 Isochromatic lines (experimental results). wedge angle : $2\theta = 120^\circ$, indenting depth : 0.1 mm, α : inclination angle of yarn.

3. 等色線の不規則性について

一方向ガラス繊維強化プラスチック材にくさびを押し込んだ場合に発生する等色線の形状は試料内のヤーンの方に大きく影響され、前報においてこれを樹脂中に発生するヤーン方向の残留応力によるものと考え、二次元平面応力状態における集中荷重問題として解析し実験結果とのよい一致を見た。等色線をさらに詳細にながめると、Fig.2 に示すようにヤーン部において等色線は不規則な変化をしており、ヤーンの傾斜角の変化によってこの不規則な状態が変化しているのが見られる。ここではこの等色線の不規則性を樹脂部とヤーン部とでの残留応力の不均一によって生じるものとして解析を行なった。

ヤーン中に存在する樹脂には試料作製時にガラス繊維のために引張りの残留応力が発生する。さらにヤーン全体としては、まわりの樹脂の収縮によって圧縮の力を受けることになる。このためヤーン中の樹脂にはこれらの合成された残留応力が存在することになる。河田²⁾によれば、等間隔にガラス繊維が配列されて樹脂中に鑄込まれた場合、ガラス繊維間の樹脂中に発生する残留応力はほぼ同じ状態の分布をしており、その残留応力の大きさはガラス繊維間隔に影響される。今回の一方向ガラス繊維強化プラスチック材の光弾性観察による残留応力分布は Fig.3 のように考えられる。すなわち、樹脂部とヤーン部とにおける光弾性観察による残留応力の差は、ガラス繊維の光弾性感度が低いのでこれを無視すると、ヤーン中に存在する樹脂部の通過距離に依存する。

Fig.3 Model of residual stress distribution in FRP specimen.

(a) side view of specimen, (b) optical path length in FRP specimen, l_m : for matrix, l_y : for resin in the yarn, (c) residual stress distribution in FRP specimen, σ_0 : residual stress (m : for matrix, y : for yarn)

Fig.3(a) は試料側面図を示す。光が通過する樹脂部およびヤーン中の樹脂部の通過距離の変化は Fig.3(a) より 3(b) のようになる。この結果、試料中の残留応力分布は Fig.3(c) となると考えられる。ここで樹脂部およびヤーン中心部の残留応力 (σ_{0m} および σ_{0y}) をバビネ補正器で測定してみると樹脂部の残留応力は $\sigma_{0m} = (1/2) \cdot (\sigma_{90}/t)$ (σ_{90} : $\alpha = 90^\circ$ のフリンジ応力 = 13 MPa・mm, t : 板厚) となり、ヤーン中心部の残留応力は $\sigma_{0y} = 0$ となる。これらの残留応力値を用い、前報と同様均質直交異方性半無限平板に集中荷重が作用し、同時に試料内にヤーン方向 (α) に残留応力 σ_{0m} および σ_{0y} が存在すると仮定して試料内の応力分布を計算した。その結果を Fig.4 に示す。図中破線は樹脂部の等色線の包絡線を示し、一点鎖線はヤーン中心部の等色線の包絡線を示す。太い実線が計算によって得られた等色線である。

Fig.4 は Fig.2 に示した実験結果と形状がよく類似している。いま Fig.2, 4 において、ヤーン中心部と樹脂部との等色線を包絡線で結ぶと両者が交差する点 C が存在する。この交点 C がくさび頂角およびヤーンの傾斜角 (α) の変化によってどのように変化するかを示したのが Fig.5 である。図においてくさび先端 (O 点) と C 点を結ぶ直線 OC と、O 点よりヤーンに下した垂線 (OA) とのなす角度を β とし、実験結果と解析結果とを定量的に比較するために β の変化をとらえる。図の縦軸は β

Fig.4 Map of isochromatic lines (orthotropic material).

load: $P = 882 \text{ N}$, residual stress: $\sigma_{0m} = 2.16 \text{ MP}$ (for matrix), $\sigma_{0y} = 0$ (for the center of yarn), α : angle between surface and direction of residual stress.

Fig.5 Relation between β and wedge angle. Dotted line shows the calculation value of analysis. α : inclination angle of yarn, 2θ , θ : wedge angle.

で、横軸はくさび頂角を示す。図において β はある程度のばらつきをもつが、ヤーンの傾斜角 (α) やくさび形

Fig. 6 Fringe number of elastic recovery after wedge indentation.

Dotted line shows the critical fringe value of linear stress-strain relation by photoelastic sensitivity experiment. N.F.: unsaturated polyester without fibers, α : inclination angle of yarn.

状の変化に対してほぼ一定である。一方、図中の破線は計算結果で残留応力の方向には無関係に一定である。このことより樹脂部とヤーン部とにおいて等色線が不規則な変化をしているが、同一の不規則な等色線上においては同一の歪差が生じていると考えてよい。

4. 弾性域と縞次数との関係

今回の FRP 材へのくさびの押込みにおいて、まず何次の縞次数までが直線的な弾性変形領域であるかを求めることにする。Fig. 6 に弾性回復によって消滅する縞数とくさび形状との関係を示す。縦軸はくさびを 1 mm まで押し込んだとき、くさび面に発生する観察されうる最大の縞数とし、除荷した後に観察されうる最大の縞数との差を示し、横軸はくさび頂角を示す。図より対称型くさび、半角型くさびともにくさび頂角が増加するにつれて消滅する縞数は増加している。またくさび頂角の変化に対する縞数の変化は、ヤーンの傾斜角 (α) の変化の影響は少なく、母材のみの試料 (◇印) とはほぼ同じ変化をしている。これはくさびの押込み形態によるものと考えられる。図中の破線は圧縮の光弾性感度測定において、応力-歪曲線がほぼ直線的に変化している範囲で、種

Fig. 7 Experiment results.

(a) isochromatic line, (b) whitening pattern by reflected light, wedge angle: $2\theta = 120^\circ$, indenting depth: 0.5 mm, α : inclination angle of yarn.

々のヤーンの傾斜角 (α) における最大の縞数の平均値を示す。

くさびを 1 mm 押し込んだ場合くさび面近くにおいて試料の一部が塑性変形していることより、Fig. 6 において今回用いた試料の直線的な弾性変形を示す縞次数は、各くさび頂角に対して破線以下の実験値および破線の値とする。

5. ガラス繊維の破損と等色線の縞次数との関係

3章において等色線がヤーン部と樹脂部において不規則な変化をしていても等色線そのものは正確に主歪差を表わすものであることを述べた。つぎにくさび押込み途中の等色線の形状とガラス繊維の破損状態との関係の一例を Fig. 7 に示す。図はくさび頂角 $2\theta = 120^\circ$ 、押込み量 0.5 mm の等色線の形状 (a) とガラス繊維の白化状態 (b) とを示す。Fig. 7(b) におけるガラス繊維の白化部分はガラス繊維および樹脂の微小破壊した部分と、両者が界面剥離している部分とを含む領域である。ヤーン中の白化はくさび先端よりヤーンに下した垂線とヤーンとの交点より発生し、押込み量が増加するにつれてヤーンに沿って伝播してゆく。Fig. 7(a) と (b) との両方の写真を

Fig. 8 Relation between isochromatic fringe number and failure point of yarn.
 α : inclination angle of yarn, indenting depth : 1.0 mm, 2θ , θ : wedge angle.

重ね合わせることによって、この伝播してゆく白化部の先端とそれに一致する等色線の縞次数との関係がとらえられる。押込み初期を除けば白化発生時の縞次数は同一のヤーン中においては、それぞれのくさび頂角に対してほぼ一定となる。この一定となった白化発生時の縞次数とくさび頂角との関係を示したのが Fig. 8, Fig. 9 である。両図とも縦軸は白化発生時の等色線の縞次数を示し、横軸はくさび先端からのヤーンの位置を番号で示してある。Fig. 8 はヤーンの傾斜角が $\alpha=0^\circ$ および $\alpha=90^\circ$ の場合を示す。両者とも同じ傾向、すなわちくさび頂角が大きくなるほど、またくさび先端から離れたヤーンほど白化発生時の縞次数は大きくなる傾向を示す。Fig. 6 と対応させた結果、これらの白化はすべて弾性変形領域内で発生している。

Fig. 9 はヤーンの傾斜角が $\alpha=30^\circ$ および $\alpha=60^\circ$ の場合である。 $\alpha=30^\circ$ の場合、図中に示すように (a) 側の領域においては第 1 番目のヤーンを除いて Fig. 8 の場合と同じ傾向を示すが、 $\alpha=30^\circ$ の場合のほうが白化の発生する縞次数は少し大きくなる。これに対して (b) 側の領域においては (a) 側とは逆にくさび頂角の大きいほうが白化の発生する縞次数が小さくなっている。この場合、(a) 側、(b) 側両方ともくさび頂角の小さい場合の白

Fig. 9 Relation between isochromatic fringe number and failure point of yarn.
 α : inclination angle of yarn, indenting depth : 1.0 mm, 2θ , θ : wedge angle.

化の発生する縞次数はほぼ同じである。 $\alpha=60^\circ$ の場合、(a) 側の領域の縞次数の変化は $\alpha=30^\circ$ の場合と同じであるが (b) 側の領域の白化の発生する縞次数は、白化がすぐに表面にぬけてしまうため観察できなかった。 $\alpha=30^\circ$ および 60° の (a) 側の領域における第 1 番目のヤーンは、ヤーンとくさびとが接近しすぎているためくさび形状の影響を大きく受けている。すなわち、圧縮型の押込みと切削型の押込みとの差が大きく現われ他のヤーンと異なった現象を示したものと推測される。一方、 $\alpha=30^\circ$ および 60° のくさび先端より左側の領域 (Fig. 5) においてくさび面とヤーンの関係が A 型の領域においては上記の関係を求めることは不可能である。この領域の破損については以前に報告したようにガラス繊維と樹脂の微小破壊が主であって^{3,4)}、白化部の進行は少ない。この領域においては等色線の縞次数が読みとれないことから塑性変形を起こしていると考えられる。

これらのことよりくさびとヤーンの関係が $\alpha=30^\circ$ (b) の場合を除いて、一般にくさび頂角が大きくなるほどヤーン中の白化の発生する等色線の縞次数は大きくなり、またくさび先端から離れたヤーンほど白化の発生する等色線の縞次数は大きくなって、白化が起りにくくなるが、くさび頂角の変化による差が小さくなる。これに対して $\alpha=30^\circ$ (b) の領域はくさび頂角が大きくなるほど白

Fig. 10 Map of isochromatic line for unsaturated polyester materials without fibers at wedge indentation.

2θ : full wedge, θ : half wedge.

化の発生する等色線の縞次数が小さく、他の条件より全体的に白化が起こりやすい。弾性変形内で観察されている白化部の破損状態は顕微鏡観察から、ほとんどガラス繊維と樹脂との界面剥離によるものである。

6. 剝離域形状と等色線形状との関係

種々のくさび形状に対するおのおのヤーン中の白化発生と等色線の縞次数との関係を観察したがこの白化の進行が等色線の形状変化とどのような関係にあるかについて考えてみる。今回使用した FRP 材の母材である不飽和ポリエステル樹脂に、種々の形状のくさびを 1 mm 押し込んだ場合の等色線の形状を模式的に示したのが Fig. 10 である。対称型くさびにおいて、圧縮型押込み ($2\theta=160^\circ$) ではくさび面下の等色線の形状は円形に近く、試料表面近くにおいて等色線はくさび先端方向に向いている。これに対して切削型押込み ($2\theta=30^\circ$) では半円形に近い形状となり、試料表面近くにおいては等色線が表面に垂直につきぬけている。一方半角型くさびにおいて、くさび面下における等色線の形状変化は対称型くさびの場合とはほぼ同じ変化であるが、くさび面前方 (図中の左側) においては試料表面につきぬけている。ガラス繊維を含んだ試料において、等色線の形状はヤーンの

Fig. 11 Schematic diagram of isochromatic line and tip of failure part of yarn.

α : inclination angle of yarn, 2θ : full wedge angle.

Fig. 12 Schematic diagram of isochromatic line and tip of failure part of yarn.

α : inclination angle of yarn, θ : half wedge angle, (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=60^\circ$, (c) $\alpha=60^\circ$.

存在によって歪むが、押込み量が 1 mm で図中に示した縞次数程度の高次の縞においては、基本的に Fig. 10 の場合とほぼ同じパターンを示している。

Fig. 11, 12 に Fig. 10 と同様に一方向ガラス繊維強化プラスチック材に、くさびを 1 mm 押し込んだ場合のヤーン中に発生する白化部先端の分布 (●印) と、この

分布に近い形状の等色線を模式的に示す。Fig. 11 は対称型くさびの場合でくさび頂角が $2\theta=30^\circ$ および 160° 、ヤーンの傾斜角が $\alpha=0^\circ$ および 60° の場合である。この場合、 $2\theta=160^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ の場合を除いて等色線の形状と白化部先端の分布とがほぼ一致している。これに対して $2\theta=160^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ の場合はくさび先端より左側（くさび面とヤーンの間）のヤーン中の白化部の先端は等色線の形状と大きくずれており、Fig. 9 において等色線の縞次数が読みとれなかった領域である。Fig. 12 は半角型くさびの場合でくさび頂角が $\theta=30^\circ$ および 80° 、ヤーンの傾斜角が $\alpha=0^\circ$ および 60° の場合である。この場合も $\theta=80^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ の場合を除いて等色線の形状と白化部先端の分布とがほぼ一致している。

以上の結果から、圧縮型の押込み形態の場合、ヤーンの間とくさび面との関係が A 型の関係である領域と、 $\alpha=90^\circ$ の場合においては等色線の形状と白化部先端の分布とが大きくずれている。一方、これ以外の場合においては、等色線の形状と白化部先端の分布とがほぼ一致している。

ここで Fig. 11 および 12 で示した現象と Fig. 4 で示した解析結果を比較考察すると、3 章で述べた交点 C を境にして異なった現象を示していることがわかった。等色線の形状と白化部先端の分布とがほぼ一致している領域は、Fig. 4 において、樹脂部における等色線の包絡線がヤーン中心部における等色線の包絡線より外側に出ている領域である。この部分の白化はガラス繊維と樹脂との界面剝離を主とした破損である。これに対して等色線の形状と白化部先端の分布とが大きくずれている領域は、Fig. 4 において樹脂部における等色線の包絡線がヤーン中心部における等色線の包絡線より内側に入っている領域である。この部分の白化は主としてガラス繊維と樹脂との微小破壊によって生じたものである。

7. 結 論

一方ガラス繊維強化プラスチック材へのくさびの押込み現象を光弾性実験法で観察し、ヤーン部における等

色線の不規則な変化、ヤーン中の白化現象の発生・進行と等色線の縞次数との関係および白化部の領域と等色線の形状との関係などを観察した結果、以下のような結論を得た。

- 1) ヤーン部における等色線の不規則な変化は試料作製時にヤーン部および樹脂部において発生する残留応力値の相違によるものである。
- 2) 等色線の不規則な変化において、ヤーン中心部の等色線の包絡線が樹脂部の等色線の包絡線より外側に出ている領域内のヤーン中に発生する白化は、主としてガラス繊維と樹脂との微小破壊によるものである。他方、ヤーン中心部の等色線の包絡線が樹脂部の等色線の包絡線より内側に入っている領域内のヤーン中に発生する白化は、主としてガラス繊維と樹脂との界面剝離である。
- 3) ヤーン中に発生する界面剝離は弾性変形内で発生する。個々のくさび形状に対してこの剝離はほぼ一定の等色線の縞次数において発生・進行していく。これに対してヤーン中に発生するガラス繊維と樹脂との微小破壊は主として塑性変形領域で発生している。
- 4) ヤーン中の剝離は一般にくさび頂角が大きいほど、またヤーン的位置がくさび先端より離れるほど発生しにくい。すなわち剝離の発生する等色線の縞次数が大きくなる。ただし、ヤーンの傾斜角 $\alpha=30^\circ$ の試料でくさび先端よりヤーンに下した垂線より表面側の領域においてはくさび頂角の変化に対して逆の傾向を示す。
- 5) 界面剝離を生じている白化部の形状は等色線の形状とよく似ているが、それ以外の破損による白化部の形状は等色線の形状と大きく異なっている。

参 考 文 献

- 1) 井上久弘, 井戸 守: 日本複合材料学会誌, 7, 4 (1981), 147-153.
- 2) 河田幸三, 橋本彰三, 本堂 明: 東京大学宇宙航空研究所報告, 4, 3-B (1968), 435-444.
- 3) 井上久弘, 井戸 守: 日本複合材料学会誌, 4, 2 (1978), 69-75.
- 4) 井上久弘, 井戸 守: 同上, 4, 3 (1978), 112-118.