

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-547

含水積層 CFRP の曲げ強度と疲労強度

古田敏康・野口義男・松嶋正道

1978 年 10 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. は し が き	1
2. 試 験 片	1
3. 試 験 法	2
3.1 曲げ弾性率試験	2
3.2 曲げ強度試験	2
3.3 含 水 試 験	2
3.4 曲げ疲労試験	3
4. 試 験 結 果	3
4.1 曲げ弾性率と強度	3
4.2 含 水 率	4
4.3 曲げ疲労強度	5
4.3.1 XAS/MRX-3501の積層材	5
4.3.2 Z-3/#241の積層材	6
4.3.3 T-300/#3130の積層材	6
5. 結 論	7
6. あ と が き	8

含水積層CFRPの曲げ強度と疲労強度*

古田 敏康** 野口 義男** 松嶋 正道**

Static and Flexural Fatigue Strength of Hydrated CFRP Laminated Plates

By Toshiyasu FURUTA, Yoshio NOGUCHI
and Masamichi MATSUSHIMA

This paper presents the results of the experimental investigation of the static and dynamic mechanical properties of laminated carbon fiber reinforced plastics (CFRP).

The composites consist of denatured epoxy resin MRX-3501, #241, #3130 and reinforced high strength type carbon fiber, PYROFIL-XAS made by Mitsubishi Rayon Co., CARBOLON Z-3 by Nippon Carbon Co., and TORYACA T-300 by Toray Co.

These laminated CFRP plates were fabricated with 24 plies of [0°, 45°, -45°, 90°] sym. laminates; the symmetry of plies is about the laminate midplane.

Flexural fatigue test results on normal test pieces and on hydrated test pieces soaked in water for two weeks were compared. The results of flexural fatigue tests showed the ratio of the flexural fatigue strength at 10⁷ cycle to the static flexural strength to be 0.27~0.43. The fatigue strengths of normal test pieces and hydrated test pieces were not changed in XAS/MRX-3501 and Z-3/#241; however, they were changed slightly in T-300/#3130.

1. は し が き

航空機構造用材料としてのカーボン複合材(CFRP)は、一般には積層材の形式で用いられる。マトリックスに使用される樹脂は耐熱性のある変性エポキシ樹脂が多く使われている。

航空機の場合には湿度の高い環境にさらされることが多い。そこで、3種類の高強度カーボン繊維と3種類の変性エポキシ樹脂を使った(0°, ±45°, 90°)の24層積層CFRPについて、まず曲げ弾性率と静的曲げ強度を求め、引張応力下の理論値と比較した。

つぎに、各CFRP試験片と各変性エポキシ樹脂単体試料を約15℃の水中に30~40日間つけた後の重量増

加を測定し、含水率を求めた。さらに、含水後の各CFRPの曲げ疲労強度を求め、含水しないものの曲げ疲労強度と比較し、各CFRPの含水率と曲げ疲労強度の関係について調べた。

2. 試 験 片

ここで使用した各種カーボン繊維の主な特性を表1に示し、試験片のカーボン繊維と変性エポキシ樹脂の組合せを表2に示す。カーボン繊維はすべて高強度品で、エポキシ樹脂は各カーボン繊維会社で開発したものである。まずカーボン繊維のプリプレグ(prepreg)を、0°, 45°, -45°, 90°の方向で板厚中立面に対し対称となるように24層積層後、オートクレーブで加熱、加圧して試験素材を成形した。素材は縁を切り取り最終的に300×300×3mmの平板にした。なお、プリプレグとは

* 昭和53年3月1日受付

** 機体第一部

カーボン繊維をシート状にそろえ、それにエポキシ樹脂を含浸させ、半乾燥させたものである。

曲げ弾性率ならびに曲げ強度用試験片は長さ 300 mm、幅 15 mm に、曲げ疲労試験片は図 1 に示す形状に、それぞれダイヤモンドカッターを使用した試験片調整装置¹⁾で作った。

3. 試験法

ここで行った積層材の静的特性試験は、曲げ弾性率と 4 点曲げ強度である。これに対して動的特性は 4 点曲げによる疲労試験である。これらの試験法は以前にわれわれが一方向強化カーボン複合材で開発した方法^{1), 2)}で行なったが、簡単にその方法を述べると次の通りである。

3.1 曲げ弾性率試験

弾性率の測定法には引張試験法、曲げ試験法などがあるが、ここでは 4 点曲げによる Dead Weight 法¹⁾を採用した。この装置を図 2 に示す。図 3 を参照して、この装置では支点間距離 $l_1 = 50$ mm、 $l_2 = 100$ mm に設定してある。この場合の曲げ弾性率 (E_b) は材料の等方性を仮定して、下記のように求められる。

$$E_b = \frac{W l_1 l_2^2}{16 I \delta} = \frac{3 W l_1 l_2^2}{4 b h^3 \delta} \quad (1)$$

表 1. 各種カーボン繊維の特性 (カタログ値)

カーボン繊維	引張強度 (Kg/mm ²)	弾性率 (Kg/mm ²)	製作会社
PYROFIL XAS	350	24000	三菱レイヨン(株)
CARBOLON Z-3	280	23000	日本カーボン(株)
TORAYCA T-300	280	24000	東レ(株)

表 2. CFRP 試験片の繊維と樹脂の組合せ

カーボン繊維	エポキシ樹脂
XAS	MRX-3501
Z-3	# 241
T-300	# 3130

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

ここで、 W は荷重 (Dead Weight)、 δ は試験片中央部の変位 (ダイヤルゲージで測定)、 b 、 h はそれぞれ試験片の幅と厚さである。中央部の変位 (δ) を測定すれば (1) 式により、曲げ弾性率を求めることができる。

3.2 曲げ強度試験

曲げ強度試験法には 3 点曲げと 4 点曲げによる方法があるが、最近の複合材ではほとんど 4 点曲げによる方法が採用されているので、ここでは 4 点曲げにより求めた。試験法は図 3 において $l_1 = 50$ mm、 $l_2 = 100$ mm とし、4 つの支点部の曲率半径はすべて 5 mm R とした。曲げ強度 (σ_b) は初等はり理論が適用できると仮定して、次式により求めた。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{P l_1}{2} \cdot \frac{6}{b h^2} = \frac{3 P l_1}{b h^2} \quad (3)$$

ここで、 M は曲げモーメント、 Z は断面係数、 P は最大荷重である。

3.3 含水試験

図 1 に示した形状の試験片と各変性エポキシ樹脂単体試料より 20 × 80 × 10 mm に切り出した試験片それぞれを約 15℃ の水中につけて、3 ~ 5 日毎に重量増加を測定し、もとの重量に対する増加率を含水率とした。なお重量は試験片を水中から取り出し、乾燥したガーゼでふ

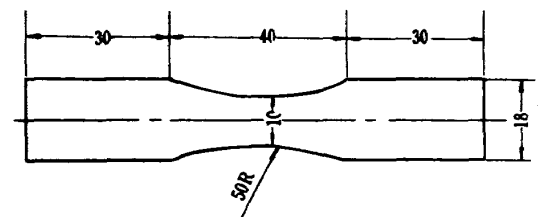


図 1 曲げ疲労試験片

き、3分後に精密化学天びんを用いて測定した。

3.4 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験機は、以前に航技研において複合材用に改造した超過荷重防止装置付^{2), 3)}のB-70型(東洋精機製, 最大荷重70Kg)定荷重型試験機を用いた。試験は両振り4点曲げである。繰返し応力は(3)式を参照して求めた。ここで l_1 は30mmに設定した。なお繰返し数は1800 cpmで、最大振幅は18mmである。

過去いくつかのCFRPで行なった疲労試験では、片対数グラフ上で、応力-繰返し数曲線(S-N曲線)は直線とみなせた。^{2), 8)}本研究の場合も後述するように、片対数グラフ上で、ほぼ直線関係にある。このため実験式としては、繰返し応力を σ とし、 N を繰返し数とすると、次式が得られる。

$$\sigma = A - B \log N \quad (4)$$

実験結果に対して寿命側で最小二乗法をあてはめて、(4)式のパラメータを求めS-N曲線を描いた。

4. 試験結果

4.1 曲げ弾性率と強度

積層材の曲げ弾性率と曲げ強度の実験結果を表3に示す。 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 積層材の諸弾性特性値をうるために、面内引張りを考えた積層理論^{4), 7)}により求めた弾性特性の計算結果を表4に示す。積層角度が $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ の場合には面内等方性となり、積層板主軸方面に関する E_x と E_y および ν_x と ν_y は等しくなる。さらに G_{xy} は E_x と ν_x により $G_{xy} = E_x / 2(1 + \nu_x)$ の関係式により求められる。実験は4点曲げによる縦弾性率(E_x)

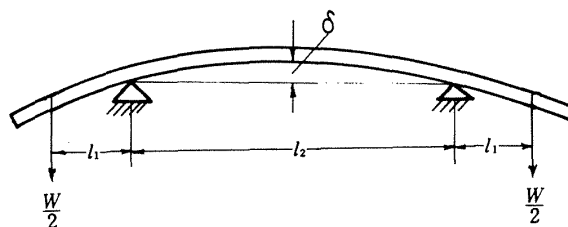


図3 4点曲げの説明図

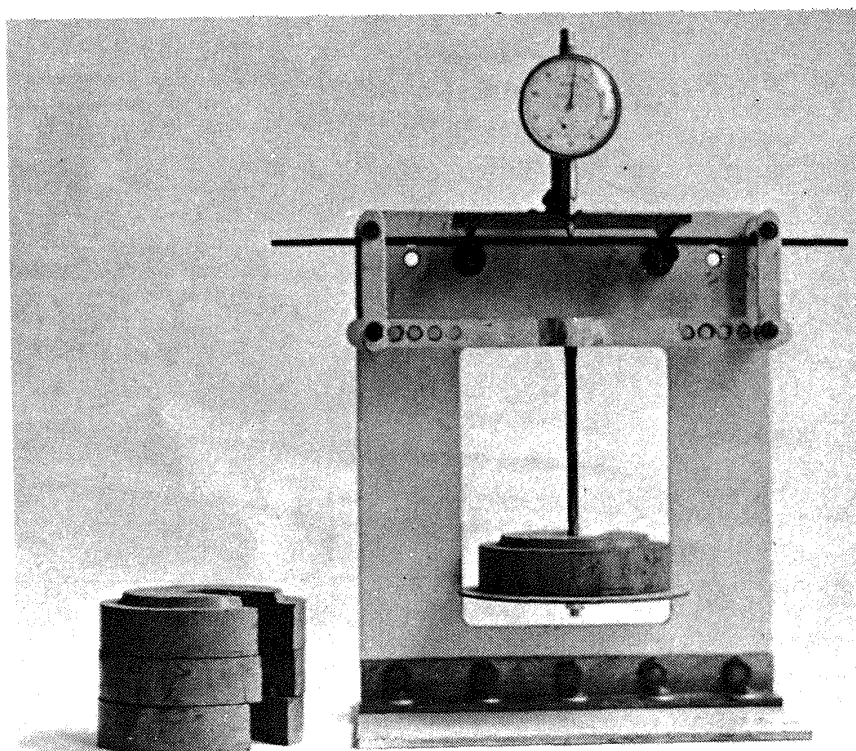


図2 曲げ弾性率測定装置
(Dead weight 法)

を求めたものであるが、各実験結果とも応力条件を引張とした解析結果に近い値となった。

つぎに曲げ強度値の検討を行なう。純曲げ状態にあるはりの公称曲げ応力は、はり理論によれば上下最遠層における引張応力と圧縮応力により与えられることに着目し、曲げ強度を表面軸方向の引張応力と圧縮応力により推定する。⁷⁾ 解析は最大応力説を拡張した破壊メカニズムの分類による方法^{5), 6), 7)}で行なった。同法の手順は一方向強化材について4種の破壊メカニズムを導入し、それらに対応する基礎強度をあらかじめ求めておく。積層材については引張応力下において各積層構成中の繊維を含む任意の面に関する3次元的諸応力を解析し、前記の4種の基礎強度と関連づけて破壊強度を決定する。計算に用いた一方向強化材の基礎強度および計算結果を表5に示す。CFRPは比較的脆性であることを考慮し、積層材の曲げ強度予想値は積層最外層である0°層の繊維が引張破壊を起こすまで積層材として耐えうるものと

推定した場合の値である。さらに、繊維の引張強度の高い(表1参照)XAS繊維を用いた積層材はT-300あるいはZ-3繊維を用いた積層材より高い計算結果となる。表3に示した曲げ強度の実験結果は各推定値に比較的近いものとなった。

4.2 含水率

各種エポキシ樹脂単体の含水率測定結果を図4に示す。ここでDX-210は標準エポキシ樹脂で比較のために実験を行なった。なお#3130樹脂については、樹脂単体の成形が困難なため省略した。樹脂の種類により含水率が異なり、40日間後の含水率は0.6~1.2%となった。

つぎに各種CFRP試験片の含水率測定結果を図5に示す。やはり使用樹脂により差があり、30日間後の含水率はZ-3/#241, XAS/MRX-3501, T-300/#3130の順で多く、0.25~0.34%となった。図4と比較して、Z-3/#241とXAS/MRX-3501の順序が逆になっているのは、CFRPの成形のとき後者

表3. 各種積層材の曲げ弾性率と曲げ強度(実験値)

カーボン積層材	曲げ弾性率(Kg/mm ²)	曲げ強度(Kg/mm ²)
XAS/MRX-3501	5100	80
Z-3/#241	5030	61
T-300/#3130	5080	64

表4. 積層材の弾性率の計算値

計算に用いた一方向強化材の弾性特性値

E_L	=	14540	Kg/mm ²
E_T	=	995	Kg/mm ²
G_{LT}	=	487	Kg/mm ²
ν_L	=	0.312	
ν_T	=	0.0214	

計算結果

$$E_X = E_Y = 5570 \text{ Kg/mm}^2, G_{xy} = 2120 \text{ Kg/mm}^2, \nu_x = \nu_y = 0.315$$

表5. 積層材の強度の計算値

計算に用いた一方向強化材の強度特性値

$$\begin{aligned} F_L &= 210 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (XAS/MRX-3501)}^1) \\ F_L &= 168 \text{ Kg/mm}^2 \text{ (T-300/#3130}^2), \text{ Z-3/#241}^3) \\ F_L' &= 130 \text{ Kg/mm}^2 \\ F_T &= 4.5 \text{ Kg/mm}^2 \\ F_{LT} &= 13 \text{ Kg/mm}^2 \end{aligned}$$

計算結果

$$\begin{aligned} 1) & 80 \text{ Kg/mm}^2 \\ 2), 3) & 64 \text{ Kg/mm}^2 \end{aligned}$$

の方がボイドの含有率が多いためと予想され、原因については調査中である。

4.3 曲げ疲労強度

各種積層CFRPについて、まず含水しないものの曲げ疲労強度を求め、つぎに2週間約15°Cの水中につけた後、1本ずつ取り出して曲げ疲労強度を求め、両者を比較し、含水率と曲げ疲労強度の関係について調べた。

4.3.1 XAS/MRX-3501の積層材

含水しないものと、含水後の曲げ疲労試験結果の比較を図6に示し、疲労特性を表6に示す。この試験の結果、含水しないものと、含水後の疲労強度は一致し、差は認められなかった。(4)式により求めた値は、 $\sigma = 70 - 6.77 \log N$ となった。表6から σ_f/σ_b の値は0.27で、 A/σ_b の値は0.88である。なお含水しないT-300/

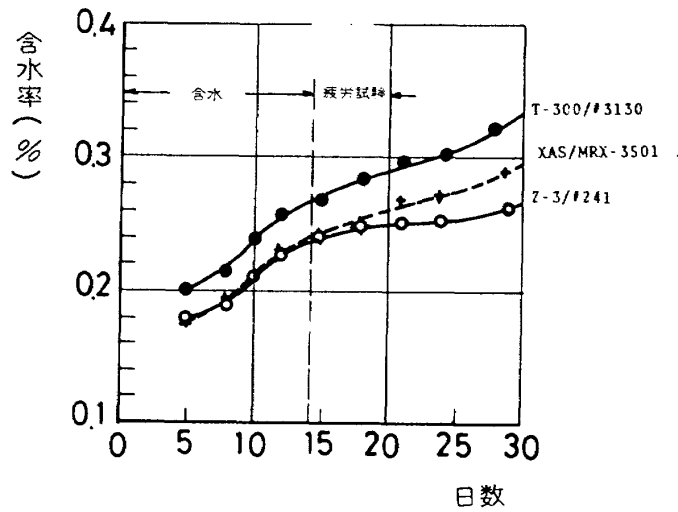


図5 各種積層材の含水率

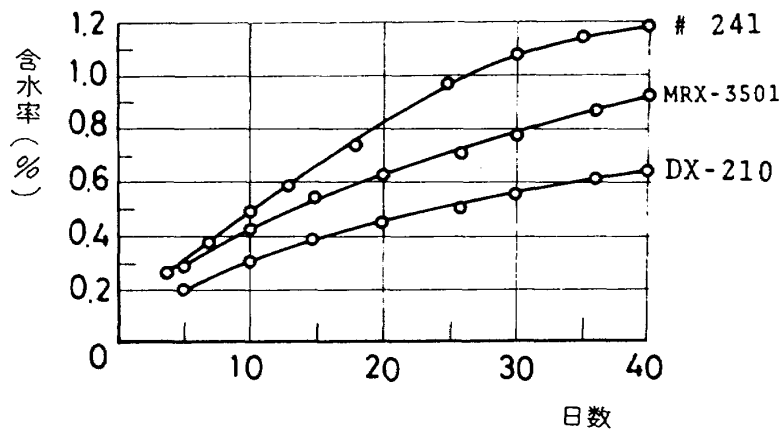


図4 各種エポキシ樹脂の含水率

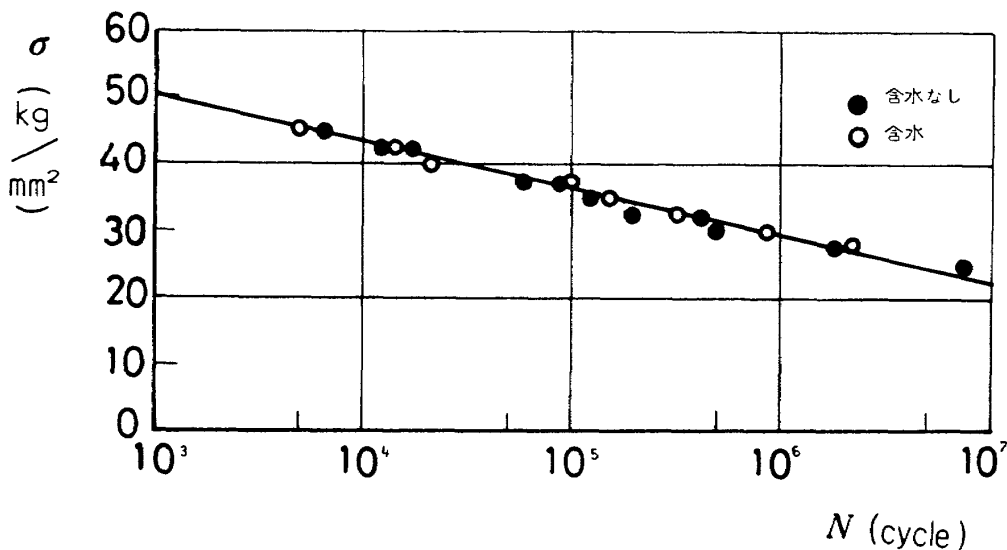


図6 XAS/MRX-3501積層材のS-N曲線の比較

#3130 の試験結果と比較すると A , B , σ_f の値はほぼ等しい, したがって両者の曲げ疲労強度特性は同程度なことを示している。疲労試験後の試験片の破壊例を図7に示す。

4.3.2 Z-3/#241 の積層材

含水しないものと, 含水後の曲げ疲労試験結果の比較を図8に示し, 疲労特性を表6に示す。この試験の結果も含水しないものと, 含水後の疲労強度は一致した。(4)式から求めた値は, $\sigma = 60 - 4.98 \log N$ となった。表

6から σ_f/σ_b の値は 0.43 で, 他に比較してやや大きな値を示している。この材料の一方方向強化の CFRP の σ_f/σ_b の値は 0.48⁸⁾であったから, 積層材の結果に近い値となっている。 A/σ_b の値は 1 に近く, $S-N$ 曲線の傾斜 B の値は 4.98 と他に比較して低い。 10^7 回における σ_f の値は $26 \text{ Kg}/\text{mm}^2$ と一番大きな値を示している。曲げ疲労試験後の試験片の破壊例を図9に示す。

4.3.3 T-300/#3130 の積層材

含水しないものと, 含水後の曲げ疲労試験結果の比較

表6. 各種積層材の疲労特性

カーボン積層材	A	B	$\sigma_f (\text{Kg}/\text{mm}^2)$	$\sigma_b (\text{Kg}/\text{mm}^2)$	A/σ_b	σ_f/σ_b
XAS/MRX-3501	70	6.77	22	80	0.88	0.27
Z-3/#241	60	4.98	26	61	0.99	0.43
T-300/#3130	69.5	6.75	22.5	64	1.08	0.35
T-300/#3130 (含水)	63.9	6.15	20.6	64	0.99	0.32

$$\sigma = A - B \log N, \sigma_f; 10^7 \text{ 回の時間強度}, \quad \sigma_b; \text{静的曲げ強度}$$

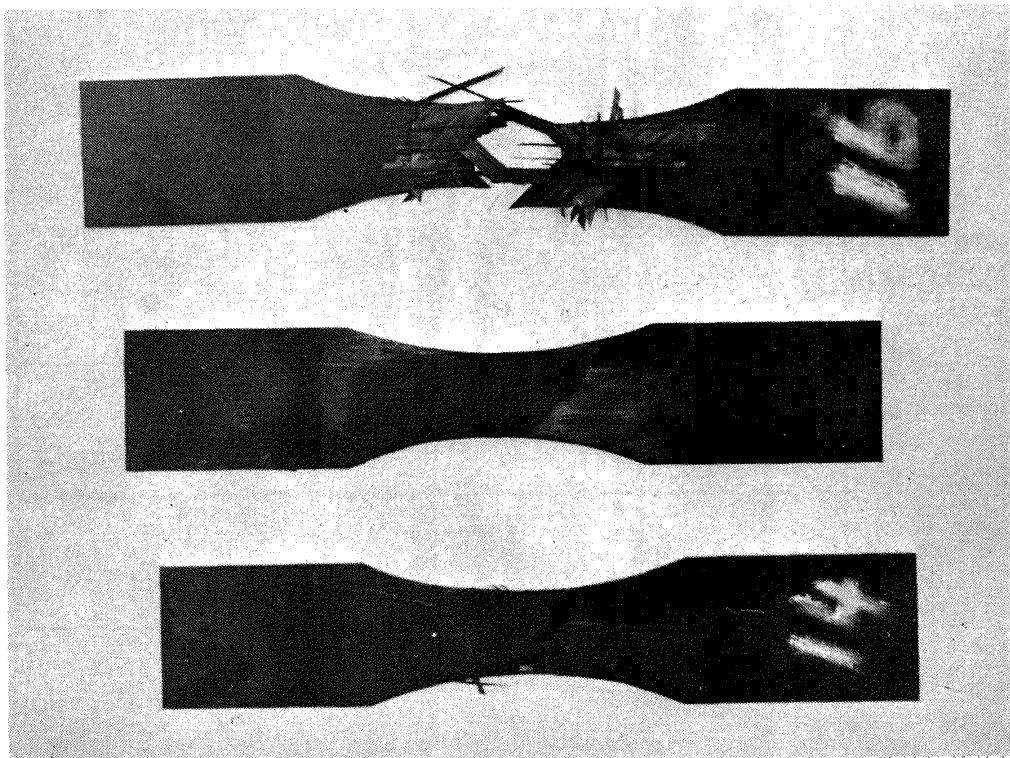


図7 XAS/MRX-3501 積層材の破壊例

を図10に示し、疲労特性を表6に示す。この試験の結果、含水率の比較的高い積層CFRPでは曲げ疲労強度は含水後に低下する。表6から σ_f/σ_b の値は含水しないものは0.35で、含水後は0.32となった。またこの材料の一方方向強化CFRPの σ_f/σ_b の値は0.46⁸⁾であったから、積層材ではやや低下する。 A/σ_b の値は約1となっている。疲労試験後の試験片の破壊例を図11に示す。

5. 結 論

0°, ±45°, 90°の積層構成によるCFRPの引張応力下における弾性特性値および静的強度の理論計算を行ない、曲げによる試験結果との比較検討を行ない、よい一致をみた。また変性エポキシ樹脂を使用した積層CFRPの含水率を求め、含水率が0.24%以下では曲げ疲労

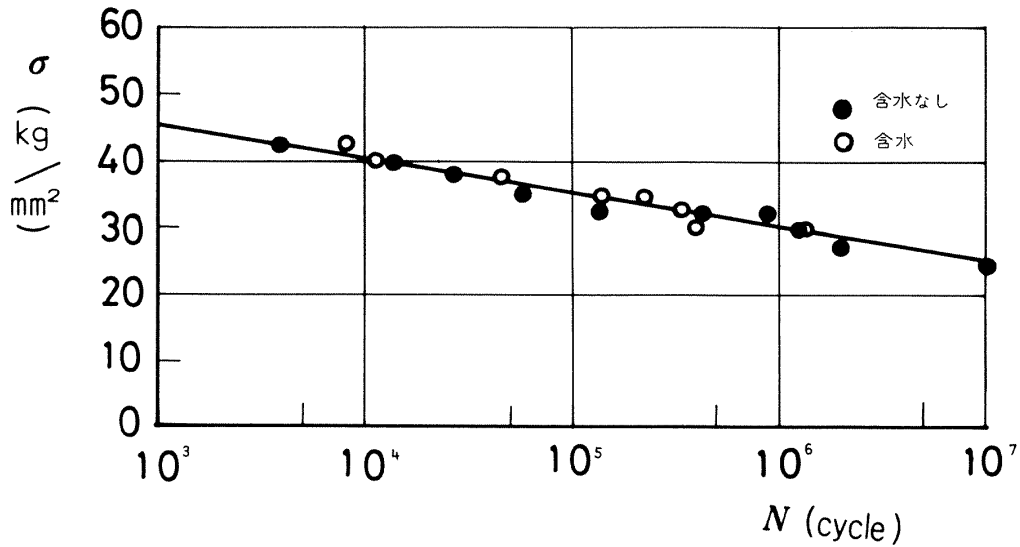


図 8 Z-3/#241 積層材のS-N曲線の比較

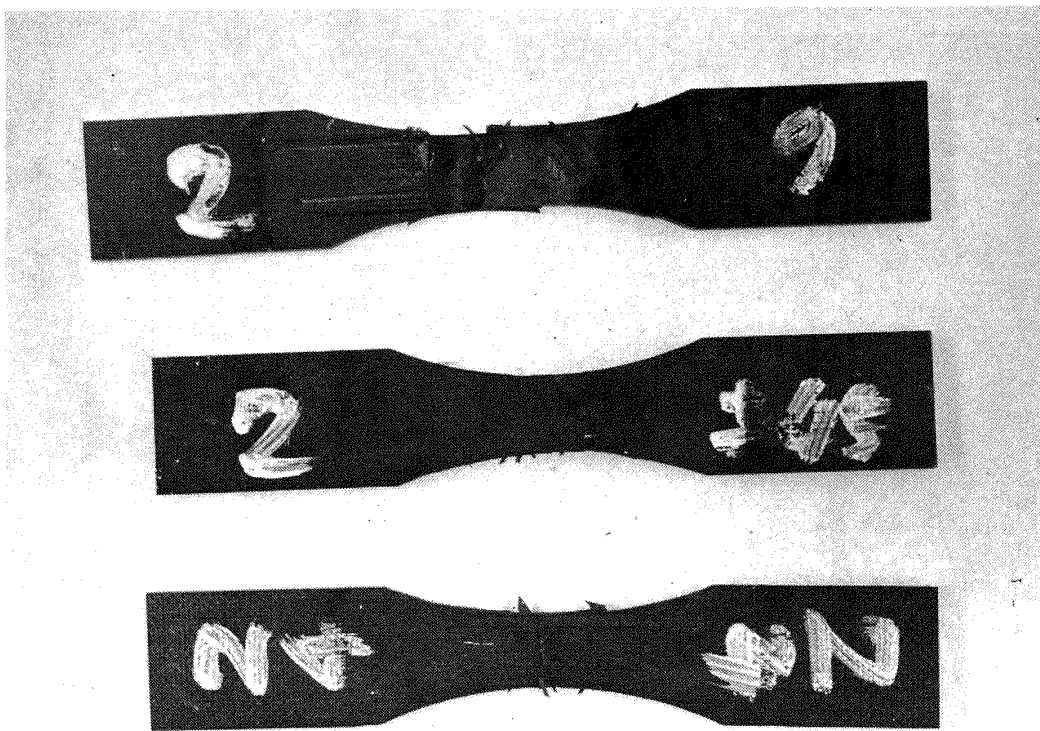


図 9 Z-3/#241 積層材の破壊例

強度は含水しないものと変わらないことがわかった。

すでに一方向強化 CFRP の疲労特性については報告した。⁸⁾ 今回は構造材として広く用いられている積層材の曲げ疲労強度を求め、 σ_f/σ_b の値が約 0.3 程度であることがわかり、航空機構造の設計に必要な資料を得ることができた。

6. あとがき

積層 CFRP の含水しないものと、含水後の曲げ疲労強度を求めたが、大きな差は認められなかった。航空機構造材として実用上は表面を塗装して使用するの、含水率はこの実験値よりはかなり低いものと予想される。

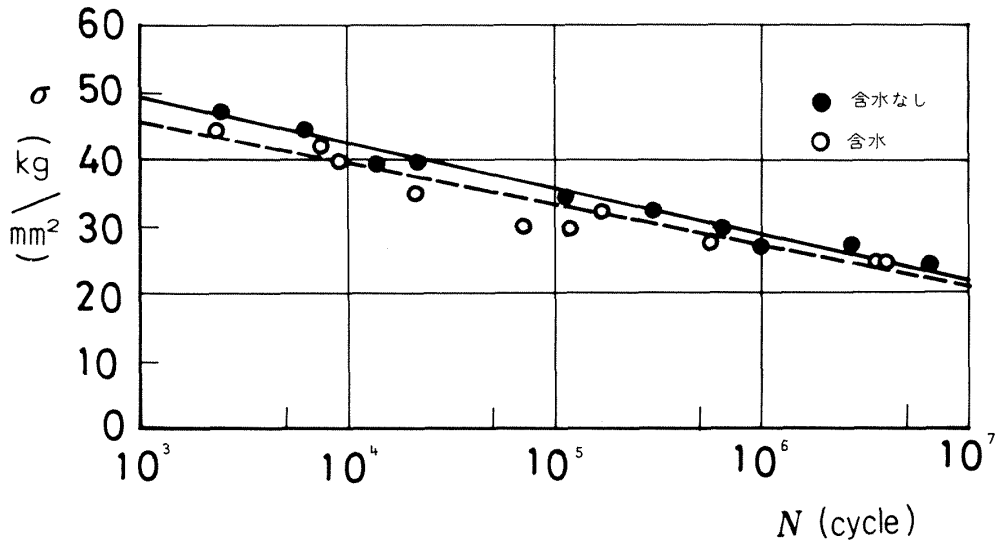


図 10 T-300 / #3130 積層材の S-N 曲線の比較

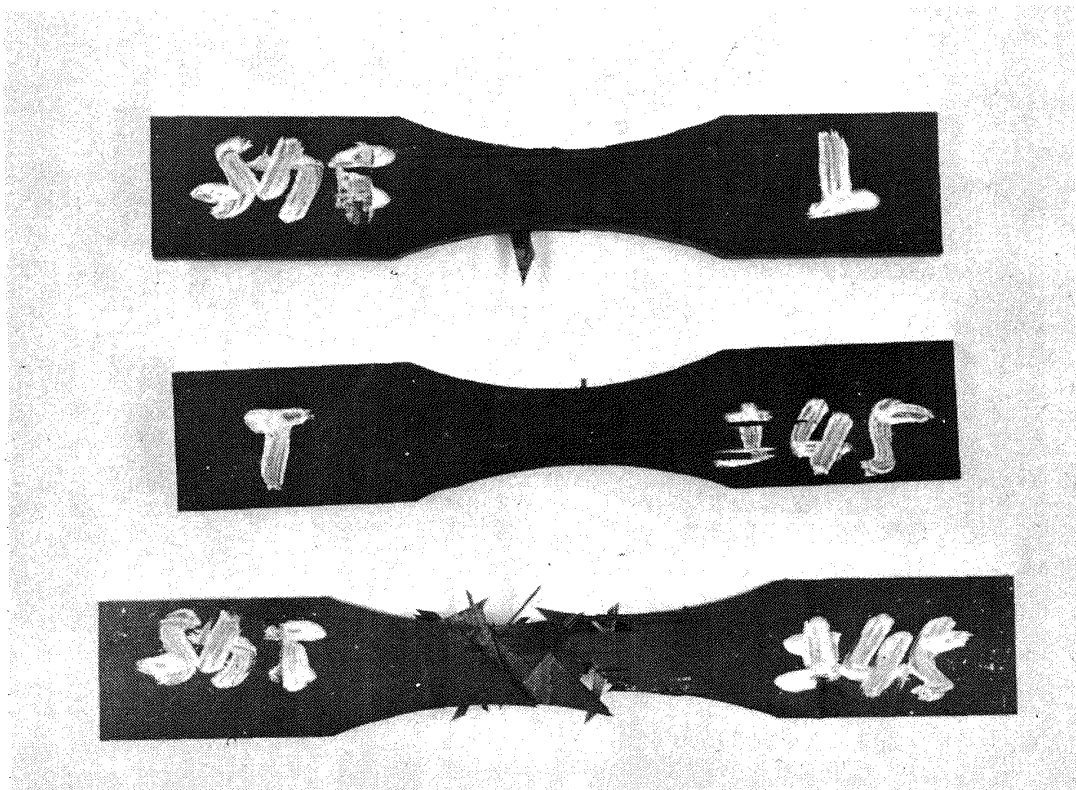


図 11 T300 / #3130 積層材の破壊例

したがって、外気中の水分による静的強度、疲労強度の低下は少ないものと思われる。しかし、吸湿したCFRPが上空では約 -45°C の環境にさらされることがあるので、これは重要な問題となるであろう。現在この種の実験を行なっているので後日報告する予定である。最後にこの報告書をまとめるに当たり、CFRP試験素材について種々協力いただいた三菱レイヨン(株)、日本カーボン(株)、東レ(株)、の関係者に、また試験片の製作に協力いただいた三菱重工(株)名古屋航空機製作所加工研究課の酒谷芳秋主務、山口泰弘研究員に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 古田, 野口, 松嶋; カーボン複合材の強度特性, 航技研資料, TM-241, 1973年6月
- 2) 古田, 野口, 松嶋; カーボン複合材の曲げ疲労強度, 航技研報告, TR-366, 1974年6月
- 3) 下河, 浜口; 航空機用アルミニウム合金2024-T4板材における疲れ寿命のばらつきとS-N曲線との関係, TR-367, 1974年4月
- 4) 植村, 山田; 炭素繊維強化プラスチック材の弾性係数, 材料, Vol. 24, № 257, (1975/2)
- 5) 山脇, 植村; ヘリカル巻きFW円筒の破壊強度, 材料, Vol. 19, № 206, (1970/11)
- 6) 植村, 井山, 野口; ヘリカル巻きFW円筒の圧縮破壊強度, 日本航空宇宙学会誌, Vol. 24, № 273 (1976/10)
- 7) 古田, 野口, 松嶋; 積層CFRPハニカムサンドイッチ材の強度, TR-527, 1978年2月
- 8) 古田, 松嶋, 野口; 各種カーボン複合材の曲げ疲労強度, 航技研報告, TR-525, 1977年12月

航空宇宙技術研究所報告 547号

昭和53年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)●182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

Printed in Japan