研究論文

パーソナルコンピュータを用いた FRP 積層板の
低サイクル疲労試験に関する研究

福田 武人*, 藤井 太一**

(1984年1月12日受付)

Low-Cycle Fatigue Test of FRP Laminate by On-Line Use of
a Desk-Top Computer System

T. FUKUDA* and T. FUJII**

(Received January 12, 1984)

A desk-top computer (what we call a personal computer) system was on-line used connecting a conventional material testing machine to evaluate the low-cycle fatigue response of glass-mat FRP. During the fatigue test, the strain behavior can be monitored by a large-strain gage put between layers when the specimen is made by the hand lay-up method. As a test result, the fatigue damage of the specimens under high stress levels of 90-75% of the static tensile strength can be characterized by the fact that the ratio of the plastic strain to the total strain increases approximately linearly with the logarithm of the repeated cycle. Using such an information of the computer monitoring, the prediction test of the cycle to failure of the specimen was carried out by on-line use of the computer system. The prediction results were compared with the experimental data. In addition, the fatigue life of the mat FRP in the low-cycle region of less than 200 cycles was evaluated by applying a statistical approach based on the Weibull distribution. The statistical analysis shows that the dispersion of the fatigue life is remarkably large and larger for the higher applied stress level, while the dispersion of the static tensile strength of the specimen is comparatively small.

1. 緒 言

材料試験におけるコンピュータによる自動化, いわゆるラボラトリオートメーション(LA)が, 安価で性能のすぐれたコンピュータが普及するにつれて盛んになりつつある^{1,2)}. しかしながら, FRP 材の試験に関しては現在のところそれほど LA 化は進んでいない³⁾. この理由は, FRP 材が金属材料などに比して新しいこと, また, FRP 材の材料試験それ自体が, その材質の複雑さともあいまって困難な場合が多いことなどであろう. そこでこのような困難さを取り除き, かつ, FRP 材固有の性質を活かしながら, 試験手順の簡単化, 効率のアップそして精度の向上などを目指すためにも LA 化は望ま

しいと考える.

このような観点から, 本研究では現在最もポピュラーなコンピュータであるパーソナルコンピュータシステムを市販の引張り試験機と結合して用い, FRP 積層板の低サイクル疲労試験を試みた. その結果, 試験の開始から試験片の破壊に至るまでの荷重-歪応答に関する情報が, 刻々 CRT ディスプレイ上でモニターでき, かつ, データが処理され, また, ディスクに記憶される. そして記憶したデータを用いて種々な角度からの疲労挙動の解析に利用でき, LA 化の目的が十分満たされた.

以下では, まず試験方法について, コンピュータの使い方と歪ゲージの埋込み利用を中心に述べ, 続いて, 得られた低サイクル疲労試験データの信頼性解析結果について述べる. そして, それらのデータをもとにして, コンピュータをオンライン利用して, 試験片の破壊を予測するアルゴリズムを説明し, 破壊の予測試験の結果についても触れる.

*,** 大阪市立大学工学部機械工学科 (558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
Dept. of Mech. Eng., Fac. of Eng., Osaka City University, 3-3-138, Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558, Japan

* 講師 Lecturer, ** 教授 Professor

2. 試験方法

2.1 試験装置

従来より研究室において使用しているインストロン型引張り試験機（島津製作所製：オートグラフ DSS-5000）を用いて行なう FRP 積層板の静的ならびに低サイクル疲労試験に際して、荷重と歪応答をモニターし、記録し、解析するためにパーソナルコンピュータ（NEC 社製：PC-8800 システム）を活用する。コンピュータシステムは、本体（CPU μ PD780C-1）、カラーモニタ（PC-8853）、フロッピーディスク（PC-8031-1W）およびプリンタ（PC-8822）とから構成され、AD 変換器（8ビット、2チャンネル）を介して試験機と結んでいる。その概要を Fig.1 に示す。

2.2 試験片

低サイクル疲労試験に用いた試験片は、強化材としてチョップドストランドガラスマット（日本硝子繊維㈱：REM-450）を6層に、不飽和ポリエステル樹脂（武田薬品㈱：ポリマール 3272）を含浸させ積層し、60°C で加圧し成形した積層板より切り出した。ポストキュアを60°C の炉内で24時間施した。試験片の形状・寸法を Fig.2 に示すが、図に記したように試験片の中央部に、大歪ゲージ（共和電業社㈱：KLM6-A9）を積層成形の際あらかじめ埋め込んである。これは、低サイクル疲労試験時の歪応答を、試験片が破断するまで確実にモニターするために工夫したものである。なお、ゲージの試験片断面に占める面積は0.8%以下であるので、ゲージを埋め込んだことによる試験片の機械的特性への影響は無視しうると考えてよい。また、試験片の材料特性を Table 1 に示す。

2.3 試験手順とコンピュータプログラム

低サイクル疲労試験は、静的引張り強度（198 MPa）

の90~75%の大きさの繰返し応力振幅をもつ定応力片振引張り繰返しで実施した。ここでは繰返し回数200サイクルくらいまでを低サイクル領域と考えている。また、繰返し速度は4~5 cycle/min で、波形は三角形波状であり、この場合試験中の歪速度は約 $2,100 \times 10^{-6}/s$ である。

つぎに、試験手順を説明する。試験を開始する前に、ロードセルよりの荷重信号と歪ゲージよりの歪応答の校正を行い、それぞれの値をコンピュータに記憶する。その他、試験片の寸法、繰返し速度、サンプリング時間なども記憶しておく。このようなデータの入力はずべてCRTディスプレイを見ながらコンピュータとの対話形式で行なうことができる。これらの試験の準備が完了した後コンピュータよりの指令で試験機が作動し、試験が始まる。なお、試験データの処理の都合上、1サイクル終了ごとに試験機を停止させ、データの処理とディスク

Fig.2 Fatigue test specimen.

Table 1 Mechanical properties of test specimen.

Number of ply	6
Tensile modulus (GPa)	13.6
Tensile strength (MPa)	198
Glass content V_f (%)	34.5

Fig.1 Schematic diagram of low-cycle fatigue testing system.

へのデータの書込みを終えた後、再び試験機を起動させ試験を続ける方法を採用した。また、計算時間を短縮させるため、データ収集部およびおもなデータ処理部分は機械語で書き、その他対話形式部分ならびに図形処理部分は BASIC 言語で書いてある。今回の試験に際して作成したおもなプログラムは、応力-歪曲線の繰返しに伴う変化の画面表示、セカント弾性率の計算ならびに破壊時期のオンライン予測のプログラムなどである。

3. 試験結果と考察

3.1 歪 応 答

低サイクル疲労試験においては、静的引張り強度 (198 MPa) の 90~75% の高応力繰返し荷重を負荷したので、歪ゲージから取り出される試験片の変形挙動は、繰返し負荷とともに特徴的なものとなった。すなわち、Fig.3 にその一例を示すように、疲労の進行とともに大きな塑性変形を生じ、応力-歪曲線の変化が複雑な様相を呈している。ディスクに記憶してある各試験片に対するデータをもとに詳しく高応力繰返しによる FRP 積層板の歪応答を観察してみる。このため、応力-歪曲線を Fig.4 に示すように簡略化して表現する。図において、 ϵ_n は n サイクル時の回復弾性歪、 ϵ_p は塑性歪、そして $\epsilon_t = \epsilon_p + \epsilon_n$ である。さて、各サイクルの応力ゼロの点と応力最大の点を結ぶ直線の傾きから求めたセカント弾性率の変化の一例を Fig.5 に示す。これらのデータは、初期セカント弾性率で除してあるので、疲労の進行とともにセカント弾性率が徐々に大きくなり、ある時期で安定する傾向にあることがわかる。このような傾向は、吉田の報告⁴⁾にも見られる。つぎに、塑性歪 ϵ_p は、疲労の進行とともに増大しているが、回復弾性歪 ϵ_n はある繰返し数までは徐々に減少し、それ以降安定な時期がありその間ほとんど変化せず、破壊の直前に上昇する傾向にある。この関係は、比 $\epsilon_r = \epsilon_p / \epsilon_t$ の変化とも対応する。比 ϵ_r の変化は、Fig.5 に示すごとく、繰返し数 N の対数 $\log N$ に関してほぼ直線的である。この傾向は、Fig.6 に示すように応力レベルが違っても認められた。このような歪応答の変化の特徴を利用した試験片の破壊の予測については後で述べる。

3.2 試験データの解析結果

Fig.7 は、ワイブル確率紙上で静的引張り強度の破壊確率 $F(x)$ をプロットした結果で、これより得られたワイブルパラメータを Table 2 にまとめている。ここで、 α は形状母数、 β は尺度母数、 μ は平均値、 CV は変動係数 (%) である。つぎに、低サイクル疲労寿命データ

Fig.3 Stress-strain diagram under repeated stress.

Fig.4 Schematically simplified stress-strain diagram.

についても同様に、2 母数ワイブル分布をあてはめ、各応力レベル (S) について整理してみた。Fig.8(a)~(d) が、そのワイブル確率紙上での破壊確率のプロットで、同図上の直線はいずれも最小二乗法で求めた。なお、いずれの場合についても、Kolmogorov-Smirnov の適合性の検定方法を用いて検定したところ、危険率 10% でワイブル分布にあてはめが可能であることが確かめられた。さて、各応力レベルに対する疲労寿命のワイブル分布についてのパラメータを整理すると Table 3 のようになる。表中、 $E[N]$ はワイブル分布の寿命期待値、 $\log \bar{N}$ は寿命 N の対数の平均値、 $\bar{N}$ は $10^{\log \bar{N}}$ 、 cv はこの場合の変動係数である。これらの解析結果から、静的引張り強度データのばらつきが比較的小さいにもかかわらず、低サイクル疲労寿命のばらつきが非常に大きいことがわかる。

つぎに、得られた疲労寿命データのワイブル分布へのあてはめ結果より、破壊確率が、5, 10, 50, 90, 95%

Fig.5 Changes of secant modulus and strains to failure.

Fig.6 Variation of the ratio of plastic strain ϵ_p to total strain ϵ_t with respect to the logarithm of number of cycles.

Fig.7 Distribution of static tensile strength.

Table 2 Weibull parameters for static tensile strength.

α	16.00
β	204.6
μ	197.9
CV	7.68

の場合の P - S - N 線図を作ってみる. その結果を, 疲労寿命データとともに, Fig.9 に示す. 図では, 便宜的に P - S - N 線図は直線で各応力レベルの間を結んである. この結果から, 本実験で求めた低サイクル領域 (繰返し数 200 回くらいまで) のマット強化 FRP 積層板の疲労寿命のばらつきは, 高応力レベルに対するものほど大きいといえる. このことは, 谷本ら⁵⁾ が各種 FRP 材について示した疲労寿命のばらつきの傾向とは異なっている. すなわち, 文献 5) によると, 回転曲げ疲労試験の

結果から, 朱子織 FRP, 平織 FRP, ロービングクロス FRP および SMC 成形板のいずれの場合にも, 高応力

Fig.8 Fatigue life distribution.

Table 3 Statistical analysis results of low-cycle fatigue life.

Stress level (%)	α	β	$E[N]$	CV (%)	$\log \bar{N}$ $\bar{N}$	cv (%)
90	1.11	12.9	12.4	90.3	0.92 (8.3)	39.5
85	0.98	29.9	30.2	102.2	1.25 (17.8)	35.5
80	1.17	61.3	58.2	86.2	1.59 (40.0)	24.3
75	1.19	86.5	81.8	84.6	1.75 (56.6)	20.1

Fig.9 P-S-N diagram.

レベル (約 50%) および低応力レベル (約 20%) に対する疲労寿命のばらつきは小さく、中応力レベルで大きいという特徴的な傾向を示している。このような疲労寿命のばらつきの傾向の違いは、両者の試験方法と繰返し速度 (3,600 rpm) および応力レベルの範囲、そして繊維の強化形態や試験片形状・寸法の相違などが原因となっていると思われる。

4. 破壊のオンライン予測の試み

4.1 予測のアルゴリズム

3.1 節で示したように、歪ゲージを用いたモニタリングの結果より、比 $\varepsilon_r = \varepsilon_p / \varepsilon_t$ の変化は、 $\log N$ に関してはほぼ直線形である。ここでは、この直線関係を P -直線と呼ぶことにする。一方、得られたデータより、破壊直前 (破壊繰返し数 - 1 回) における ε_r 値と破壊繰返し数 N_f との関係を、各試験データをもとに半対数線図上にプロットすると Fig.10 のようになる。図中の太い実線は最小二乗近似法で求めたもので、 F -直線と呼ぶことにする。以上述べた P -直線と F -直線を利用して試験途中で、試験片の破壊繰返し数を予測することを考えてみる。すなわち、試験開始後早い時期に P -直線を作成し、すでに得られている Fig.10 の F -直線との交点を計算させ、その交点より破壊繰返し数の予測値 $\tilde{N}_f$ を求める。ところで、Fig.10 に示したようにデータにかなりばらつきがあるので、 F -直線にある程度の幅をもたせる必要がある。そこで $\log N_f$ の分布を調べると Fig.11 で示すように正規確率紙上でほぼ直線で近似できるので、ここでは、 $\log N_f$ は正規分布に従っていると仮定し、次に述べる回帰理論に基づいて F -直線の 95% 信頼幅を求めることにする。

文献 6) によると、一般に大きさ k の標本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$ に対して、 y の値が正規分布に従っていると仮定できるとき、その母平均値 m が x との間に一次式

$$m = a + bx \quad (1)$$

の関係が成立しているものとする。このとき、この回帰直線に対する信頼幅は、 m の推定値

$$\hat{m} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (2)$$

に対して、

$$|m - \hat{m}| < C \quad (3)$$

によって与えられる。ただし、

$$C = T \cdot \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{k-2} \left(\frac{1}{k} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)} \quad (4)$$

であり、 T は、信頼度と自由度 ($k-2$) を定めると、

Fig.10 Computational concept for predicting the failure cycle of specimens by on-line use of a computer system.

Fig.11 Distribution of logarithm of failure cycle.

分布表より求められる。また、 $\bar{x} = \sum x_i / k$, $e_i = y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i$ である。

このような回帰理論において、 ε_r と $\log N_f$ をそれぞれ変数 x と y に対応させることによって、 F -直線の 95% 信頼幅が、(3)式を用いて計算することにより 2 本の曲線として求まる。したがって、先に述べた F -直線と P -直線との交点として得られる予測値 $\tilde{N}_f$ に対して、 F -直線の 95% 信頼幅の 2 本の曲線と P -直線との二つの解析的に得られる交点 $\tilde{N}_s$ と $\tilde{N}_L$ ($\tilde{N}_s < \tilde{N}_L$) が、

それぞれ下限値と上限値となる。以上述べた予測のアルゴリズムを流れ図に表わすと Fig.12 のようになる。ただし、図中の点線は、低サイクル疲労試験中にコンピュータをデータの取得や処理にも使っている関係上、オンライン予測が全体の流れ図の一部分であることを意味している。

4.2 シミュレーション結果とオンライン予測試験結果

Fig.10 に示した試験片本数 16 本に対する低サイクル疲労試験データを用いて、いま述べた破壊繰返し数予測のアルゴリズムに従って、予測のシミュレーションを行なってみる。

まず、(1)式を用いて、16 個のデータより最小二乗法で F -直線として

$$m = 0.561 + 2.85x \quad (5)_1$$

を得る。ただし、 $y = \log N_f$ 、 $x = \varepsilon_r$ においている。一方、 t 分布表より、 $k=16$ の標本に対して、信頼度 95%、自由度 14 の場合、 $T=2.145$ と与えられるので、(4)式より

$$C = \sqrt{0.009 + 0.874(x - 0.327)^2} \quad (6)_1$$

となる。

そこで、ディスクに記憶してある各試験片に対する繰返しに伴う歪応答より、 $N=3$ と 5 における ε_r 値を用いて P -直線を作り、(6)₁式と(3)式で与えられる二つの曲線との交点を計算させ、 $\tilde{N}_f$ の下限値 $\tilde{N}_s$ と上限値 $\tilde{N}_L$ とを求めると、Table 4 の Specimen No. A~P に関して Simulation results-I の結果を得た。表中の *

印は、 $\tilde{N}_s \leq N_f \leq \tilde{N}_L$ となり予測が的中していることを示す。また、— の記号は、 $\tilde{N}_L$ の値が 200 を越える値となり、予測結果として不適当と判断したものを意味している。なお、Simulation results-I の的中率は、56.3%であった。

つぎに、A~P と同じロットに属する新しい試験片 11 本について、この予測アルゴリズムに従って低サイクル疲労試験中に破壊のオンライン予測を試みた。その結果を Table 4 の Specimen No. 1~7 に示す。ここに、11 本の試験片のうち 4 本は、 $N=5$ 以下で破断したので表より除外した。このオンライン予測結果と Simulation results-I の結果を加えた場合の的中率は、52.3% となり、Simulation results-I のみの率より低くなっている。

そこで、データ数を増やすことによって予測の信頼度がどの程度向上するかを知るために、オンライン予測試験より得た 7 個のデータを加え、標本数を $k=23$ として、改めて F -直線の回帰を行ない、同様なシミュレーションを行なった。この場合、(5)₁式の代りに、

$$m = 0.523 + 2.90x \quad (5)_2$$

が与えられ、自由度 21 に対して、 $T=2.080$ となるので(6)式の代りに

$$C = \sqrt{0.006 + 0.525(x - 0.340)^2} \quad (6)_2$$

を得る。

そして、シミュレーションを行なったところ、同表に示した Simulation results-II を得た。この場合の的中率は 65.2% で、I の場合より 8.9% 向上した。このことから、予測の信頼度を上げるための一つの方法として、新たに試験をして得たデータをフィードバックしてデータに加え、その都度 F -直線の回帰をし直すことが考えられる。この考え方をアルゴリズムとしてコンピュータのプログラムに加えることも可能であるが、機会を改め報告したい。

5. 結 言

パーソナルコンピュータを材料試験機と結合して用いたチョップドストランドガラスマット強化不飽和ポリエステル樹脂積層板に対する低サイクル疲労試験より得られた結果をまとめると次のようになる。

(i) マット強化 FRP 積層板の片振引張り低サイクル疲労試験にパーソナルコンピュータをオンライン利用することにより、破壊にいたるまでの歪応答をモニタすることができた。この目的のため、大歪ゲージを FRP 成形時に埋め込む方法を採用した。

Fig.12 Flow-chart for the on-line prediction test of failure cycles.

Table 4 Simulation results and on-line test results of predicted upper and lower bounds of failure cycles.

Specimen No.	Test results N_f	Simulation results-I		On-line prediction results		Simulation results-II	
		$\tilde{N}_s$	$\tilde{N}_L$	$\tilde{N}_s$	$\tilde{N}_L$	$\tilde{N}_s$	$\tilde{N}_L$
A	50	*15	72			*19	56
B	23	* 7	29			*10	27
C	37	4	16			7	9
D	92	4	16			7	9
E	19	4	15			* 5	20
F	9	* 4	19			* 6	9
G	25	*18	91			*16	85
H	41	*20	126			*35	111
I	10	11	28			*10	19
J	49	*20	105			*31	94
K	29	* 9	30			*11	29
L	42	5	21			9	15
M	50	*12	72			*10	64
N	17	* 6	22			*11	20
O	164	5	17			7	9
P	18	—	—			—	—
1	12			* 6	12	* 7	13
2	26			* 7	106	* 7	80
3	47			*30	62	*31	56
4	168			15	27	14	23
5	22			24	41	*20	35
6	88			13	29	12	25
7	9			---	---	---	---

(ii) ディスクに記憶したデータ解析によって、疲労に伴う歪挙動に関して、塑性歪の全歪に対する割合の変化は、繰返し数の対数との間に、ほぼ線形関係を有することがわかった。

(iii) 静的引張り強度の 90~75% の高応力振幅を負荷した低サイクル疲労寿命のばらつきは、静的引張り強度のばらつきに比して非常に大きく、また、高応力レベルにおいてより大きい。

(iv) (ii) の歪挙動の特徴を利用し、かつ、信頼性理論に基づいて破壊繰返し数に信頼幅を付加して、コンピュータをオンライン利用して、試験片の破壊時期の予測を試みた結果、ある程度までの予測が可能となった。また、試験片本数を増やし、 F -直線の信頼性を高めることによって、破壊の予測の信頼度が向上することがわかった。

最後に、本研究を行なうにあたり、試験片の製作と低サイクル疲労試験に多大な労力を費やしていただいた本

学技術職員の板見和夫氏ならびに 58 年度卒業生の中澤善之氏、59年度卒業生の木村正昭、法覚 健の両君に感謝申し上げる。また、試験データの信頼性解析について適切なご教示をして下さった京都工芸繊維大学の前川善一郎助教授に厚く御礼申し上げます。なお、ガラス繊維と樹脂をそれぞれ提供していただいた日本硝子繊維㈱と武田薬品工業㈱に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 岡村弘之：日本機械学会誌，85，763 (1982)，39-43.
- 菊川 真，城野政弘，田中健一，近藤良之，田畑文夫，村田洋一：材料，29，327 (1980)，86-92.
- W.W. Stinchcomb, K.L. Reifsnider & R.S. Williams: ASTM, STP 613 (1976)，94-103.
- 吉田治夫：科学と工業，41，9 (1967)，438-442.
- 谷本敏夫，網島貞男，石川 浩：材料，28，304 (1979)，40-46.
- 国沢清典：統計学 初歩，日本評論社 (1974)，pp. 64-68.