朱子織ガラス布 FRP のランダム荷重下での疲労寿命と信頼性*

網 島 貞 男** 谷 本 敏 夫***

石 原 郁 雄**** 松 岡 敬*****

Fatigue Life and Reliability of Satin Woven Glass Cloth
FRP under Random Loading

by

Sadao AMIJIMA

(Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Toshio TANIMOTO

(Columbia University, New York)

Ikuo ISHIHARA

(Daifuku Kiko Ltd., Osaka)

and Takashi MATSUOKA

(Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto)

An investigation was made on the fatigue properties under random loadings of satin woven glass cloth FRP. Constant displacement fatigue tests were conducted on FRP test specimens with a random loading fatigue test apparatus. The effects of the input signal type of loading wave and the frequency of input signal of loading wave on the fatigue life of FRP were investigated. Moreover, 8-step stress amplitude fatigue test and randomly programmed ones were conducted on the FRP test specimens and their fatigue lives under these conditions were evaluated.

In order to investigate the effect of filler in the resin on the fatigue life, the test was conducted on FRP test specimens containing the filler (CaCO_3) with a rotating bending fatigue test machine.

According to the results of repeated bending fatigue test, a longer fatigue life was obtained at the long life region in the case where sinusoidal wave was used for the loading signal compared with other types of loading waves like pulse and triangle waves.

As for the fatigue life, there was no difference between the FRP test specimens with and without filler. However, the specimens with filler showed a larger scatter of fatigue life with increasing filler content.

(Received May 9, 1979)

キー・ワード：高分子複合材料，プログラム荷重，疲労寿命分布，信頼性

1 緒 言

FRP を構造部材に用いる際の疲労設計にあたって，実働荷重下での性質を把握することは不可欠な課題であるが，これに関する研究はいまだ極めて少く，これまでの FRP の疲労寿命に関する研究は定振幅荷重下のものが大部分である。一般に，実働荷重下における材料の疲労寿命に関しては，その研究の第一段階として 2 段 2 重重複荷重下の疲労寿命に対して直線被害法則が成立するか否かを調べることから始めるのが普通

である。ときには理論的に直線被害法則を修正するか，もしくはこれに代りより妥当な被害法則を決定するための努力が払われている。しかしながら，実際にこうして得られた被害法則による推定値が正しいかどうかは，多段荷重の段数を増すか，もしくは究極的には実働荷重そのものによる疲労試験の結果に基づいて判断する必要がある。

本研究はまず，動電型実働荷重疲労試験機を設計し，これを用いて入力波形，ならびに入力波の周波数の相異による FRP 材の疲労寿命に及ぼす影響について検討を加え，さらに，8 段 8 重重複荷重疲労試験を行い，2 段 2 重のような少段数疲労試験から得られた累積被害法則の適用性を検討したものである。

* 原稿受理 昭和54年5月9日

** 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

*** 正 会 員 コロンビア大学 ニューヨーク

**** 大福機工(株) 大阪市西淀川区御幣島

***** 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川

さらに、充てん剤によって FRP の寿命およびそのばらつきがいかなる影響を受けるかについても同時に検討を行ったので併せて報告する。

2 理 論

金属に関して多段多重重複下における疲労寿命の研究は数多くあり、その疲労損傷理論は、 N_i を $S-N$ 曲線における i 番目の応力レベルでの破壊までの繰返し数、 n_i を i 番目の応力レベルでの繰返し数とすると、Miner¹¹⁾、Plamgren 等の提唱した、次式で示されるマイナー則あるいは直線被害法則と呼ばれるもの

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

($i=1, 2, \dots, m$, ただし m は段数)

および(2)式に示すように、被害の量と繰返し数比は線形関係にないとした Marco-Starkey の説とがある。

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^{x_i} = 1 \quad x_i > 1 \quad (2)$$

しかしながら、FRP に対する 2 段 2 重重複荷重下での疲労試験結果によると、疲労寿命は、 n_2/N_2 が 1 より大きくなる場合が生じた。言い換えると、一次応力と異なる二次応力に切換えると、なかには全く損害を受けないばかりでなく、かえって強化される場合もあるわけで、この傾向は特に一次応力が二次応力よりも大きい場合に顕著であった。また、谷本¹⁴⁾はある適度の疲労を受けた後の FRP の残留静的強度はときには元の強度の 100% あるいはそれ以上の強度を保持することがあることを報告している。また、Sturgeon も炭素繊維強化プラスチック (CFRP) について同様の傾向があることを指摘しているが、2 段 2 重重複荷重疲労試験においても FRP 特有とも思えるこれと類似した傾向が得られたわけで、したがって FRP においては損傷という言葉の意味には一般性がなくなり、前記の(1)、(2)式の関係式をそのまま FRP の累積被害法則として適用することは妥当でないことを示唆するものである。以上のような観点から、FRP に対しては以下に示すマイナー則の修正式を用いるのが適当と思われる。

$$\sum_{i=1}^{m-1} \frac{n_i}{N_i} + \delta \frac{n_m}{N_m} = 1, \quad \sum_{i=1}^{m-1} \frac{n_i}{N_i} > 0 \quad (3)$$

ところで、材料の耐久限度以上の応力に対して $S-N$ 曲線の形が、

$$\sigma^b \cdot N = C \quad (4)$$

なる線形関係にある場合には(3)式は次のようになる。

$$\sum_{i=1}^{m-1} \frac{n_i}{N_i} + \delta \frac{n_m}{N_1} \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_1} \right)^b = 1, \quad \sum_{i=1}^{m-1} \frac{n_i}{N_i} > 0 \quad (5)$$

ここで、 δ は一次応力、および二次応力の大きさ、さらに一次応力での繰返し数比等に関連した係数である。 $\delta < 1$ ならば、累計繰返し数比は $\sum_{i=1}^m n_i/N_i > 1$ となり、

$\delta > 1$ ならば $\sum_{i=1}^m n_i/N_i < 1$ となる。また、 $\delta=1$ でマイナー則に帰着する。

3 実 験

3.1 供試材ならびに試験片

本研究に用いた材料は基材としてイソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (回転曲げ疲労試験用)、オルソフタル酸系不飽和ポリエステル樹脂 (動電型実動荷重疲労試験用)、補強材として朱子織ガラス布からなるものである。

強化材にガラス布を用いた積層板は手積法を用い、24 時間常温硬化させて作った。できあがった積層板は電気炉で 80℃、4 時間のアフタキュアを施し、成形時の内部ひずみを除去した。この積層板からガラス布の縦糸方向が試験片の長手方向になるようにして、回転曲げ疲労試験は Fig. 1 (a)、動電型実動荷重疲労試験

(a) Rotating bending fatigue test specimen.
(b) Random loading fatigue (Canti-lever type) test specimen.

Fig. 1. Fatigue test specimen.

Table I. Material of specimen in rotating bending fatigue test.

Glass weight content, W_g	54.47 (%)
Glass weight content, V_g	35.78 (%)
Matrix	Iso-phthalic unsaturated polyester resin
Reinforcement	Satin woven FRP
Catalizer	Methyl ethyl keton per oxide
Hardener	Cobalt naphthenate 0.6% solution
Filler content W_f/W_r	0 (%), 50 (%), 100 (%)

Table II. Glass fiber content of the specimen and its static properties.

Type of test specimen	Random loading fatigue test specimen
Weight content W_g	40.99 (%)
Volume content V_g	24.83 (%)
Tensile strength σ_t	21.0 (kg/mm ²)
Bending strength σ_b	33.0 (kg/mm ²)

片は Fig. 1 (b) に示すような形状寸法にそれぞれ加工した。

Table I に充てん剤の量を変えた 3 種類の回転曲げ疲労試験片の素材構成を示す。また, Table II は, 動電型実働荷重疲労試験 (以下実働荷重試験という) に用いた試験片のガラス含有率および静強度特性を示したものである。

3・2 実験方法

試験片は試験前の環境条件を一定にするため, 温度 $23 \pm 1^\circ\text{C}$, 湿度 $65 \pm 5\%$ の恒温恒湿槽内に 48 時間以上保持した後, 取り出して実験に供した。

回転曲げ疲労試験には, 片持はり式回転曲げ疲労試験機 (ユーシン精機) を用いた。回転数は 3 600 r. p. m. である。実験の際, 試験片の振れやモーメントアームには充分注意した。

Fig. 2 に実働荷重実験装置のブロックダイアグラムを示す。

この装置は関数発生器により 3 種類の周波数 (18, 30, および 45 Hz) の各種波形 (正弦波, 三角波および矩形波) を入力信号として発生し得るもので, それを増幅して加振器機を動作させ, 加振機に取り付けられた Vibration pick-up により変位を検出し, 振動計で一定たわみに設定した後, それを制御器にフィードバックして一定たわみ条件で試験を行うことができる。負荷方式は片持はり式平面曲げである。

4 実験結果およびその考察

4・1 実働荷重試験

4・1・1 FRP の疲労寿命の荷重波形依存性, 周波数依存性 実際の実働条件においては, 材料あるいは構造物に加わる荷重波形は極めて多種多様であるが, 一般に研究室的には正弦波が疲労試験の波形として代表的に用いられるのが普通である。そこで, 本節ではその他の波形が FRP に作用したとき, その疲労寿命にどのような影響をもたらすか, 特に矩形波のような

断続的な荷重のもとで FRP の界面状態に及ぼす影響が剛性低下としてどのように現れるのかというような観点から実働荷重試験装置を製作し, 疲労寿命に及ぼす入力波形の影響について調べた。

Function generator により加振機への入力波形を上記の 3 種類に変化させ, 変位一定制御のもとで, 片持はり式両振り平面曲げ疲労試験を実施した。ところで, 変位一定制御条件下での疲労試験では剛性低下に比例して試験片に加わる実応力が減少するため, FRP のように曲げ弾性率の小さい複合材料では, 剛性低下が進んでも最終的には試験片は分離破断を起さない。繰返し荷重負荷後, 試験片内ではまず樹脂領域内で微視的き裂が多数生じ, 繰返し数の増加につれてそのき裂密度はますます増加し, 外観的には白化度が増えてくる。剛性はそれに対応して徐々に低下してゆき, 繊維-樹脂間の層間強度に著しい影響が生じたとき, 層間はく離により剛性は急激に低下することになる。しかしながら, 積層板においては樹脂部に重大な損傷を受けたとしても, もう一方の構成部材であるガラス布を曲げの繰返して分離破断を引き起こすことは事実上不可能なことである。そこで, 剛性の一定量低下の時期を疲労破壊の時期とするクリテリアを採用すべきであるといえる。

Fig. 3 は入力波形が正弦波で周波数が 30 Hz の場合の朱子織 FRP の疲労試験中における剛性低下曲線の一例である。剛性が低下するようすをみるのに, 本研究では正確な値を測定するために, 一度トランジェントメモリーに記憶させ, それをサーボコード上に逐次記録させる方法をとった。ASTM D671-63T では剛性保持率が, 87.5% (7/8) に達したときを疲労破壊の時期と規定している。本実験によると, 剛性低下率が急増する時期の保持率は応力レベルによってさまざまであり, 負荷応力レベルが高い場合には, 約 95% 程度のところであるが, 中応力程度では 80% ぐらいの

Fig. 2. Block diagram of equipment.

ところである。それゆえに、一義的に一定値を設定することは困難で、むしろそれは設計基準に応じて決定されるべきものであると考えられる。たとえば、より安全側の設計をするためには87.5%よりも高い保持率で疲労破壊とみなさなければならない。

Fig. 4 および Fig. 5 は周波数がともに 30 Hz で、三角波およびパルス波を入力波形として用いた場合の剛性低下曲線である。この場合も剛性低下率の急増する時期は負荷応力レベルによってさまざまで、保持率が87.5%より大きい場合も逆に小さい場合もある。したがって、全体的にみると、剛性低下率の急増する時

Fig. 3. Stiffness decay during fatigue of satin woven glass cloth FRP.

Fig. 4. Stiffness decay during fatigue of satin woven glass cloth FRP.

Fig. 5. Stiffness decay during fatigue of satin woven glass cloth FRP.

期、すなわち疲労破壊の時期に対するクリテリアとして保持率を87.5%にとるのが一応妥当であると考えられる。以後、これに基づいて論議を進めることにする。

Fig. 6 は剛性保持率が87.5%を切るときの繰返し数を疲労寿命としてこれを横軸にとり、縦軸には最初に設定した応力振幅（繰返しに伴い実応力は低下する）をとった、いわゆる $S-N$ 曲線である。なお、参考のため、Fig. 7 に初期応力振幅と片持はり先端部変位（これが疲労試験中一定に制御される。ただし、 $l=40$ mm である。）との関係を示す。この図より、設定し

Fig. 6. Initial stress amplitude vs. number of cycles to fatigue.

Fig. 7. Control deflection vs. initial stress amplitude.

Fig. 8. Initial stress amplitude vs. number of cycles to failure.

た初期応力振幅から試験中一定に制御されるたわみ振幅の値を換算することができる。Fig. 6 から、周波数が 30 Hz の一定の場合、入力波形の違いによって疲労寿命がどのように異なるかを評価することができる。すなわち、高応力レベルでは波形による影響はほとんど見られず、低応力レベル（長寿命域）になると差が現れる傾向がある。正弦波の場合に最も寿命が長く、三角波とパルス波はほとんど差がない。連続的に滑らかに加わる正弦波荷重に比べて、三角波荷重およびパルス波荷重は断続的で多数衝撃的な荷重が加わる波形であるため、長寿命域において差が生じたものと思われる。参考までに各波形に対する初期応力振幅と疲労寿命の関係について、最小自乗法による直線近似結果を示す。

$$\sigma^b \cdot N = \alpha \cdot 10^r \quad (6)$$

	b	α	r
正 弦 波	11.69	3.373	16
三 角 波	7.49	1.645	12
パ ル ス 波	9.70	1.548	14

また、Fig. 8 は正弦波形のものについて周波数の影響を調べたものである。周波数は、18, 30 および 45 Hz の 3 種類に変化させた。図中直線は最小自乗法によって求めたものである。この場合には逆に長寿命域においてはそれほど疲労寿命の差がなく、高応力レベルで 45Hz の場合に寿命が長くなった。この傾向は各繰返し数について、疲労強度と周波数の関係からさらに明白であり、周波数の増加につれて疲労強度は高くなるが、特に低繰返し数のところで顕著であった。

4・1・2 プログラムされた多段荷重下での疲労寿命の実験の推定例 以上述べた 2 段 2 重重複荷重下での累積被害法則による推定値が、段数が大きい場合にも適用できるか否かを調べるために、8 段 8 重の重複荷重をプログラムした応用例を示すことにする。

Table III と Table IV は 8 段 8 重重複荷重をそれぞれ漸減的、漸増的にプログラム (Fig. 9 (a), (b) 参照) し、実働荷重試験機 (両振り平面曲げ) を用いて疲労試験を行ったものである。各段とも繰返し数比 1/8 で次の段に切り換えた。その結果、この場合もやはりトータルマイナー値はともに 1 以上 (漸減型で 2.382, 漸増型で 2.222) となった。2 段 2 重重複荷重疲労試験結果で示された傾向がここにも反映されている。

Table V は Fig. 9 (c) に示すような 8 段でのランダム荷重をプログラムし、FRP に負荷した場合の耐久寿命を測定したものである。その結果も、マイナー値による推定値より大きめに現れた。よって以上のことから多段荷重下での FRP の疲労寿命は現象論的には、

Table III. Repeated bending fatigue test result (High-Low type).

i	σ_a (kg/mm ²)	n_f ($\times 10^3$)	n_i ($\times 10^3$)	N_i ($\times 10^3$)	n_i/N_i	$\sum (n_i/N_i)$
1	12.10	2 552.190	0.928	7.42	0.125	2.382
2	11.46		1.750	14.00	0.125	
3	10.83		3.390	27.12	0.125	
4	10.19		6.909	55.27	0.125	
5	9.55		14.746	117.97	0.125	
6	8.92		32.746	261.97	0.125	
7	8.28		78.190	625.52	0.125	
8	7.64		2 413.531	1 601.97	1.507	

Table IV. Repeated bending fatigue test result (Low-High type).

i	σ_a (kg/mm ²)	n_f ($\times 10^3$)	n_i ($\times 10^3$)	N_i ($\times 10^3$)	n_i/N_i	$\sum (n_i/N_i)$
1	7.64	347.970	200.246	1 601.97	0.125	2.222
2	8.28		78.190	625.52	0.125	
3	8.92		32.746	261.97	0.125	
4	9.55		14.746	117.97	0.125	
5	10.19		6.909	55.27	0.125	
6	10.83		3.390	27.12	0.125	
7	11.46		1.750	14.00	0.125	
8	12.10		9.993	7.42	1.347	

Table V. Randomly programmed fatigue test result.

i	σ_a (kg/mm ²)	n_f ($\times 10^3$)	n_i ($\times 10^3$)	N_i ($\times 10^3$)	n_i/N_i	$\sum (n_i/N_i)$
1	7.64	353.285	200.246	1 601.97	0.125	2.938
2	11.46		1.750	14.00	0.125	
3	9.55		14.746	117.97	0.125	
4	10.19		6.909	55.27	0.125	
5	8.28		78.190	625.52	0.125	
6	8.92		32.746	261.97	0.125	
7	10.83		3.390	27.12	0.125	
8	12.19		15.308	7.42	2.063	

従来からよく用いられるマイナー則をそのままの形では適用できないことが判明した。しかしながら、本研究の範囲内ではマイナー値は常に 1 以上に現れたことを考慮に入れると、実用的観点からは、マイナー値を用いた耐久寿命推定を行えば、一応安全側の設計ができることになる。

4・2 回転曲げ疲労寿命およびそのばらつきの充てん剤による影響

一般に、充てん剤を樹脂中に混入することにより得られる利点としては、(1)価格値下げの増量、(2)粘度調節、(3)収縮を防いで寸法の安定性を与えること、(4)ポリマーの相対的含有量を減らすことによって油や溶剤中での膨潤を減少させ、耐油性を向上させること、な

Fig. 9. Programmed stress amplitude.

どが考えられ、樹脂中に充てん剤を混入するときは、その量の強度および寿命特性を劣化させることなく混入できる限界あるいは、最適値を決定することが重要となる。また、充てん剤の混入は、それにより繊維—樹脂の層間に微妙な影響を与えることが想像される。そこで、本節では積層強化 FRP の疲労寿命およびそのばらつきに及ぼす充てん剤（炭酸カルシウム）の影響について具体的に検討を加えてみた。

充てん剤と樹脂の混合比 $W_f/W_r=0, 50, 100\%$ についての $S-N$ 曲線をまとめて比較したものが Fig. 10 である。応力レベルと、寿命の間に直線性を仮定するならば、各充てん剤混入率の FRP についての応力 σ と寿命の期待値 N の関係は、(6)式がそのままあてはまり、その係数は以下のように表される。

$W_f/W_r(\%)$	b	α	r
0	24.03	2.857	29
50	22.72	6.061	27
100	19.36	1.015	25

充てん剤を樹脂重量と同量添加の場合は、無添加の場合とその疲労寿命はほとんど変わりなく、むしろ高応力レベルでは樹脂中に充てん剤を添加することにより若干のびるような傾向を示した。 $W_f/W_r=50\%$ の場合、無添加および同量添加のときよりも寿命が短いのは、充てん剤の分散が均一になりにくいのが原因で

はないかと考えられる。

平均ランク法により累積確率を評価し、充てん剤混入率 $W_f/W_r=0\%$ について各応力レベルの寿命データをワイブル確率紙上に打点したのが Fig. 11 である。高応力レベルでは、ほぼ直線とみなすことができ、2母数ワイブル分布に従っていると考えて良いと思われる。

得られた疲労寿命データに基づいて、充てん剤混入率の異なる FRP について破壊確率が、10, 50, 90% の場合の $P-S-N$ 線図を Fig. 12~14 に示す。充てん剤の混入しない場合には、各応力レベルともばらつきの幅にそれほど変化はないが、充てん剤の混入率が増

Fig. 10. Relation between stress and fatigue life.

Fig. 11. Weibull distribution (Filler content; $W_f/W_r=0\%$). Fig. 12. $P-S-N$ diagram (Filler content; $W_f/W_r=0\%$).

Fig. 13. P-S-N diagram (Filler content; $W_f/W_r = 50\%$).

Fig. 14. P-S-N diagram (Filler content; $W_f/W_r = 100\%$).

加するにつれて中寿命域での寿命の分散が大きく現れることはすでに報告されており、かつ屈曲するような傾向がある。すなわちこの領域での寿命分布は、単一分布ではなく異った分布が重畳していると考えられるかもしれない。

一般に、FRPの疲労破壊は層間はく離による損傷と繊維破損が混在した形で進行するが、中応力レベルにおいては繰返し荷重による最終破断に対して層間はく離が主として支配した場合と、繊維破損の蓄積が主たる破断誘因となる場合の二つの破断様式に明確な分離が生じた結果ばらつきの範囲が広がり、このような傾向が現れたのではないと思われる。特に充てん剤の量が増えると、これらの疲労の破壊モードの分離がさらに顕著に現れるものと考えられる。

5 結 言

本研究は実働荷重下でのFRPの疲労挙動を調べるために、動電型実働荷重疲労試験機を設計製作し、これを用いて2段2重、3段3重という比較的少段数の疲労試験から得られた累積被害法則の適用限界を調べ、かつ入力波形ならびに入力波の周波数が疲労寿命に及ぼす影響についても検討した。さらに、FRPの回転

曲げ疲労寿命およびそのばらつきが、樹脂の中に混入されて充てん剤によってどのような影響を受けるかについて調べた。その結果以下に示すような結論を得た。

(1) 2段2重重複荷重下でのFRPの累積被害の傾向は、8段8重重複荷重においても同様に現れた。

(2) 片持はり式両振り平面曲げ疲労試験の結果、入力波形として正弦波荷重を用いた場合、他の波形荷重(三角波および矩形波)を用いた場合に比べてFRPの疲労寿命は長寿命領域において長くなることが判明した。

(3) 充てん剤を樹脂量と同量混入したとき、充てん剤を混入しない場合とほとんど疲労寿命は変わらず、高応力レベルではむしろ充てん剤を混入することにより寿命は長くなった。一方、寿命の分散は充てん剤の混入率が増加するにつれて大きくなる傾向が現れた。

(昭和54年3月27日 FRPシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Jann, N. Y., J. Composite Materials, **12**, 19 (1978).
- 2) Ralph, P., J. Composite Materials, **11**, 41 (1977).
- 3) Hahn, H. T., and R. Y. Kim, J. Composite Materials, **10**, 156 (1976).
- 4) Palph, L. T., and T. R. David, J. Composite Materials, **10**, 32 (1976).
- 5) Nevedunsky, J. J., J. J. Lucas, and M. J. Salkind, J. Composite Materials, **9**, 394 (1975).
- 6) Williams, R. S., and K. L. Reifsnider, J. Composite Materials, **8**, 340 (1974).
- 7) Hashin, Z., and A. Poten, J. Composite Materials, **7**, 448 (1973).
- 8) Berg, C. A., and M. Salama, Fiber Science and Technology, **6**, No. 2, 79 (1973).
- 9) Boller, K. H., ASTM STP 460, 217 (1969).
- 10) Shimizu, H., and J. F. Dolowy, ASTM STP 460, 192 (1969).
- 11) Miner, M. A., Tran. ASTM, J. Appl. Mech., **67**, A-159.
- 12) Marco, S. M., and W. L. Starkey, Trans. ASME, **76**, 627 (1954).
- 13) 谷本敏夫, 網島貞男, 石原郁雄, 第12回疲労シンポジウム, 119 (1978).
- 14) Tanimoto, T., and S. Amijima, J. Composite Materials, **9**, 380 (1975).
- 15) Sturgeon, J. B., Proc. 28th Annual Conference, SPI, Reinforced Plastics Division (1973).
- 16) 川田雄一, 中沢 一, 材料試験, **6**, 45 (1957).
- 17) 谷本敏夫, 網島貞男, 石川 浩, 材料, **28**, 40 (1979).