完全両振りおよび完全片振り繰返し荷重下での FRP の 統計的残留強度劣化過程とプルーフテストについて†

谷 本 敏 夫* 石 川 浩** 網 島 貞 男*
柴 田 勝 久*** 松 岡 敬****

Residual Strength Degradation Process and Proof Tests for FRP Subjected to Various Tension-Compression Cyclic Loadings

by

Toshio TANIMOTO

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Hiroshi ISHIKAWA

(Department of Information Science, Kagawa University, Kagawa)

Sadao AMIJIMA

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Katsuhisa SHIBATA

(Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Kadoma)

and Takashi MATSUOKA

(Faculty of Engineering, Doshisha University, Kyoto)

Experimental studies have been performed on the residual strength degradation process of Glass/Polyester laminates under repeated tension and compression loadings. The validity of the model proposed in the previous paper was examined through the comparison with a sufficient amount of test data under both the perfectly reversed loading and the zero-tension loading conditions, for three kinds of specimens having different glass fiber contents.

Good correlation was verified between the theoretical prediction and the test result of the residual strength as well as its statistical distribution. In addition to predicting the residual strength, the present model was used to evaluate the effect of proof loads. It was also shown that the correlation between the experimental results and the theory of proof tests was reasonable.

(Received Apr. 13, 1983)

キー・ワード：残留強度，疲労寿命，信頼性，プルーフテスト，複合材料

1 はじめに

長時間の応力繰返しを受ける材料あるいは構造物がある任意の時点において残存・保有している強度，すなわち残留強度は変動性を有しつつ，時間とともに変化していくという事実は良く知られている．信頼性設計概念の一つである S-R モデル (Stress-Residual Strength Model) が示すところによれば，応力の繰返しにより強度の劣化がもたらされることによって，応力および強度の両分布の重畳部分が次第に増加し，破

壊の確率が増大することになる．したがって，目的の使用期間内において機械・構造物の破壊確率をある限度内に抑え，安全性・信頼性ある設計を行うという観点から残留強度の劣化過程は，最近では特に，航空機の信頼性評価を行ううえでの一つの有力な情報として注目されるようになってきた．

複合材料における残留強度劣化過程の統計的特性の理論的研究に関しては，過去に多くの研究がなされており，たとえば Halpin²⁾ らは等方均質体のクラック伝ば過程に基づいて理論的に検討し，Hahn³⁾ らや Yang⁴⁾ らは，複合材料の残留強度劣化の速度は残留強度の $(c-1)$ 乗に反比例するという仮定に基づいて論考した．また著者らも前報⁵⁾において，残留強度が繰返し数の増

† 原稿受理 昭和58年4月13日

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区鳥丸今出川

** 正 会 員 香川大学経済学部 高松市幸町

*** 松下電器産業(株) 大阪府門真市

**** 同志社大学大学院 京都市上京区鳥丸今出川

大につれ、指数関数的に劣化していくという理論的モデルを構築し、提案した。一方、残留強度に関する実験的研究のまとまった報告は^{6,7)}まだ数少なく、残留強度劣化過程についての情報から構造物の安全性を確認したり、信頼性を向上させるためこれを活用するためには、充分な実験データを蓄積し、種々の理論的モデルとの比較を通して、より信頼できる劣化モデルの確立を目ざさなければならないことは論をまたないであろう。

以上のような観点より、本論文は、種々の条件の下での残留強度データを測定し、先に著者らが提案した残留強度劣化モデルの妥当性について検討し、同時に Yang⁴⁾らのモデルとの比較を行ったものである。はじめに、完全両振り引張圧縮の繰返しを受けるそれぞれ異なったガラス含有率の FRP の残留強度データとの比較を行い、ついで完全片振り引張圧縮繰返しを受ける場合についても実験データを求め、モデルの検証を行った。最後に、圧縮残留強度の劣化過程に関しても検討を加えた。さらにこれに加えて、応力繰返しの後にブルー荷重 (Proof Load) を受けた場合の残留強度の統計的分布についても考察を行った。

2 供試材料ならびに試験片

本研究に用いた材料は基材として不飽和ポリエステル樹脂、補強材として平織ガラス布から成るものである。まず初めに、これらの素材を用い手積法により積層板を24時間常温硬化させて作製した。積層途中、層内に残る気泡を除去するためガラス丸棒をころがして気泡を送り出す脱泡方法を用いた。できあがった積層板はさらに電気炉で 353 K、4 時間のアフターキュアを施し、成形時の内部ひずみを除去した。これらの積層板から強化材の縦糸方向が試験片の長手方向になるようにして、Fig. 1 に示す形状寸法の試験片に加工した。

また、ガラス含有率の異なる試料のそれぞれの残留強度劣化過程を調べる目的のため、一定厚さ (3 mm) に積層するガラス布の枚数を変えることにより、供試材料のガラス含有率を変化させた。3 種類の積層板

Fig. 1. Test specimen (both in fatigue and tension).

(ガラス枚数が10枚、12枚、16枚) が成形された。ガラス含有率の違いの影響を検討するための実験は、完全両振り繰返し荷重のもとで実施された。また完全片振り疲労試験は、ガラス布枚数12枚 ($V_f=34.2\%$) の積層板について実施された。

Table I に積層板のガラス体積含有率および素材構成を示す。

Table I. Material of the specimen and its glass fiber content.

Matrix reinforcement	Polyester resin (Polylite FG-284) Plain woven glass cloth (MG-252)		
Number of plies of glass cloth	10	12	16
Glass-fiber content by volume	25.4 (%)	34.2 (%)	39.0 (%)

3 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 296 ± 1 K、湿度 $65 \pm 5\%$ の恒温恒湿槽内に試験直前まで少なくとも、48時間以上保持した後、取り出して実験に使用した。

本実験における負荷方式は引張圧縮とし、疲労試験装置として島津万能疲労試験機 UF-500 を用い、繰返し速度 2000 r. p. m. で完全両振りおよび完全片振り疲労試験を実施した。

残留強度の測定は、各応力レベルにおける寿命の期待値 N_f^* (便宜上、2母数ワイブル分布の期待値を基準寿命として用いる。) に基づいて、繰返し数比 n/N_f^* が 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 および 0.8 のそれぞれに達した時点で試験機を停止し、取りはずして残留引張強度および残留圧縮強度を測定した。引張試験および圧縮試験は島津オートグラフ IS-5000S を用い、クロスヘッドスピード 1 mm/min で実施した。なお、圧

(a) Test specimen (in compression).

(b) Ancillary jig to prevent the buckling of the specimen.

Fig. 2. Compression test.

縮試験は ASTM D 695 の規定に準拠して, 疲労試験片より切出した圧縮試験片 (Fig. 2 (a)) の両側面に座屈を防止するための治具 (Fig. 2 (b)) をあてて, 長軸方向に圧縮する方法を採用した。

4 実験結果および考察

4.1 基礎 $S-N$ 線図の確立

ガラス枚数10枚 ($V_f=25.4(\%)$) およびガラス枚数16枚 ($V_f=39.0(\%)$) の試料に対する完全両振疲労試験により得られた $S-N$ 線図をそれぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に示す。各応力レベルとも10本の試験片を用い、

Fig. 3. Basic $S-N$ diagram for perfectly reversed loading ($V_f=25.4\%$).

Fig. 4. Basic $S-N$ diagram for perfectly reversed loading ($V_f=39.0\%$).

で, 寿命の変動性を調べた。図中に示されている直線は2母数ワイブル分布に基づいた寿命の期待値 N_f^* (本研究における基準寿命) の最小自乗法による直線近似結果である。各含有率の試料の直線式を参考のため以下に示す。

$$V_f=25.4(\%): S^{13.63} \cdot N=2.608 \times 10^{15} \quad (1)$$

$$V_f=34.2(\%): S^{14.11} \cdot N=6.700 \times 10^{16} \quad (2)$$

(前報より)

$$V_f=39.0(\%): S^{14.30} \cdot N=3.247 \times 10^{17} \quad (3)$$

同様に, $V_f=34.2(\%)$ の試料に対する完全片振疲労試験により得られた $S-N$ 線図を Fig. 5 に示す。ただし, 縦軸は先の両振りの場合に合せて, 応力振幅をとった。

4.2 初期静強度の分布パラメータの決定

Fig. 5. Basic $S-N$ diagram for zero-tension condition ($V_f=34.2\%$).

前報で議論したごとく, 初期静強度 $R(0)^{*1}$ は2母数ワイブル分布に従うものと仮定する。このとき $R(0)$ の分布関数は

$$F_{R(0)}(\sigma) = \text{Prob.}[R(0) \leq \sigma] \\ = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (4)$$

で与えられる。

$V_f=25.4(\%)$ および $V_f=39.0(\%)$ の試料の初期静強度データをワイブル確率紙上に打点したものが Fig. 6, 7 である。ワイブル分布の形状母数および尺度母数は平均ランク法 ($F_{R(0)}(\sigma_i) = i/(n+1)$) による

Fig. 6. Distribution of static tensile strength on the virgin material ($V_f=25.4\%$).

Fig. 7. Distribution of static tensile strength on the virgin material ($V_f=39.0\%$).

*1 以後, 確率変量はゴシック字体を用いて表すこととする。

Table II. Estimation of Weibull parameters for ultimate tensile strength of virgin material.

	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}(\text{kgf/mm}^2)$	$\sigma_{\text{ult}}(\text{kgf/mm}^2)$
$V_f=25.4(\%)$	32.63	19.86	19.52
$V_f=34.2(\%)$	30.34	22.54	22.13
$V_f=39.0(\%)$	27.50	25.54	25.04

累積確率に基づいて、最小自乗推定法により求められた。各含有率に対するそれらの推定結果を Table II にまとめて示す。なお、 σ_{ult} は初期静強度の平均値 $\sigma_{\text{ult}} = \beta\Gamma(1+1/\alpha)$ を表すものである。

4・3 残留強度の分布パラメータの決定

前報の提案モデルによれば、繰返し応力レベル S で n 回の繰返しを受けたときの残留強度 $R(n)$ は、モデルの基礎となる劣化速度に関する方程式に基づいて次式で表される。

$$R(n) = R(0) \cdot e^{-f(s) \cdot n} \quad (5)$$

したがって、残留強度 $R(n)$ の分布関数 $F_{R(n)}(\sigma)$ は

$$\begin{aligned} F_{R(n)}(\sigma) &= \text{Prob.}[R(n) \leq \sigma] \\ &= \text{Prob.}[R(0)e^{-f(s) \cdot n} \leq \sigma] \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\beta^*(s)}\right)^\alpha\right] \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、

$$\beta^*(s) = \beta \cdot e^{-f(s) \cdot n} \quad (7)$$

で与えられる。^{*2}

残留強度データの一例として $V_f=39.0(\%)$ 、 $S=9$ (kgf/mm^2) の場合について Fig.8 に示す。ここで、

Fig. 8. Variation of residual strength as a function of cycle ratio (perfectly reversed loading; $V_f=39.0\%$, $S=9 \text{ kgf/mm}^2$).

^{*2} 残留強度 $R(n)$ の分析を実験的に求める際には、繰返し応力 s を与えられた回数 n 回繰返して荷重し、未破断であった試験片を静引張試験に供する手法が用いられるので、この場合には未破断であるという条件を考慮に入れた条件付き確率

$$\begin{aligned} \text{Prob.}[R(n) \leq \sigma | R(n) > s] &= \text{Prob.}[s < R(n) \\ &\leq \sigma] / \text{Prob.}[R(n) > s] \\ &= 1 - \exp[(s^\alpha - \sigma^\alpha) / (\beta^*(s)^\alpha)] \end{aligned}$$

を考える必要がある。ただし、 $[s/\beta^*(s)]^\alpha$ が相対的に小さい場合には上式は近似的に式(6)に等しいものと考えてよい。本節でもこのような近似的な取扱いをすることにする。

分布のパラメータ $\beta^*(s)$ 、つまり $f(s)$ の推定について考えてみることにする。各繰返し数比における残留強度のデータに基づき、 i 番目の繰返し数比に対するワイブル分布における母数の組合せ $[\alpha, \beta_i^*(s)]$ を推定し、しかる後にそれぞれの $f_i(s)$ を計算することも可能である。しかしながら前出の式(6)が示すごとく、提案モデルから導かれた残留強度分布は形状母数 α が初期静強度分布に対するものと変らなく一定で、尺度母数のみが変わることになったため、この結果に基づき取扱いを簡単化するため $\alpha = \text{const} \equiv \hat{\alpha}$ と考えて $\beta^*(s; n_i)$ を best-fit するようにして $f_1(s) = f_2(s) = \dots = \text{const} \equiv \hat{f}(s)$ を決定することとした。best-fit 曲線の例として、両振りの場合については $V_f=39.0(\%)$ 、 $S=8(\text{kgf/mm}^2)$ の場合を、片振りの場合については $V_f=34.2(\%)$ 、 $S=4.5(\text{kgf/mm}^2)^{*3}$ の場合をそれぞれ Fig.9 および Fig.10 に示す。縦軸は、各繰返し数比に対する残留強度の尺度母数 β^* を初期静強度の尺度母数 β で除して無次元化したものである。

Fig. 9. Best fit exponential curve for the relationship between expected residual strength and cycle ratio (perfectly reversed loading; $V_f=39.0\%$, $S=8 \text{ kgf/mm}^2$).

Fig. 10. Best fit exponential curve for the relationship between expected residual strength and cycle ratio (zero-tension condition; $V_f=34.2\%$, $S=4.5 \text{ kgf/mm}^2$).

^{*3} この場合、完全両振りであるので平均応力 S_m 応力振幅 S_a がともに等しく、 $S_m=S_a=4.5(\text{kgf/mm}^2)$ である。

ところで, 初期静強度が σ_{ult} である材料が $s=s_1$ の応力を n 回繰返し受けたときの残留強度 $R(n)$ は

$$R(n) = \sigma_{ult} \cdot e^{-f(s_1) \cdot n} \quad (8)$$

となり, したがって $n/N_f^* = 1.0$ での残留強度の値は

$$R(N_f^*) = \sigma_{ult} \cdot e^{-f(s_1) \cdot N_f^*} \quad (9)$$

となる. 式(9)に基づいて先に推定した $\hat{f}(s)$ から, 基準寿命 N_f^* の時点での残留強度の値 $R(N_f^*)$ を外挿した結果, たとえば完全両振りの場合について示した Fig. 9 ($V_f = 39.0(\%)$, $s = 8(\text{kgf/mm}^2)$) では $R(N_f^*) = 16.78(\text{kgf/mm}^2)$ となった. すなわち, 前報において異なったガラス含有率 $V_f = 34.2(\%)$ について詳しく議論されたのと同様に, $R(N_f^*)$ の値はガラス含有率にかかわらず, それぞれの応力振幅の約2倍の値, 換言すれば応力変動幅 $s_r (s_{\max} - s_{\min})$ にほぼ近い値をとることが判明した. 一方, 完全片振りの場合には Fig. 10 ($V_f = 34.2(\%)$, $s_m = s_a = 4.5(\text{kgf/mm}^2)$) の結果から外挿される疲労破断時での残留強度の値は $R(N_f^*) = 12.39(\text{kgf/mm}^2)$ となり, $R(N_f^*)$ の値は応力変動幅 s_r の約1.4倍となることが明らかとなった.

完全両振りの繰返しで, $V_f = 39.0(\%)$, $S = 9(\text{kgf/mm}^2)$ の場合の残留強度データを各繰返し数比 n/N_f^*

Fig. 11. Comparison between experimental and theoretical distributions of residual strength (perfectly reversed loading; $V_f = 39.0\%$, $S = 9 \text{ kgf/mm}^2$, $n/N_f^* = 0.1$).

Fig. 12. Comparison between experimental and theoretical distributions of residual strength (perfectly reversed loading; $V_f = 39.0\%$, $S = 9 \text{ kgf/mm}^2$, $n/N_f^* = 0.6$).

Fig. 13. Comparison between experimental and theoretical distributions of residual strength (perfectly reversed loading; $V_f = 39.0\%$, $S = 9 \text{ kgf/mm}^2$, $n/N_f^* = 0.8$).

についてワイブル確率紙上に打点した結果を Fig. 11 ~ 13 に示す. 図中, 実線は先の手順で推定した $\hat{f}(s)$ もしくは $\hat{\beta}^*(s)$ を用いて, 提案モデルによる理論的な残留強度分布を式(6)より計算したものである. 各繰返し数比とも計算結果は, 実験結果に比較的近いものとなった.

これまでに知り得た結果を勘案すれば, 提案モデルを用いて各繰返し数での残留強度およびその分布を推定するには Fig. 14 に説明するごとく, まずはじめに便宜上, 完全両振りの場合には $R(N_f^*) = s_r$ と置き, さらに完全片振りの場合には $R(N_f^*) = 1.4 \cdot s_r$ と置くことにより式(9)より $f(s)$ を算出できる. しかる後にこのようにして得られた $f(s)$ の値を用いれば, 各繰返し数に対する残留強度およびその分布は式(8)および式(6)によって, 比較的簡単に推定することが可能となるものと思われる.

Fig. 14. Flow chart, illustrating the procedure in estimating the residual strength and its statistical distribution for the different loading conditions.

4.4 残留強度劣化曲線

Fig. 14 で説明されたような手順で $f(s)$ の値を推定し, 式(8)から残留強度 $R(n)$ を理論計算して実験データと比較したのが Fig. 15 (完全両振り; $V_f = 39.0(\%)$, $s = 8(\text{kgf/mm}^2)$), Fig. 16 (完全両振り; $V_f = 25.4(\%)$, $s = 6(\text{kgf/mm}^2)$), Fig. 17 (完全片振り; $V_f = 34.2(\%)$, $s = 4.5(\text{kgf/mm}^2)$) である. 実線が本理

Fig. 15. Comparison between experimental data and theoretical curves for the degradation of residual strength (perfectly reversed loading; $V_f=39.0\%$, $S=8 \text{ kgf/mm}^2$).

Fig. 16. Comparison between experimental data and theoretical curves for the degradation of residual strength (perfectly reversed loading; $V_f=25.4\%$, $S=6 \text{ kgf/mm}^2$).

Fig. 17. Comparison between experimental data and theoretical curves for the degradation of residual strength (zero-tension condition; $V_f=34.2\%$, $S=4.5 \text{ kgf/mm}^2$).

論による計算結果で、破線が比較のために示された Yang の理論による計算結果である。残留強度の劣化過程は完全両振り、完全片振りの両タイプとも、さらにはガラス含有率の異なる場合でも、Yang の理論曲

線よりも提案モデルによる計算結果の方が傾向的にはよく合っていると考えてよいであろう。また、前報で論考したごとく提案モデルは、異なった組合せの複合材や負荷条件の異なる場合などにも適用できるよう拡張することが可能である。この場合、式(5)に対応した残留強度劣化過程は次式で与えられる。

$$R(n) = R(0)e^{-f(s)n^c} \quad (10)$$

c は定数であり、 c の値が 1 のときには元のモデルに帰着する。Fig. 15~17 において一点鎖線は、この拡張モデルによる計算結果であり、計算に際して $c=0.6$ をとった。この拡張モデルによればさらに実験データに忠実な近似ができ、 c の値のとり方によって設計の際の必要性に応じて、より安全側の推定も可能となる。

4・5 圧縮残留強度劣化過程

$V_f=34.2(\%)$ の試料を用いて、繰返しに伴う圧縮残留強度の変化を測定し、繰返し応力レベル s の異なる場合についてまとめて示したのが Fig. 18 である。

Fig. 18. Degradation process of residual strength in compression for various cyclic stress amplitudes.

実験は各繰返し数比とも 10 本の試料を用いて実施され、丸印はワイブル分布の期待値を表している。応力の繰返しに伴う圧縮残留強度の劣化する割合は、引張残留強度に比べて著しく小さく、低応力レベルの場合でも n/N_f^* が 1 に近づいても依然として、初期静強度の 80% 以上の強度を保持している。したがって、長時間の応力繰返しに伴う一種の劣化過程という観点からは、引張残留強度の方が多くの情報を含んでいると考えられる。

4・6 プルーフ荷重を受けた FRP の残留強度分布

ある機器を製造した場合、その機器が予想される性能を有しているかを確認するために一般に保証試験 (Proof test) を行い、信頼性工学的見地よりこれを設計へ応用する様々な試みがなされている。保証試験に関しては板垣らや Shinozuka らの研究などがある。

ここで、 n 回の応力繰返しを受けた後に FRP が残存・保有する強度が予想された挙動をするかを確認する試みのため、繰返しの後にプルーフ荷重 p を作用させ、このときの残留強度の分布を考えてみることにす

る。この場合の残留強度の分布関数 $F_{R^*(n)}(\sigma)$ は条件付確率の考えを援用することにより

$$\begin{aligned} F_{R^*(n)}(\sigma) &= 1 - \text{Prob.} [R(n) \geq \sigma | R(n) \geq \rho] \\ &= 1 - \left[\frac{\text{Prob.} [R(n) \geq \sigma]}{\text{Prob.} [R(n) \geq \rho]} \right] \\ &= 1 - \exp \left\{ \frac{\rho^\alpha - \sigma^\alpha}{(\beta^*(s, n))^\alpha} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

で与えられる。ただし、 $\sigma \geq \rho$ である。

これに関する実験として、 $V_f = 34.2(\%)$ の試料を用いて $s = 8(\text{kgf/mm}^2)$, $n/N_f^* = 0.8$ の繰返し後に、処女材の静強度の75%の大きさのブルーフ荷重 ρ を作用させた場合の残留強度の分布を調べたものが Fig. 19 である。実際には、図中に示されたデータ以外に2本の試験片が実証試験の途中で破断した。前報の $V_f = 34.2(\%)$, $s = 8(\text{kgf/mm}^2)$, $n/N_f^* = 0.8$ の条件に対する残留強度データによれば、初期静強度の75%の大きさのブルーフ荷重というのは10本中3本が破断する応力レベルであることを考えれば、このことは理解できるであろう。また保証試験を実施した場合の残留強度は式(11)を用いることにより、強度の分散性はやや異なるようではあるが、比較の実データに近い予測ができるものと思われる。

Fig. 19. Distribution of residual strength after subjected to proof load (note that two specimens have failed during proof load).

つぎにブルーフ荷重の大きさの違いによって、その後の残留強度分布 $F_{R^*(n)}(\sigma)$ がどのような影響を受けるか、すなわち分布のブルーフ荷重レベルによる敏感性 (Sensitivity) を検討したものが Fig. 20 である。 k はブルーフ荷重の、平均静強度 σ_{ult} に対する割合を表し、 $k = 0.2, 0.4$ および 0.6 では下側の領域でわ

Fig. 20. Variation of residual strength distribution according to the change of proof load.

ずかな違いを示すだけでほとんど差がなく、 K の値が 0.7, 0.75 および 0.8 と大きくなるにつれ、残留強度分布 $F_{R^*(n)}(\sigma)$ は著しい影響を受けることになる。換言すれば、ブルーフ荷重レベルが大きくなるほど、この保証試験によって取除かれる弱い部材の割合が多くなり、強度の高い部材が保証試験に耐えて生き残ることになるわけであるから生存部材集団の破壊確率は相対的に小さくなり、このような生存部材を用いることにより信頼度の向上を期待することができる。このようにブルーフ荷重を作用させ破損を生じなかった場合には、その事実から様々な推論を下すことが可能であり、これを信頼性工学的見地より設計へ有機的に応用することはきわめて重要である。

5 結 言

本研究において、完全両振および完全片振繰返し荷重下での残留強度に関する実験的研究がなされた。著者らによって前報において提案された残留強度劣化過程の統計的モデルの妥当性が考究された。その結果モデルの有用性が確認され、さらに、ガラス含有率の異なる場合の残留強度データについてもモデルの検証がなされた。

また、応力繰返しの後にブルーフ荷重を作用させた場合の残留強度の統計的分布についても考察がなされた。保証試験については、非破壊試験から得られる情報と関連づけることも可能であり、これらの手法を信頼性工学的見地から有機的に設計に応用する試みは、今後ますます、重要となるであろうと考える。

(昭和57年12月9日 第4回設計における信頼性工学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) J.N. Yang, ASTM STP 617, 272 (1977).
- 2) J.C. Halpin, K.L. Jerina and T.A. Johnson, ASTM STP 521, 5 (1973).
- 3) H.T. Hahn and R.Y. Kim, J. of Composite Materials, 9, 297 (1975).
- 4) J.N. Yang and M.D. LIU, J. of Composite Materials, 12, 176 (1977).
- 5) 谷本敏夫, 石川 浩, 網島貞男, 柴田勝久, 松岡 敬, 材料, 31, 1217 (1975).
- 6) L.J. Broutman and S. Sahu, Proc. of 24th Annual Conf. SPI, Reinforced Plastic Division (1969).
- 7) T. Tanimoto and S. Amijima, J. of Composite Materials, 9, 380 (1975).
- 8) 板垣 浩, 石川 浩, 山本規雄, 第4回設計における信頼性工学シンポジウム前刷集, p.15, (1982).
- 9) M. Shinozuka and J.N. Yang, Proc. of the 8th Reliability and Maintainability Conf., 8 (1969).