一方向炭素繊維強化複合材料の高温における非主軸クリープ破断挙動*

河井昌道^{*1}, 佐川貴彦^{*2}

Off-Axis Tensile Creep Rupture Behavior of a Unidirectional CFRP Laminate at High Temperatures

Masamichi KAWAI^{*3} and Takahiko SAGAWA^{*3} Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

Creep rupture behavior of a unidirectional carbon/epoxy T800H/Epoxy Laminate under constant off-axis loading conditions at different temperatures of 60, 100 and 130°C is examined. Tensile creep rupture tests are performed on plain coupon specimens with different fiber orientations $\theta = 0, 10, 30, 45$ and 90° . Creep rupture of specimens takes place predominantly along reinforcing fibers in a brittle manner, regardless of the fiber orientation. The log-log plots of the creep rupture data can approximately be described using straight lines with negative slopes over the range of rupture time up to 10 h, regardless of the fiber orientation. Then, two kinds of simple phenomenological models are developed for predicting the time-to-failure of unidirectional composites. Validities of those models are evaluated by comparing with experimental results. It is demonstrated that the proposed models succeed in adequately predicting the creep rupture lives of the unidirectional composite at different temperatures.

Key Words: Polymer Matrix Composites, Unidirectional Composites, Creep Rupture, Off-Axis Loading, Creep Damage Mechanics Model, Larson-Miller Parameter, Carbon Fiber, Epoxy, High Temperature

1. 緒 言

高分子系炭素繊維強化複合材料 (CFRP) を用いた機器・構造体の性能と信頼性を保証するためには, CFRP のクリープ変形⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾だけでなく, クリープ破壊強度についても定量的に評価することが求められる. しかし, CFRP の長期クリープ強度を実験によって評価することは, 時間とコストの制約から, 実質的には不可能なことが多い. このため, CFRP の短時間クリープ強度データに基づいて使用条件の応力・時間・温度に対するクリープ強度を予測する技術を確立することが重要になる.

高分子系複合材料の長期耐久性を精密に予測する問題に対して, マトリックスに支配されるクリープ強度の理解と定量化が重要になる⁽⁶⁾. 一方向 CFRP の非主軸クリープ破断に関する研究はこのような観点から重要な工学的意義を有するものであり, 最近の代表的な研究例には以下のものがある. Dillard ら⁽⁷⁾は,

Graphite/Epoxy の一方向積層板を用いて高温 (160°C) で非主軸クリープ破断試験 (繊維配向角 $\theta = 10, 45, 60, 90^\circ$) を行い, その結果を報告した. また, Tsai-Hill 静的強度則⁽⁸⁾に含まれる主軸強度を時間の関数とすることでクリープ破壊モデルへの拡張を試みた. さらに, このクリープ破断モデルを多方向積層板のクリープ寿命予測に適用し, 全体的には良好な予測の得られること, 一方向プライのせん断クリープ強度の取り方に予測結果が大きく依存することなどを明らかにした.

Raghaven と Meshii⁽⁹⁾は, 一方向 AS4/3501-6 の非主軸試験片 ($\theta = 10, 90^\circ$) を用いて異なる温度でクリープ破断試験を行い, その結果を報告した. また, 材料内に蓄積される全弾性ひずみエネルギーがひずみ速度と温度に依存する臨界値に達したときに破壊が起きることを仮定する臨界破壊エネルギー基準を提案し, 観察したクリープ破断挙動が良好に説明できることを示した.

Guedes⁽¹⁰⁾は, クリープ変形中の自由エネルギーが弾性エネルギーの Tsai-Hahn 強度比⁽¹¹⁾ 倍に達したときクリープ破壊が起きることを仮定する破壊モデルを提案し, Dillard らの非主軸クリープ破断試験結果⁽⁷⁾に基づいてその有効性を示した. なお, その予測結果は Dillard らの修正 Tsai-Hill 則による予測と同程度の精度を有する

* 原稿受付 2007 年 5 月 15 日.

^{*1} 正員, 筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1).^{*2} 筑波大学大学院システム情報工学研究科.
E-mail: mkawai@kz.tsukuba.ac.jp

ものであった。最近、Kawai ら⁽¹²⁾は、一方向強化 CFRP の非主軸クリープ破断挙動を高温 $T = 100^{\circ}\text{C}$ について調べ、応力依存性と繊維配向角依存性の特徴を明らかにした。また、クリープ破断寿命の現象論的な予測法を提案し、実験結果との比較に基づいてその有効性を示した。

繊維配向角の影響だけでなく温度の影響を解明することも重要となる。宮野ら⁽¹³⁾は、一方向 CFRP の繊維垂直方向に対して種々の温度で 3 点曲げによるクリープ試験と応力比の異なる定常疲労試験を行い、ガラス転移温度以下においてはクリープ強度が疲労強度の上限に、またガラス転移温度に近くでは下限に対応することを示した。また、同じ時間-温度換算則が成り立つことを仮定して任意の温度・荷重条件に対する寿命予測法を提案した⁽¹⁴⁾。

しかしながら、非主軸クリープ破断に関する上記の研究⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾においては、主に一定温度におけるクリープ破断挙動の特徴のみが議論されている。異なる温度でクリープ破断試験を実施した Raghaven と Meshii の結果においても、一方向 CFRP の非主軸クリープ破断の温度依存性は明瞭には議論されていない。このように、異なる温度における非主軸クリープ破断データが十分に求められていないこともあって、一方向 CFRP の短時間範囲の非主軸クリープ破断データに基づいて長時間領域のそれを精密に予測する問題を工学的な観点から体系的に議論した研究はまだ報告されていない。

本研究においては、一方向 CFRP の非主軸クリープ破断挙動の温度依存性を実験によって明らかにし、さらにその工学的な予測方法を開発することを目的とする。まず、一方向 CFRP の非主軸平滑試験片を用い、前報⁽¹²⁾の試験温度 $T = 100^{\circ}\text{C}$ とは異なる 3 種類の試験温度 ($T = 60, 80, 130^{\circ}\text{C}$) で一定引張応力保持によるクリープ破断試験を行う。各温度におけるクリープ破断試験は 5 種類の繊維配向角に対して行う。試験結果に基づいて、非主軸クリープ破断時間の繊維配向角依存性、応力依存性、およびそれらに与える試験温度の影響を明らかにする。次に、一方向 CFRP の非主軸クリープ破断寿命とその温度依存性を予測することができ現象論的なクリープ破断寿命予測モデルを定式化する。このクリープ破断寿命予測モデルから新しい温

度・時間換算パラメータが導かれることを示す。後者に関連して、Larson-Miller パラメータ⁽¹⁵⁾を用いたグラッドマスタークリープ破断曲線を同定する方法を新たに提案する。最後に、これらのクリープ破断寿命予測モデルの適用性を実験結果との比較に基づいて評価する。

2. 試験片および試験方法

2.1 供試材 供試材は、炭素繊維 T800H (東レ) と Epoxy 樹脂 #2500 (130°C 硬化型) を用いたプリプレグ P2053F-20 (東レ) を 12 枚積層した一方向積層板 T800H/Epoxy [0]₁₂ である。一方向積層板はオートクレーブによって加圧成形されたものであり、厚さは約 2.2 mm である。

長手方向と繊維軸のなす角度 (繊維配向角 θ) が $\theta = 0, 10, 30, 45, 90^{\circ}$ となる 5 種類の短冊形平滑試験片を一方向積層板パネル ($400 \times 400 \text{ mm}$) から切り出した。短冊型平滑試験片の寸法は JIS K7073⁽¹⁶⁾, K7087⁽¹⁷⁾ に準ずるものとし、繊維方向 ($\theta = 0^{\circ}$) については長さ 200 mm、幅 10 mm、その他の繊維配向角については長さ 200 mm、幅 20 mm とした。

前報⁽¹²⁾と同様、せん断カップリングに起因する標線間の不均質な変形を低減するため、Sun と Chung⁽¹⁸⁾ による角度付タブを用いた (図 1)。角度付タブの傾斜角 ϕ は $\cot \phi = -\bar{S}_{16} / \bar{S}_{11}$ ($\bar{S}_{ij}$: 試験片座標系に関するコンプライアンス成分) を用いて計算される。本研究では、角度付タブをアルミニウム合金で作製し、試験片両端に Epoxy 系接着剤を用いて貼付した。タブの接着強度を上げるため、加熱装置 Gravity Oven LG-112 (ESPEC) を使い、 90°C で 1 時間の加熱接着処理を施した。

2.2 試験方法 引張応力 (公称応力) の一定保持によるクリープ破断試験を 3 種類の試験温度 $T = 60, 80, 130^{\circ}\text{C}$ で行う。繊維配向角 $\theta = 0, 10, 30, 45, 90^{\circ}$ のそれぞれに対して異なる応力レベルでクリープ破断試験を行う。クリープ試験の打切時間は 10 h とする。クリープ応力の大きさは、試験打切時間 10 h の範囲内でクリープ破断が観察されるように相対的に高い応力レベルを設定する。クリープ応力の大きさを決定するため、一定変位速度 1.0 mm/min による静的引張試験を各試験温度 ($T = 60, 80, 130^{\circ}\text{C}$) で行う。一定保持するクリープ応力レベルまでの負荷は一定変位速度 1.0 mm/min で与えるものとする。

クリープ破断試験および静的引張試験には、油圧サーボ式材料試験システム (MTS 810 Test Star) を用いた。この試験システムには低速バルブと高速バルブが装備

Fig. 1 Specimen geometry (dimensions in mm)

されており、クリープ破断試験には低速パルプを、引張試験には高速パルプを選択する。試験片の加熱には、室温から約 350°C までの範囲で任意の温度にデジタル設定することのできる環境槽を利用した。この環境槽は試験片と油圧グリップの全体を覆うように装着されている。いずれの試験においても、環境槽内の温度を試験温度に昇温し、1 時間の加熱保持によって温度が安定化した後に試験を開始した。環境槽内の湿度は制御していない。試験片のひずみは、ひずみゲージ、クロスヘッド変位およびビデオ式非接触伸び計 (DVE) を用いて測定した。

3. 試験結果および検討

3.1 静的引張挙動 $T=80^{\circ}\text{C}$ における非主軸応力-ひずみ関係をすべての繊維配向角について重ねて図 2 に示す。繊維方向 ($\theta=0^{\circ}$) についてはほぼ線形な応力-ひずみ関係であるが、非主軸方位 ($\theta=10, 30, 45^{\circ}$) については顕著な非線形性が観察される。繊維垂直方向 ($\theta=90^{\circ}$) になると再び直線的な応力-ひずみ関係を呈する。これらの特徴はこれまでの報告⁽⁵⁾⁽⁹⁾に見られるそれと同様である。非主軸応力-ひずみ関係のこれらの特徴は、他の試験温度 ($T=60, 100, 130^{\circ}\text{C}$) においても同様に観察された。

応力-ひずみ関係の温度依存性を観察するため、試験温度 $T=\text{RT}$ ⁽⁹⁾, 60, 80, 100⁽¹²⁾, 130°C で求めた $\theta=10, 30^{\circ}$ に対する応力-ひずみ関係を重ねて図 3 (a), (b) に示す。繊維方向 ($\theta=0^{\circ}$) の応力-ひずみ関係の勾配に温度依存性はほとんど認められなかった。しかし、非主軸方位 (図 3) については、試験温度の上昇とともに変形流動応力が大きく低下することを確認することができる。また、応力-ひずみ関係の初期勾配によって評価したヤング率も、高温になるほど小さくなる傾向が認められる。降伏後の非弾性的な応力-ひずみ関係

Fig. 2 Off-axis stress-strain curves at 80°C

は、いずれの試験温度についてもほぼ平行で、接線係数の大きさがほぼ等しい。線形域から非線形域への遷移がほとんど認められない 130°C の応力-ひずみ関係が他の試験温度における降伏後の応力-ひずみ関係とほぼ同じ勾配を持っていることは興味深い。ガラス転移温度 T_g よりも低い温度における非線形塑性変形流動と T_g 近傍の巨視的な塑性流動が類似していることは、 T_g 以下で議論した非線形粘塑性モデル⁽⁵⁾⁽¹²⁾が広い温度範囲で適用できる可能性を示唆しているものと思われる。

なお、荷重方向のヤング率の繊維配向角依存性は、試験温度に拘わらず、直交異方性弾性理論によって精度良く記述できることを確認している。

3.2 引張強度の温度依存性 荷重方向の引張強度を各温度について比較して図 4 に示す。すべての繊維配向角について、引張強度は温度の上昇とともに低下する傾向を示す。いずれの試験温度についても、引

(a) $\theta=10^{\circ}$

(b) $\theta=30^{\circ}$

Fig. 3 Temperature dependence of off-axis stress-strain curve for each fiber orientation

Table 1 Engineering elastic constants at test temperatures

T °C	Engineering elastic constants			
	E_1 GPa	E_2 GPa	G_{12} GPa	ν_{12}
RT ⁽¹⁹⁾	159.0	8.80	4.37	0.328
60	158.8	7.95	4.23	0.344
80	159.6	7.47	4.22	0.347
100 ⁽¹²⁾	158.3	6.02	2.91	0.344
130	159.9	1.20	0.45	0.339

Table 2 Principal fracture strengths at test temperatures

T °C	X MPa	Y MPa	S MPa
RT ⁽¹⁹⁾	2472.1	47.9	59.7
60	2068.3	29.8	52.3
80	2288.5	36.4	46.4
100 ⁽¹²⁾	1554.3	28.7	37.7
130	895.8	12.0	20.9

Fig. 4 Off-axis tensile strength versus test temperature plots for all the fiber orientations

張強度の繊維配向角依存性が Tsai-Hill 則⁽⁸⁾ によって精度よく記述することができることを確認している。

各試験温度について、異方性主軸に関する弾性係数と引張強度の値をそれぞれ表 1 と表 2 にまとめて示す。

3・3 クリープ変形挙動 いずれの試験温度 ($T=60, 80, 100, 130^{\circ}\text{C}$) においても、類似の非主軸クリープ変形応答が観察された。すなわち、クリープひずみは応力保持開始直後に急激に増加し、クリープ (ひずみ) 速度は時間とともに低下して 0 に近づく傾向を示した。発生するクリープひずみはクリープ応力が大きいほど大きくなった。本クリープ試験の範囲においては、定常クリープ応答および加速クリープ応答は明瞭には認められなかった。したがって、一方向 CFRP の一定応力によるクリープ応答は、クリープ破断に至る全クリープ過程を通して、遷移クリープに支配されていることがわかった。紙面の制限もあるので各温度の非主軸

Fig. 5 Off-axis creep rupture curves at 60°C

Fig. 6 Off-axis creep rupture curves at 80°C

Fig. 7 Off-axis creep rupture curves at 130°C

クリープ曲線は省略する。なお、前報⁽¹²⁾ に $T=100^{\circ}\text{C}$ の非主軸クリープ曲線を示しているのを参照されたい。

3・4 クリープ破断挙動 試験温度 $T=60, 80, 130^{\circ}\text{C}$ における非主軸クリープ破断曲線 (クリープ破断時間 t_R とクリープ応力 σ_c の関係) をそれぞれ図 5, 図 6, 図 7 に示す。図中の矢印は打ち切りクリープ時間 10 h で破断しなかったデータを表す。クリープ破断強度は、すべての試験温度において、類似の特徴を呈する。す

なわち、クリープ破断強度は繊維配向角に強く依存しており、繊維配向角の増加とともに低下する。また、両対数表示した非主軸クリープ破断曲線は、繊維配向角と試験温度に拘わらず、右下がりの平行な直線によって近似することができる。クリープ破断データは、繊維配向角と試験温度に拘わらず、縦軸 ($t_R = 10^3$ h)

Table 3 Slopes of the normalized off-axis creep rupture curves at test temperatures

$T(^{\circ}\text{C})$	n
60	76.9
80	50.6
100 ⁽¹²⁾	27.9
130	18.0

Fig. 8 Normalized off-axis creep rupture curves at 60°C

Fig. 9 Normalized off-axis creep rupture curves at 80°C

Fig. 10 Normalized off-axis creep rupture curves at 130°C

上にプロットしている非主軸静的引張強度を表す点まで近似的に外挿することができる。なお、静的強度を $t_R = 10^3$ h にプロットしたのは、静的引張試験において最大応力レベルの 1/2 に達するのに要する時間が繊維配向角に拘わらず約 3×10^3 h であったことに基づいている。

3・5 無次元クリープ破断曲線 クリープ破断データが静的強度レベルから始まるほぼ平行な曲線上に分布することは、非主軸クリープ強度の繊維配向角依存性が非主軸静的強度のそれに類似していることを示している。

クリープ応力を引張強度で除して得られるクリープ強度比 $\sigma_C / \sigma_{B(\text{exp})}$ とクリープ破断時間の両対数関係を各試験温度 ($T = 60, 80, 130^{\circ}\text{C}$) についてそれぞれ図 8, 図 9, 図 10 に示す。無次元化されたクリープ破断データは、いずれの温度においても、繊維配向角に拘わらず一つの狭いバンド内に集まって分布している。したがって、クリープ強度比を用いることにより、試験温度に拘わらず、非主軸クリープ強度の繊維配向角依存性をほぼ取り除くことができる。この結果は、非主軸クリープ破断データを合理的に整理する強度パラメータとして、クリープ強度比が有効に利用できる可能性を示唆している。

これらの図に示された実線は、無次元クリープ破断データの最小 2 乗近似直線

$$\left(\frac{\sigma_C}{\sigma_{B(\text{exp})}} \right)^n t_R = C_0 \quad (1)$$

を表している。各試験温度における近似直線の勾配を表 3 にまとめて示す。この表から、温度が高くなるほど無次元クリープ破断曲線の勾配 ($1/n$) が大きくなることがわかる (図 11 参照)。

4. 温度依存性を考慮したクリープ

損傷力学モデル

本論文では、現象論的クリープ損傷力学モデル⁽¹²⁾を拡張して、温度に依存する一方向 CFRP 積層板の非主軸クリープ破断挙動を記述する問題に適用することを考える。

4・1 無次元有効応力 平面応力状態を仮定して、無次元応力パラメータ（無次元有効応力）を

$$\sigma^* = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{X^2} + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2} \quad (2)$$

と定義する⁽²⁰⁾。ここで、 X, Y はそれぞれ繊維方向と繊維垂直方向の引張強度を、また S は繊維に沿うせん断強度を示している。応力は異方性主軸に関する成分を表している。

このように定義した無次元有効応力は、平面応力状態に対する理論強度比を表している⁽²¹⁾。クリープ応力に対する無次元有効応力は、理論的なクリープ強度比を与えることになる。

4・2 損傷発展式 脆性的なクリープ損傷挙動に対して、クリープ損傷変数 ω の変化を

$$\frac{d\omega}{dt} = \left(\frac{1}{1-\omega}\right)^{k(T)} K(T)(\sigma^*)^{n(T)} \quad (3)$$

と表現する⁽²²⁾。ここで、応力指数 n およびその他の係数 K, k は温度の関数とする。

クリープ損傷 $\omega=1$ のときにクリープ破壊すると仮定する。この結果、クリープ破壊時間 t_R は、

$$t_R = \frac{1}{(1+k)K(\sigma^*)^n} \quad (4)$$

と表すことができる。

上記の関係〔式 (4)〕を用いれば、単調静的負荷による破壊 ($\sigma^*=1$) に要する基準時間は、

$$t_R^0 = t_R \Big|_{\sigma^*=1} = \frac{1}{(1+k)K} \quad (5)$$

と表現される。この関係を利用すれば、クリープ破断データを完全な無次元形式

$$\sigma^* = \left(\frac{t_R^0}{t_R}\right)^{1/n} \quad (6)$$

によって表現することができる。この関係式は非主軸クリープ破断の繊維配向角依存性と温度依存性を考慮したグランドマスタークリープ破断曲線を定義している。

4・3 時間-温度パラメータ クリープ応力指数 n の温度依存性が温度のべき関数

$$\frac{1}{n(T)} = AT^m \quad (7)$$

によって近似できる場合 (A, m は定数)、時間-温度パラメータ P^* を

$$P^* = T^m \log_{10} \frac{t_R}{t_R^0} \quad (8)$$

によって定義すれば、クリープ強度比 σ^* と時間-温度パラメータ P^* の関係を

$$AP^* + \log_{10} \sigma^* = 0 \quad (9)$$

と表現することができる。この関係は温度と繊維配向角に依存しないグランドマスタークリープ破断曲線の具体的な近似表現を与えている。

4・4 計算結果と実験結果の比較 図 11 にクリープ応力指数 n と（絶対）温度の関係を示す。図中の実線は式 (7) を用いた近似関係を表している。なお、式 7) の材料定数には、次の値を用いた。

$$m = 7.64, \quad A = 7.2 \times 10^{-22} \quad (1/K)^m \quad (10)$$

式 (6) の基準時間 t_R^0 は、温度だけでなく負荷速度にも依存する可能性があるが、ここでは簡単のため、一定値 $t_R^0 = 10^{-3}$ (1/h) を仮定する。なお、図 3 から明らかに、130°C になると非主軸方向の耐荷能力が著しく低下するから、図 11 の有効近似範囲は 130°C 前後以下と考えなければならない。

各温度の（無次元）マスタークリープ破断曲線（図 8, 図 9, 図 10）の縦軸（無次元応力軸）を繊維配向角に対する静的強度（Tsai-Hill 則を用いた予測静的強度）を乗じてスケーリングすれば、その繊維配向角に対するクリープ破断曲線を予測することができる。このように予測したクリープ破断曲線と試験結果の比較を $T = 60, 80, 130^\circ\text{C}$ についてそれぞれ図 12, 図 13, 図 14 に示す。これらの図から、温度依存性を考慮したクリープ損傷力学モデルによって非主軸クリープ強度を精度良く予測できることがわかる。

Fig. 11 Plots of stress exponent as a function of temperature

5. Larson-Miller パラメータを用いたモデル化

5・1 Larson-Miller パラメータ Larsson-Miller (LM) パラメータ⁽¹⁵⁾は,

$$P_{LM} = T(C + \log_{10} t_R) \quad (11)$$

Fig. 12 Comparisons between predicted and observed off-axis creep rupture curves at 60°C using a damage mechanics model

Fig. 13 Comparisons between predicted and observed off-axis creep rupture curves at 80°C using a damage mechanics model

Fig. 14 Comparisons between predicted and observed off-axis creep rupture curves at 130°C using a damage mechanics model

と定義され, 異なる温度におけるクリープ破断データを整理する上で有効な時間-温度パラメータとなることが知られている.

5・2 $\sigma^* - P_{LM}$ 関係 クリープ強度比を用いてクリープ破断曲線の繊維配向角依存性を取り除いた非主軸マスタークリープ破断曲線 (図8, 図9, 図10) は温度に依存する. 非主軸マスタークリープ破断曲線の温度依存性を LM パラメータを用いてスケリングし, 繊維配向角だけでなく, 温度にも依存しないグランドマスタークリープ破断曲線を構築することを考える.

まず, クリープ強度比を求めるのに使用する静的強度は温度に依存するので, 基準強度を設定する必要がある. ここでは, 室温の静的強度を基準

Fig. 15 Normalized creep stress level (σ^*) versus Larson-Miller parameter (P_{LM}) plots of the off-axis creep rupture data obtained at 60, 100, 130°C

Fig. 16 $\sigma^* - P_{LM}$ plots for all the test temperatures ($T = 60, 80, 100, 130^\circ\text{C}$)

Fig. 17 Larson-Miller plots of creep rupture data for $\theta = 0, 10^\circ$

強度とする。次に、室温強度に基づく各温度の無次元クリープ破断データのすべてが一つの曲線

$$\sigma_{C(RT)}^* = f(P_{LM}) \quad (12)$$

の周囲に分布するように LM パラメータの定数 C を決める。

本研究では、グランドマスタークリープ破断曲線として、最も簡単な線形関係

$$\sigma_{C(RT)}^* = a + bP_{LM} \quad (13)$$

を仮定する。異なる温度のクリープ破断データに対して、室温強度に基づくクリープ強度比 $\sigma_{C(RT)}^*$ と Larson-Miller パラメータ P_{LM} の関係を C の値を変えてプロットし、データ点全体が直線上に分布すると判断できる C の値を見つける。このような試行法で LM 定数を決めると $C = 82$ が得られた。試験温度 $T = 60, 100, 130^\circ\text{C}$ の結果に対して、このように同定したグランドマスタークリープ破断曲線を図 15 に示す。図中に実線が近似曲線を示している ($a = 3.2$, $b = -0.09$)。図 16 は、グランドマスタークリープ破断曲線の同定に使用しなかった $T = 80^\circ\text{C}$ のデータを重ねて示したものである。この図から、 $T = 80^\circ\text{C}$ のクリープ破断データが同定したグランドマスター曲線の周囲に分布することを確認することができる。グランドマスタークリープ破断曲線に繊維配向角に対応する室温の静的強度を乗じれば、繊維配向角ごとの温度に依存しないクリープ破断曲線 (Larson-Miller プロット) が得られる (図 17, 図 18)。なお、図 15 と図 16 においては、クリープ応力を室温における静的強度で除して求めたクリー

Fig. 18 Larson-Miller plots of creep rupture data for $\theta = 30, 45, 90^\circ$

プ強度比を縦軸の区間 $[0.1, 1.0]$ に示しており、データ分布が相対的に拡大されている。このため、図 15 と図 16 のデータ分布の幅が図 17 と図 18 のそれよりも大きく見える。

一方向 CFRP の非主軸引張クリープ破断は、短時間破断と長時間破断のいずれにおいても、繊維に沿って起きる。巨視的な非主軸破断機構に大きな変化がないことから、長時間挙動を短時間データに基づいて近似的に予測することは可能であると考えられる。しかしながら、時効の影響が大きくなる場合は、特に長時間クリープ寿命の予測に際して、これを適切に考慮することが重要になる。

6. 結 言

本研究においては、一方向強化 CFRP (T800H/2500) の非主軸クリープ破断試験を 3 種類の温度 ($T = 60, 80, 130^\circ\text{C}$) で行い、先に求めた 100°C の結果と併せて、各温度における応力依存性と繊維配向角依存性およびそれらの温度依存性を明らかにした。また、温度の影響を考慮してクリープ損傷力学モデルを拡張し、クリープ破断寿命の現象論的な予測法を提案した。さらに、Larson-Miller パラメータを用いてグランドマスタークリープ破断曲線を構築する方法も提案した。得られた主な結果をまとめると以下のようになる。

(1) いずれの試験温度においても、クリープ応力と破断時間の両対数表示は、試験時間範囲 ($\leq 10\text{ h}$) において繊維配向角に拘わらず、直線によって近似することができる。

(2) クリープ強度比を用いることによって非主軸クリープ破断曲線の繊維配向角依存性をほぼ取り除くこ

とができる。

(3) クリープ強度比を用いた無次元クリープ破断曲線の勾配は試験温度が高いほど大きくなる。

(4) 無次元有効応力を用いた一方向 CFRP に対するクリープ損傷力学モデルを温度の影響を考慮できるように拡張した。提案したクリープ損傷モデルは非主軸クリープ破断挙動とその温度依存性を精度よく記述することができる。

(5) 提案したクリープ損傷モデルに基づいて、一方向 CFRP の非主軸クリープ破断に対するグランドマスタークリープ破断曲線を定義することができる。

(6) Larson-Miller パラメータを用いたグランドマスタークリープ破断曲線の構築方法を開発し、実験結果との比較に基づいてその有効性を示した。

参考文献

- (1) Beckwith, S.W., Creep Evaluation of a Glass/Epoxy Composite, *SAMPE Quarterly*, Vol. 11 (1980), pp. 8-15.
- (2) Tuttle, M.E. and Brinson, H.F., Prediction of the Long-Term Creep Compliance of General Composites, *Experimental Mechanics*, Vol. 26, No. 1 (1986), pp.89-102.
- (3) Katouzian, M., Bruller, O.S., Horoschenkoff A., On the Effect of Temperature on the Creep Behavior of Neat and Carbon Fiber Reinforced PEEK and Epoxy Resin, *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 3 (1995), pp. 372-387.
- (4) Kawai, M., Off-Axis Creep Behavior of Unidirectional Polymer Matrix Composites at High Temperature, *Proc. of UTAM Symposium on Creep in Structures*, (2001), pp. 469-478.
- (5) Kawai, M. and Masuko, Y., Creep Behavior of Unidirectional and Angle-Ply T800H/3631 Laminates at High Temperature and Simulation Using a Phenomenological Viscoplasticity Model, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, No. 15 (2004), pp. 2373-2384.
- (6) Brinson, H.F., Matrix Dominated Time Dependent Failure Predictions in Polymer Matrix Composites, *Composite Structures*, Vol. 47 (1999), pp. 445-456.
- (7) Dillard, D.A., Morris, D.H. and Brinson, H.F., Predicting Viscoelastic Response and Delayed Failures in General Laminated Composites, *Composite Materials: Testing and Design (Sixth Conference)*, Ed. I.M. Daniel, ASTM STP 787 (1982), pp. 357-370.
- (8) Azzì, V.D., Tsai, S.W., Anisotropic Strength of Composites, *Experimental Mechanics*, Vol. 5 (1965), pp. 283-288.
- (9) Raghavan, J. and Meshii, M., Creep Rupture of Polymer Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 57 (1997), pp. 375-388.
- (10) Guedes, R.M., An Energy Criterion to Predict Delayed Failure of Multi-Dimensional Polymer Matrix Composites Based on a Non-Linear Viscoelastic Model, *Composites, Part A*, Vol. 35 (2004), pp. 559-571.
- (11) Tsai, S.W., Hahn, H.T., Introduction to Composite Materials, Technomic Publishing Co., 1980.
- (12) Kawai, M., Masuko, Y. and Sagawa, T., Off-Axis Tensile Creep Rupture of Unidirectional CFRP Laminates at Elevated Temperature, *Composites Part A*, Vol. 37 (2006), pp. 257-269.
- (13) Miyano, Y., Nakada, M. and McMurray, M.K., Influence of Stress Ratio on Fatigue Behavior in the Transverse Direction of Unidirectional CFRP, *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 14 (1995), pp. 1808-1822.
- (14) Miyano, Y., Nakada, M., Kudoh, H. and Muki, R., Prediction of Tensile Fatigue Life Unidirectional CFRP, *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 7 (2000), pp. 538-550.
- (15) Larson, F.R. and Miller, A., A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses, *Transactions of the ASME*, Vol. 74 (1952), pp. 765-771.
- (16) JIS K7073. Testing Method for Tensile Properties of Carbon Fiber-Reinforced Plastics. In: Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association, (1988).
- (17) JIS K 7087. Testing Methods for Tensile Creep of Carbon Fiber Reinforced Plastics. In Japanese Industrial Standard, Japanese Industrial Association, (1996), pp. 1-18.
- (18) Sun, C.T. and Chung, I., An Oblique End-Tab Design for Testing Off-Axis Composite Specimens, *Composites*, Vol. 24 (1993), pp. 619-623.
- (19) Kawai, M., Suda, H., Effects of Non-Negative Mean Stress on the Off-Axis Fatigue Behavior of Unidirectional Carbon/Epoxy Composites at Room Temperature, *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 10 (2004), pp. 833-854.
- (20) Kawai, M., Damage Mechanics Model for Off-Axis Fatigue Behavior of Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Composites at Room and High Temperatures, In: Massard, T. and Vautrin, A. (eds.), *Proc. of 12th Int. Conf. on Composite Materials (ICCM12)*, Paris, France, July 5-9, (1999), p. 322.
- (21) Kawai, M., Yajima, S., Hachinohe, A. and Takano, Y., Off-Axis Fatigue Behavior of Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Composites at Room and High Temperatures, *Journal of Composite Materials*, Vol. 35, No. 76 (2001), pp. 545-576.
- (22) Kachanov, L.M., Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, (1986).