

耐熱性エポキシ樹脂をマトリックスとする一方向CFRPの高温強度特性

日大生産工(院) ○井口 賢太郎 日大生産工 平山 紀夫

(株明電舎) 太田 智 (株明電舎) 萩原 崇之 (株明電舎) 小倉 和也

1 緒言

一方向に引き揃えた炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)は、非常に高い強度と剛性を有するため、航空機や自動車等の構造部材として積極的に利用されている。この一方向強化CFRPのマトリックス樹脂であるエポキシ樹脂は、ガラス転移温度(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⁾。そのため、一方向強化CFRPを高温域で長時間の負荷がかかるような環境で使用する場合には、クリープ破断や疲労による破断に対して十分な検討を行う必要がある。

本研究では、耐熱性の高いエポキシ樹脂をマトリックスとする一方向強化CFRPのクリープ破断強度の予測方法の検討を行う。そのため、フィラメントワインディング(FW)法により成形した一方向強化CFRPの曲げクリープ破断試験を実施し、クリープ破断時間の応力-温度依存性を調査した。そして、得られた試験結果に金属材料において用いられている代表的な破断寿命の予測手法の一つであるラーソン・ミラー法^{2)~3)}の適用を試み、CFRPへの適用可能性について評価した。

2 使用材料と成形条件

2.1 使用材料

使用材料には、強化材として炭素繊維(東レ(株), T720SC)を用い、マトリックス樹脂として耐熱性エポキシ樹脂(ナガセケムテックス(株), XNR6813)を用いた。

2.2 成形方法

一方向強化CFRP板は、FW法により平板に耐熱性エポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維を巻きつけた後、120℃/2hr + 180℃/4hrの条件でプレス装置により加熱加圧成形することで作製した。製作した一方向強化CFRPの平板は、板厚が $t=2\text{mm}$ で、炭素繊維体積含有率 V_f は、 $V_f=68.2\%$ であった。

3 動的粘弾性試験

作製した一方向強化CFRPのガラス転移温度 T_g と弾性係数の温度依存性を調べるため、動的粘弾性試験を行った。動的粘弾性試験装置には、DMS6100(セイコーインスツルメンツ社)を使用した。

動的粘弾性試験から得られた貯蔵弾性率 E' と損失正接 $\tan\delta$ をFig.1に示す。Fig.1より、ガラス転移温度 T_g は200℃付近であることが確認できる。また、貯蔵弾性率は T_g よりもかなり低い温度域においても、著しい温度依存性があることが確認できる。

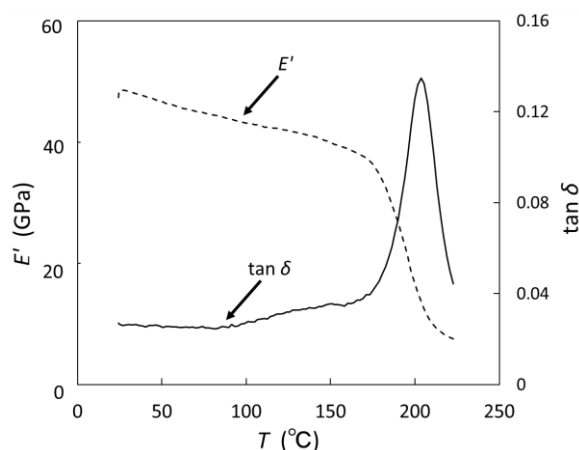


Fig.1 Dynamic viscoelastic properties of CFRP, measured at 1.0 Hz.

4 クリープ試験と破断時間の予測

4.1 3点曲げクリープ試験

作製した一方向強化CFRPの平板より、Fig.2に示すクリープ試験片を切り出し、曲げクリープ破断試験を行った。計測器には、シングル型クリープ試験機(東伸工業(株))を使用した。

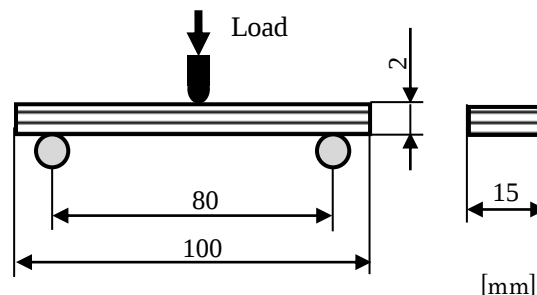


Fig.2 Schematic diagram of three-point bending creep test.

Elevated Temperature Mechanical Properties of Unidirectional CFRP with Heat-Resistant Epoxy Resin as the Matrix

Kentaro IGUCHI, Norio HIRAYAMA, Satoru OTA, Takayuki HAGIWARA
and Kazuya OGURA

4.2 ラーソン・ミラー法

高温環境下で長時間使用される構造部や機器の設計では、設計寿命よりクリープ破断時間が長くなるように使用温度と負荷応力を設定しなければならない。しかしながら、設計寿命に近い長時間のクリープ試験を行うことは現実的ではない。そこで、使用される温度環境よりも高温で促進試験を行い、その試験結果からクリープ破断時間を予測する様々な手法が提唱されている。これらの手法は、TTP(Time Temperature Parameter)法と呼ばれ、代表的なものとしてラーソン・ミラー法が提案されている。

ラーソン・ミラー法では、異なる温度におけるクリープ破断データ（負荷と破断時間の関係）を統一的に整理するために、式(1)のラーソン・ミラーパラメータ P を使用する。

$$P = T \{ \log_{10} t_r + C \} \quad (1)$$

ここで、 T は絶対温度(K)、 t_r は破断時間(hr)で、 C は材料定数であり、式(2)より求められる。

$$C = \frac{T_1 \log t_1 - T_2 \log t_2}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

式(1)の P は温度と時間がクリープ損傷に与える影響を表すパラメータであり、パラメータ P と負荷応力の関係が試験温度によらず、一つの関係式で表されることを利用し、高温短時間のクリープ破断データから、より低温長時間のクリープ破断寿命を予測することができる。なお、 T および t_r は、同じ負荷応力で、異なる試験温度での絶対温度と時間である。

5 結果および考察

曲げクリープ破断試験の結果をFig.3に示す。縦軸が負荷応力、横軸が破断時間である。この図から、本研究における一方強化CFRPは負荷応力と試験温度の低下に伴い、破断時間が長くなることがわかる。また、試験温度によらず破断応力と破断時間の関係がほぼ一定である。

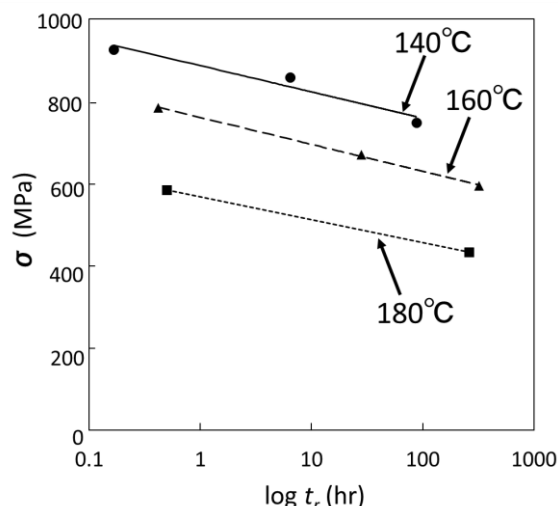


Fig.3 Relationship between the stress and creep rupture time at three temperatures.

次に、曲げクリープ破断試験の結果にラーソン・ミラーパラメータ P を適用したマスターラプチャ曲線をFig.4に示す。縦軸に負荷応力、横軸にラーソン・ミラーパラメータ P をとっている。この図から、3水準の温度における試験結果は、一本の近似直線で整理できることがわかる。したがって、本研究における一方強化CFRPには負荷応力、温度、破断時間の間に一定の関係があることがわかった。

したがって、本研究で検討した一方強化CFRPは、ラーソン・ミラー法の適用により、Fig.4に示した近似直線を利用して、使用される負荷応力と温度に対応した、破断寿命の予測が可能である。

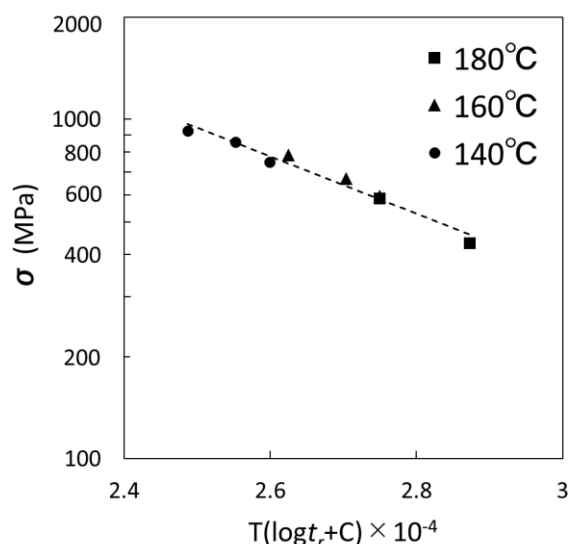


Fig.4 Master creep rupture curve.

6 結言

耐熱性エポキシ樹脂をマトリックスとする一方強化CFRPについて、様々な応力・温度水準のもとで曲げクリープ破断試験を行った。

その結果、一方強化CFRPが破断に至るまでの時間は、負荷応力と温度によって変化するが、試験結果はラーソン・ミラー法により整理することができ、任意の応力と温度における破断寿命の予測が可能であることがわかった。

<参考文献>

- 1) 宮野 靖, 笠森 正人, 平桜 康晴, エポキシ樹脂およびそれをマトリックスとするCFRP繊維直角方向の曲げクリープ挙動, 日本複合材料学会誌 19. 1 (1993), p.20-25.
- 2) 木村 一弘, 耐熱鋼のクリープ破断寿命予測, 日本金属学会誌 第73巻 第5号(2009), p.323-333.
- 3) 砂田 久吉, “演習 材料試験入門”, テクニカブックス, (1987), p.113.