研究論文

朱子織 CFRP 積層板の曲げクリープ破壊寿命の予測

宮野 靖*, 笠森 正人**,***, 大塚 猛***, 服部 陽一*

(1991 年 12 月 16 日受付)

Estimation Method on Flexural Creep Fracture Strength of
Satin Woven CFRP Laminates

Y. MIYANO,* M. KASAMORI,**,*** T. OHTSUKA*** and Y. HATTORI*

(Received December 16, 1991)

This paper is concerned with the prediction of flexural creep fracture for CFRP laminates consisting of satin woven carbon fibers and high temperature epoxy matrix, of which glass transition temperature $T_g=236^\circ\text{C}$. The flexural creep fracture tests were practically carried out under various stress level at 50°C to be sufficiently lower than the T_g . On the other hand, the static flexural tests were carried out under various deflection rates and temperatures. The master curve of flexural strength of CFRP was obtained by applying the reciprocity law between time and temperature to these experimental results. Furthermore, the flexural creep fracture of CFRP was estimated by utilizing the linear cumulative damage rule adapted to this master curve. The creep fracture predicted by the method mentioned above is fairly well agreed with that measured by creep tests.

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチック CFRP は比強度、比剛性に優れており、機器の軽量化が期待できることから航空宇宙機器などの二次構造材はもとより一次構造にまで使用されるようになってきた。

ところで、FRP のマトリックスであるエポキシ樹脂に代表される熱硬化性樹脂はガラス転移温度 T_g 以上において、機械的性質が時間や温度により著しく変化するといういわゆる粘弾性挙動を示す。しかし、この T_g 以

下においても、その機械的性質が時間や温度によりかなり変化することが知られている¹⁻⁸⁾。CFRP を構造材として使用する場合には当然そのマトリックス樹脂の T_g 以下の温度において使用されるが、その温度領域におけるマトリックス樹脂の粘弾性挙動によって、CFRP の機械的性質も時間や温度により変化することが推測される。たとえば、CFRP を一定荷重下で構造部材として長期にわたって使用する場合、マトリックス樹脂の粘弾性挙動によるクリープ変形やクリープ破壊の生じることが当然考えられるが、これは構造物の寿命を左右する重要な問題である。そこで、CFRP を構造材料として用いた機器を設計する際には、長期にわたるクリープ挙動をあらかじめ十分把握する必要がある。この長期のクリープ挙動は長期のクリープ試験によって求められるが、当然、試験には長時間を要する。そのため、長期クリープ挙動を正確にかつ短時間に予測する方法の開発が急がれている。

本報では、航空機の構造材等に使用される耐熱性エポキシ樹脂をマトリックスとする朱子織 CFRP 積層板(以下 CFRP 積層板と呼ぶ)を取り上げ、その曲げクリープ破壊寿命を求めるとともに、その予測方法について考察

* 金沢工業大学材料システム研究所 (921 金沢南局区内野々市町扇が丘 7-1)

Materials System Research Laboratory, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Ohgigaoka, Nonoichi, Kanazawa 921, Japan

** 石川県工業試験場 (920-02 金沢市戸水町口-1) Industrial Research Institute of Ishikawa, Ro-1, Tomizu, Kanazawa 920-02, Japan

*** 金沢工業大学大学院 (921 金沢南局区内野々市町扇が丘 7-1) Graduate Students, Kanazawa Institute of Technology, 7-1, Ohgigaoka, Nonoichi, Kanazawa 921, Japan

するものである。すなわち、種々の一定温度およびたわみ速度の下での静的曲げ試験の結果と時間-温度換算則より静的曲げ強度のマスター曲線を求める。次いでこのマスター曲線に累積損傷則を利用して曲げクリープ破壊寿命を予測する。この予測結果と実際の曲げクリープ試験の結果を比較することにより、提案した予測方法の妥当性も検討する。

2. 実験

2.1 供試材料

CFRP 積層板は、耐熱性エポキシ樹脂 #3601 をマトリックスとする 8 枚朱子織炭素繊維 (T400) のプリプレグ “FJ6341G-06P” (東レ製) を縦糸繊維束が表面にくるように中立面に対称に 8 枚積層し成形したものである。なお、CFRP 積層板の仕上り厚さは 2.7 mm、繊維体積含

有率 V_f は約 65% である。また、マトリックス樹脂のガラス転移温度 T_g は 236°C である。

試験片は Fig.1 に示すように、JIS K7116 に準じ幅 15 mm、長さ 70 mm の短冊型とし、表面層の縦糸繊維束方向が試験片長手方向と一致するように CFRP 積層板より切り出した。

2.2 静的 3 点曲げ試験

前報⁹⁾での静的 3 点曲げ試験は、クリープ試験と同一の試験片を用い、支点間距離 50 mm、試験温度 50~250°C の範囲における 10 水準の各一定温度の下、試験速度 0.2~200 mm/min の範囲における 4 水準で行った結果を利用した。

種々の一定温度における曲げ強度 σ_{bs} と破壊するまでの試験時間 t_{bs} との関係を Fig.2 の左図に示す。この図より、 σ_{bs} はマトリックス樹脂のガラス転移温度 T_g 以上の温度においては当然ながら、それ以下の温度においても時間の経過にともない大きく低下し著しい時間依存性を示すことがわかった。また、この図の右図は 50°C の曲線を基準として、他の温度曲線を横軸の対数時間軸に沿って、互いに重なるように平行移動することにより求めたマスター曲線であるが、このように 1 本の滑らかな曲線が描けたことにより σ_{bs} の時間依存性と温度依存性の間には時間-温度換算則が成立することが確かめられた。なお、このマスター曲線を作成するときに求めた各温度曲線の平行移動量である時間-温度移動因子 $at(T)$ は 200°C を境として低温側では $\Delta H_1 = 200$ kJ/mol、高温側では $\Delta H_2 = 673$ kJ/mol の異なる活性化エネルギーをもつ二つの Arrhenius 式で表現できた。

2.3 3 点曲げクリープ試験

クリープ試験には、恒温層付き 6 本掛けクリープ試験

Creep bending test condition	
Temperature [°C]	50

Static bending test conditions	
Deflection rate [mm/min]	0.2, 2, 20, 200
Temperature [°C]	50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 235, 250

Fig.1 Test specimen and condition.

Fig.2 Master curve of flexural strength of CFRP.

Fig.3 Time-deflection curves of flexural creep test for CFRP at various stress.

Fig.4 Fracture appearance of CFRP laminate.

(a)

(b)

Fig.5 Photographs of unfractured CFRP laminate at 10^5 min. (a) Compressive face view, (b) Edge view.

機 CP6-L-500 (オリエンテック製) を用い、静的曲げ試験と同じく支点間距離 50 mm の下、試験温度は 50°C の一定温度で、種々の一定荷重を試験片がクリープ破壊するまで負荷して行った。ただし、最長試験時間は 10^5 min までとした。

試験温度一定の 50°C の下、種々の一定応力下でのクリープ試験において、曲げクリープ破壊に至るまでのたわみ量 δ と時間 t の関係を Fig.3 に示す。クリープ変形は破壊時まで対数時間に対して直線的に徐々に増加し、破壊は瞬間的に起きる。このときの破壊の様相の代表例を Fig.4 に示すが、いずれの負荷荷重においても上部表面の荷重点付近の圧縮破壊とそれに続く層間はく離である。また、Fig.5 に 10^5 min で破壊しなかった試験片について示すが、圧縮側表面層の縦糸繊維束の屈曲部と屈曲部の間で明らかに局部的な圧縮破壊を示していることより、クリープ破壊は圧縮側の縦糸繊維束の破壊が起点

となって生じることがわかる。

曲げクリープ破壊強度 σ_{bc} と時間 t_{bc} の関係を Fig.6 に示す。図中の実線はクリープ破壊の実験点を最小二乗法により直線近似したものである。これより、 σ_{bc} は 1 min から 10^5 min の間に約 12% も低下し、大きな時間依存性を示していることがわかる。

3. クリープ破壊寿命の予測

CFRP のクリープ破壊寿命を求めるには長時間の試験が必要となるが、長時間にわたる試験は現実的には困難な場合が多い。そこで、比較的短時間に行える静的試験からクリープ寿命を求める予測法について提案する。

3.1 予測 I

Fig.2 のマスター曲線における静的曲げ強度 σ_{bs} とその換算破壊時間 t'_{bs} の関係がそのままクリープ破壊強度 σ_{bc} とそのクリープ破壊時間 t_{bc} の関係にそのまま適用

Fig.6 Relationship between creep rupture strength and rupture time.

Fig.7 Comparison of the estimations curve with the experiment for creep rupture time.

できるとして、クリープ破壊を予測したものが Fig.7 の一点鎖線であるが、この予測値は実験値と傾向的には一致するものの、予測値が実験値を上回り危険側の予測となる。

3.2 予測 II

次に、上記のマスター曲線に線形累積損傷則を適用した新しい予測方法を提案する。線形累積損傷則は次式で表現できる¹⁰⁾。

$$\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_{bc}(\sigma_i)} = 1 \quad (1)$$

ここで、 t_i は応力 σ_i の負荷時間、 $t_{bc}(\sigma_i)$ は一定応力 σ_i を負荷したときの破壊までの時間である。Fig. 8 に示すように、たとえば静的曲げ試験は応力が時間とともに階段的に変化するクリープ試験の連続と見なすことができ、線形累積損傷則は応力 σ_i が時間 t_i 負荷され

Fig.8 Schematic diagram illustrating a linear cumulative damage rule for creep test under flexural stress.

るとそれにもない破損が $t_i/t_{bc}(\sigma_i)$ だけ生じ、それが次々に累積された総和が1に達したとき破壊するとしたものである。この(1)式を、積分で表現すると次式となる。

$$\int_0^{t_{bs}} \frac{dt}{t_{bc}(\sigma_{bc})} = 1 \quad (2)$$

また、静的曲げ試験は定ひずみ速度試験であるが荷重-たわみ線図は線形である⁹⁾ ため定応力速度試験ともみなすことができる。このとき、ある時間 t_s での応力 σ_s は時間の関数で次式のように表現できる。

$$\sigma_s = \frac{\sigma_{bs}}{t_{bs}} t_s \quad (3)$$

一方、Fig.6 よりクリープ破壊強度 σ_{bc} と破壊時間 t_{bc} の関係を次式のように表現できるとする。

$$\sigma_{bc} = a_c - b_c \log t_{bc} \quad (4)$$

また、マスター曲線の $1 \sim 10^5$ min において、 σ_{bs} と t'_{bs} の関係も次式のように直線近似する。

$$\sigma_{bs} = a_s - b_s \log t'_{bs} \quad (5)$$

(4)、(5)式で、 a_c, b_c, a_s, b_s は実験から求まる定数であり、 $b_c = b_s$ となるとする。ついで、(3)、(4)および(5)式を用いて(2)式を積分すると次式を得る。

$$\sigma_{bc} = a_c - b_c \log \left(\frac{b_c}{\sigma_{bs}} t'_{bs} \right) \quad (6)$$

(4)、(6)式を比較すると t_{bc} と t'_{bs} の間には次式の関係がある。

$$t_{bc} = \frac{b_s}{\sigma_{bs}} t'_{bs} \quad (7)$$

この t'_{bc} が静的曲げ試験により予測されるときクリープ破壊時間となり、その予測結果を Fig. 7 の二点鎖線に示す。このようにして求めた予測値は実験値とは安全側でよく一致する。すなわち、長時間のクリープ破壊

強度を短時間の静的試験によって求めたマスター曲線に線形累積損傷則を用いることにより精度良くかつ安全側に容易に予測することができた。

4. 結 言

耐熱性エポキシ樹脂をマトリックスとする炭素繊維 CFRP 積層板の曲げクリープ破壊試験をマトリックスのガラス転移温度 $T_g=236^\circ\text{C}$ より十分低い室温近傍の 50°C 一定の温度において、種々の一定応力の下で行った。

クリープ試験の一定荷重負荷後において、試験片は対数時間経過に対してほぼ直線的にわずかなクリープ変形を生じ、クリープ破壊時間に達すると突然変形量が増大し、同時に圧縮側表面の荷重点付近の圧縮破壊とそれに続く層間はく離がともなって破壊する。このようにして求めた曲げクリープ破壊応力は、 T_g より十分低い常温近傍においても時間の経過にともないかなり大きく低下する。

一方、この CFRP 積層板を種々のひずみ速度および温度で静的曲げ試験を行い、時間-温度換算則を用いてマスター曲線を求め、このマスター曲線に線形累積損傷則を適用してクリープ破壊寿命を予測した。これと上述

のクリープ破壊試験結果と比較したところ、両者はよく一致し、ここで提案したクリープ破壊の予測法が妥当であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 宮野 靖, 鈴木克人: 材料, **23**, 255 (1974), 1057-1062.
- 2) 鬼頭 諒, 宮野 靖, 鈴木克人: 高分子論文集, **32**, 1 (1975), 55-60.
- 3) 鈴木克人, 宮野 靖, 天城滋夫: 材料, **24**, 259 (1975), 308-313.
- 4) 鬼頭 諒, 鈴木克人, 宮野 靖: 高分子論文集, **33**, 2 (1976), 89-95.
- 5) 鈴木克人, 宮野 靖: 材料, **25**, 270 (1976), 302-308.
- 6) 鈴木克人, 宮野 靖, 國尾 武: 高分子論文集, **33**, 5 (1976), 271-278.
- 7) K. Suzuki, Y. Miyano & T. Kunio: *J. Appl. Polym. Sci.*, **21** (1977), 3367-3379.
- 8) 金 光 学, 宮野 靖, 國尾 武: 材料システム, **1** (1982), 31-37.
- 9) 笠森正人, 大塚 猛, 新保 實, 宮野 靖: 材料, **41**, 463 (1992), 465-469.
- 10) 横堀武夫: 材料強度学 (第2版), 岩波書店, 東京 (1974), p.198.