223 皮膜散乱光法による3次元物体の表面ひずみの測定

Strain Measurement of Surface Coatings of
Three-dimensional Body by the Scattered-light Method

○正 林 佳彦 (久留米工大) 正 平野 貞三 (久留米工大) 正 今井 康文 (長崎大)

Yoshihiko HAYASHI, Kurume Institute of Technology, 2228 Kamitsu-machi, Kurume 830-0052

Teizo HIRANO, Kurume Institute of Technology

Yasufumi IMAI, Nagasaki University

Key words : Photoviscoplasticity, Surface strain, Coating method, Scattered-light, Polyester coating, Three-dimensional problem, Tension

1. 緒 言

著者らは、薄い帯状のレーザー光を皮膜に入射して得られる散乱光縞の連続観察のみから実物体表面のひずみ成分を分離する新しい皮膜法として皮膜散乱光法の開発を行ってきた。この方法は、従来の反射型皮膜法では観察できなかった皮膜接着面上の縞の観察ができる特色があり、さらに、測定精度の低い等傾線を使用しなくてもひずみ成分の分離ができる利点がある。著者らはすでに、この解析法を用いて、軸対称ねじり問題のせん断ひずみ成分を解析し、また、2次元問題における対称面上の垂直ひずみ成分を解析し、その有効性について明らかにしてきた^{(1), (2)}。

本研究では、皮膜散乱光法を引張りを受ける3次元軸対称問題に適用し、軸対称応力場でのひずみ成分を異なる3方向からの偏光入射による散乱光縞の連続観察から解析する方法を提案する。また、提案した解析法の有効性を確認するために、ポリエステル皮膜を接着したアルミニウム合金の切欠き丸棒試験片で引張試験を行い、本解析法を用いて切欠き部周上の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を算出し、その結果と有限要素解析による結果と比較検討した。

2. 実験方法

本実験で使用した実物試験片の素材は、市販のアルミニウム合金 (A1050BD-O) 丸棒材で、素材より平行直径 25mm の中央部に深さ 5 mm, 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、焼なまし処理を行った。実験に使用した皮膜材料は、硬質ポリエステルと軟質ポリエステ

ルを重量比 3 : 7 の割合で混合し、試験片表面にこの混合ポリエステルを流し込み、試験片表面に厚さ約 2.5mm の皮膜に機械加工した。引張試験は、島津オートグラフを用い引張速度 0.3mm/min で、実験温度は 34℃で行った。皮膜散乱光実験に用いた光学系の概略図と座標系を Fig. 1 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。偏光の入射方向は、ひずみ成分を解析するために試験片中心軸 z を含む主断面 (rz 面) 内の r 方向および r 方向と角度 $+\alpha$ および $-\alpha$ をなす方向の3方向とし、縞の撮影は rz 面の z 軸から 45° 回転した方向よりあおり機構付きカメラを用いて規定時間毎に写真撮影を行った。

3. 皮膜散乱光法による3次元問題のひずみ解析

最初に、皮膜材料の特性を調べるために、皮膜材で丸棒試験片を作製し、ひずみ速度を変えて引張試験を行い、主断面に沿って半径方向より偏光を入射し、そのとき得られた散乱光縞の縞次数を N , 入射点からの光路程を S としたとき、 $n = dN/dS$ を縞こう配 n とし、この縞こう配 n と入射方向に垂直な面内の2次相当ひずみ Γ' との関係を測定した。その結果、2次相当ひずみ Γ' と縞こう配 n との関係はひずみ速度の影響を含んだ

$$\Gamma' = g(n, \dot{n})$$

のような関数で表せる⁽²⁾。したがって、時間的に変化する散乱光縞のみからひずみ速度の影響を含んだ2次相当ひずみ Γ' が推定できる。

皮膜内のひずみ成分を測定するために Fig. 1 に示すように試験片中心軸を z とする円柱座標系を取り、主断面 rz 面に沿って偏光を3方向から入射させると、入射方向に垂直な面内の2次相当ひずみ Γ' は、それぞれの方向より得られる縞こう配 n_i と縞こう配増加速度 $\dot{n}_i$ により次式で表せる。

(1) r 方向から入射したとき

$$\Gamma'_0 = \pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) = g(n_0, \dot{n}_0) \quad (1)$$

(2) r 方向となす角 $+\alpha$ 方向より入射したとき

$$\begin{aligned} \Gamma'_{+\alpha} &= \pm \{ (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \sin^2 \alpha \\ &\quad + \gamma_{rz} \sin \alpha \cos \alpha \} \\ &= g(n_{+\alpha}, \dot{n}_{+\alpha}) \end{aligned} \quad (2)$$

(3) r 方向となす角 $-\alpha$ 方向より入射したとき

$$\begin{aligned} \Gamma'_{-\alpha} &= \pm \{ (\varepsilon_z - \varepsilon_\theta) \cos^2 \alpha + (\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \sin^2 \alpha \\ &\quad - \gamma_{rz} \sin \alpha \cos \alpha \} \\ &= g(n_{-\alpha}, \dot{n}_{-\alpha}) \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 1. Schematic illustration of experimental apparatus.

ここで、 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ および γ_{rz} は垂直ひずみ成分およびせん断ひずみ成分、添字の 0, $+\alpha$ および $-\alpha$ は入射方向を表す。したがって、式 (1), (2), (3) から垂直ひずみ差 $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)$, $\pm(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)$, $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_r)$ およびせん断ひずみ $\pm\gamma_{rz}$ を求めることができる。

次に、ひずみ解析手順を示す。まず、ある時間間隔毎に縞次数 $N_0, N_{+\alpha}$ および $N_{-\alpha}$ を測定し、縞こう配 $n_0, n_{+\alpha}$ および $n_{-\alpha}$ を算出し、縞こう配 n_i の時間的変化から縞こう配増加速度 $\dot{n}_i$ を求める。次に、皮膜の特性実験で得られた縞こう配と 2 次相当ひずみの関係を用いて、3 つの垂直ひずみ差 $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)$, $\pm(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)$, $\pm(\varepsilon_z - \varepsilon_r)$ およびせん断ひずみ $\pm\gamma_{rz}$ を算出する。特に、実物試験片表面が塑性域にある場合には、体積不変となり、3 つの垂直ひずみ成分 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ および ε_z は簡単に決定することができる。

4. 有限要素解析

本解析法の有効性を検討するために有限要素解析を行った。有限要素解析は、切欠き丸棒試験片の対称性から 1/4 部分を解析対象とし、アルミニウム合金部とポリエステル部にそれぞれ 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、接着境界は完全固着として、軸対称弾塑性-粘弾性解析を行った。アルミニウム合金の加工硬化係数は実験より求め、ある応力レベルごとに与えた。粘弾性解析の方法は以前報告した^{(1), (2)} のと同様である。

5. 実験結果

本実験で得られた散乱光縞写真の一例を Fig. 2 示す。左に荷重 $P=12.6\text{kN}$ 、右に $P=14.0\text{kN}$ の場合で、上から、 r 方向と角度 $+\alpha$ ($\alpha=28.9^\circ$)、 r 方向および r 方向と角度 $-\alpha$ をなす方向から入射して得られた明視野の写真を示す。

本解析法により試験片表面が塑性域にある場合の切欠き部周上の垂直ひずみ成分 $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ およびせん断ひずみ成分 γ_{rz} の分布を Fig. 3 に示す。図の(a)と(b)は、それぞれ荷重 P が 12.6 kN と 14.0 kN の場合で、図中、本解析法の結果を●, △, □, ◆印で示し、有限要素解析の結果を破線で示した。両者の結果を比較すると、いずれの荷重においてもそれぞれのひずみ成分の分布は良い一致を示していることがわかる。したがって、本解析法は、軸対称応力場で引張りを受ける 3 次元物体表面のひずみ解析に有効であると考えられる。

6. 結 論

皮膜散乱光法を 3 次元軸対称問題に適用し、軸対称応力場で引張り負荷を受ける実物体表面の垂直ひずみ成分とせん断ひずみ成分を皮膜法によって解析する方法を提案した。提案した解析法を用いて、引張りを受けるアルミニウム合金の切欠き丸棒試験片表面が塑性域にある場合の切欠き部周上のひずみ成分を解析し、その結果は、有限要素解析の結果と良い一致を示し、本解析法の有効性を確認することができた。

参考文献

- (1) 平野貞三, 林 佳彦, 今井康文, 材料, 48, 1443 (1999).
- (2) 林 佳彦, 平野貞三, 今井康文, 材料, 50, 1388 (2001).

Fig. 2. Scattered-light fringe patterns in the coatings for the aluminum notched specimen under uniaxial tension.

(a) Applied load $P=12.6\text{kN}$

(b) Applied load $P=14.0\text{kN}$

Fig. 3. Distribution of strains on the notch surface for the aluminum notched specimen under uniaxial tension.