皮膜散乱光法による光粘塑性ひずみ解析[†]

平野 貞三* 林 佳彦* 今井 康文**

Photoviscoplastic Strain Analysis of Surface Coatings by the Scattered-Light Method

by

Teizo HIRANO*, Yoshihiko HAYASHI* and Yasufumi IMAI**

A coating method for measuring large surface strains of three-dimensional bodies using the scattered-light technique was proposed associated with an investigation of photoviscoplastic behavior of properly mixed polyester resin. A major advantage of this method is that interference fringes at the boundary between a real specimen and coatings can be observed directly. Two components of shearing strains on the surface of the real specimen in axi-symmetrical torsion problems could be calculated using two kinds of scattered-light fringe patterns obtained by two different incidences of polarized light. For the demonstration of effectiveness of the proposed method, this method was applied to analyses of surface strains of solid and circumferentially notched cylindrical specimens made of aluminum alloy with polyester coatings under torsion. Shearing strains on the surface of solid specimens were estimated, which were well consistent with ones calculated from twisting angles. For the notched specimen, shearing strains on the notch surface were estimated and the distributions were well consistent with FEM analyses.

Key words: Photoviscoplasticity, Surface strain, Coating method, Scattered-light, Polyester coatings, Torsion

1 緒 言

光弾性皮膜法は金属などの実物試験体表面に光弾性材料の皮膜を接着し、実物の弾塑性変形に伴って皮膜に現れる複屈折効果を利用して、実物表面のひずみ分布を直接測定する方法である。この方法は1930年 Mesnager により提案されたもので、これまでも皮膜法による実物弾塑性解析に関する研究が多く行なわれてきた。^{1)~8)}

これまでの皮膜法は反射型光弾性装置を用いて、実物表面で反射した偏光の皮膜表面に現れる干涉縞から実物表面のひずみを測定する方法であり、実物表面が平面である場合の2次元問題の解析に多く用いられてきた。しかしながら、この反射型光弾性装置を用いた実験法を実物表面が曲面である場合の3次元問題に適用するには、縞の観察方法やひずみ成分の分離方法などの問題が具体的に解決されていないため、現在まで3次元問題に関する皮膜法の研究例は非常に少ないようである。^{2), 5)}

そこで本研究は、3次元問題における皮膜法の開発を目的としたもので、著者らがこれまで研究を行ってきた散乱光法による3次元光粘弾塑性解析法^{9)~11)}を皮膜の解析に適用して、3次元物体表面のひずみ分布の解析を試みたものである。散乱光法とは、光弾性モデルや光粘弾塑性モデルに偏光の薄いスリット光を通過させ、その光束面上で散乱される光の干涉縞からモデル内部の応力およびひずみを解析する方法である。特に、本研究のよ

うに皮膜法の縞観察に散乱光法を用いる最大の特徴は、従来の反射型実験法では観察できなかった皮膜厚さ内の干涉縞の観察が可能であり、しかも最も観察したい実物表面と皮膜との接着面上の干涉縞を直接観察できる点にある。皮膜法のこれまでの報告には、本研究のように散乱光法を用いて解析した例はほとんど見当たらない。以後、この実験法を皮膜散乱光法と名付けることにする。

著者らはこれまでに、ポリエステルをモデル材料に用いて、散乱光法によりひずみ速度の影響を考慮した3次元光粘弾塑性解析法について検討してきた。^{9)~11)} その結果、ポリエステルは粘弾塑性的に変形し、変形に伴って現れる散乱光縞はひずみとひずみ速度に依存する。しかしながら、その応力とひずみの関係および縞こう配と主ひずみ差の関係は、ひずみ速度の広い範囲にわたって、ひずみ速度に依存する係数を含む簡単な式で表すことができ、縞の観察のみからモデル内部の応力、ひずみ、およびひずみ速度が推定できることを明らかにした。¹⁰⁾

皮膜散乱光法では、散乱光法に適した皮膜材料の選定が重要である。つまり、散乱光法に適した皮膜材料としては、大きなひずみの範囲まで縞こう配-ひずみ関係が線形で、しかも散乱光に対する感度の高い材料であることが理想的である。しかし、現在のところそのような材料は見当たらない。

本研究では、皮膜材料には縞こう配-ひずみ関係が非

† 原稿受理 平成11年2月2日 Received Feb. 2, 1999

* 正会員 久留米工業大学工学部機械工学科 〒830-0052 久留米市上津町, Dept. of Mech. Eng., Kurume Inst. Tech., Kamitsu-machi, Kurume, 830-0052

** 正会員 長崎大学工学部機械システム工学科 〒852-8521 長崎市文教町, Dept. of Mech. Sys. Eng., Nagasaki Univ., Bunkyo-machi, Nagasaki, 852-8521

線形であるが、散乱光に対する感度の高い上記のポリエステル^{9)~13)}を用いて、皮膜散乱光法による実物試験体の軸対称ねじり問題について検討したもので、ポリエステルの材料特性実験から皮膜の解析に必要な実験解析式を導出し、皮膜に現れる散乱光縞から実物丸棒表面のせん断ひずみを解析する方法を提案するものである。また、断面が一樣でない実物丸棒表面のせん断ひずみの解析では、異なる2方向からの偏光入射によって得られる2種類の散乱光縞から2つのせん断ひずみ成分を算出する方法について述べている。さらに、提案した解析法の有効性を検討するために、アルミニウム合金の中実丸棒試験片と円弧切欠き丸棒試験片を用いて皮膜散乱光法によるねじり試験を行い、本解析法を用いてアルミニウム合金の表面ひずみの解析を行った。そして、本解析法より求めた結果を、中実丸棒試験片の場合にはねじれ角から算出した結果と、円弧切欠き丸棒試験片の場合には有限要素法による解析結果とそれぞれ比較検討した。

2 実験方法

実験に使用した実物試験体の素材は、市販のアルミニウム合金 (A1050BD-O) で、素材から平行部直径が 14 mm の中実丸棒試験片と最小断面の直径が 15mm で深さ 5mm、切欠き半径 10mm の円弧切欠き丸棒試験片に機械加工した後、温度 350℃ で 1 時間の焼なまし処理を行った。その後、試験部表面での偏光の反射の影響を避けるために、試験部表面に黒色ペイントを薄く塗布した。さらに、試験部表面と皮膜との接着性を良くするために、試験部表面にシラン処理を行った。

実験に使用した皮膜材料は、硬質ポリエステル (リゴラック 1557) と軟質ポリエステル (リゴラック 70F) を重量比 3 : 7 の割合で混合し、所定の触媒と硬化促進剤を重量比約 0.5% ずつ添加した混合ポリエステルである。この混合液をシラン処理した試験部表面に注塑し、室温で 24 時間硬化させ、さらに 70℃ で 12 時間の熱処理を行った後、機械加工して Fig. 1 に示すような形状寸法の皮膜接着試験片に仕上げた。なお、試験部の皮膜厚さは約 2.5mm とした。

実験に使用した皮膜の材料特性を調べるために、既報¹⁰⁾と同様、平行部直径 20mm のポリエステル丸棒試験片を

機械加工により作製した後、試験片平行部外周のひずみ速度が $1.77 \times 10^{-4} 1/s \sim 2.30 \times 10^{-3} 1/s$ の範囲の 5 種類についてねじり試験を行った。なお、ねじり試験には島津ねじり試験機を用いた。

アルミニウム合金のねじり試験は、中実丸棒試験片の場合、つかみ部のねじれ角速度 $\dot{\omega}$ を $3.96 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ と $7.33 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ の 2 種類、切欠き丸棒試験片の場合、 $1.90 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ で行った。なお、すべての実験は温度 32℃ のもとで行った。

皮膜散乱光実験で使用した光学系の概略を Fig. 2 に示す。光源には、He-Ne レーザー (波長 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$) を使用した。偏光が皮膜表面に入射する際の反射と屈折を避けるために液浸法を用いた。その浸漬液には、皮膜の屈折率と等しいポリエステルモノマー溶液を使用した。偏光の入射方向は、2つのせん断ひずみ成分を分離して算出するため、試験片軸に垂直な半径方向と斜方向の 2 方向とした。散乱光縞の写真撮影は、シリンドリカルレンズによってシート状にした偏光を試験片軸を含む rz 面に沿って入射させ、入射面と直角な方向から行った。

3 皮膜の材料特性

皮膜に用いたポリエステルの材料特性を調べるために、ポリエステルの丸棒試験片を用いて試験片平行部外周のひずみ速度を変えてねじり試験を行い、皮膜の光粘塑性解析に必要な実験解析式を導出した。その導出過程は、既報¹⁰⁾で詳細に述べているので、本論文では皮膜の解析に必要な関係式のみを記述する。

3・1 応力とひずみの関係

弾塑性状態の真応力と真ひずみを次のような相当せん断応力 T と相当せん断ひずみ Γ で表す。

$$T = \left(\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2}, \quad \Gamma = (2e_{ij} e_{ij})^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 s_{ij} は偏差応力成分、 e_{ij} は偏差ひずみ成分である。ポリエステルの T - Γ 関係は、Ramberg-Osgood¹⁴⁾ 形の次式 (2) で表される。

$$\Gamma = \frac{T}{G} \left\{ 1 + \frac{3}{7} \left(\frac{T}{T_y} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 G は横弾性係数、 T_y は相当降伏せん断応力である。 G と T_y は、いずれもひずみ速度 $\dot{\Gamma}$ に依存し、ひずみ

Fig. 1. Shapes and dimensions of specimens.

Fig. 2. Schematic illustration of experimental apparatus.

速度の標準値 ($\dot{\Gamma}_0 = 10^{-3} 1/s$) を用いて、それぞれ次式 (3), (4) で表される。

$$G = 40.4 \left(\frac{\dot{\Gamma}}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{0.184} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$T_y = 1.93 \left(\frac{\dot{\Gamma}}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{0.184} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

3・2 縞こう配と主ひずみ差の関係

縞こう配 n は偏光の入射面内の主ひずみ差と関係するので、ポリエステルの丸棒試験片が単純ねじりおよび単軸引張りを受ける場合、偏光が試験片軸 (z 軸) を含む rz 面に沿って半径方向から入射するとき、 rz 面内の 2 次相当ひずみ Γ' を次のように定義した。¹⁰⁾

$$\Gamma' = \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2 + \gamma_{\theta z}^2} \quad (5)$$

ここで、 ε_z , ε_θ は軸方向と円周方向の垂直ひずみ、 $\gamma_{\theta z}$ はせん断ひずみである。 Γ' はねじりの場合にはせん断ひずみに等しく、引張りの場合には 2 次主ひずみ差に等しい。

本実験から得られたポリエステルの n - Γ' 関係は次式 (6), (7) で表される。

$0 < \Gamma'/\Gamma'_y < 1$ のとき、

$$\frac{n}{n_y} = 0.80 \left(\frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right) + 0.20 \left(\frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right)^4 \quad (6)$$

$\Gamma'/\Gamma'_y \geq 1$ のとき、

$$\frac{n}{n_y} = 1.60 \left(\frac{\Gamma'}{\Gamma'_y} \right) - 0.60 \quad (7)$$

ここで、 Γ'_y は 0.0685、 n_y は Γ'_y に対応する n の値で、降伏縞こう配と定義する。 n_y はひずみ速度に依存し、偏光の波長 λ (= 632.8nm) を用いて次式 (8) で表される。

$$n_y \cdot \lambda = 1.91 \times 10^{-4} \left(\frac{\dot{\Gamma}}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{0.0343} \quad (8)$$

2 次相当ひずみ速度 $\dot{\Gamma}'$ は、縞こう配 n と縞こう配増加速度 $\dot{n}$ ($= dn/dt$) から、次式 (9), (10) で推定できる。

$n < n_y$ のとき、

$$\frac{\dot{\Gamma}'}{\dot{\Gamma}_0} = \left[\frac{1.345 \times 10^3}{2 + \sqrt{1 + 15 \left(\frac{\dot{n}}{n_y} \right)^3}} \left(\frac{\dot{n} \cdot \lambda}{\dot{\Gamma}_0} \right) \right]^{1/1.0343} \quad (9)$$

$n \geq n_y$ のとき、

$$\frac{\dot{\Gamma}'}{\dot{\Gamma}_0} = 186.1 \left(\frac{\dot{n} \cdot \lambda}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{1/1.0343} \quad (10)$$

また、降伏縞こう配 n_y は縞こう配増加速度 $\dot{n}$ から次式 (11) で推定できる。

$$n_y \cdot \lambda = 2.285 \times 10^{-4} \left(\frac{\dot{n} \cdot \lambda}{\dot{\Gamma}_0} \right)^{1/0.03316} \quad (11)$$

以上の結果より、縞の時間的変化の測定から単純ねじりおよび単軸引張りを受けるポリエステル皮膜のひずみ速度、相当せん断ひずみおよび相当せん断応力を推定することができる。

4 軸対称ねじり問題の皮膜光粘塑性解析法

4・1 縞こう配とせん断ひずみの関係

断面が一様でない丸棒試験片をねじる場合のせん断ひずみ成分は、円柱座標系を用いて表すと $\gamma_{\theta z}$, $\gamma_{r\theta}$ である。

いま、皮膜内のせん断ひずみ成分を求めるために、Fig. 3 に示すような試験片軸 (z 軸) を含む rz 面に沿って、偏光を 2 方向から入射すると、縞こう配 n とせん断ひずみ成分 $\gamma_{\theta z}$, $\gamma_{r\theta}$ の関係は次のように表される。

(1) 半径方向入射のとき

$$n_0 = \frac{dN_0}{dS_0} = C(\Gamma', \dot{\Gamma}') \gamma_{\theta z} \quad (12)$$

(2) 半径方向と角 α をなす方向入射のとき

$$\begin{aligned} n_{+\alpha} &= \frac{dN_{+\alpha}}{dS_{+\alpha}} \\ &= C(\Gamma', \dot{\Gamma}') (\gamma_{\theta z} \cos \alpha - \gamma_{r\theta} \sin \alpha) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、 N は散乱光縞次数、 S は入射点からの光路程、 $C(\Gamma', \dot{\Gamma}')$ は主ひずみ差感度、および添字の 0 と $+\alpha$ は入射方向を表す。

したがって、式 (12), (13) からせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$, $\gamma_{r\theta}$ は次式 (14), (15) のように求められる。

$$\gamma_{\theta z} = \frac{1}{C(\Gamma', \dot{\Gamma}')} \cdot n_0 \quad (14)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{C(\Gamma', \dot{\Gamma}')} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} (n_0 \cos \alpha - n_{+\alpha}) \quad (15)$$

さらに、 $\gamma_{\theta z}$ と $\gamma_{r\theta}$ を

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\theta z} &= \frac{1}{C(\Gamma', \dot{\Gamma}')} \cdot n_{\theta z} \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{1}{C(\Gamma', \dot{\Gamma}')} \cdot n_{r\theta} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

と書き表すと、 $n_{\theta z}$, $n_{r\theta}$ は

$$\left. \begin{aligned} n_{\theta z} &= n_0 \\ n_{r\theta} &= \frac{1}{\sin \alpha} (n_0 \cos \alpha - n_{+\alpha}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

で表せる。

特に、対称断面では、 $\gamma_{r\theta} = \gamma_{zr} = 0$ となるので、半径方向からの偏光入射による縞こう配 n_0 の測定から、直ちにせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ が求められる。

4・2 解析手順

(1) 縞次数 N_0 と $N_{+\alpha}$ を測定し、縞こう配 $n_{\theta z}$, $n_{r\theta}$ を計算し、縞こう配 n_{ij} の時間的変化から縞こう配増加速度 $\dot{n}_{ij}$ を求め、式 (11) からそれぞれの降伏縞こう配 n_{ijy} を計算する。

(2) $n_{ij} < n_{ijy}$ のときは式 (6), (9) から、 $n_{ij} \geq n_{ijy}$ のときは式 (7), (10) から、せん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$, $\gamma_{r\theta}$ とせん断ひず

Fig. 3. Coordinate system and incident directions of polarized light.

み速度 $\dot{\gamma}_{\theta z}$, $\dot{\gamma}_{r\theta}$ を算出する。

(3) 対称軸を含む断面上における相当せん断ひずみ Γ は次式から求める。

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{\theta z}^2 + \gamma_{r\theta}^2} \quad (18)$$

さらに、この時間的変化から、相当せん断ひずみ速度 $\dot{\Gamma}$ を算出することもできる。

5 有限要素解析

中実丸棒試験片を用いたねじり試験の場合、試験片平行部の表面ひずみは実験的に測定できるので、皮膜光粘塑性解析による結果の妥当性は簡単に判断できる。しかし、円弧切欠き丸棒試験片の場合には、切欠き部周上のひずみ分布は実験的に測定するのは容易でない。したがって、皮膜光粘塑性解析から得られたひずみ分布の妥当性は、別の解析法からの結果と比較する必要がある。本論文では、有限要素法によって、切欠き部周上のひずみ分布を解析し、皮膜光粘塑性解析の結果と比較することにした。

有限要素解析には、Fig. 1 (b) に示すような円弧切欠き丸棒試験片をモデル化し、対称性を考慮して全体の1/4を解析の対象とした。Fig. 4 には、解析に用いた要素分割を示す。薄墨部分がポリエステル皮膜である。解析では、8 節点および6 節点のアイソパラメトリック要素を用いて、時間ステップ1秒毎に実験から得られた荷重増分を与えた。Fig. 5 には、解析に用いたアルミニウム合金のせん断応力-せん断ひずみ関係を示す。この関係は、中実丸棒試験片を用いたねじり試験から得られた実験点を近似したものである。また、ポリエステル皮膜のせん断応力-せん断ひずみ関係は、実験から得られた Ramberg-Osgood 形の構成式 (2) を用いた。解析に際し

Fig. 4. Element division of the notched specimen with the coatings.

Fig. 5. Shearing stress-shearing strain relation of aluminum alloy used in FEM analyses.

ては、アルミニウム合金は弾塑性体として、ポリエステル皮膜は既報¹¹⁾と同様、ひずみ速度に依存する係数を含む非線形弾塑性体として取扱い、アルミニウム合金とポリエステル皮膜との接着面では節点を共通にし、変位が等しいとして、変形解析を行った。

6 実験結果および考察

提案した皮膜光粘塑性解析法を用いて、ねじりを受ける中実丸棒試験片の表面ひずみと円弧切欠き丸棒試験片の切欠き部周上のひずみ分布の解析を行い、さらにその解析結果の妥当性について検討した。以下、その結果について述べる。

6・1 中実丸棒試験片の解析結果

Fig. 1 (a) に示すような皮膜を接着したアルミニウム合金の中実丸棒試験片を用いて、ねじれ角速度 $\dot{\omega} = 3.96 \times 10^{-4}$ rad/s でねじり試験を行った。そのとき得られたトルク Mt と時間 t の関係を Fig. 6 に、また散乱光縞写真の一例を Fig. 7 に示す。Fig. 7 の散乱光縞写真は偏光を半径方向から入射させて得られたものである。

散乱光縞から求めた試験片平行部での皮膜厚さ内の縞こう配 n_0 の分布を Fig. 8 に示す。ここで、グラフの横軸は皮膜接着面から皮膜表面までの距離を r で表している。いずれのトルクにおいても、 n_0 の値は皮膜接着面で最小で、皮膜表面で最大となり、トルクが増加するにつれて n_0 の値も増加する。この n_0 から前述の解析方法により求めた皮膜厚さ内のせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ の分布を Fig. 9 に示す。いずれのトルクにおいても、皮膜内のせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ は皮膜接着面で最小で、皮膜接着面から遠ざかるにつれて直線的に増加し、皮膜表面で最大となり、その違いは約 1.3 倍となっている。それゆえに、実物試験体がねじりを受ける場合、皮膜法を用いて精度の良いひずみ解析を行うためには、皮膜表面から皮膜接着面までの干渉縞が観察できる実験法が必要であることがわかる。

本解析法により算出した中実丸棒試験片表面のせん断ひずみの値と試験片平行部のねじれ角から算出した値を比較した。その結果を Table I に示す。この表より、両者の違いは約 5% 以内であり、本解析法は表面ひずみの解析法として有効であることがわかる。

さらに、皮膜に生ずる応力について検討するために、前述の解析法により皮膜厚さ内のせん断応力 $\tau_{\theta z}$ を算出した。その結果を Fig. 10 に示す。この図より、皮膜内

Fig. 6. Torque-time curve for a solid cylindrical specimen under torsion.

のせん断応力 $\tau_{\theta z}$ はせん断ひずみと同様、皮膜接着面で最小で、皮膜接着面から遠ざかるにつれて増加し、皮膜表面で最大となっている。また、トルクが増加するにつれて皮膜のせん断応力 $\tau_{\theta z}$ の分布も増加している。そこで、皮膜内の応力に及ぼす試験体の負荷速度の影響について調べるために、同じ皮膜厚さの中実丸棒試験片を用いて、ねじれ角速度 $\dot{\omega}$ が $7.33 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ の場合の実験を行い、皮膜内の応力分布を求めた。Fig. 11 には、ねじれ角速度 $\dot{\omega} = 7.33 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ でねじれ角から算出したアルミニウム試験片表面のせん断ひずみが $(\gamma_{\theta z})_a = 0.230$ の場合と $\dot{\omega} = 3.96 \times 10^{-4} \text{ rad/s}$ で $(\gamma_{\theta z})_a = 0.243$ の場合の応力分布の比較を示す。この図からわかるように、両者の負荷速度において試験片表面のせん断ひずみが等しくて

も、遅い負荷速度の方が皮膜に生ずる応力は小さい。このことは、前述の皮膜材料の応力-ひずみ関係からも明らかである。したがって、実物試験体がひずみ速度依存性をもたない場合には、遅い負荷速度で実験を行えば皮膜に生ずる応力を減少させることができる。また、皮膜厚さを薄くすれば皮膜に生ずる応力が減少することは Fig. 10 と Fig. 11 から明らかであるが、本論文では縞の解析精度を考慮して皮膜厚さを約 2.5mm とした。

つぎに、皮膜に生ずる応力分布から皮膜が分担するトルクを算出し、試験片に負荷したトルクの値と比較した。その結果を Table II に示す。この表からわかるように、負荷したトルクに対して皮膜が分担するトルクの割合は、負荷したトルクが増加するにつれて徐々に大きくなっている。また、遅い負荷速度の方が皮膜が分担するトルクの割合も少ないことがわかる。

Fig. 7. Scattered-light fringe patterns in the coatings for a solid cylindrical specimen under torsion.

Fig. 8. Distribution of fringe gradient n_0 in the coatings for a solid cylindrical specimen under torsion.

Fig. 9. Distribution of shearing strain $\gamma_{\theta z}$ in the coatings for a solid cylindrical specimen under torsion.

Table I. Comparison of surface shearing strains measured from twisting angle and photoviscoelastic method for a solid cylindrical specimen.

t sec	Mt Nm	$(\gamma_{\theta z})_p$	$(\gamma_{\theta z})_a$	$(\gamma_{\theta z})_p / (\gamma_{\theta z})_a$
1800	20.4	0.0632	0.0611	1.034
2400	22.4	0.0822	0.0847	0.970
3600	25.3	0.128	0.135	0.948
4800	27.6	0.179	0.188	0.952
6000	29.5	0.236	0.243	0.971

Mt: applied torque,

$(\gamma_{\theta z})_p$: shearing strain obtained from photo. method,

$(\gamma_{\theta z})_a$: shearing strain obtained from twisting angle

Fig. 10. Distribution of shearing stress $\tau_{\theta z}$ in the coatings for a solid cylindrical specimen under torsion.

Fig. 11. Distribution of shearing stress $\tau_{\theta z}$ in the coatings at different loading rates.

6・2 円弧切欠き丸棒試験片の解析結果

Fig. 1 (b) に示すような皮膜を接着したアルミニウム合金の円弧切欠き丸棒試験片を用いて、ねじれ角速度 $\dot{\omega} = 1.90 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ でねじり試験を行った。そのとき得られたトルク Mt と時間 t の関係を Fig. 12 に、また切欠き部周辺の散乱光縞写真の一例を Fig. 13 に示す。Fig. 13 において、上段および下段の散乱光縞写真はそれぞれ偏光の入射方向が半径方向および半径方向と角 $+\alpha$ ($= 27^\circ$) をなす方向から得られたものである。

これら 2 方向からの偏光入射によって得られた 2 種類の散乱光縞から求めた切欠き部周上での縞こう配 n_0 と $n_{+\alpha}$ の分布をそれぞれ Fig. 14 と Fig. 15 に示す。ここで、グラフの横軸は切欠き底から切欠き部周上の位置を角位置 ϕ で表している。いずれのトルクにおいても、 n_0 と $n_{+\alpha}$ の値は切欠き底で最大となり、切欠き底から遠ざかるにつれて急激に減少している。前述の解析法により求めたせん断ひずみ $\gamma_{\theta z}$ および $\gamma_{\theta\theta}$ の分布を Fig. 16 に示す。図中、皮膜光粘塑性解析の結果を●、▲印で、有限要素解析の結果を○、△印で示した。両者の結果を比較すると、いずれのトルクにおいても、 $\gamma_{\theta z}$ および $\gamma_{\theta\theta}$ の分布とも皮膜光粘塑性解析から得られた値の方が少し低い値を示しているが、分布の傾向はよく一致していることがわかる。

また、切欠き部周上での相当せん断ひずみ Γ の分布を Fig. 17 に示す。いずれのトルクにおいても、 Γ の分布は $\gamma_{\theta z}$ の分布と同様、切欠き底で最大となり、切欠き底から遠ざかるにつれて急激に減少している。図中、皮膜光粘塑性解析の結果を■、▲、●印で、有限要素解析の結果を□、△、○印で示した。両者の結果を比較すると、皮

膜光粘塑性解析から得られた値の方が切欠き底付近で少し低い値を示しているが、分布の傾向はよく一致していることがわかる。

したがって、本解析法はねじり負荷を受ける実物弾塑性体の表面ひずみの解析に有効であると考えられる。

Fig. 13. Scattered-light fringe patterns in the coatings for a notched cylindrical specimen under torsion.

Table II. Comparison between applied torque and shared torque of the coatings at different loading rates.

$\dot{\omega}$ rad/s	t sec	$(\gamma_{\theta z})_a$	Mt N m	$(Mt)_{coat.}$ N m	$(Mt)_{coat.} / Mt$
3.96×10^{-4}	1800	0.0611	20.4	1.21	0.0593
	2400	0.0847	22.4	1.46	0.0652
	3600	0.135	25.3	1.92	0.0759
	4800	0.188	27.6	2.29	0.0830
	6000	0.243	29.5	2.64	0.0895
7.33×10^{-3}	125	0.0939	24.4	2.60	0.107
	185	0.139	26.9	3.23	0.120
	245	0.184	29.1	3.70	0.127
	305	0.230	30.8	4.14	0.134
	365	0.279	32.4	4.51	0.139

$(\gamma_{\theta z})_a$: shearing strain obtained from twisting angle,

Mt: applied torque, $(Mt)_{coat.}$: shared torque of the coatings

Fig. 12. Torque-time curve for a notched cylindrical specimen under torsion.

Fig. 14. Distribution of fringe gradient n_0 in the coatings on the notch surface of a notched cylindrical specimen under torsion.

Fig. 15. Distribution of fringe gradient $n_{+\alpha}$ in the coatings on the notch surface of a notched cylindrical specimen under torsion.

Fig. 16. Distributions of shearing strains $\gamma_{\theta z}$ and $\gamma_{\theta\theta}$ on the notch surface of a notched cylindrical specimen under torsion.

Fig. 17. Distribution of equivalent shearing strain Γ on the notch surface of a notched cylindrical specimen under torsion.

7 結 論

本論文では、著者ら^{10), 11)}がこれまで提案してきた散乱光法を用いた3次元光粘弾塑性解析法を皮膜の解析に適用して、実物試験体が軸対称ねじりを受ける場合の実物表面の弾塑性ひずみを皮膜散乱光法によって解析する新しい方法を提案した。提案した解析法を、ねじり負荷を受けるアルミニウム合金の中実丸棒試験片と円弧切欠き丸棒試験片の表面ひずみの解析に適用し、その有効性について検討した。その結果、次のような結論を得た。

(1) ねじりの軸対称問題では、異なる2方向からの偏光入射によって皮膜に現れる2種類の散乱光縞の連続観察から、実物試験体表面の2つのせん断ひずみ成分を算出できる解析法を提案した。

(2) 本解析法を用いて、ねじり負荷を受けるアルミニウム合金の中実丸棒試験片表面のせん断ひずみを解析した結果は、ねじれ角から算出した値とよい一致を示した。また、負荷速度を遅くすれば皮膜に生ずる応力を減少できることを確認できた。

(3) 本解析法を用いて、ねじり負荷を受けるアルミニ

ウム合金の円弧切欠き丸棒試験片の切欠き部周上のせん断ひずみ分布を解析した結果は、有限要素法の解析結果とよい一致を示し、本解析法の有効性を確認することができた。

本論文では、軸対称ねじり問題を取扱ったが、本解析法は、異なる数種類の方法からの偏光入射による散乱光縞の連続観察により、軸対称ねじり問題だけでなく一般の3次元問題への適用も可能であり、また実物試験体の材質に関係なく適用できるので、数値解析法が適用しづらい実物粘弾塑性体の変形解析にも適用できるものと考えている。

参 考 文 献

- 1) K. Kawata, J. Sci. Res. Inst., **52**, 17 (1958).
- 2) D. Post and F. Zandman, Exp. Mech., **1**, 21 (1961).
- 3) J. Duffy and T. C. Lee, Exp. Mech., **1**, 109 (1961).
- 4) S. S. Redner, Exp. Mech., **3**, 170 (1963).
- 5) A. Mondina, C. Pappalettere and M. Saegirardi, Exp. Tech., 23 December (1985).
- 6) L. Yunlin, Eng. Fract. Mech., **26**, 383 (1987).
- 7) J. W. Dally and W. F. Riley, "Experimental stress analysis", p.280 (1965) McGraw-Hill, Kogakusha.
- 8) A. S. Kobayashi, Handbook on Experimental Mechanics, Second Revised Edition, p.245 (1993) SEM-VCH.
- 9) 平野貞三, 林 佳彦, 今井康文, 材料, **44**, 213 (1995).
- 10) T. Hirano, Y. Imai and Y. Hayashi, Exp. Mech., **37**, 159 (1997).
- 11) 平野貞三, 今井康文, 林 佳彦, 材料, **46**, 555 (1997).
- 12) S. S. Issa and G. Maamoun, Exp. Mech., **29**, 279 (1989).
- 13) S. S. Issa, Exp. Mech., **30**, 224 (1990).
- 14) W. Ramberg and W. R. Osgood, NACA Tech. Note, 902 (1943).