ガラス繊維強化複合材料のクリープ特性に関する研究[†]

網島 貞男* 足立 恒行**

Creep Characteristic of Glass Fiber Reinforced Composites

by

Sadao AMIJIMA

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

and Tsuneyuki ADACHI

(Dainippon Ink and Chemicals Inc., Osaka)

A method to predict the time response of unidirectional glass fiber and plain woven glass cloth reinforced polyester laminates was described. The short term (20 minutes duration) creep test results of strip tension specimens with the load at various angles to the fiber direction were reported and compared to the analytical results. For the unidirectional laminates, it was shown that the materials were elastic at all stress levels when the fibers were in the load direction. On the other hand, when the load transverse to the fibers the viscoelastic response varying from a small amount at low stress level to a large amount at high stress level appeared even at room temperature. For off-axis specimens and plain woven laminates, the response was similar to the latter.

Furthermore, the numerically predicted results were compared with the experimental results. The results showed that only two material informations were needed to predict the viscoelastic response of the composites: One is the viscoelastic response of the matrix resin and the other is the elastic constants of the glass fiber.

(Received Jan. 5, 1983)

キー・ワード：材料異方性，繊維強化，マトリックス，粘弾性，クリープ

1 緒 言

繊維強化樹脂複合材料は，金属材料などに比べて一般的に大きな粘弾性挙動を示す。この粘弾性特性は，荷重の大きさ，環境温度ならびに湿度に依存することが知られている。繊維強化複合材料の力学的な性質は，強化繊維の配向に依存するところが大きい。すなわち，異方性の強い材料でありこの性質は，粘弾性挙動においても例外ではない。また，マトリックスとして樹脂が使用される場合には高温環境下ではもちろん常温下でもクリープに代表される粘弾性挙動を示すことは充分予測される。

このように繊維強化樹脂複合材料の粘弾性特性を解明するうえで，常温における材料異方性と粘弾性挙動との関係を把握することは最も基本的な事項の一つと考えられる。本研究は，複合材料を構成するマトリックスと，強化繊維に対し，Boltzmann の粘弾性構造式を導入，展開することによって，複合材の材料主軸におけるクリープ現象を推定した。そしてそれを座標変

換することにより，強化方向と負荷方向が一致しない場合のクリープ変形量を数値計算する方法について提案し，ポリエステル／ガラス繊維系 F.R.P. のクリープテスト結果と比較検討したので以下に詳述する。

2 非線型粘弾性

粘弾性の数式表現は，Boltzmann の重畳理論を基にした Halpin³⁾ の以下の線型粘弾性構造式で示される。

$$e(t) = \int_0^t s_{ij}(t-\tau) \frac{d\sigma(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (1)$$

ここで， e ， σ ， t ， τ ， s_{ij} はそれぞれひずみ，応力，時間，時間の補助変数，線型粘弾性コンプライアンスである。線型粘弾性理論は，負荷応力が材料強度⁴⁾に比べて極端に小さいときは実験値と良く一致するが，応力が増大するともはや適用できなくなる。Lou と Schapery¹⁾ は，線型粘弾性構造式に次式で示すように，非線型係数を付加することによって比較的大きな応力水準にも適応できる非線型粘弾性構造式を提案した。すなわち

$$e(t) = g_0 s_{ij}(0) \sigma + g_1 g_2 a_s \left(\frac{t}{a_g} \right) \sigma \quad (2)$$

上式で， g_0 ， g_1 ， g_2 ， a_g は，非線型性を表す係数で，

† 原稿受理 昭和58年1月5日

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

** 正 会 員 大日本インキ化学工業(株) 高石市高砂

Fig. 1. Creep curve.

応力および荷重方向と繊維強化方向とがなす角度 θ との関数である。ただし、材料が等方性の場合には、応力のみの関数となる。また Δs_{ij} は線型粘弾性コンプライアンスの遷移成分である。多くの材料に対し、 Δs_{ij} は時間の指数形で表現できることが示されておりこれは次式で与えられる。

$$\Delta s_{ij} = c \Psi^n \quad (3)$$

ここで、 c 、 n は、定数で、材料の種類により実験的に求められる。また Ψ は、 $\Psi = t/a_0$ で表される時間である。式(2)に式(3)を代入すると、

$$e(t) = g_0 s_{ij}(0) \sigma + g_1 g_2 c \left(\frac{t}{a_0} \right)^n \sigma \quad (4)$$

を得る。

非線型の係数 g_1 、 g_2 、 c 、 a_0 を実験によって各々、独立に求めることは極めて難しく、クリープ回復データから求めるのが唯一の方法と考えられている。しかしながらクリープ回復データは、クリープデータ以上に正確なデータを得ることが困難であり、それを基に求めた非線型係数は、信頼性のとばしいものと予想される。そこで、本研究では次式で示す新しい材料係数 K を導入することにより、比較的容易に、クリープデータから、これを得ることができると考えられる。すなわち、 K は、次式で与えられる。

$$K = \frac{g_1 g_2 C \sigma}{a_0^n} \quad (5)$$

したがって式(4)と式(5)から非線型粘弾性クリープコンプライアンス s_{ij}^{NL} は、

Fig. 2. Dimensions of the specimen.

Table I. Materials of the specimen.

Matrix resin	Polyester resin, POLILITE FG-284 (Dainippon Ink & Chemicals Inc.)
Reinforcement	E glass fiber roving, MICRO GLASS ERN (Nippon Glass Fiber Corp.) Plain woven glass cloth, MG-252 (Asahi Fiber Glass Corp.)
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardner	Cobalt naphthenate

$$s_{ij}^{NL}(t) = \frac{e(t)}{\sigma} = g_0 s_{ij}(0) + \frac{K t^n}{\sigma} = \frac{e_0 + K t^n}{\sigma} \quad (6)$$

で表され Fig.1 に示す曲線となる。なお、上式で e_0 は、初期弾性ひずみを表す。式(6)において、 K と n の値は、短時間クリープデータから求めることができる。

3 実験方法

本研究では Table I に示すように、不飽和ポリエステル樹脂をマトリックスとした一方向ガラス繊維強化積層板と目抜き平織ガラス繊維強化積層板の二種類を使用した。また、マトリックスの粘弾性特性を観察するために、ポリエステル樹脂注型板を用意した。これら積層板を、ハンドレイアップ法により作製し、常温硬化後、80℃で4時間の後硬化処理を経て Fig.2 に示す形状に加工した。なお、一方向、平織積層板共にガラス含有率は、 $34 \pm 1 \text{ vol. \%}$ とした。ひずみの検出には、ひずみゲージを使用するが、若干の偏心荷重などによる曲げやねじりの影響を防ぐため、ゲージは、試験片の表と裏の両面に設け、二つのゲージの出力の平均値を記録するようにした。

クリープテストは、上述の試験片を、Fig.3 に示す試験機のチャックにセットし、負荷後、20分間のひずみ出力を記録した。負荷量の大きさは、クリープ破壊が半永久的に起らないとされる材料の引張強度の40%を上限に、3水準とした。

本研究では、クリープテストの精度をあげるために、試験片の前処理として、破壊応力の1/10の荷重を1時

Fig. 3. Creep testing apparatus.

Fig. 4. Lamina coordinate system.

間かけた後24時間放置, 回復させる作業を, 各々の試験片に対し, 10回くり返した。この理由は, 最初の負荷により, その負荷が充分小さくても, 試験片内部に微細クラックが発生し, それによってクリープテスト中のひずみ出力の乱れやばらつきの原因となると考えられるためである。そしてこの弊害を防止するために, 上述の前処理を実施した。

4 マトリックスと強化繊維の粘弾性挙動

積層板を構成する単層板の力学的性質は, 材料主軸 (Fig. 4 参照) に関する四つの弾性定数, すなわち強化方向のヤング率 E_{11} , 強化方向に直角方向のヤング率 E_{22} , ポアソン比 ν_{12} (または, ν_{21}) および横弾性係数 G_{12} によって特性づけられる。

いま, 積層板に使用されているマトリックスと強化材が粘弾性を有している場合, 複合則は時間の関数として次式で表示できる。

$$E_{11}(t) = \alpha \{E_f(t)V_f + E_m(t)V_m\} \quad (7)$$

$$\nu_{12}(t) = \beta \{\nu_f(t)V_f + \nu_m(t)V_m\} \quad (8)$$

ここで, V はマトリックスまたは強化材の含有率を示す。また, 添字 f , m は各々強化材, マトリックスを表す。さらに, α , β は, Tsai が提案した Misalignment factor と呼ばれる強化繊維の配列様式により定められる定数であるが, 本研究では, さらに広義に解釈し, 一方向強化や平織二方向強化まで含む織目構造を決定づける定数とする。

一方, E_{22} , G_{12} に関して Halpin⁸⁾らの式が, 比較的, 実験値と良く一致することが知られており, この式を, (7), (8)と同様に時間に依存すると考えると次式で表される。

$$\frac{\bar{p}(t)}{p_m(t)} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{\left(\frac{p_f(t)}{p_m(t)} - 1\right)}{\left(\frac{p_f(t)}{p_m(t)} + \xi\right)} \quad (10)$$

上式において, $\bar{p}(t)$ は $E_{22}(t)$ または $G_{12}(t)$ を表し, $p_m(t)$ は $E_m(t)$ または $G_m(t)$, $p_f(t)$ は, $E_f(t)$ または $G_f(t)$ を表す。また ξ は, 繊維の配列などに依存する係数であるが, 式(7)~(8)中の α , β と同様に,

Table II. Engineering constants of glass fiber and polyester resin.

	E glass fiber	Polyester resin
E	7.24×10^4 MPa	3.70×10^3 MPa
ν	0.25	0.35
G^*	2.90×10^4 MPa	1.37×10^3 MPa

* $G = E/2(1+\nu)$

Table III. Engineering constants of U. D. L. and P. W. L.

U. D. L.		P. W. L.	
Factor	Modulus	Factor	Modulus
$\alpha = 0.98$	$E_{11} = 2.65 \times 10^4$ MPa	$\alpha = 0.65$	$E_{11} = 1.77 \times 10^4$ MPa
$\xi = 2.0$	$E_{22} = 8.28 \times 10^3$ MPa		$E_{22} = E_{11}$
$\xi = 2.0$	$G_{12} = 3.16 \times 10^3$ MPa	$\xi = 1.0$	$G_{12} = 2.65 \times 10^3$ MPa
$\beta = 0.95$	$\nu_{12} = 0.30$	$\beta = 0.38$	$\nu_{12} = 0.126$

Fig. 5. Relation between viscoelastic factor, K and stress of FG-284 polyester resin.

織目構造までを決定づける定数として扱う。そしてこれらの定数 α , β , ξ は, 一方向強化積層板 (以下 U. D. L. と略す) および平織積層板 (以下 P. W. L. と略す) の材料主軸方向の $t=0$ におけるクリープテスト結果と, Table II に示すガラス繊維およびポリエステル樹脂の材料定数から決定される。それらを Table III に示す。なお材料主軸方向の面内せん断定数 $G_{12}(0)$ は, U. D. L. $\theta = 45^\circ$ 積層板から求めた。

一方, ポリエステル樹脂のみの短時間クリープテストの結果, 式(6)中の定数 $n=0.26$ が得られ, 負荷方向に対する K 値は, $\log K = 2.667 + 0.022\sigma$, また負荷に直角方向に対し, $\log K = 2.279 + 0.025\sigma$ であった。

さらに, 面内せん断に対する K 値は, ポリエステル樹脂を, 完全等方性材料と仮定し, $G_m = E_m/2(1+\nu_m)$ から容易に求めることができる。これらの結果は, Fig. 5 に示す。ガラス繊維の場合は, 樹脂に比べて, その粘弾性は, 無視できる程小さく, かつ, 負荷応力も, 繊維の破壊強度に比べて小さいので, 完全弾性体として, 本研究では扱った。

以上, ポリエステルおよびガラス繊維の個々のクリープ挙動と, 式(7)~(9)とから, 積層板のクリープ特性

は、数値表現が可能である。次章にそれを詳述する。

5 一方向および平織積層板のクリープ特性

平面応力下における応力とひずみ、時間の関係は、一般化された Hook の法則に、時間 t を導入すると次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \gamma_{12}(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}(t) & s_{12}(t) & 0 \\ s_{12}(t) & s_{22}(t) & 0 \\ 0 & 0 & s_{66}(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} s_{11}(t) &= \frac{1}{E_{11}(t)}, \quad s_{22}(t) = \frac{1}{E_{22}(t)} \\ s_{12}(t) &= \frac{-\nu_{12}(t)}{E_{12}(t)}, \quad s_{66}(t) = \frac{1}{G_{12}(t)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

である。式(12)中のそれぞれ右辺は、式(7)~(9)から直ちに求まり、それらを、Fig. 6~9 に示す。図中、プロットは、実験値を示し、実線は、計算値を示す。これらの結果において、 $s_{11}(t)$ と $s_{12}(t)$ は、応力と時間の大小・長短にかかわらず、ほぼ一定値を示し、ガラス繊維の影響が極めて強いことを示している。一方、 $s_{22}(t)$ 、 $s_{66}(t)$ は共に応力、時間に強く依存し、ポリエステルの影響が大きいことを示している。さらに、実験値と計算値が、かなり良い精度で一致していることは、 $t=0$ で、実験的に定めた係数 α 、 β 、 ξ が、時間にかかわらず、一定値として取り扱っても支障ないことを表している。

つぎに、負荷方向が、材料主軸に一致しない場合、すなわち Fig. 4 の X-Y 軸において、クリープひずみ $e(t)$ は

Fig. 6. Time dependent creep compliance, S_{11} of the unidirectional laminate.

Fig. 7. Time dependent creep compliance, S_{12} of the unidirectional laminate.

Fig. 8. Time dependent creep compliance, S_{22} of the unidirectional laminate.

Fig. 9. Time dependent creep compliance, S_{66} of the unidirectional laminate.

Fig. 10. Time dependent creep compliance, S_{11} of the off-axis unidirectional laminate.

$$\{e(t)\} = [\bar{s}_{ij}(t)]\{\sigma\} = [T]^T [\bar{s}_{ij}(t)] [T]\{\sigma\} \quad (13)$$

で示される。ここで、 $[T]$ は、座標変換マトリックス、添字 T は、転置マトリックス、 $[\bar{s}_{ij}]$ は、X-Y 軸におけるクリープコンプライアンスを示す。Fig. 10 は、負荷と強化方向のなす角度 θ が、 15° 、 30° 、 45° の場合について、クリープコンプライアンス $\bar{s}_{11}(t)$ の時間変化を示したものであるが、かなり精度良く、実験値と計算値が一致している。ただ、 θ が大きく、負荷も大きい場合にも、 $\bar{s}_{11}(t)$ の値は、計算値の方が、実験値より若干大きな値を示した。平織積層板の場合にも

Fig. 11. Time dependent creep compliance, S_{11} of the plain woven laminate for various load directions.

一方向積層板と同様、式(13)で、負荷と強化方向 θ のなす場合のクリープひずみが表現できる。Fig. 11は、負荷方向に対する積層角が $10^\circ/-80^\circ$ 、 $20^\circ/-70^\circ$ 、 $45^\circ/-45^\circ$ の場合につき $\bar{s}_{11}(t)$ の変化を示したものであるが特にせん断変形の強い $45^\circ/-45^\circ$ 積層板では応力が大きくなるにつれ計算値の方が実験値より大きな値を示す。

一方、織目構造をもたない $20^\circ/-70^\circ$ 積層板（一方向強化の単層板を 20° 、 -70° 方向に交互に16プライ積層、Fig. 11でC.P.L.で示す。）との比較を61.2 MPaの応力レベルで比較したが、同一の負荷に対し、織目を有するP.W.L.の方が、 $\bar{s}_{11}(t)$ が、実験、計算共に小さく、クリープ変形に対し、有利である。これは、P.W.L.の縦糸と横糸の摩擦をはじめとした織目の影響が、クリープに対し、有利に作用するものと推定される。

6 結 論

本研究では、ポリエステル/ガラス系のF.R.P.をとり上げ、常温下でのクリープ現象を、構成素材であるポリエステル樹脂の非線型粘弾性によるものとして解析し、実験値と比較したが、両者は、実用上、極めて良い一致を示した。これらの結果は、構成素材であるポリエステルのみが、積層板のクリープ変形に寄与し、ガラス繊維の粘弾性は無視できることを示した。これは、 $s_{11}(t)$ および $s_{12}(t)$ が、時間に依存せず、 $s_{22}(t)$ および $s_{66}(t)$ が、時間に依存することからも明らかである。そして、積層板が、一方向強化であっても、平織クロス強化であっても、また、負荷方向が、強化方向と一致していても、しなくても、本研究によれば、材料素材のクリープ特性を知ること、積層板のクリープ変形を予測できることが、判明した。この結果は、構成素材が、ポリエステルであってもエポキシ樹脂であってもまた、ガラスであってもカーボンファイバーであっても適用可能と考えられる。

(昭和57年5月26日 日本材料学会第31期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Y.C. Lou and R.A. Schapery, Journal of Composite Materials, **5**, 81 (1971).
- 2) R.M. Jones, "Mechanics of Composite Materials" (1975) Scripta Book Co.
- 3) J. C. Halpin, "Composite Materials Workshop", (1968) Technomic Publication Co..
- 4) E. Passaglia and J.R. Knox, Ch. 3, Engineering Design for Plastics, Eric Baer, Ed., Reinhold (1964).
- 5) Plastics for Flight Vehicles, Part 1, Reinforced Plastics, MIL-HDBK-17 (1959) US Government Printing Office.
- 6) M.B. Desai and F.J. McGarry, ASTM Bulletin, No. 239, p. 76 (1959).
- 7) S.W. Tsai, NASA CR-71 (1964).
- 8) J.C. Halpin and S.W. Tsai, AFML-TR67-423(1969).
- 9) P.H. Petit, Composite Materials, ASTM STP 460, p. 83 (1969).