平織 GFRP の疲労損傷過程に及ぼす 二段階組合わせ荷重の影響†

森 中 泰 章* 藤 井 透**

Effect of Load Sequence on Fatigue Damage of FRP Reinforced Plain Woven Glass Fabric

by

Hiroaki MORINAKA* and Toru FUJII**

This paper presents the effect of load sequence on fatigue damage of FRP reinforced by plain woven glass fabric. Two stage pulse loading was applied to the specimen. The specimen was subjected to the first pulse load up to 1000 cycles, and then the second pulse load having a different wave profile from the previous pulse was applied to the specimen until it failed.

The following conclusions were obtained from this study.

(1) The fatigue life under the two stage loading can be roughly estimated by the Miner's rule although the experimental fatigue life is about 30% shorter than the predicted one.

(2) The inherent characteristics in stiffness reduction under the second pulse loading cannot be identified due to the large stiffness reduction caused by the first pulse, while the specimen shows the inherent stiffness reduction given only by the second pulse even at the second stage in the case that the pulse load at the first stage does not cause the large stiffness reduction. The similar result is obtainable on the AE records.

(3) It is found that the stiffness reduction is not the appropriate parameter for the degree of fatigue damage. Namely, it is hard to predict the fatigue life from the observation of the stiffness under pulse loadings.

Key words : Fatigue, FRP, Plain, Woven glass fabric, Internal damage, Stiffness, AE

1 緒 言

著者らは、先にパルス波荷重の負荷持続時間および除荷(無負荷の状態)持続時間が平織 GFRP の疲労損傷過程にどのような影響を及ぼすかを明らかにしてきた¹⁾。最大繰返し応力が同じ場合、パルス波荷重の負荷持続時間が長くなれば、疲労寿命は短くなる。さらに、最大繰返し応力および負荷持続時間が同じであっても、無負荷の状態である除荷持続時間が異なれば、疲労寿命および剛性低下も異なることがわかった。Fig. 1 に示すように、特に剛性低下については除荷持続時間の長い LL 波荷重下の場合、繰返し寿命比が約 3 分の 1 のとき、既に除荷持続時間の短い LS 波荷重下での破断直前の剛性低下に達していた。さらに、両者の破断直前の剛性低下を比較すると、前者は後者の約 2 倍であった。

最大繰返し応力が一定の場合、剛性低下は疲労損傷の程度を表すパラメータであり、剛性が材料固有の値

に達すると部材が破断すると報告されている^{2)~5)}。しかし、前報¹⁾の剛性低下の計測結果を彼らの報告に照らし合わせると大きな疑問が生じる。剛性がある固有の値に達したときに試験片が破断すると考えるならば、除荷持続時間の長い LL 波荷重を用いて寿命比 3 分の 1 まで疲労試験を行った後、除荷持続時間の短い LS 波荷重で疲労試験を行えば、すぐに試験片は破断することになる。なぜなら、荷重波形を LL 波荷重から LS

Fig. 1. Modulus decay under single pulse loading.

† 本報を「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(第2報)」(Effect of Load Sequence on Fatigue Damage of FRP reinforced Plain Woven Glass Fabric, II)とする。また、前報は材料 40巻454号908~913頁(1991年)に掲載済である。

原稿受理 平成4年8月3日 Received Aug. 3, 1992

* 学生会員 同志社大学大学院 〒602 京都市上京区今出川烏丸, Graduate Student, Doshisha Univ., Kamigyo-ku, Kyoto, 602

** 正会員 同志社大学工学部機械工学科 〒602 京都市上京区今出川烏丸, Dept. of Mech. Eng., Doshisha Univ., Kamigyo-ku, Kyoto, 602

波荷重に変えたとき, 既に LS 波荷重下における破断直前の剛性低下に達しているためである。

本研究の目的は, 疲労試験中, パルス波荷重を他のパルス波荷重に変えた場合, その後の剛性低下や疲労寿命等にどのような影響が現れるのかを明らかにすることである。また, 荷重波形が変化する場合, 剛性が疲労寿命を推定する上で適切なパラメータとなり得るのかについても, 再度検討する。これにより, 実働荷重下における疲労寿命推定の一助とする。

2 試験片および実験方法

試験片の形状, 寸法を Fig. 2 に, 構成素材を Table I に示す。平織ガラス布の積層枚数は 12 枚である。試験片並びに実験方法は前報と同じである。

Fig. 2. Dimensions of the specimen.

本研究では, 基本的に負荷持続時間 $t_{\max}$, 除荷持続時間 $t_{\min}$ の組合わせを変えた三種類のパルス波荷重を用いた (Fig. 3 参照)。疲労試験中, 繰返し数第 1 回目から 1000 回目まで一つのパルス波荷重で試験片に負荷し, その後 1001 回目から他のパルス波荷重に変えた。ここで, 疲労試験中他のパルス荷重に変えた荷重を二段階組合せ荷重と呼ぶ。試験片が破断するまで一つのパルス波荷重のみ負荷した場合の荷重を単一パルス波荷重と称する。荷重波形の条件を Table II に示す。Table II の条件に従って, 以下, 各二段階

Table I. Materials of the specimen.

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

Fig. 3. Pulse loading wave profile.

組合せ荷重を SL-LS 波, SL-LL 波, LS-SL 波, LS-LL 波, LL-SL 波, LL-LS 波と呼ぶ。試験片本数はいずれの荷重条件についても 6 本以上である。実験はいずれも実験室環境下, 室温で行った。

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カメラ・レコーダを使用して内部観察を行った。内部観察には前報と同様, 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。

3 実験結果

3・1 疲労寿命

二母数ワイブル分布によって評価された二段階組合せ荷重下における疲労寿命の期待値を Fig. 4 に示す。

3・2 剛性低下

二段階組合せ荷重下における繰返し数の増加に対する剛性低下の代表例を Fig. 5 に示す。参考のため, 単一パルス波荷重波形下における剛性低下についても併せて示してある。

Table II. Parameters of pulse wave for two stage pulse loading.

Condition of loading wave	Fatigue cycle from 1 to 1000			Fatigue cycle from 1001		
	Loading duration $t_{\max}$ (sec)	Unloading duration $t_{\min}$ (sec)	Period (sec)	Loading duration $t_{\max}$ (sec)	Unloading duration $t_{\min}$ (sec)	Period (sec)
SL-LS	0.10	0.82	1.00	0.82	0.10	1.00
SL-LL	0.10	0.82	1.00	0.82	0.82	1.72
LS-SL	0.82	0.10	1.00	0.10	0.82	1.00
LS-LL	0.82	0.10	1.00	0.82	0.82	1.72
LL-SL	0.82	0.82	1.72	0.10	0.82	1.00
LL-LS	0.82	0.82	1.72	0.82	0.10	1.00

Fig. 4. Fatigue life.

Fig. 5. Modulus decay under single and two stage pulse loadings.

3・3 AE 現象

試験片によるばらつきが大きいので、試験条件ごと、すべての試験片について平均した繰返し数の増加に対する AE 総カウント数を Fig. 6 に示す。参考のため、単一パルス波荷重下における代表的な AE 総カウント数についても Fig. 6 に示す。前報では、単一パルス波荷重下における AE 総カウント数として代表的な例を載せたが、ここでは二段階組合せ荷重の場合と同様平均した結果を示す。

3・4 内部観察

内部観察から明らかとなった平織 GFRP の疲労損傷過程について述べる。前報でも述べたが、どの荷重

Fig. 6. Total AE event counts under single and two stage pulse loadings.

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系に沿って複数のはく離が発生した。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系に沿って進展し、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。

SL-LS 波および SL-LL 波荷重下の場合、前段の SL 波荷重下では、Fig. 7(a)-1, (b)-1 に示すように、横繊維束内のはく離は横繊維系に沿って進展し、隣りの交差部から進展してきたはく離と結合した。繰返し数の増加に伴い、はく離は太く成長した。パルス波荷重を LS 波および LL 波荷重に変えると、繰返し数の増加に伴い徐々に太く成長し、ある程度の太さになると試験片は破断した。

LS 波荷重下では、Fig. 7(a)-2, (b)-2 に示すように、横繊維束内のはく離は横繊維系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、繰返し数の増加に伴い、見かけ上太く成長した。パルス波荷重を SL 波および LL 波荷重に変えると、Fig. 7(c) に示すように、横繊維束内のはく離は横繊維系に沿って進展し、隣りの交差部から進展してきたはく離と結合した。はく離は太く成長し続け、ある程度の太さになると試験片は破断した。負荷持続時間の長い LL 波荷重に変えた場合の横繊維束内のはく離の方が、短い SL 波荷重に変えた場合より、1 サイクル当たり速く太く成長した。前報で示したように、除荷持続時間の短い LS 波荷重下において、横繊維束内のはく離が横繊維系に沿ってあまり進展しなかった理由は母材の粘弾性特性の観点から以下のように考えられる。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 SL 波、LL 波荷重下の場合、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

Fig. 7. Schematic illustration of fatigue damage process.

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糸に沿って進展する長さは短かった。

LL波荷重下では、Fig. 7(a)-3, (b)-3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、隣りの交差部から進展してきたはく離と結合した。繰返し数の増加に伴い、はく離は太く成長した。この場合の横繊維束内のはく離の方が、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。パルス波荷重をSL波およびLS波荷重に変えた後も特に大きく変化せず、繰返し数の増加に伴い、横繊維束内のはく離は徐々に太く成長した。

なお、各二段階組合せ荷重下において、縦繊維束内にはく離は発生するものの、目視による観察では縦繊維の損傷は破断するまで見られなかった。

4 考 察

4・1 疲労寿命

前報¹⁾で示したように単一パルス波荷重下における疲労寿命は、LL波荷重下の方がLS波およびSL波荷重下の場合より短かった。単一パルス波荷重下における繰返し数1回当りの疲労損傷の程度が等しいと考えると、LL波荷重を含む二段階組合せ荷重下における疲労寿命は、他の組合せ荷重に比べて短くなると推

測される。LS-SL波あるいはSL-LS波荷重下での疲労寿命が最も長くなると推測される。試験条件に大きな違いがない場合には第1近似的にマイナー則に示される疲労損傷の線形加算則が複合材料(FRP)にも有効である⁶⁾⁻⁷⁾。そこでマイナー則を適用して、異なるパルス波荷重を組合わせた二段階組合せ荷重下での疲労寿命について検討してみる。

前段および後段のパルス荷重波形下での繰返し数比を n_1/N_1 , n_2/N_2 とし、これらの和をもって線形加算則値 D を定義する。マイナー則ではこれが1になったときに破壊が生じると考える。すなわち、

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

n_1 : 前段の繰返し数 (ここでは1000回)

n_2 : 後段での破断までの繰返し数 (推定値)

N_1, N_2 : 前段および後段のパルス波荷重のみで疲労試験を行った場合の二母数ワイブル分布¹⁾によって評価された疲労寿命

とする。

次式から二段階組合せ荷重下における疲労寿命の推定値 N_{total} が求まる。

$$N_{total} = n_1 + n_2$$

疲労寿命の推定値をFig. 4に示す。図では左から右に実験から得られた疲労寿命が長い順に並べてある。

各二段階組合せ荷重下における疲労寿命について、実験値と推定値を比較すると寿命の長短は SL-LS 波を除いて、両者はほぼ同じ傾向を示す。しかし、実験から得られた疲労寿命は、推定された疲労寿命に比べてすべて短い。二種類のパルス波荷重を試験片に負荷した場合、それぞれのパルス波荷重下における疲労損傷形態が異なるため、疲労寿命は必ずしも線形加算則的な値にはならないようである。実際、マイナー則では荷重履歴による干渉効果を見逃しているため、必ずしも $D=1$ で破壊が起こるわけではなく、 D の値を 1 以下の値に修正して用いるようである⁸⁾。本研究の場合、 D の値を 0.8 から 0.9 にすると、実験から得られた疲労寿命は推定値と一致した。

これらのことから、マイナー則を用いることによって、二段階組合せ荷重下における疲労寿命の長短の傾向は判るが、疲労寿命そのものを予測することは困難であることが明らかとなった。

4・2 剛性低下

二段階組合せ荷重が剛性低下に及ぼす影響について述べる。

SL-LL 波荷重下における剛性低下と、単一パルス波荷重である SL 波および LL 波荷重下における剛性低下を Fig. 8(a) に示す。それぞれの荷重波形下での疲労寿命は異なるものの、破断直前の剛性低下は同程度である。SL 波荷重および LL 波荷重下における剛性低下が同程度であるため、SL-LL 波荷重下における後段の LL 波荷重下での剛性低下において顕著な変化は見られないと考えられる。同様なことは、LL-SL 波荷重を用いた場合についても言える。LL-SL 波荷重、LL 波荷重および SL 波荷重下における繰返し数の増加に対する剛性低下を Fig. 8(b) に示す。

Fig. 8. Modulus decay (a) under SL, SL-LL, LL, (b) under SL, LL-SL, LL.

三者の剛性低下は同程度である。上述と同様、LL 波荷重および SL 波荷重下での剛性低下が同程度であるため、LL-SL 波荷重下における後段の SL 波荷重下での剛性低下において顕著な変化は見られないと考えられる。

LL-LS 波荷重下における剛性低下と LL 波および LS 波荷重下における剛性低下を Fig. 9(a) に示す。LL-LS 波荷重および LL 波荷重下における剛性低下は同程度である。前報で示したように LS 波荷重下における剛性低下は LL 波荷重下の場合より小さく、LS 波荷重の方が LL 波荷重より剛性低下に及ぼす影響は小さいと考えられる。LL-LS 波荷重下において、荷重波形を後段で剛性低下の小さい LS 波荷重に変えたにもかかわらず、剛性低下に顕著な変化がなく LL 波荷重下での場合と同程度である理由は次のように考えられる。LL-LS 波荷重下での後段の LS 波荷重下における剛性低下において、既に前段の LL 波荷重の影響を強く受けたため LS 波荷重の特性が現れず、顕著な変化は見られなかった。同様なことは、SL-LS 波荷重を用いた場合についても考えられる。SL-LS 波荷重、SL 波荷重および LS 波荷重下における繰返し数の増加に対する剛性低下を Fig. 9(b) に示す。SL-LS 波荷重下での後段の LS 波荷重下における剛性低下において、既に前段の SL 波荷重の影響を強く受けたため LS 波荷重の特性が現れず、顕著な変化は見られなかったと考えられる。

LS-LL 波荷重下における剛性低下と LS 波および LL 波荷重下における剛性低下を Fig. 10(a) に示す。それぞれの剛性低下は異なっている。前報で示したように LL 波荷重下における剛性低下は LS 波荷重下の場合より大きかった。LL 波荷重は LS 波荷重より

Fig. 9. Modulus decay (a) under LS, LL-LS, LL, (b) under LS, SL-LS, SL.

Fig. 10. Modulus decay (a) under LS, LS-LL, LL, (b) under LS, LS-SL, SL.

剛性低下に大きな影響を及ぼす。そのため、前段でのLS波荷重下での荷重履歴に関わらず、後段のLL波荷重下では単一パルス波荷重であるLL波荷重下での剛性低下の特性が現れ、繰返し数の増加に伴い大きく変化したのではないかと考えられる。同様なことはLS-SL波荷重を用いた場合についても考えられる (Fig. 10(b) 参照)。

これらのことから次のことがいえる。剛性低下がよく生じるパルス波荷重を前段に用いた場合、剛性低下があまり生じない特性を有するパルス波荷重を後段に用いたとすると、二段階組合せ荷重下での後段ではその特性は認められない。剛性低下がよく生じるパルス波荷重を後段に用いた場合についても、後段では特に大きな変化は認められなくなる。これに対し、剛性低下があまり生じないパルス波荷重を前段に用い、剛性低下がよく生じるパルス波荷重を後段に用いた場合、後段では後段単独でのパルス波荷重の特性が認められ、急激に剛性が低下する。

二段階組合せ荷重下における破断直前の剛性低下については、単一パルス波荷重下における場合と異なるようである。Fig. 5 中、二段階組合せ荷重下および単一パルス波荷重下における破断直前の剛性の上限と下限の範囲にハッチングで示す。両者のハッチングの範囲を比較すると、二段階組合せ荷重を用いた場合の方が単一繰返し荷重を用いた場合より狭いことが判る。剛性低下の小さいLS波荷重を前段に用いた場合であっても、後段に他のパルス波荷重を用いるとLS波荷重下とは異なる破壊形態が生じるため、剛性低下が大きくなり、結果的には他の二段階組合せ荷重下における破断直前の剛性低下と同程度になる。二段階組合せ荷重を用いた場合、疲労試験中の剛性低

Fig. 11. Total AE event counts under SL, SL-LL, LL.

下はパルス波荷重によって異なるものの、二種類の剛性低下の形態が生じることによって、破断直前の最終的な剛性低下は同程度になると考えられる。

4・3 AE 総カウント数

二段階組合せ荷重が AE 事象総カウント数 (以下、単に AE 総カウント数と呼ぶ) に及ぼす影響についても、剛性低下のところで述べたことと同様な観点から説明できる。一例として、Fig. 11 に SL-LL 波、SL 波、LL 波荷重下における AE 総カウント数を示す。それぞれの荷重波形下での AE 総カウント数は同程度である。SL 波および LL 波荷重下における AE 総カウント数の増加の傾向が同程度であるため、SL-LL 波荷重下での後段の LL 波荷重下での AE 総カウント数は顕著な変化が見られないと考えられる。このようなことから、AE がよく生じるパルス波荷重を前段に用いた場合、AE があまり生じないという特性を有するパルス波荷重を後段に用いたとしても、二段階組合せ荷重下での後段ではその特性は認められない。AE がよく生じるパルス波荷重を後段に用いた場合についても、後段では特に大きな変化は認められない。これに対し、AE があまり生じないパルス波荷重を前段に用い、AE がよく生じるパルス波荷重を後段に用いた場合、後段では後段単独での特性が認められ、急激に AE 総カウント数は増加する。

Fig. 6 中、二段階組合せ荷重下および単一パルス波荷重下における破断直前の AE 総カウント数の上限と下限の範囲にハッチングで示す。両者のハッチングの範囲を比較すると、二段階組合せ荷重下の方が単一パルス波荷重下の場合より狭く、破断直前の AE 総カウント数は同程度になると考えられる。二段階組合せ荷重を用いた場合、疲労試験中の AE 総カウント数はパルス波荷重によって異なるものの、二種類の AE 総カウント数の増加形態が生じることによって破断直前の最終的な AE 総カウント数は同程度になると考えられる。

4・4 二段階組合せ荷重下の疲労損傷過程

最大繰返し応力が一定の場合、剛性がある固有の値

に達すると試験片が破断すると考えると、LL-LS 波および SL-LS 波荷重下において、荷重波形を LS 波荷重に変えると直ちに試験片が破断するのではないかという懸念が生じていたが、実際には破断しなかった。この理由について検討する。前段の LL 波および SL 波荷重下において、横繊維束内のはく離は横繊維束系に沿って進展し、繰返し数の増加に伴い、太く成長した。そのため、荷重波形を後段の LS 波荷重に変えたときの剛性低下は、横繊維束内のはく離が横繊維束系に沿ってあまり進展しない LS 波荷重下の破断直前の剛性低下より、既に大きかった。しかし、この時点ではまだ横繊維束内のはく離は前段のパルス波荷重のみで疲労試験を行った場合の破断直前での太さにまで成長していないため、すぐに破断しなかったと考えられる。後段の LS 波荷重下において、このはく離が太く成長し、前段のパルス波荷重のみで疲労試験を行ったときにはく離の太さと同程度になると破断した。ここで重要なことは、横繊維束内のはく離の太さである。剛性低下が生じる主な原因は、横繊維束内のはく離が横繊維束系に沿って進展することおよびそれが太く成長することである。しかし、前者は疲労寿命に大きな影響を及ぼさない。前段が除荷持続時間の短いパルス波荷重であっても後段が除荷持続時間の長いパルス波荷重 (LS-SL, LS-LL 波荷重) であれば、後段のパルス波荷重下で横繊維束内のはく離が横繊維束系に沿って進展することにより、剛性低下は急激に低下した。そのため、破断直前の剛性低下はすべて同程度であったと考えられる。このように、疲労損傷過程が異なるパルス波荷重を組合せた二段階組合せ荷重下における疲労損傷は、単に各パルス波荷重下での損傷過程を順に辿るというわけではない。後段での疲労損傷は後段のみで疲労試験を行ったときの疲労損傷過程が単に加算的に生じるのではなく、加速的に損傷が生じる。そのため、マイナー則で求めた疲労寿命より実際の疲労寿命の方が短くなったと考えられる。

横繊維束内のはく離が太く成長するということの具体的な現象について述べておく。横繊維束内のはく離が厚さ方向に進展し縦繊維束にまで達すると、縦繊維束部と横繊維束部の交差部にはく離が生じる。この部分にはく離が生じると横繊維束内のはく離が太くなったように観察されるのではないかと考えられる。このはく離が発生すると、試験片全体の疲労損傷は大きいと考えられる。すなわち、横繊維束内のはく離が太く成長するという事は、疲労寿命に対し、大きな影響を及ぼすと考えられる。

前報で、単一の特別なパルス波荷重についてはパルス波荷重によって破断直前での剛性低下が異なったた

め、剛性低下は疲労寿命予測の指標とはならないと結論付けた。今回、二段階組合せ荷重下についていえば、二種類の損傷状態が生じることによって破断直前の内部の損傷形態はある意味で均一化する、平均的な損傷状態になる。その結果、破断直前の剛性低下および AE 総カウント数の値は同程度であると考えられる。実働荷重では負荷あるいは除荷持続時間が幅広い領域に分布している荷重と考えられるから、平均的な損傷状態が生じると考えられ、剛性低下が疲労寿命予測の指標の一つに成りうる可能性は高い。しかし、前報で指摘したように除荷持続時間は常に短いといった特別なランダム荷重については注意を要する。

5 結 言

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

(1) マイナー則を用いることにより、二段階組合せ荷重下における疲労寿命の長短の傾向は予測できるが、疲労寿命そのものを予測することは困難である。二種類のパルス波荷重を試験片に負荷した場合、パルス波荷重下によって疲労損傷形態が異なるため、疲労寿命は必ずしも線形加算則的な値にはならない。

(2) 剛性低下がよく生じるパルス波荷重を前段に用いた場合、剛性低下があまり生じないという特性を有するパルス波荷重を後段に用いたとしても、二段階組合せ荷重下での後段ではその特性は認められない。これに対し、剛性低下があまり生じないパルス波荷重を前段に用い、剛性低下がよく生じるパルス波荷重を後段に用いた場合、後段では後段単独での特性が認められ、急激に剛性が低下する。AE 総カウント数についても同様なことが成り立つ。

(3) 平織ガラス布を強化材として用いた FRP の場合、常に除荷持続時間が短いランダム荷重については、疲労寿命予測をするパラメータとして剛性を用いることは適切ではない。

終わりに、本研究に当たって樹脂の提供頂いた大日本インキ化学工業(株)並びにガラス繊維を提供頂いた旭ガラスファイバ(株)に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 森中泰章, 藤井 透, 網島貞男, 材料, **40**, 454, 908 (1991).
- 2) 増田雄市郎, 日本機械学会論文集, A-47, 424, 1266 (1981).
- 3) M. F. Poursartip, M. F. Ashby, P. W. R. Beaumont, Scripta Metallurgica, 601 (1982).
- 4) S. L. Ogin, P. A. Smith, P. W. R. Beaumont, Composites Science and Technology, **22**, 23 (1985).
- 5) M. F. Poursartip, M. F. Ashby, P. W. R. Beaumont, Composites Science and Technology, **25**, 193 (1986).
- 6) Z. Hashin, Composites Science and Technology, **23**, 1 (1985).
- 7) D. C. Leach, D. C. Curtis, D. R. Tamblin, ASTM STP **937**, 358 (1987).
- 8) 西谷弘信, “総合材料強度講座 6 疲労強度学”, p. 233 (1985) オーム社