平織 GFRP の疲労損傷過程に及ぼす負荷持続時間 および除荷持続時間の影響[†]

森 中 泰 章* 藤 井 透** 網 島 貞 男**

The Effect of Loading and Unloading Duration on Fatigue Damage Process of Plain Woven GFRP

by

Hiroaki MORINAKA*, Toru FUJII** and Sadao AMIJIMA**

This paper presents the effect of loading and unloading duration on the fatigue damage process of plain woven GFRP. Specimens were subjected to three kinds of rectangle wave loading having different combinations of loading and unloading duration. All loading waves had the same maximum cyclic stress. Fatigue life, modulus decay, AE events and residual strength were measured. In-situ observation of internal damage of GFRP was conducted using an optical microscope with a video recording system.

From the study, the following conclusions were obtained. The fatigue life is influenced by not only loading duration but also unloading duration. The fatigue life is short in the case that loading or unloading duration is long. Modulus decay in the fatigue process is affected by unloading duration, while it is not affected by loading duration. The residual strength is independent on both loading and unloading duration. In the case of short loading duration, debonding in the weft bundle becomes wide with an increase of number of cycles, but the rate is low. Few of debonding in the weft bundle propagate transversely and few AE events are detected in the case of short unloading duration regardless of loading duration. Both loading and unloading duration affect the growth mode of debonding in the weft bundle. These effects of loading and unloading duration on fatigue damage process may be explained by the difference in growth mode of debonding in the weft bundle.

Key words: Fatigue, Plain woven cloth, GFRP, Microscopic examination, Modulus decay, Damage process, Debonding

1 緒 言

FRP を用いた機械構造物の安全性および信頼性の高い設計を行う場合、材料の疲労特性および疲労寿命について十分検討しておく必要がある。従来の実働荷重下における FRP の疲労に関する研究では、実働荷重の周波数分析や頻度分析に基づいて疲労寿命予測を行うことに力点が置かれていた。これらの研究では、FRP の疲労破壊についてのマイクロメカニズムが考慮されていなかったため、疲労寿命予測の手法を確立するまでには至っていない。例えば、単に一般の S-N 線図における最大繰返し応力の値だけで疲労寿命を評価することは困難である。FRP の場合、母材としてプラスチックが用いられているため、粘弾性的性質に基づいたさまざまな時間効果について考慮する必要がある。そこで、最近では実働荷重下における FRP の疲労寿命予測の手法を確立するため、さまざま

な角度から疲労損傷過程を解明しようとする研究が行われている。

網島らは実働荷重下における疲労寿命あるいは寿命予測に関する一連の研究を行い、さまざまな寿命予測を提案した。Chim⁴⁾らは破壊までの負荷持続時間の総和を短いクリープの累積と考え、クリープの影響について検討し、疲労荷重と静的荷重を交互に負荷すると疲労寿命が増加することを示した。Crowther⁶⁾や Mandell⁸⁾らは負荷持続時間と疲労挙動の関係について言及し、破断までの負荷持続時間の総和とクリープ負荷時間が同じであっても、繰返し荷重はクリープ荷重に比べて材料を著しく劣下させることを示した。しかし、彼らは繰返し荷重における無負荷状態である除荷持続時間が疲労損傷過程に及ぼす影響についてはまったく考慮していない。そこで、我々は負荷持続時間のみならず、疲労損傷に及ぼす除荷持続時間の影響に着

[†] 原稿受理 平成 2 年 7 月 30 日 Received July 30, 1990

* 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区今出川烏丸, Graduate Student, Doshisha University, Imadegawa-Karasuma, Kamigyo-ku, Kyoto

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区今出川烏丸, Faculty of Engineering, Doshisha University, Imadegawa-Karasuma, Kamigyo-ku, Kyoto

目した。

本研究の目的は、除荷持続時間を考慮した 3 種類の台形波荷重が平織 GFRP の疲労損傷過程に及ぼす影響を明らかにすることである。

2 試験片および実験方法

本研究に用いた試験片は、強化材として平織ガラス布、母材として不飽和ポリエステル樹脂を用いた平織 GFRP 積層板である。積層板の構成素材を Table I に示す。積層板は手積法により製作した。ガラス体積含有率は 33% である。試験片の形状、寸法を Fig. 1 に示す。試験片形状は、破断部を特定するため平行部を持たないダンベル型とした。変位計の標点間距離は、ダンベル曲率半径と比較して十分短い 12.5 mm とした。有限要素法を用いた弾性応力解析結果によれば標点間内での応力-ひずみの分布に大きな偏りは見られなかった。

疲労試験には、負荷持続時間 $t_{\max}$ 、除荷持続時間 $t_{\min}$ の組合せを変えた 3 種類の台形波荷重を用いた (Fig. 2 参照)。各荷重波形の条件を Table II に示す。

Table II の条件に従って、以下、SL 波、LS 波、LL 波と称する。疲労試験における最大繰返し応力は、静的強度の 53% である。

AE 現象の計測には、2 チャンネルの広帯域センサを用いた^{*1}。しきい値は、センサの周波数感度特性からもっとも適切と考えられる 80 dB とした。AE センサの取付位置を Fig. 1 に示す。試験は室温下で行った。

疲労損傷過程を微視的に評価するため、疲労試験中、光学顕微鏡とビデオを使用して内部観察を行った。内部観察には、強化材であるガラス布が 1 枚のみの 1 枚積層試験片を用いた。厚さは 0.25 mm とした。1 枚積層試験片を用いた理由は、ガラス布が 1 枚であると他のガラス布と重ならないため、疲労損傷状態が明確に観察できるからである。疲労試験の条件は 12 枚積

Fig. 1. Specimen geometry.

Fig. 2. Loading waveform.

層試験片の場合と同様とした。

3 実験結果

3・1 疲労寿命

各荷重波形下での疲労寿命をワイブル確率紙上にプロットした結果を Fig. 3 に示す。図より、荷重波形によって、疲労寿命が異なることがわかる。SL 波および LS 波荷重下における疲労寿命を比較すると、LS 波荷重下での疲労寿命は SL 波荷重下の場合に比べてわずかに短くなった。しかし、ばらつきを考慮すると、両者に明らかな差があるとは言えない。一方、SL 波および LS 波荷重下における疲労寿命と LL 波荷重下における疲労寿命を比較すると、LL 波荷重下

*1 NF AE-900S-WB, AE 解析機 NF U-PLOT 9502, 真空用グリスをカップリング剤として使用。

Table I. Materials of laminate.

Matrix	Polyester resin (Polylite FG-284)
Reinforcement	Plain woven glass cloth (MG-252)
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardener	Cobalt naphthenate 0.6% solution

Table II. Parameters of loading waveform.

Waveform	Loading duration $t_{\max}$ [sec]	Unloading duration $t_{\min}$ [sec]	Period [sec]	Maximum cyclic stress $\sigma_{\max}$ [MPa]	Minimum cyclic stress $\sigma_{\min}$ [MPa]
SL	0.10	0.82	1.00	131	0
LS	0.82	0.10	1.00		
LL	0.82	0.82	1.72

Fig. 3. Weibull probability plot of fatigue life.

の方が SL 波および LS 波荷重下の場合より短いと言える。SL 波, LS 波, LL 波荷重下におけるワイブル分布によって評価された疲労寿命の期待値は, それぞれ 4370, 4010, 3030 cycle であった。

疲労寿命に及ぼす負荷持続時間の影響について述べる。除荷持続時間が一定で負荷持続時間が異なる SL 波および LL 波荷重下での疲労寿命を比較すると, 負荷持続時間が長い LL 波荷重下における疲労寿命の方が短くなった。このことより, 負荷持続時間が長いと疲労寿命は短くなると考えられる。

つぎに, 疲労寿命に及ぼす除荷持続時間の影響について述べる。負荷持続時間が一定で除荷持続時間が異なる LS 波および LL 波荷重下における疲労寿命を比較すると, 除荷持続時間が長い LL 波荷重下における疲労寿命の方が短くなった。このことより, 除荷持続時間が長いと疲労寿命は短くなると考えられる。つまり, 負荷持続時間だけでなく無負荷の状態である除荷持続時間も平織 GFRP の疲労寿命に大きな影響を及ぼすことがわかる。

3・2 剛性低下

各荷重波形下における代表的な剛性低下曲線を Fig. 4 に示す。

Fig. 4. Relation between modulus decay and cycle ratio.

Fig. 5. Relation between total AE counts and cycle ratio.

剛性低下に及ぼす負荷持続時間の影響について述べる。SL 波および LL 波荷重下における剛性低下曲線を比較すると, 両者はほぼ同程度であった。

つぎに, 除荷持続時間の影響について述べる。LS 波および LL 波荷重下における剛性低下曲線を比較すると, LS 波荷重下における剛性低下は LL 波荷重下の場合と比較して小さく, 破断直前での LS 波荷重下における剛性低下率は LL 波荷重下の場合の約 2 分の 1 であった。このことより, 除荷持続時間が短いと剛性低下は小さくなることがわかる。

一般に, 剛性低下は疲労損傷の程度を示すパラメータの一つであると考えられている^{8),9)}。しかし, 剛性の低下率が同じであっても除荷持続時間が異なれば疲労寿命が異なるので, 剛性低下率のみをもって疲労寿命を予測することはできないようである。

3・3 AE 現象

各荷重波形下における代表的な AE 総カウント数の測定結果を Fig. 5 に示す。疲労初期において, 除荷持続時間の長い SL 波および LL 波荷重下における AE 総カウント数は同程度であり, 除荷持続時間の短い LS 波荷重下の場合よりも多くなった。疲労中期以降になると, 各荷重波形下における AE 総カウント数はあまり増加しなかった。

3・4 残留強度試験

各荷重波形下における残留強度試験の結果を Fig. 6 に示す。荷重波形が残留強度に及ぼす影響は明確には見られなかった。この理由については以下で考察する。

3・5 内部観察

12 枚積層試験片を用いて疲労試験を行った場合と 1 枚積層試験片を用いた場合とでは, 疲労寿命, 剛性低下, AE 総カウント数, 残留強度は同程度であった。内部観察についても, 両者の試験片の場合の試験結果を比較すると同じであったので, 内部観察には観察が

Fig. 6. Relation between residual strength and cycle ratio.

容易である1枚積層試験片を用いた。1枚積層試験片に疲労試験を行いながら、同時に光学顕微鏡とビデオを用いることによって内部観察された平織GFRPの疲労損傷過程について以下に示す。どの荷重波形下の場合でも、疲労初期には縦繊維束と交差している横繊維束の内部に横繊維糸に沿って複数のはく離^{*2}(Debonding)が発生した (Fig. 7 参照)。これは、繰返し数が数回から数十回の疲労の極く初期で生じた。繰返し数の増加に伴い、横繊維束内のはく離は横繊維糸に沿って進展し、その後見かけ上、太く成長した。そして、横繊維束内のはく離と接している縦繊維束内にも、はく離が発生した。横繊維束内のはく離がある程度太く成長すると、そのはく離と接している縦繊維束が破断し、同時に試験片は破壊した。ただし、荷重波形が異なれば横繊維束内のはく離の進展状態は異なった。各荷重波形下における疲労損傷状態を Fig. 8 (a), (b), Fig. 9 (a), (b) に、模式的に示す。

LS 波荷重下では、Fig. 8 (a), (b) に示すように、横繊維束内のはく離は横繊維糸に沿ってあまり進展せず、ほとんどののはく離は独立した状態で見かけ上太く成長

Fig. 7. Microscopic damage under LS wave loading at early stage.

Fig. 8. Internal damage process under LS wave loading.

し、ある程度の太さになると試験片は破断した。

SL 波および LL 波荷重下では、Fig. 9 (a), (b) に示すように、横繊維束内のはく離は横繊維糸に沿って進展し、隣の交差部から進展したはく離と結合した。その後、LS 波荷重下の場合と同様に、はく離は太く成長し、ある程度の太さになると試験片は破断した。

なお、負荷持続時間の長い LS 波および LL 波荷

Fig. 9. Internal damage process under SL or LL wave loading.

*2 横繊維束内の損傷は、透過光を用いて低倍率の光学顕微鏡により観察しているため、繊維糸に沿うはく離(Debonding)は黒い影(線)として観察される。一本一本の素線に沿うはく離を識別することは困難で、一カ所で Debonding の数が増加すると黒い影として現れる。本論文では Debonding をはく離と呼び、その数の増加によって見かけの影が太くなることを、顕微鏡観察と対応させてはく離が太くなると表現した。

重下で発生した横繊維束内のはく離のほうが、負荷持続時間の短い SL 波荷重下の場合より、速く太く成長した。

4 考 察

4・1 疲労損傷進展過程に及ぼす負荷持続時間の影響

除荷持続時間が一定で負荷持続時間が異なる SL 波と LL 波荷重下における疲労寿命を比較すると、負荷持続時間が長い場合、短い場合よりも疲労寿命は短い。このことは、負荷持続時間が秒単位と非常に短いながらも、負荷持続時間中の FRP の破壊の進展を短時間内のクリープ的現象として捉えれば容易に理解される。¹⁰⁾ 負荷持続時間が長ければ疲労荷重 1 サイクル当りの試験片に生じる損傷は負荷持続時間が短い場合より大きくなる。したがって、最大繰返し応力が一定であれば、負荷持続時間が長い場合、最終破断に至るまでの繰返し数すなわち疲労寿命は短くなると考えられる。

一方、ここで注目すべきことは、除荷持続時間が一定である SL 波および LL 波荷重下では疲労寿命が異なるものの、寿命比に対する疲労損傷過程が互いに似ているということである。AE 総カウント数は両者とも疲労初期に大きく増加し、中期以降その増加率は減少する。破断直前の AE 総カウント数の値も両者に大きな差は見られない。剛性低下に関して、両者はほぼ一致すると言える。これらのことから、疲労寿命が異なっても、両者の基本的な疲労損傷過程は似ていると推察される。実際、強化繊維布を一枚のみ用いた試験片による疲労試験の結果より、両者の試験片内部での疲労損傷過程が似ていることがわかった。負荷持続時間の長短による疲労損傷過程への影響は、横繊維束内のはく離がある一定の太さにまで成長するのに要する時間のみである。負荷持続時間が長い場合、短い場合よりも横繊維束内のはく離は速く太く成長する。この負荷持続時間の長短による横繊維束内のはく離の成長速度の違いについても、上述と同様に、高分子材料の破壊に及ぼす短時間内のクリープ的現象として捉えれば理解できる。負荷持続時間が長い場合疲労荷重 1 サイクル当りの試験片に与える損傷は、負荷持続時間の短い疲労荷重の場合より大きくなると考えられる。そのため、横繊維束内のはく離は速く太く成長したものと考えられる。

したがって、除荷持続時間が一定で負荷持続時間が異なる場合、両者の疲労損傷過程は似ているため特に寿命比に対する剛性低下および AE 総カウント数は同じ傾向を示すものの、1 サイクル当りの横繊維束内のはく離の太さの成長速度が違うため疲労寿命は異なると考えられる。

4・2 疲労損傷進展過程に及ぼす除荷持続時間の影響

無負荷の状態である除荷持続時間が異なる場合、負荷持続時間が一定であっても、疲労寿命、剛性低下、AE 現象は異なる。除荷持続時間の短い LS 波荷重下のほうが長い LL 波荷重下より、剛性低下が小さく AE 総カウント数が少ない。このことから、剛性低下と AE 総カウント数は対応していることがわかる。また、除荷持続時間が異なると、試験片内部の疲労損傷過程にも違いが見られる。繰返し数が増加しても、LS 波荷重下の場合、横繊維束内のはく離は、LL 波荷重下の場合ほど横繊維系に沿って進展せず、隣に発生するはく離とはあまり結合しない。そのため、除荷持続時間が短い場合、長い場合と比較して、見かけの剛性低下が小さく、はく離が横繊維系に沿って進展する際に発生する AE が少ないため AE 総カウント数は少ない。また、繰返し数の増加と共に横繊維束内のはく離は太く成長していくものの横繊維系に沿って進展せず、あまりはく離同士結合しないため、はく離の長さは短い。その結果、負荷時のはく離の開口が抑えられ、これらのはく離と交差部にある縦繊維束へのダメージの度合は、はく離同士が結合する LL 波荷重下の場合より低くなると考えられる。そのため、LS 波荷重下の疲労寿命は、LL 波荷重下の場合と比較して長くなると考えられる。

ここで、除荷持続時間の影響を、母材の粘弾性特性の観点から考える。粘弾性的性質を顕著に表す高分子材料が母材である複合材料では、一定時間負荷をかけたあと急速に除荷しても、母材と繊維との界面の応力は直ちにゼロとはならず、この応力が充分緩和されるまでには短いながらも有限の時間を要する。すなわち、試験片に加わる荷重が急速に変動する場合、粘弾性的性質を有する樹脂と弾性体とみなすことのできるガラス繊維との組合せである複合材料内の応力は、荷重と同様な変動をするわけではない。除荷持続時間が短い場合、除荷すると界面の応力は低下するが、ゼロまで低下する前に次の負荷が加わる。これに対し、除荷持続時間が長い場合、除荷すると界面の応力が充分緩和し、その後次の負荷が加わる。このことから、除荷持続時間が短い場合、長い場合と比較して、見かけの応力振幅が小さいと推測できる。そのため、除荷持続時間が短い場合、長い場合と比較して、横繊維束内のはく離が 1 サイクル当り横繊維系に沿って進展する長さは短く、繰返し数の増加に対する剛性低下も小さい。また、AE 総カウント数も少なくなり、疲労寿命が長くなったと考えられる。

一方、Fig. 6 に示すように、残留強度に及ぼす荷重波形の明確な影響は見られなかった。本研究では、各

荷重波形下において縦繊維束内の繊維の破断は観察されなかった。また、横繊維束と交差している縦繊維束内にもはく離が発生するものの、はく離は縦繊維糸に沿ってあまり進展しなかった。処女材を静的引張破壊させる場合、疲労試験の場合と同様、試験片全域で縦繊維束との交差点を起点として発生する横繊維束内のはく離は、負荷の増加とともに横繊維糸に沿って進展し、同様にして進展してきた隣りの交差点を起点とするはく離と結合する。そして、横繊維束内のはく離が太く成長するとともに縦繊維束内にもはく離が発生する。その後、縦繊維の破断が生じ、最終破壊に至る。疲労試験片を用いた残留強度試験においても同様な破壊過程をたどる。しかし、この場合、すでに疲労試験により試験片の横繊維束内にはく離が発生しているため、ある程度の負荷まではく離は成長しない。LS 波荷重下で任意の繰返し数まで疲労試験を行った後、残留強度試験を行う場合、疲労試験では横繊維束内のはく離同士があまり結合していないものの、準静的荷重によりやがて結合して連続する。そのため、LS 波荷重を用いた後の残留強度と LL 波荷重を用いた場合とでは大きな違いが生じなかったものと思われる。また、SL 波荷重下で任意の繰返し数まで疲労試験を行った後、残留強度試験を行う場合、疲労試験の段階では横繊維束内のはく離があまり太く成長していないものの、準静的荷重によりやがて太く成長する。そのため、SL 波荷重を用いた後の残留強度と LL 波荷重を用いた場合とで大きな違いが生じなかったものと思われる。したがって、各荷重波形下における残留強度は同程度になったと考えられる。

5 結 言

本研究の結果、負荷および除荷持続時間は平織 GFRP の疲労損傷過程に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。まとめると以下の通りである。

(1) 除荷持続時間が一定で負荷持続時間が異なる場

合、負荷持続時間の長い台形波荷重下における疲労寿命は短くなった。負荷持続時間が一定で除荷持続時間が異なる場合、除荷持続時間が長い台形波荷重下における疲労寿命は短くなった。

(2) 除荷持続時間の短い台形波荷重下における剛性低下は、長い場合と比較して小さくなった。

(3) 除荷持続時間が短い台形波荷重下における AE 総カウント数は、長い場合と比較して少なくなった。

(4) 残留強度に及ぼす負荷および除荷持続時間の影響は明確には見られなかった。

(5) 疲労寿命および剛性低下は横繊維束内のはく離の成長状態に依存していた。

終わりに、本研究を遂行するにあたり種々のご助言を賜った近畿大学工学部松岡 敬氏、さらに、材料の提供をしていただいた大日本インキ化学工業(株)に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) J. C. Halpin, J. Composite Materials, **6**, 208 (1972).
- 2) J. N. Yang and D. L. Jones, J. Composite Materials, **12**, 371 (1978).
- 3) J. N. Yang, R. K. Miller and C. T. Sun, J. Composite Materials, **14**, 82 (1980).
- 4) 網島貞男, 谷本敏夫, 松岡 敬, 材料, **30**, 1123 (1981).
- 5) 網島貞男, 谷本敏夫, 松岡 敬, 材料, **31**, 1156 (1982).
- 6) E. S. Chim and C. T. Sun, ASTM STP 723, 233 (1981).
- 7) M. F. Crowther, R. C. Wyatt and M. P. Phillips, Composites Science and Technology, **36**, 1 (1989).
- 8) J. F. Mandell and U. Meier, ASTM STP 813, 55 (1983).
- 9) 増田雄市郎, 日本機械学会論文集, A-47, 1266 (1981).
- 10) R. W. Hertzberg, R. J. Manson and M. D. Skibo, Polym. Eng. Sci., **15**, 252 (1974).