

散乱光法によるねじりを受けるポリエステルのはずみ速度の影響を考慮した光粘弾塑性解析法[†]

平野 貞三* 林 佳彦* 今井 康文**

Photovisco-Elasto-Plastic Analysis Considering Strain Rate Effect on Polyester under Torsion by Scattered-Light Method

by

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

Three-dimensional photovisco-elasto-plastic analysis considering strain rate effect was investigated by a scattered-light method using polyester as a model material. In order to examine the mechanical and optical properties of polyester, torsion tests were carried out on solid shafts under various twisting rates at 30°C and the effects of strain rate on the shearing stress, shearing strain, fringe gradient and increasing rate of fringe gradient were investigated. Regardless of the strain rate, it was found that the shearing stress-strain relation can be expressed by a Ramberg-Osgood equation and the fringe gradient-shearing strain relation was successfully represented by a nondimensional equation. Finally, the relation between the fringe gradient and its increasing rate was formulated as a function of strain rate. From these results, we established a method to estimate the shearing stress and the shearing strain in a three-dimensional model only by measuring the fringe gradient and its increasing rate. The calculated torques from the shearing stress estimated by this photovisco-elasto-plastic analysis were consistent with the applied torques on solid and hollow shafts.

Key words: Experimental stress analysis, Photovisco-elasto-plasticity, Polyester, Scattered-light method, Torsion, Shearing strain rate, Fringe gradient-shearing strain relation

1 緒 言

光塑性法とは、金属材料と類似な応力・ひずみ挙動を示す透明な高分子材料を使用し、その複屈折効果を利用して、弾性限を越えた塑性域までの応力またはひずみを解析する実験法の一つである。これまでに、光塑性法に関する多くの研究が行われている。光塑性モデル材料としては、セルロイド^{1)~4)}、ポリカーボネイト^{5)~7)}、ポリエステル^{8)~11)}、セルロースアセテート^{12),13)}などが使用され、それぞれ特色のある解析方法により二次元問題の光塑性解析が行われている。その中で、モデル材料のひずみ速度の影響を考慮した研究としては、大橋³⁾、但野・石川らの研究がある。

三次元問題の光塑性解析に関する研究としては、Dally-Mulc¹⁴⁾のポリカーボネイトを用いた圧縮除荷後の短円柱の残留ひずみ分布の解析、Gomide-Burger¹⁵⁾のポリエステルを用いた圧縮短円環の残留ひずみ分布の解析、万・高橋¹⁶⁾のポリカーボネイトを用いたひずみ凍結後の圧縮短円柱のひずみ分布の解析などが報告されている。これらいずれの場合も、モデルの機械的スライスを必要とし、種々の負荷状態についてひずみ分布の解析を行うためには、多数のモデルを必要とする不便な点がある。また、Johnson¹⁷⁾はプロピオン酸セルロースを用いて、散乱光法によりステップ荷重方式によるねじり試験を行い、

負荷後 15 分経過したときの応力・ひずみ曲線と応力・縞こう配曲線から、ねじり応力とひずみの解析を行っている。しかし、この負荷方法では非常に遅い変形速度で実験しなければならず、しかも種々の負荷状態について調べるには、時間がかかり過ぎて実用的な方法とは言い難い。

したがって、現在、三次元光塑性法の研究においては、モデル材料の粘性の影響を考慮に入れた実用的な実験方法と解析法の確立が望まれている。

本研究は、実験方法として散乱光法を用いて、モデル材料の粘性の影響を考慮に入れた三次元光粘弾塑性解析法を提案するもので、本報では、一つのモデルで弾性、塑性領域が得られるねじりの問題について検討する。

散乱光法は、Weller¹⁸⁾によって提案された三次元の実験応力解析法の一つで、従来の平行光法に比べて、モデルの応力凍結や機械的スライスを必要とせず、光学のスライスを行うため非破壊的な計測が可能であり、一つのモデルで広範囲な負荷状態の解析ができる利点がある。しかし、散乱光は微弱なため、明瞭な縞が得られにくい欠点もあった。

しかし、著者らは、¹⁹⁾ポリエステル材を用いて、ねじり試験を行い、浸漬液にポリエステルモノマー溶液を使用することによって、明瞭な散乱光縞が得られることを明

† 原稿受理 平成 6 年 3 月 14 日 Received Mar. 14, 1994

* 正 会 員 久留米工業大学機械工学科 〒830 久留米市上津町, Dept. of Mech. Eng., Kurume Inst. of Tech., Kamitsu-machi, Kurume, 830

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

らかにした。

本研究では、モデル材料として、ポリエステル材を用いて、ねじり負荷状態の応力およびひずみの光粘弾塑性解析を行うために必要なせん断応力-せん断ひずみ関係、縞こう配-せん断ひずみ関係、縞こう配-縞こう配増加率関係に及ぼすせん断ひずみ速度の影響を縞解析の精度の良い試験片外皮の縞に注目して検討した。その結果より、縞こう配と縞こう配増加速度からモデル内部のせん断応力およびせん断ひずみを推定できる実験解析式の誘導を試みた。

2 実験方法

本実験で使用した材料は、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、触媒（パーメック N）と硬化促進剤（ナフテン酸コバルト）とを重量比で約 0.5% ずつ添加して室温で硬化させたポリエステル丸棒材である。これより Fig. 1 に示すような中実丸棒試験片を機械加工により作製した。試験片の両端部には、ピンを通してねじり負荷を加えるための円孔を設けた。

ねじり負荷装置は、島津ねじり試験機を使用した。試験片平行部のねじれ角は、つかみ部間のねじれ角から算出し、平行部の外皮のせん断ひずみ γ は、試験片平行部のねじれ角 θ から算出した。

ねじり負荷条件としては、ねじれ角速度 $\dot{\theta}$ が $1.45 \times 10^{-3} \text{ rad/s} \sim 2.62 \times 10^{-2} \text{ rad/s}$ （試験片平行部の外皮のせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の大きさが $2.33 \times 10^{-4} \text{ 1/s} \sim 4.16 \times 10^{-3} \text{ 1/s}$ ）の範囲の 6 条件で、実験はすべて温度 30°C の下で行った。なお、この温度条件の下では、負荷中にポリエステルの複屈折効果の符号反転現象⁹⁾は生じないことを予備実験により確認した。散乱光実験の光学装置の概略図を Fig. 2 に示す。光源には、500 W の超高压水銀灯（波長 $\lambda=546.1 \text{ nm}$ ）を用いた。本実験では、

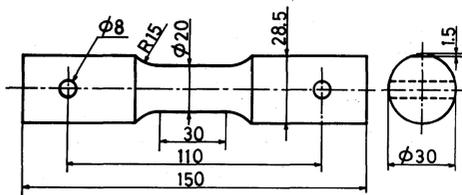


Fig. 1. Shape and dimensions of specimen.

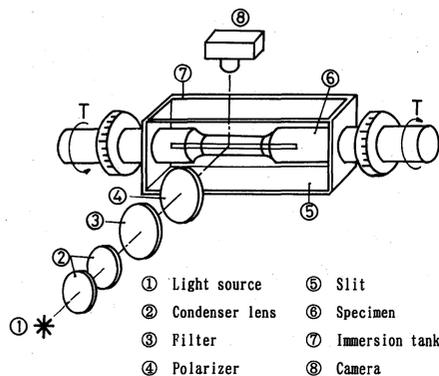


Fig. 2. Schematic illustration of experimental apparatus.

偏光が試験片表面に入射する際の反射と屈折をさけて明瞭な散乱光縞を得るために液浸法を用いた。浸漬液には、試験片の屈折率 (1.537) と等しくするために実験材料と同じポリエステルモノマー溶液を使用した。

散乱光縞の撮影は、幅 1 mm のスリットを通過した偏光層を浸漬液槽内の試験片の軸に直交して入射させ、光路に垂直な方向から一定時間ごとに写真撮影を行った。また、同時にトルクとねじれ角の測定を行った。

散乱光縞の解析には、撮影したネガフィルムを拡大投影機にかけ、光電管により縞の光強度を測定する方法を用いて、縞の位置の確定を行った。

3 実験結果および考察

3.1 せん断応力-せん断ひずみ関係

ねじり試験より得られたトルク-ねじれ角線図から Nadai²⁰⁾の方法により求めた試験片外皮のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を Fig. 3 に示す。薄肉円筒を用いても同様な結果が得られた。図より、 τ - γ 関係はせん断ひずみ速度に依存し、ひずみ速度が速くなるにつれて、せん断応力も増加している。これはポリエステル材料が大きな粘性をもっているため、変形速度が速くなるほど粘性抵抗が大きくなるためである。

従来から、光塑性材料の応力-ひずみ関係を表示する方法として、Ramberg-Osgood 則²¹⁾がよく利用されている。本報でも、せん断応力-せん断ひずみ関係を Ramberg-Osgood 則を用いて次式のように表示することを試みた。

$$\frac{G\gamma}{\tau_y} = \frac{\tau}{\tau_y} + \frac{3}{7} \left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^m \quad (1)$$

ここで、 G は横弾性係数、 τ_y は降伏せん断応力（セカント係数 $G_s=0.7G$ となるときの応力）、 m は加工硬化指数である。

Fig. 3 の τ - γ 線図から求めた横弾性係数 G および降伏せん断応力 τ_y とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を Fig. 4 に示す。図より、 G および τ_y は、いずれもせん断ひずみ速度に依存し、ひずみ速度が速くなるにつれて、増加している。 G および τ_y は、ひずみ速度の標準値を $\dot{\gamma}_0 = 10^{-3} \text{ 1/s}$ に定めるとそれぞれ式 (2), (3) で近似でき、Fig. 4 に式 (2), (3) を実線で示した。

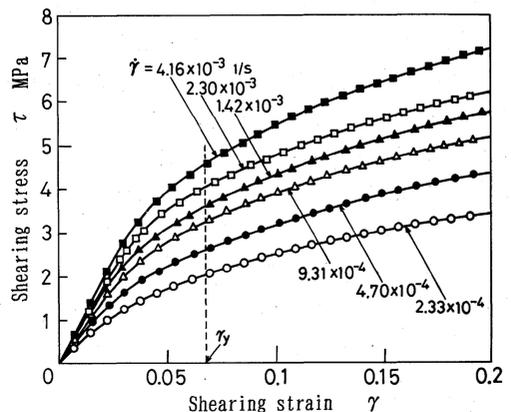


Fig. 3. Shearing stress~shearing strain curves under torsion.

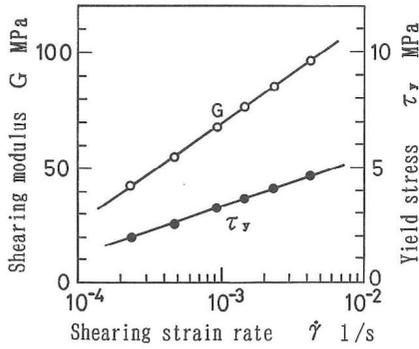


Fig. 4. Effects of shearing strain rate on shearing modulus and yield shearing stress.

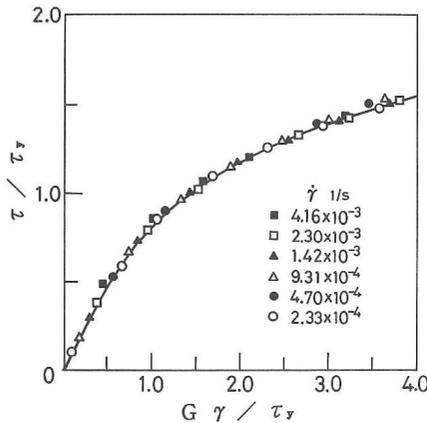


Fig. 5. Nondimensional stress-strain relation.

$$G = 43.3 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + 70.1 \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$\tau_y = 2.12 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + 3.35 \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

Fig. 5には、 τ - γ 関係を降伏応力 τ_y で、無次元化した応力 (τ/τ_y) とひずみ $(G\gamma/\tau_y)$ の実験結果を示す。図より明らかなように、実験値はせん断ひずみ速度に関係なく、一つの曲線で近似できることがわかる。図中、実線は式(1)の指数 $m=4$ の曲線を示す。したがって、ポリ

エステルのせん断応力-せん断ひずみ関係は次式のように表せる。

$$\frac{G\gamma}{\tau_y} = \frac{\tau}{\tau_y} + \frac{3}{7} \left(\frac{\tau}{\tau_y} \right)^4 \quad (4)$$

3・2 縞こう配-せん断ひずみ関係

ねじれ角速度 $\dot{\theta}$ が 8.72×10^{-3} rad/sの実験で得られた散乱光縞写真の例をFig. 6に示す。図中、(a), (b)は平行ニコル、(c)~(f)は直交ニコルの散乱光縞である。散乱光縞は、ねじれ角が増加するにつれて、その次数が増加し、縞の間隔が狭まっていく。縞こう配 n は、縞次数 N を偏光の入射光路程 S で微分した値 dN/dS で求めることができる。Fig. 7には、試験片外皮の縞こう配 n とせん断ひずみ γ の関係を示す。図より、 n - γ 関係はせん断ひずみ速度に依存し、ひずみ速度が速くなるにつれて、縞こう配も増加している。これは、ポリエステル材料の持つ粘性効果が光学的性質にも大きな影響を及ぼすことを示すものである。

n - γ 関係をそれぞれの降伏時の値を用いて無次元化式で表示することを試みた。降伏せん断応力 τ_y に対応するせん断ひずみを降伏せん断ひずみ γ_y とすると、 γ_y はFig. 3の τ - γ 線図において破線で示すように、せん断ひずみ速度に関係なく、0.066~0.069の範囲にあった。また、降伏せん断ひずみ γ_y に対応する縞こう配 n の値を降伏縞こう配 n_y とすると、 n_y はFig. 7の n - γ 線図から求められる。得られた降伏縞こう配 n_y とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係をFig. 8に示す。図より、 n_y はせん断ひずみ速度に依存し、ひずみ速度が速くなるにつれて、増加している。 n_y は、式(5)で近似でき、Fig. 8に実線で示した。

$$n_y \cdot \lambda = 7.70 \times 10^{-5} \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + 2.14 \times 10^{-4} \quad (5)$$

ここで、 λ は波長、 $\dot{\gamma}_0$ はひずみ速度の標準値である。

Fig. 9には、 n - γ 関係をそれぞれの降伏時の値で無次元化した縞こう配 (n/n_y) とせん断ひずみ (γ/γ_y) の実験結果を示す。図より、 (γ/γ_y) と (n/n_y) の関係はせん断ひずみ速度に関係なく、 $0 < (\gamma/\gamma_y) < 1$ の範囲では、二次

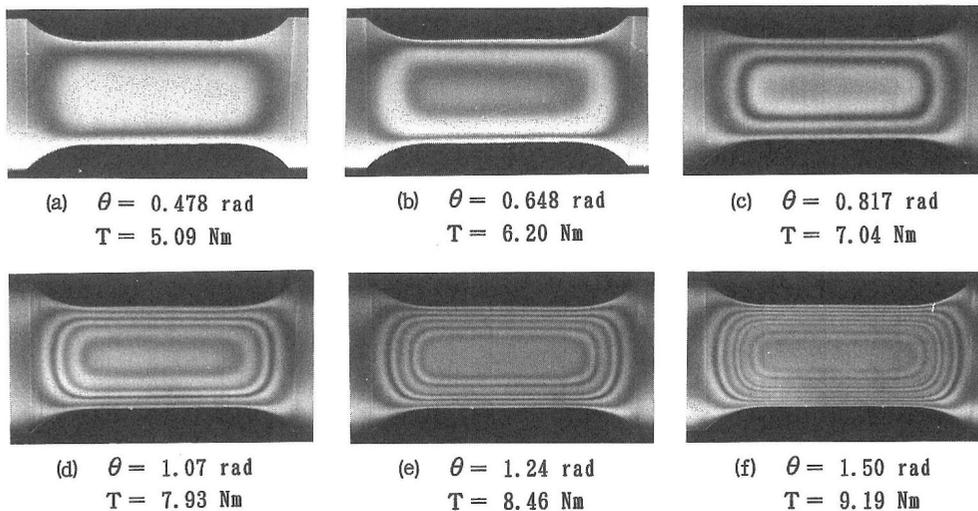


Fig. 6. Scattered-light fringe patterns for polyester under torsion. ($\dot{\theta} = 8.72 \times 10^{-3}$ rad/s); (a), (b) parallel nicols pattern, (c)~(f) crossed nicols pattern.

曲線で近似でき、 $(\gamma/\gamma_y) \geq 1$ の範囲では、直線で近似できることがわかった。その近似式を式(6)、(7)に示す。

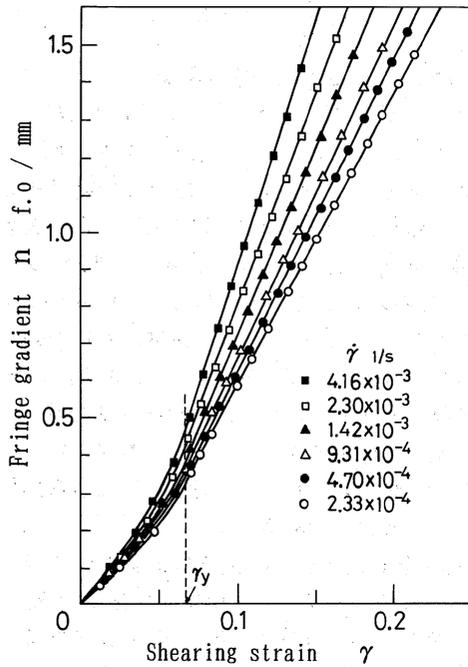


Fig. 7. Fringe gradient~shearing strain curves under torsion.

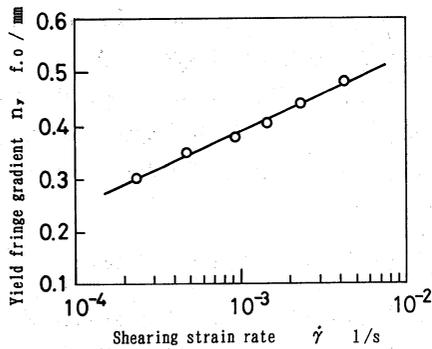


Fig. 8. Effect of shearing strain rate on yield fringe gradient.

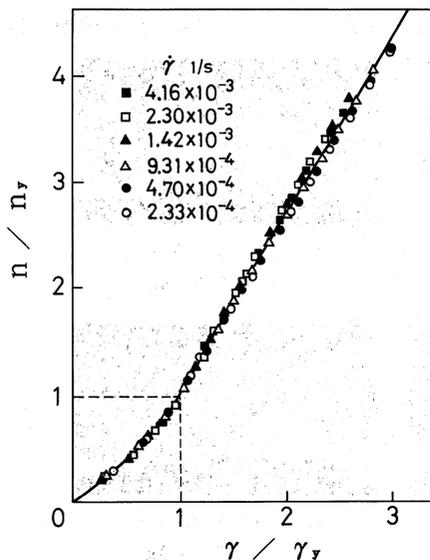


Fig. 9. Nondimensional fringe gradient~shearing strain relation.

図中、式(6)、(7)を実線で示したが、実験値をよく表している。また、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を変化させた場合にも同式は成立した。

$0 < (\gamma/\gamma_y) < 1$ のとき

$$\frac{n}{n_y} = 0.70 \left(\frac{\gamma}{\gamma_y} \right) + 0.30 \left(\frac{\gamma}{\gamma_y} \right)^2 \quad (6)$$

$(\gamma/\gamma_y) \geq 1$ のとき

$$\frac{n}{n_y} = 1.67 \left(\frac{\gamma}{\gamma_y} \right) - 0.67 \quad (7)$$

3・3 縞こう配-縞こう配増加率関係

Fig. 7 から明らかなように、一定のせん断ひずみ速度の下でも、ポリエステル縞こう配増加率は、一定ではなく、降伏前 ($0 < (\gamma/\gamma_y) < 1$) より降伏後 ($(\gamma/\gamma_y) \geq 1$) の方が大きくなっている。これは、ポリエステル材料のひずみ複屈折感度が降伏前より降伏後の方が高いためで、ポリエステル材料が塑性域の解析に適していることになる。縞こう配増加率 \bar{n} ($\bar{n} = (dn/dt)/(d\gamma/dt)$) は、縞こう配 n と時間 t の関係図より求めた。その結果を縞こう配 n と縞こう配増加率 \bar{n} の関係図として Fig. 10 に示した。図より、 \bar{n} は n が増加するにつれて増加するが、 n が n_y に達すると \bar{n} は一定となる。また、 \bar{n} はせん断ひずみ速度に依存し、せん断ひずみ速度が速くなるほど増加する。

これから、 n の測定のみからせん断ひずみ速度を推定することを試みる。まず、 \bar{n} が一定となる開始点の n の値は、前述した降伏縞こう配 n_y と一致していたので、降伏縞こう配 n_y と縞こう配増加率 \bar{n} の関係を次式(8)で近似する。図中、式(8)を破線で示した。

$$n_y \cdot \lambda = 2.73 \times 10^{-4} \log(\bar{n} \cdot \lambda) + 8.46 \times 10^{-4} \quad (8)$$

したがって、降伏縞こう配 n_y は、縞こう配増加速度 dn/dt から決定することができる。

つぎに、 n と \bar{n} の関係 ($0 < n < n_y$) を、式(9)のように近似し、その係数 A 、 B のひずみ速度依存性を調べてみる。

$$\log(\bar{n} \cdot \lambda) = A(n \cdot \lambda)^2 + B \quad (9)$$

ここで、 A 、 B は係数である。

Fig. 10 からそれぞれのせん断ひずみ速度に対して求

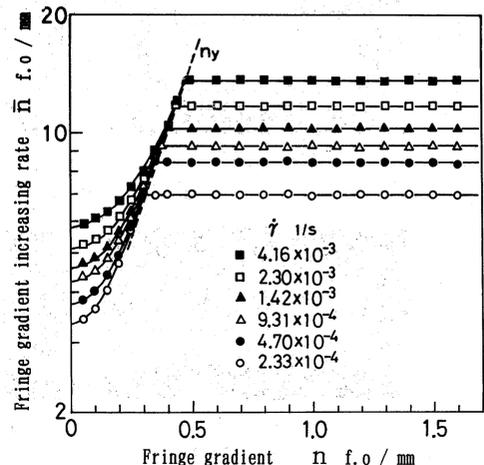


Fig. 10. Fringe gradient~fringe gradient increasing rate curves under torsion.

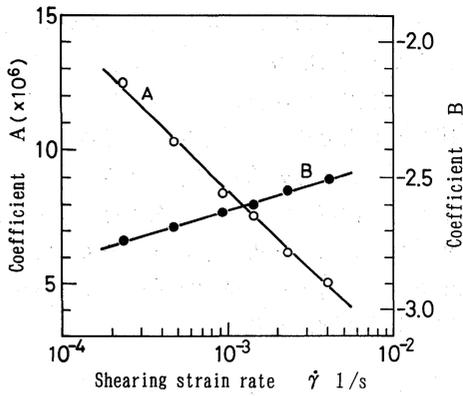


Fig. 11. Effects of shearing strain rate on coefficients A and B.

められた係数 A, B の関係を Fig. 11 に示す。Fig. 11 より、係数 A はひずみ速度が速くなるほど減少し、係数 B はひずみ速度が速くなるほど増加している。係数 A, B の値は、それぞれ式 (10), (11) で近似でき、図中、実線で示した。

$$A = -5.90 \times 10^6 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + 8.48 \times 10^6 \quad (10)$$

$$B = 0.19 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} - 2.62 \quad (11)$$

$n \geq n_y$ のときは式 (9) で、 $n = n_y$ としたものになる。

したがって、ポリエステルの縞こう配 n と縞こう配増加率 \bar{n} の関係は、次式のように表せる。Fig. 10 の実線は式 (12) を示したもので、実験値をよく表している。

$$\log(\bar{n} \cdot \lambda) = \left(-5.90 \times 10^6 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} + 8.48 \times 10^6 \right) \lambda^2 \cdot [n]^2 + \left(0.19 \log \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} - 2.62 \right) \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0 < n < n_y \text{ のとき} & [n] = n \\ n \geq n_y \text{ のとき} & [n] = n_y \end{cases}$$

このことから、縞こう配 n と縞こう配増加速度 dn/dt を測定することによって、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を推定することができる。

3・4 散乱光法による光粘弾塑性解析法の手順

ねじり負荷を受ける粘弾塑性モデルに生ずるせん断応力とせん断ひずみの光粘弾塑性解析法の手順として次のような方法が考えられる。

(1) モデル内の各点の散乱光縞こう配 n と縞こう配増加速度 dn/dt を測定し、式 (8) より、降伏縞こう配 n_y を計算する。

(2) 測定した縞こう配 n が計算した n_y よりも小さいときは、式 (6), (12) を使い、 n_y よりも大きいときは、式 (7) と式 (12) を用いて、せん断ひずみ γ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を推定する。

(3) さらに、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ から、式 (2), (3) を用いて、横弾性係数 G および降伏せん断応力 τ_y を計算し、得られた γ , G および τ_y から式 (4) を用いて、せん断応力 τ を推定する。

3・5 せん断ひずみ分布とせん断応力分布の解析結果

今までの結果は、試験片外皮の解析結果をまとめたもので、上記の解析方法を適用してモデル内部のせん断ひずみ分布とせん断応力分布の解析結果について述べる。ねじれ角速度 $\dot{\theta}$ が 8.72×10^{-3} rad/s の場合の中実丸棒の横断面上のせん断ひずみ分布とせん断応力分布の解析結果を Fig. 12 と Fig. 13 に示す。図中、解析結果を○印で示した。この解析結果の精度について検討することにした。

一般にねじり負荷を受ける場合の、中心から任意の位置のせん断ひずみ γ と試験片外皮のせん断ひずみ γ_R の関係は次式で表される。

$$\gamma = \frac{r}{R} \gamma_R \quad (13)$$

ここで、 R は試験片外皮の半径、 r は中心から任意の位置である。

Fig. 12 中、式 (13) を実線で示した。中心部は、縞こう配が小さく精度が悪いが、全体として解析値は式 (13) とほぼよい一致を示していることがわかる。

つぎに、トルク T とせん断応力 τ の関係は、次式で表される。

$$T = 2\pi \int_0^R \tau r^2 dr \quad (14)$$

Fig. 13 のせん断応力分布より、式 (14) を用いて計算したトルクの値 T_c と実際に加えたトルク T を比較した結果を Table I に示す。また、中空丸棒（内径 10 mm、

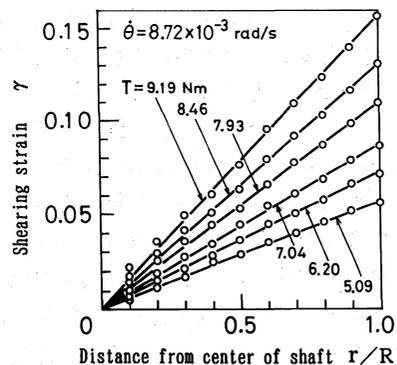


Fig. 12. Distribution of shearing strain on the cross section of solid shaft under torsional loadings.

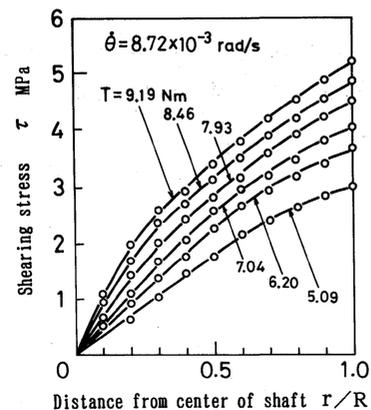


Fig. 13. Distribution of shearing stress on the cross section of solid shaft under torsional loadings.

Table I. Comparison between applied and calculated torques on solid shaft.
($\dot{\theta}=8.72 \times 10^{-3}$ rad/s)

θ (rad)	T (Nm)	T_c (Nm)	T_c/T
0.478	5.09	5.25	1.031
0.648	6.20	6.37	1.027
0.817	7.04	7.04	1.0
1.07	7.93	7.83	0.987
1.24	8.46	8.50	1.005
1.50	9.19	9.14	0.995

T : Applied torque.

T_c : Calculated torque.

Table II. Comparison between applied and calculated torques on hollow shaft.
($\dot{\theta}=8.72 \times 10^{-3}$ rad/s)

θ (rad)	T (Nm)	T_c (Nm)	T_c/T
0.455	4.74	4.68	0.987
0.625	5.73	5.79	1.010
0.792	6.47	6.55	1.012
0.961	7.11	7.13	1.003
1.14	7.62	7.63	1.001
1.31	8.04	8.08	1.005

T : Applied torque.

T_c : Calculated torque.

外径 20 mm) のトルクの比較を Table II に示す. 中空丸棒の方が, 精度の悪い部分が入らない分だけ精度が良い. Table I, II より, 計算値と測定値の誤差は約 3% 以内であることが確認された.

したがって, 以上の結果から散乱光法を用いた本光粘弾塑性実験法は三次元モデルの粘弾塑性応力・ひずみ解析法として有効であると判断できる.

4 結 論

三次元光粘弾塑性モデル材料として, ポリエステル材料を使用し, ねじり試験を行い, 解析に必要なポリエステルの機械的および光学的性質に及ぼすひずみ速度の影響について調べた結果, 次のような結論を得た.

(1) ポリエステルのせん断応力-せん断ひずみ関係は, ひずみ速度に依存した G および τ_y で無次元化すれば, 一つの Ramberg-Osgood 式で表示できる.

(2) ポリエステルの横弾性係数, 降伏せん断応力, 降伏時の縞こう配は, せん断ひずみ速度の関数で表示できる.

(3) ポリエステルの縞こう配~せん断ひずみ関係は, それぞれの降伏時の値で無次元化することで, 一つの関係で表示できる.

(4) ポリエステルの縞こう配~縞こう配増加率関係は, せん断ひずみ速度の関数として表示でき, 逆に, 縞こう配と縞こう配増加速度を測定すれば, モデル内のせん断ひずみ速度が算出でき, ひずみ速度を考慮したせん断応力およびせん断ひずみの値が推定できる.

(5) 本粘弾塑性解析法によって求めたせん断応力およびせん断ひずみ分布の解析結果より, 散乱光法を用いた本実験法は三次元モデルの粘弾塑性応力ひずみ解析法として有効であると判断できる.

参 考 文 献

- 1) M. Nisida, M. Hondo and T. Hasunuma, Proc. 6th Japan Nat. Congr. Appl. Mech., 137 (1956).
- 2) M. M. Frocht and R. A. Thomson, Exp. Mech., 1, 43 (1961).
- 3) Y. Ohashi, Exp. Mech., 13, 287 (1973).
- 4) J. Javornicky, Photoplasticity, 73 (1974) Elsevier.
- 5) H. F. Brinson, Exp. Mech., 11, 467 (1971).
- 6) 島本 聡, 日本機械学会論文集, A-47, 959 (1981).
- 7) 高橋 賞, 末次正寛, 島本 聡, 日本機械学会論文集, A-53, 865 (1987).
- 8) S. Miki, Proc. 8th Japan Nat. Congr. Appl. Mech., 231 (1959).
- 9) 三木 教, “光弾性学要論”, 9 (1974) 理工新社.
- 10) D. H. Morris and W. F. Riley, Exp. Mech., 12, 448 (1972).
- 11) 三木正伸, 大村安彦, 栗谷丈夫, 日本機械学会論文集, 42, 3410 (1976).
- 12) 但野 茂, 石川博将, 日本機械学会論文集, A-54, 139 (1988).
- 13) 但野 茂, 石川博将, 日本機械学会論文集, A-54, 1410 (1988).
- 14) J. W. Dally and A. Mulc, J. Appl. Mech., 40, 600 (1973).
- 15) H. A. Gomide and C. P. Burger, Exp. Mech., 21, 361 (1981).
- 16) 万 向, 高橋 賞, 日本機械学会論文集, A-57, 977 (1991).
- 17) R. L. Johnson, Exp. Mech., 16, 201 (1976).
- 18) R. Weller, J. Appl. Phys., 14, 266 (1939).
- 19) 平野貞三, 林 佳彦, 応用力学連合講演予稿集, 41, 431 (1991).
- 20) A. Nadai, Theory of Flow and Fracture of Solids, 347 (1950) McGraw-Hill.
- 21) W. Ramberg and W. R. Osgood, NACA Tech. Note, 902 (1943).