

直交積層 CFRP の引張疲れ強さの実験的評価*

野口 義男^{*1}

Experimental Results of Tensile Fatigue Strength of Cross-ply Laminated CFRP*

Yoshio NOGUCHI^{*1}

ABSTRACT

This study evaluates the testing method for static tensile and fatigue strength of advanced composite materials. The fatigue test is conducted under tensile-tensile constant range loading. The test specimen is a cross-ply laminated CFRP using a unidirectional fiber reinforced substrate and epoxy resin. The three carbon fibers adopted in this test are classified as high-strength, high-strain and high-strength/intermediate-elastic-modulus types. Fatigue damage in test specimens is quantified by an X-ray radiography penetrative crack detection method. The test results indicated that the fracture of all specimens occurred in sudden mode. The high-strength type CFRP should exhibit rupture in grip portion. The relationship between fatigue stress and number of cycles is approximately linear on a semi-logarithmic graph. After being subjected to 10^7 stress cycles, the ratios of tensile fatigue strength to static tensile strength for high-strength, high-strain and high-strength/intermediate-elastic-modulus types CFRP were estimated to be 0.97, 0.85 and 0.76, respectively.

Key words: Composites, Carbon/epoxy, Cross-ply laminates, Tensile test, Damage, X-ray radiography, Fatigue strength

概 要

新素材の強さを評価するための標準化技術確立に関する研究の一環として、炭素繊維強化樹脂複合材 (CFRP) の静的引張強さ試験及び引張疲れ強さ試験を行った。供試体には、一方向強化基材を積層した直交積層材と、それに加えて平織物基材を積層した織物積層材を用いた。前者の試験片の繊維としては、比較のために高強度品、高伸度品、及び高強度・中弾性率品の特徴を有する3種類の炭素繊維を、また後者については、高強度品と高伸度品の炭素繊維を用いて、それぞれの強さを評価した。試験片の破断様相をX線透過探傷写真結果を観察することにより、損傷を定量化した。試験の結果、何れも突発的な破断様相であることを確認した。なお高強度品の場合には、チャック切れ破断を呈するものであった。各試験片の繰返し応力と破断までの繰返し数の関係は、片対数グラフで直線近似式によって表わすことができた。直交積層材の疲れ強さ比(疲れ強さ/静的強さ)は、高強度品を用いたものが最も大きく、次いで高伸度品、高強度・中弾性率品の順番になった。一方向強化基材の直交積層材よりも平織物基材の織物積層材の方が疲れ強さ比は10%程度低めの値を示した。

* 平成9年9月22日受付 (received 22 September 1997)

*1 機体部 (Airframe Division)

1. まえがき

繊維強化複合材料の特性は繊維、樹脂、繊維含有率、積層構成によって大きく変えることができる。炭素繊維は原料繊維の組性、炭化焼成条件等により弾性率、強度の異なる性能を実現することができ、他の強化繊維にはない各種特性値のものが製品化されている。これらにより、CFRPの各種力学的特性値を系統立てたデータの蓄積がなされているものは極めて少ない。ところでCFRPの繊維方向に関する引張疲れ強さは金属材料より優れているが、高強度な一方強化CFRPに対する現状の評価方法には問題があり¹⁾、確立しているとは言い難い。多層積層材においては破壊様式が多様で、何をもって破壊と定義したかで差異があることを考慮しなければならない。さらに疲れ強さの取得には多大の時間を要するために、ある種の積層構成につき個別に試験が行われているのが現状である^{2)~14)}。したがって、これらデータ相互の比較には困難さを伴うことになっている。

本研究では、炭素繊維強化樹脂系複合材料の引張疲れ強さの評価として、高強度品、高伸度品及び高強度・中弾性率品の炭素繊維(引張強さのカタログ値は35 GPa、4.4 GPa及び5.6 GPa)それぞれによる一方強化基材を用いた3種類の直交積層材、及び高強度品と高伸度品の炭素繊維(引張強さが3.5 GPaと4.4 GPa)による平織物基材を用いた2種類の織物積層材について(母材は全て共通なエポキシ樹脂を使用した)、基本となる繊維方向についての静的引張強さ試験及び定荷重の引張 - 引張による繰返し疲れ強さ試験を行った。同試験片の損傷き裂の進展状況及び破壊様相をX線透過探傷法による非破壊検査によって観察した。これらを疲れ強さの比較結果と共に報告する。

2. 供試材料

2.1 素材構成

直交積層材は、表1に引張特性値を示した3種類の炭素繊維(T300, T400H及びT800H)と180 硬化型エポキシ樹脂(#3631)による一方強化繊維強化プリプレグ(P3211-12, P1211-15及びP2212-15:東レ(株))それぞれを用いて(0°/90°)_{4s}、(0°/90°)_{3s}及び(0°/90°)_{3s}の直交積層により平均厚さ

表1 強化繊維の特性値(カタログ値)

炭素繊維 名称	弾性率 E _f (GPa)	強さ f _f (GPa)	最大ひずみ f _f (%)
T300	230	3.53	1.5
T400H	250	4.41	1.8
T800H	294	5.59	1.9

2.0 mm、1.8 mm及び1.7 mmとした成形板(以下においてはC3直交材、C4直交材及びC5直交材とする)である。織物積層材は、2種類の炭素繊維(T300及びT400H)とエポキシ樹脂(#3631)による平織物強化プリプレグ(P7373-21及びP7344-21:東レ(株))それぞれを用いて10層及び8層の積層により平均厚さ1.9 mm及び1.6 mmとした成形板(以下においてはF3織物材及びF4織物材とする)である。これらの積層板寸法は全て500 mm × 500 mmとし、成形はオートクレーブを用いて180 °で2時間の保持によるノンブリード成形法によって行った。積層板は各3枚製作され、繊維体積含有率の平均値は各直交積層材が55%、56%及び57%で、織物積層材は59%と57%である。

2.2 試験片形状

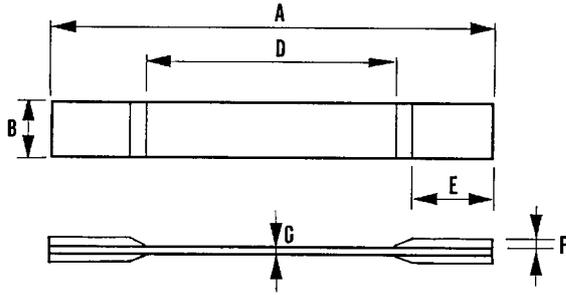
FRPの引張疲れ試験方法としてはASTM D3479規格¹⁵⁾が制定されている。対象は引張弾性率が20 GPa以上のガラス繊維、炭素繊維あるいはボロン繊維によって強化された樹脂系複合材料で、一方強化材と直交対称積層材を包括している。CFRPについてはJIS K7083規格¹⁶⁾が前記規格を参考に制定され、一方強化材と織物積層材を対象にしている。これらにおける試験片の形状、寸法等は静的引張特性試験方法の規格^{17,18)}とほとんど同じである。

なお高強度な炭素繊維を用いた一方強化CFRPの繊維方向について、現状の規格内容等による引張疲れ強さの評価試験を実施した結果は¹⁾意図した破壊様相と成らず、疲れ強さが低い値しか得られない。さらに疲れ試験においては、つかみ部補強タブの端にテーパを付けても同所の接着部は早期に剥離することを著者はすでに指摘した。

上記2規格における直交材を対象にした引張疲れ試験片の形状と寸法を図1に示す。両端のつかみ部に補強タブを接着した短冊形状であるが、寸法は微妙に異なっているのが現状である。そこで本評価試験における試験片は、上記結果等を参考にして図2の寸法とした。なお直交材におけるタブ材でテーパの効果を検討するために、C5直交材は上記規格に準拠してテーパ(長さ10 mm)付きとした。

2.2 試験片製作

1枚の積層板からは中央部において220 mm × 260 mm(試験片数で10本分)を採取して、試験素板とした。試験片つかみ部(長さ50 mmで幅が25 mm)用の端部補強タブ材には、ガラス繊維による朱子織物(WE181D:日東紡(株))と120 硬化型エポキシ樹脂(#2500:東レ(株))によるプリプレグを6層積層してオートクレーブ法(120 °,2時間)でGFRP板を成形した(板厚さは約1.5 mm)。前記試験素板の端部両面へGFRPを接着するには、加熱硬化型エポキシ樹脂フィルム接着剤(AF-126-2:住友3M(株))を用いてオートクレーブ法(120 °,2時間)により固着した。試験片は長さ220 mmで



引張疲れ試験片の形状と寸法（直交材への規格値）
単位：mm

記号	試験片の部位	ASTM D3479	JIS K7083
A	全長	228 以上	200 以上
B	幅	25.4	25 ± 0.2
C	厚さ	0.5 ~ 2.5	2 ± 0.4
D	ゲージ長さ	152 以上	70 以上
E	つかみ部長さ	38 以上	50 以上
F	タブの厚さ	0.8 ~ 10	1 ~ 2
	タブのテーパ部	5°	15 ~ 20

図 1 試験法規格における試験片の形状と寸法

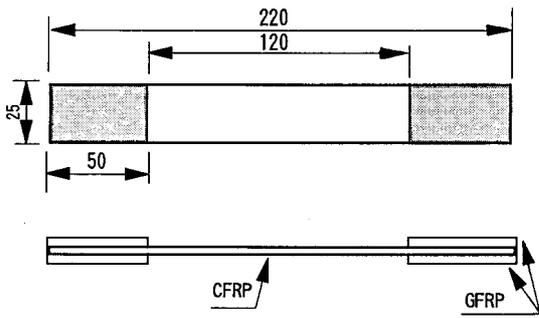


図 2 試験片の形状と寸法

幅が25 mmの短冊形状とし、ダイヤモンドカッターを用いた切断機で切出し加工を行った。ただしF4織物材は加工の手違いから長さ200 mm、タブ間の距離100 mmである。なお試料板の成形から試験片の加工については、東レ(株)に製作を依頼した。

3. 試験装置

静的特性試験及び疲れ強さ試験は、試験環境として温度 23 ± 3 ，相対湿度 $50\% \pm 5\%$ の雰囲気室内に設置した荷重容量が100kNの電気油圧サーボ式材料試験機(8501:インストロン(株))を使用した。つかみ具は、油圧式グリップを用いており、試験片のつかみ部を試験中は一定圧力で締め付けるようにした。なお本試験機の下部分かみ具を取り付けたアクチュエータ軸は回転が自由であり、油圧式つかみ具への油供給ホースによる回転力が試験片を擦る可能性があった(上部つかみ具は荷重検出器に固定されている)。そこで同影響を防止するためのジグを装着し、上下つかみ具間の軸芯面を一致させた。したがって試験片の取り付け

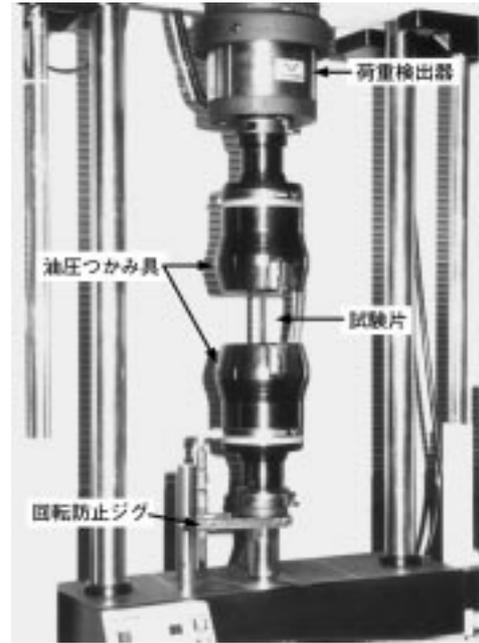


図 3 試験の状況

から試験終了に至るまで、試験片には捩り力が加わらない。図3に試験機の外観と試験状況を示す。

4. 静的特性試験

4.1 試験方法

引張特性測定用の試験片には、図2に示した試験片評定部の中央両面の長手方向にひずみゲージ(ゲージ長さ5 mm)をシアノアクリレート樹脂系の常温速硬化型接着剤を用いて貼付し、ひずみ履歴の計測用とした。引張試験における試験速度は、材料試験機のかみ具間の移動速度を毎分1mmで実施した。なお、ひずみゲージより動ひずみ計(DPM-611B:共和電業(株))を介しての出力及び材料試験機よりの荷重出力は、X-Y記録計(WX4422-Z11:グラフテックス(株))に試験片が破断に至るまで連続的に記録し、荷重とひずみの関係を求めた。

4.2 試験結果

静的特性試験は各5本の試験片について行い、それぞれの弾性率、破断時の強さ、及び最大ひずみを取得した。図4には各種層材の応力 - ひずみ関係例を示す。何れも硬化型(下に凸な曲線)の関係を示している。同傾向は高強度な炭素繊維を用いた場合ほど大きく、織物材よりも直交積層材において顕著であった。

弾性率(E_i)については、荷重 - ひずみ曲線における初期 ($\epsilon = 0.1-0.3\%$)の部分を用いて次式により算出した。

$$E_i = (P/A) / \epsilon \quad (1)$$

ここで、 P : 荷重の増加分、 A : 試験片の平均断面積、 ϵ : P 又は ΔP に対応するひずみの増加分、 σ : 応力の増

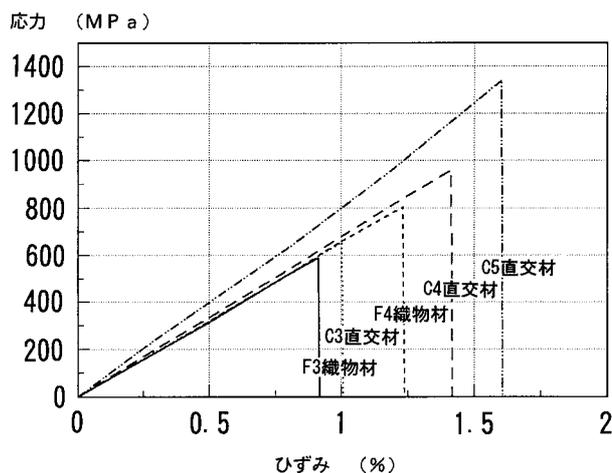


図4 静的特性試験における応力-ひずみ関係例

加分である。

破断時の強さ(σ_B)は、次式により算出した。

$$\sigma_B = P_B / A \quad (2)$$

ここで、 P_B は最大荷重である。

各試験片個々の弾性率及び強さの算出値と最大ひずみの測定値は付録にそれぞれ示すこととし、表2には各試験結果の平均値をまとめて示す。なお最大荷重時の近傍における弾性率を求めると、表2の値よりもC3直交材、C4直交材、F3織物材及びF4織物材がそれぞれ5%、そしてC5直交材では10%ほど高い値が得られた。

4.3 複合則値との比較

各直交積層材の弾性率について、複合則による算出値との比較を試みる。複合則とは複合材料の特性を構成素材の特性とその体積含有率のみにより表現されるとする関係式である。最も単純な線形関係で与えると弾性率は次式が成り立つ。

$$\text{弾性率} : E_t = \sigma_f \cdot E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3)$$

ここで、 E_f (炭素繊維の特性値)は表1に示した各値、樹脂特性値は $E_m = 3.7$ GPaとした。繊維含有率 V_f は実測の平均値より55%、56%及び57%を用いる。 σ_f は強化繊維の形態による係数であり、一方向強化では1.0であるが、本積層材のような直交方向(等量)強化の場合は0.5である。C3直交材、C4直交材及びC5直交材としての E_t の算出値は64.9 GPa、71.6 GPa及び85.4 GPaとなる。これらは、どれも表2の値に近いものである。次に、直交積層材の90°層に損傷き裂が入って、局部的に破損を生じた場合の弾性率を巨視的に推定する簡便法として、(3)式に $E_m = 0$ GPaを代入した場合の E_t は、63.3 GPa、70.0 GPa及び83.8 GPaとなる。樹脂特性値は繊維特性値に比べ極めて小さいため算

表2 静的引張特性試験結果

積層材の呼称	弾性率 E_t (GPa)	強さ σ_B (MPa)	最大ひずみ max (%)
C3直交材	65	609	0.9
C4直交材	68	970	1.4
C5直交材	83	1340	1.6
F3織物材	65	536	0.8
F4織物材	66	815	1.2

出値は、上記の結果とほとんど変わらない。したがって本積層材においては、何れも脆性的な破断になると予想した。

4.4 破断様相

試験片の破断状況は、全て最大荷重において瞬時に90°方向の分離破壊を生じた。試験片は、軟X線透過探傷装置(SV-100AW:ソフテックス(株))を使用した透過撮影をX線フィルム(#FR:富士写真フィルム(株))に行って検討用の資料とした。図5及び図6に各種層材の透過写真例を示す。図中の黒く見える部分は、造影剤(ヨウ化亜鉛: ZnI_2 の希釈液)が浸透したき裂や層間剥離の箇所である。C3直交材及びC4直交材での90°層内における繊維に沿う方向の損傷き裂や、F3織物材とF4織物材における横糸方向の損傷き裂は、破断部以外にはほとんど見られず局所的な破断である。C5直交材においては、90°方向の損傷き裂が他所に若干生じていることを確認した。なお高強度な繊維を使用したC4直交材及びC5直交材の場合は、破断時における二次的な層間剥離破損が生じたために破壊様相は複雑になっていると判断した。

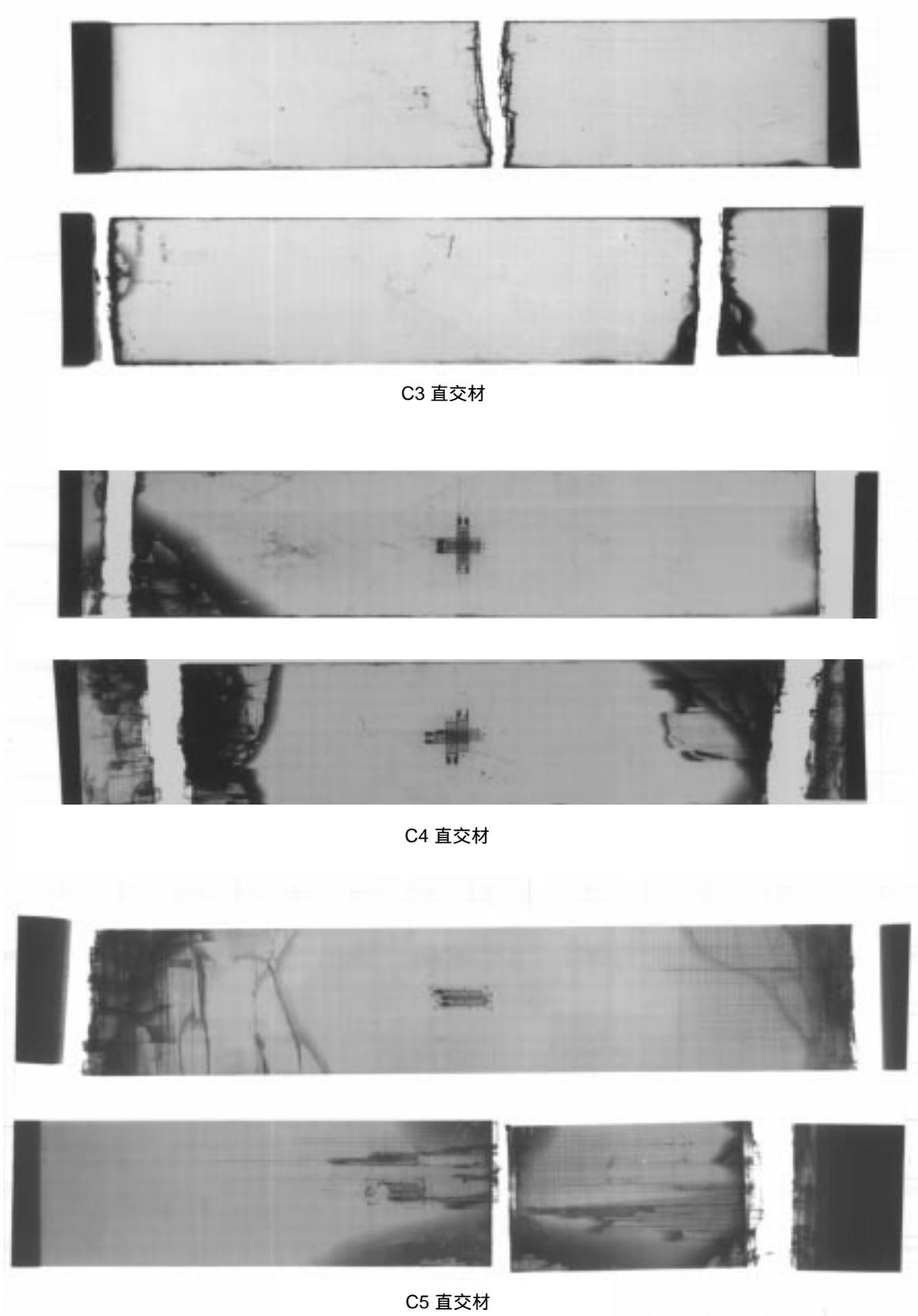
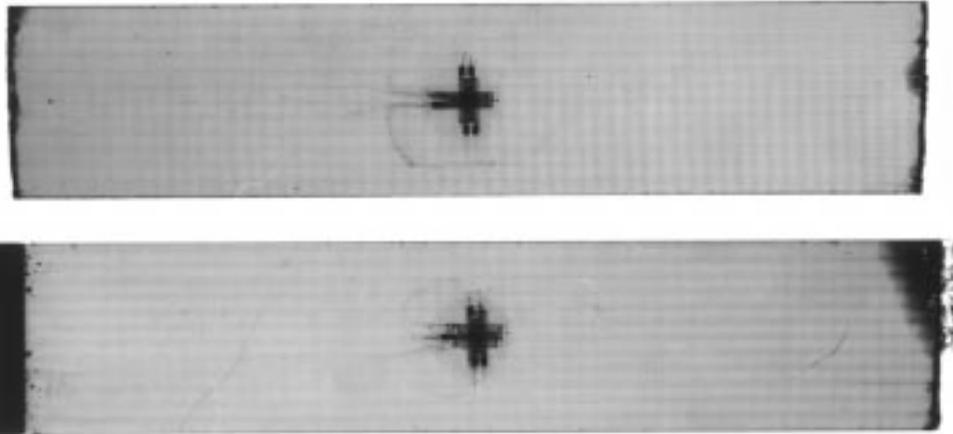
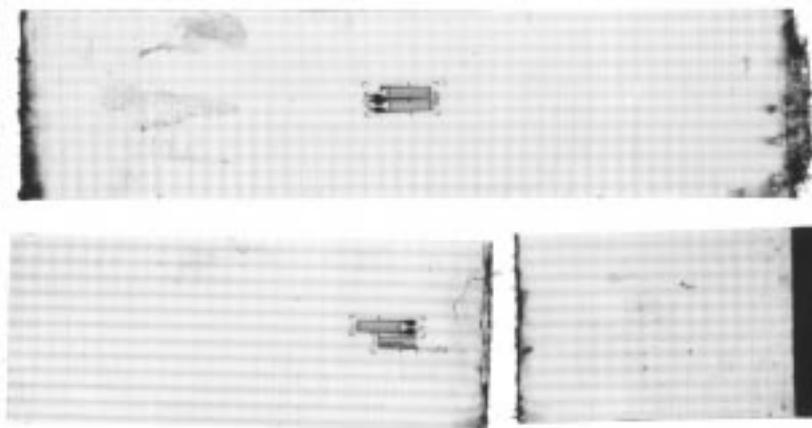


図5 直交積層材の静的破断様相例



F3 織物材



F4 織物材

図6 織物積層材の静的破断様相例

5. 疲れ強さ試験

5.1 試験状況

定荷重制御による正弦波の部分片振りで、応力比は最小応力(min)/最大応力(max) = 0.1の引張 - 引張、繰返し速度が5 Hzによる疲れ試験を行った。試験は試験片が破断に至るまでとした。一部の試験片については試験を一時的に中断し、ひずみゲージの再貼付を行い低荷重域での弾性率の再測定、及び疲れ破損き裂の進展状況または破断様相を確認するために静的特性試験片で実施したX線透過写真撮影による非破壊検査を行った。

5.2 弾性率の検討

ある試験片では疲れ試験を中断して、その試験片の弾性率を測定、及び10⁶回以上の繰返し数によっても破断に至らず試験を中止した試験片や破断した試験片の残存部につ

いて弾性率の再測定を行った。直交材では、若干の低下傾向にあるが静的特性試験における変動率の範囲内であった。織物材の結果でも静的試験における弾性率とほぼ同じ値であった。90°層や横糸内に破損き裂が生じてても、0°方向の引張弾性率は殆ど低下しない。4.3項の弾性率の算出においても予想したが、直交積層材では単に引張弾性率を観測していてもその低下が小さいため疲れ破断を予知できなかった。

5.3 直交積層材の破壊様相

直交積層材における疲れ試験に伴う破損進行例を図7に示す。90°層内の繊維に沿う方向の損傷き裂が、まず両幅端より内部方向に生じる。き裂の間隔は繰返し最大応力が大きい負荷では疎らであるが、繰返し最大応力が小さい場合には間隔の小さいき裂が多数生じた。これらの損傷き裂は繰返し数の増加と共に全幅方向に貫通したものが増す傾向

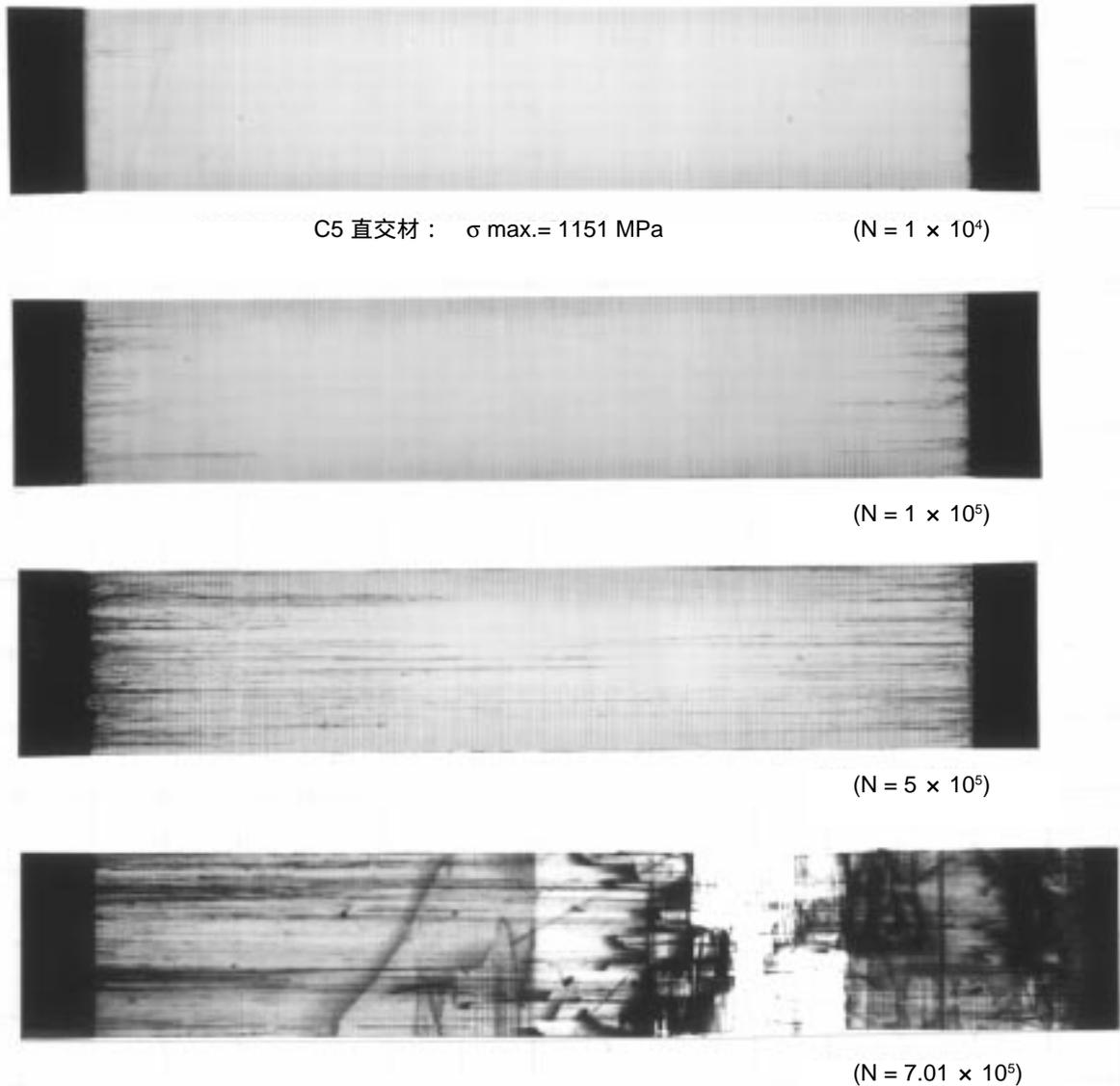


図7 直交積層材の疲れ破損の進展状況例

にある。なおタブ端から 0° 方向にも損傷の進展が見られる。これは疲れ試験に伴いタブ材が先端部よりはがれて、タブ端が試験片の表面に繰返し当たることによって表層の繊維を傷めるからである。ただし、この損傷は全体的な疲れ破断の主因にはなっていない。

疲れ破断した試験片例を図8に示す。C3直交材及びC4直交材の場合は、何れもほぼ評定部内における 90° 方向の局所的な破断になった。C5直交材では、つかみ部タブのテーパ部と端近傍で破断したものが多かった。引張疲れ試験中にタブのテーパ部で剥離が進行し、その後は応力集中によって破断したものと推測される。なおC5直交材では破断時の二次的な層間剥離損傷が認められ破壊領域はC3直交材及びC4直交材よりも広い範囲に及んでいる。幅部自由端からの層間剥離進行は、何れの直交材とも破断まではほとんど認められなかった。

5.4 織物積層材の破壊様相

織物積層材における損傷の進行状況例を図9に示す。横糸方向の損傷き裂が両幅側面部より内部方向に生じると共に、内部にも横糸に沿った損傷き裂が生じて幅方向に成長した。疲れ試験に伴って幅部自由端からの層間剥離進展は、両織物積層材ともに織糸目において損傷き裂が多数発生し、その後に剥離へと進展している。F4織物材の疲れ破断はF3織物材よりも広い範囲となり、高繰返し数に至る試験片では板厚さの側面の目視観察でも層間剥離が確認された。

織物積層材の疲れ破断試験片例を図10に示す。破壊は直交積層材と同様な形態で、縦糸が局所的に破断することによっている。F3織物材の破断箇所は、すべて片方のつかみ部端においてであった。 10° 以上の繰返し数によっても破断に至らず試験を中止した試験片について、残留強さ試験を行った結果は両つかみ部端において破断をした。F4織物



$\sigma_{\max.} = 590 \text{ MPa}, N = 2.42 \times 10^4$

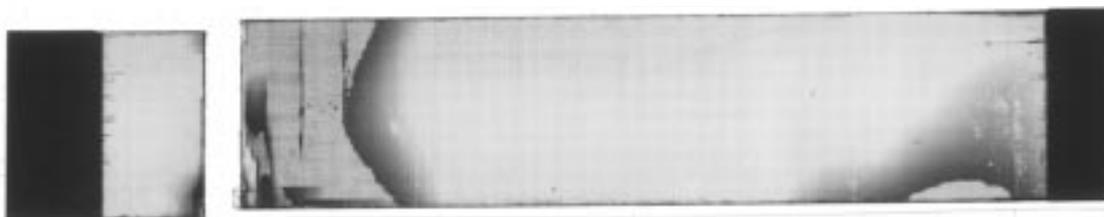


C3 直交材

$\sigma_{\max.} = 590 \text{ MPa}, N = 3.72 \times 10^5$



$\sigma_{\max.} = 833 \text{ MPa}, N = 6.25 \times 10^5$



C4 直交材

$\sigma_{\max.} = 843 \text{ MPa}, N = 4.14 \times 10^5$



タブ端 ↑

$\sigma_{\max.} = 1194 \text{ MPa}, N = 7.72 \times 10^4$

↓ タブ端



C5 直交材

$\sigma_{\max.} = 1194 \text{ MPa}, N = 2.39 \times 10^5$

図 8 直交積層材の破断試験片例

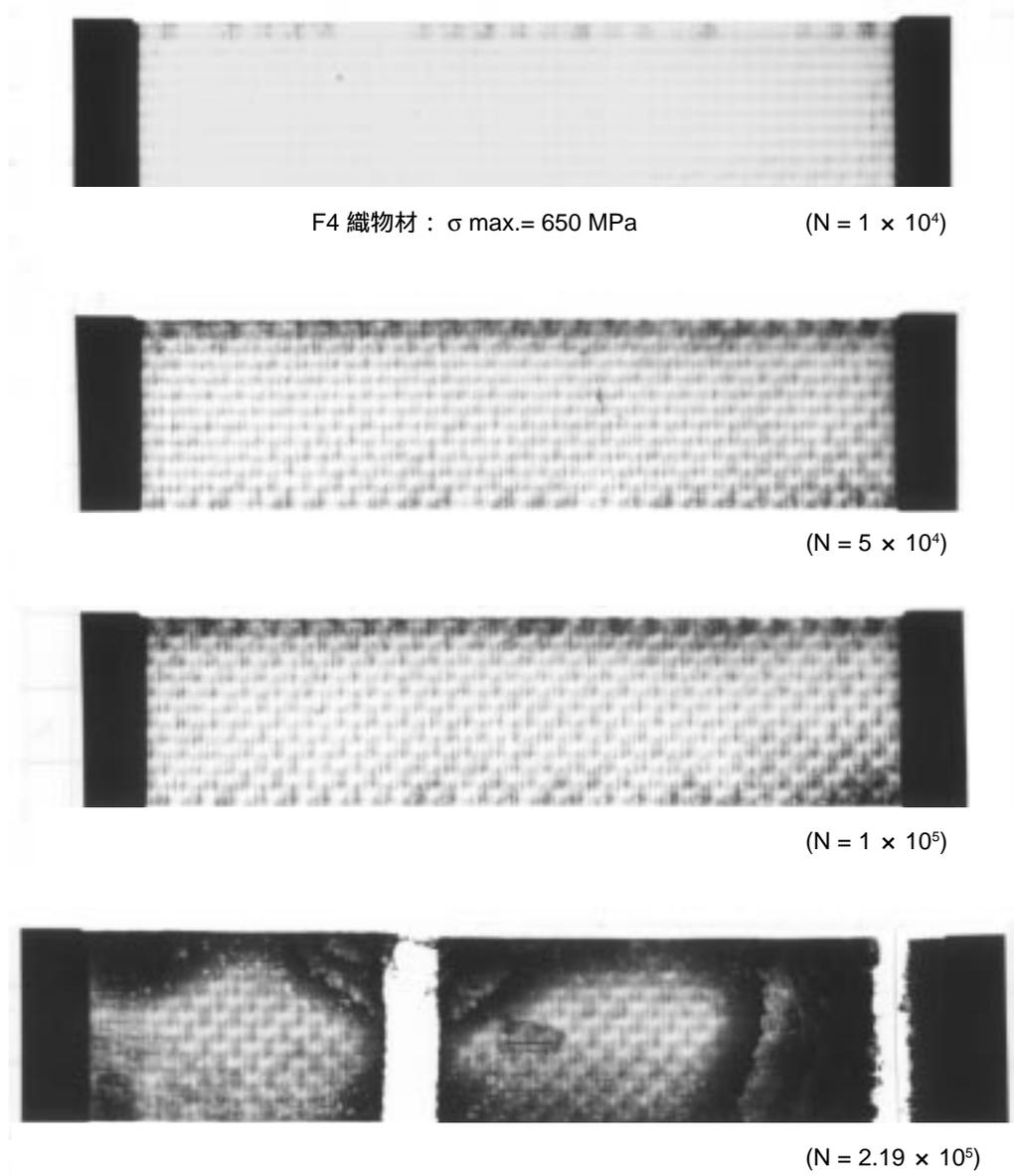


図9 織物積層材の疲れ破損の進展状況例

材は、ほぼ評定部内全体にわたり損傷を呈しているが、破断は両つかみ部に近いものが多かった。

5.5 S-N 関係結果

疲れ試験は試験片が破断に至るまでの繰返し数 (N) 範囲が $10^3 \sim 10^6$ 回程度となるように繰返し最大応力 (S) を定めるようにした。取得した各種層材における個々の繰返し最大応力と破断までの繰返し数の結果は一覧表として付録に記載する。図 11 には各直交積層材、及び図 12 に両織物積層材の試験結果としての S-N 関係をそれぞれ示す。なお図 12 における F3 織物材で実験点がばらついているのは、静的強さの変動率が他に比べ若干大きいものであり本試料板に起因したものと考えている。なお 10^6 回以上の繰返し数において試験を中止した試験片 (3 本) の残留強さ値は、582 MPa、

650 MPa 及び 679 MPa と何れも静的強さの平均値以上であった。

各図中の直線は疲労寿命曲線が片対数座標上で次式の直線と仮定し最小二乗法により近似したものである。

$$= a \cdot b \cdot \log N \quad (4)$$

各結果に対する近似式とそれより得られる 10^7 回での時間強さ (w)、及び静的強さ (B) との比較値を表 3 に示す。

直線近似式の定数 a (10^0 回における強さの推定値) と B との対応は、C3 直交材と C4 直交材及び両織物材はほぼ良好であった。近似直線の傾き (定数 b) は直交積層材に用いた強化繊維による差が認められた。すなわち共通のエポキシ樹脂を用いた 3 種類の炭素繊維それぞれによる直交積層材の疲れ強さ結果は、高強度特性の炭素繊維によるものが w は高い値となるが、定数 b も大きい傾向である。なお

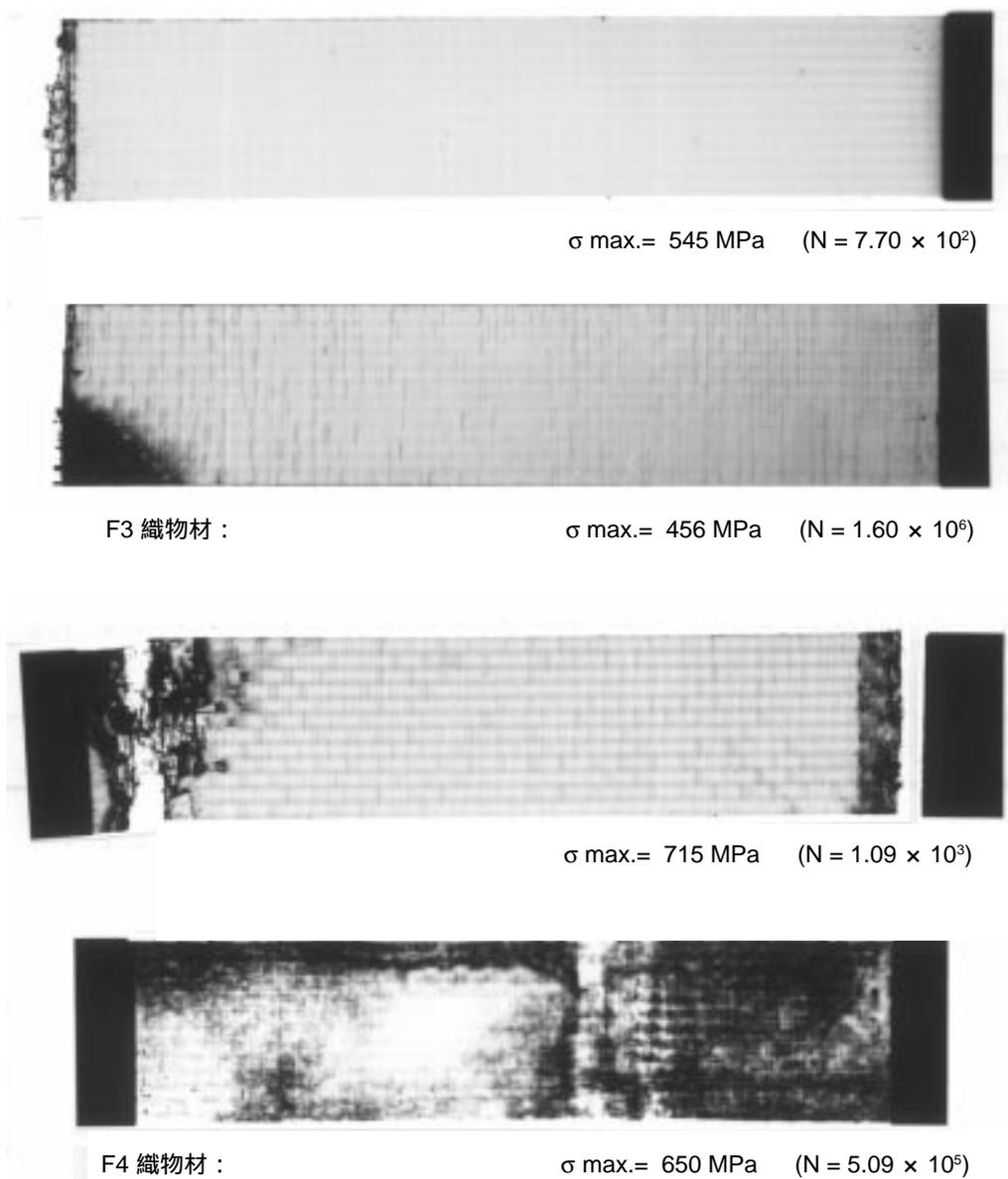


図 10 織物積層材の破断試験片例

表 3 引張疲れ試験結果

呼称	S-N 関係 (MPa)	w	a/ B (MPa)	w/ B
C3 直交材	= 600-1.1 log N	592	0.99	0.97
C4 直交材	= 910-12 log N	826	0.94	0.85
C5 直交材	= 1550-76 log N	1015	1.15	0.76
F3 織物材	= 551-14 log N	455	1.03	0.85
F4 織物材	= 808-29 log N	607	0.99	0.74

注) = a-b log N (直線近似式)
 B : 静的強さ
 w : 10⁷ 回時間強さ

同様な直交積層CFRPについての両振曲げ疲れ特性においても同じ関係があることを筆者はすでに報告している¹⁹⁾。

図13にはS-N関係における縦軸を疲れ強さ比(疲れ強さ/静的強さ)として各種層材の直線近似結果をまとめて示した。特に、C3直交材のS-N関係結果は静的強さ値よりほとんど水平であり、繰返し応力に伴う強度低下が極めて小さい。ちなみに10⁷回における疲れ強さ比は0.97と高い値を得た。CFRPの繊維方向に関する耐引張疲れ特性の特長を本材では確認した。疲れ強さ比を強化繊維によって比べると、高強度な炭素繊維による方が小さい値である。織物積層材においても同様の傾向が認められる。

強化基材が一方向材(C3直交材, C4直交材)に比べて、平織物材(F3織物材, F4織物材)では繊維束が交差し、かつ波打っているために強度の低下が予想される。本結果におけ

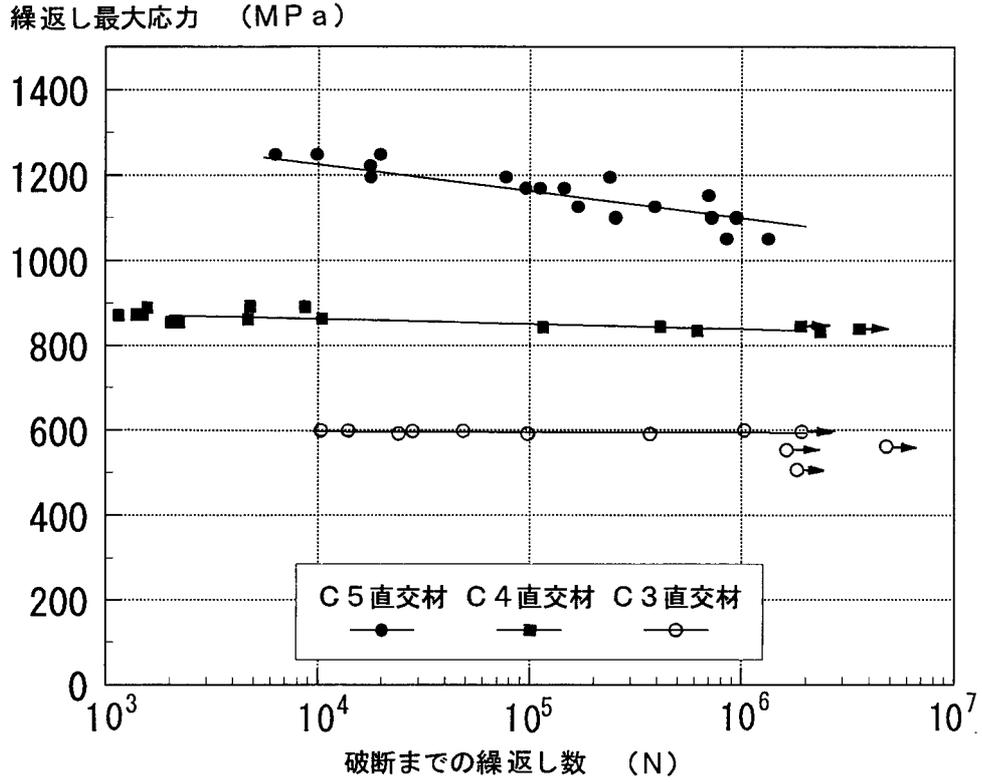


図11 直交積層材の繰返し最大応力 - 破断までの繰返し数の関係

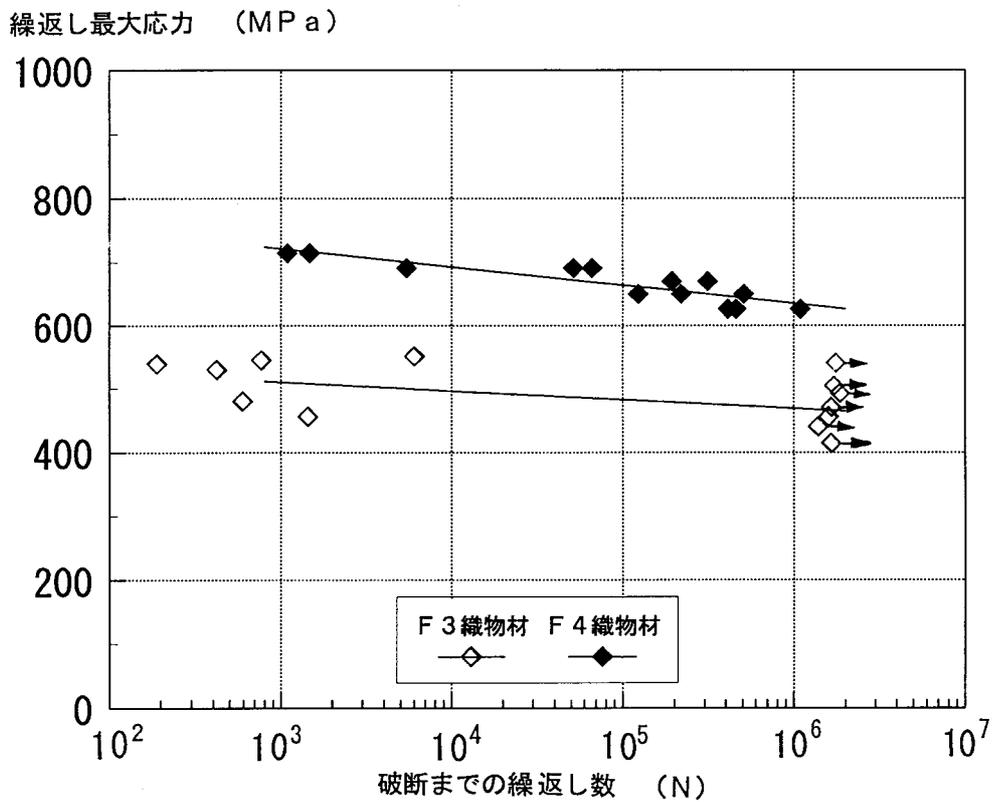


図12 織物積層材の繰返し最大応力 - 破断までの繰返し数の関係

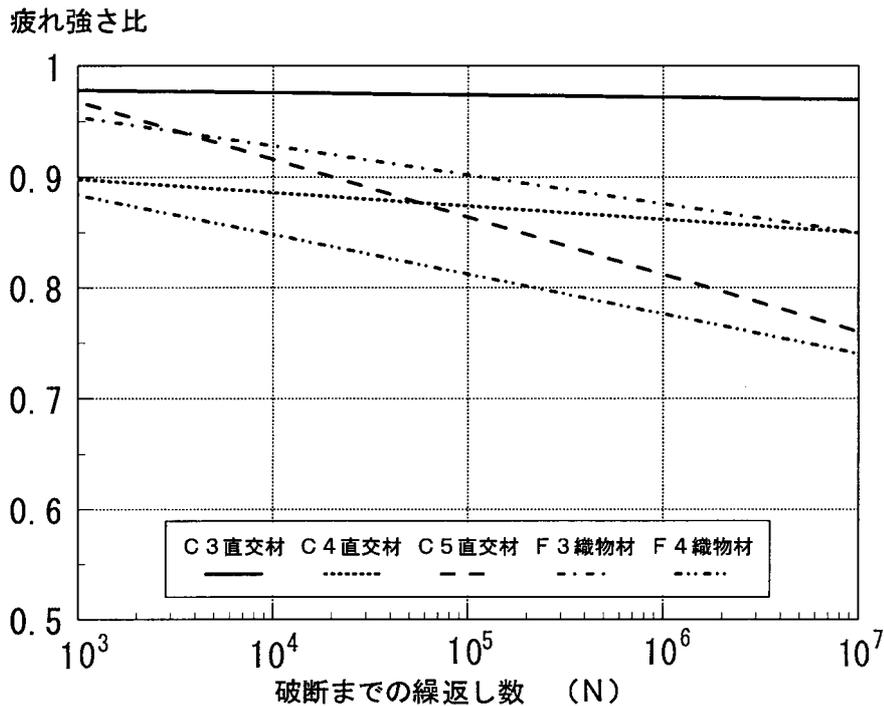


図 13 疲れ強さ比 - 破断までの繰返し数の関係

る比較では、織物基材のために直交積層材よりも疲れ強さ比は 10 ~ 15% ほど低くなった。

6. あとがき

3 種類の炭素繊維(引張強さ値が 3.5 GPa, 4.4 GPa 及び 5.6 GPa)それぞれとエポキシ樹脂による一方向繊維強化基材を用いた直交積層材及び 2 種類の炭素繊維(引張強さ値 3.5 GPa 及び 4.4 GPa)それぞれによる平織物基材を用いた織物積層材について、静的引張特性試験及び定荷重引張 - 引張疲れ強さ試験を行い、以下の結果を得た。

1) 各種層材は疲れ試験の進行と共に 90° 方向、又は横糸方向に損傷き裂を進展するが、試験片 0° 方向の引張弾性率の低下は小さい。疲れ破断せずに試験を中止した場合や疲れ破断した試験片の残存部について実施した引張弾性率の測定結果は、静的特性結果と大差なかった。破断様相は何れも 0° 層、又は縦糸における突発的な破断である。

2) 静的強さが高いものは、疲れ試験による時間強さも高い値となり、本結果からの各直交積層材での順番は C5 直交材、C4 直交材、C3 直交材である。しかし、疲れ強さ比による順番は C3 直交材、C4 直交材、C5 直交材となった。また、両織物積層材の結果にも同様な傾向がある。

3) 高強度な炭素繊維を用いた積層材の方が破断に伴って生じた二次的な層間剥離損傷の範囲が大きくなる傾向にある。両織物積層材の比較においても同じ傾向が認められた。

4) C3 直交材の疲れ試験結果の S-N 関係は静的強さ値か

ら極めて緩やかな傾斜の直線で示すことができ、繰返し最大応力の設定において非常に難しい試験であった。このことは試料成形及び試験片製作においても高い信頼性が要求される。

5) 一方向基材と平織物基材による試験結果の比較から、織物としたことによって静的強さ及び疲れ強さ比は 10 ~ 15% ほど低めとなった。

6) C5 直交材の疲れ強さ比は 0.76 を得た。ただし、タブのテーパ部は剥離し、つかみ部内でチャック切れ破断を呈していることを付記する。なお本材と同一基材を用いた一方向強化 CFRP 複合材料の引張疲れ試験結果として、疲れ強さ比は 0.65 程度であった¹⁾。この値は本結果より明らかに低いものであり、現状の引張疲れ試験方法規格における試験片形状、寸法等では目的とする疲れ強さが得られていないことが分かった。したがって、繊維の引張強さ値が 5.6 GPa 品を用いた一方向強化材や直交積層材にも対応できるように現状の試験方法規格における記述内容は見直されるべきである。その際に評価すべき検討事項としては、より高い力学的特性値の炭素繊維と樹脂を組み合わせた場合、供試材の厚さ及び積層数の影響、つかみ部タブの材料及び厚さの影響、タブ取り付け用の接着剤の選定などについての試験が必要である。

CFRP は航空機の性能向上、軽量化には欠べかざる材料になってきており、主要民間航空機の二次構造材用における多くの実績から、さらに一次構造部材へと適用範囲を拡げている。本研究では、炭素繊維の特性値において代表的

な高強度品,高伸度品及び高強度・中弾性率品を用いた基本的な積層構成である直交積層材について引張疲れ特性を評価した。本結果が基礎的データの蓄積に寄与することを期待する。

本研究は,科学技術庁の科学技術振興調整費による総合研究としての「特性発現モデルに基づく技術開発に関する国際共同研究」の基に行われている関連研究の一環として実施した。

最後に,機体部朝田洋雄部長には有益な助言を戴いたことを付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 野口義男; 一方向強化FRPの引張疲れ試験法に関する評価, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1241 (1994).
- 2) O. Konur, F.L. Matthews; Effect of the properties of the constituents on the fatigue performance of composites: a review, *Composites*, 20-4 (1989) pp. 317-328.
- 3) R.F. Dickson, C.J. Jones, B. Harris; The environmental fatigue behaviour of carbon fibre reinforced polyether ether ketone, *J. of Materials Science*, 20 (1985) pp. 60-70.
- 4) C. Baron, K. Schulte, H. Harig; Influence of fibre and matrix failure strain on static and fatigue properties of carbon fibre-reinforced plastics, *Composites Science and Technology*, 29 (1987) pp. 257-272.
- 5) C. Baron, K. Schulte; Fatigue damage response of CFRP with toughened matrices and improved fibres, *ICCM-6* (1987) pp. 4.65-4.75.
- 6) C.M.L. Wu; Thermal and mechanical fatigue analysis of CFRP laminates, *Composite Structures*, 25 (1993) pp. 339-344.
- 7) C. Henaff-Gardin, M.C. Lafarie-Frenot; Fatigue behaviour of thermoset and thermoplastic cross-ply laminates, *Composites*, 23-2 (1992) pp. 109-116.
- 8) N. Takeda, S. Ogihara, A. Kobayashi; Microscopic fatigue damage progress in CFRP cross-ply laminates, *Composites*, 26-12 (1995) pp. 859-867.
- 9) S. Cler; Fatigue properties of composite materials autoclave processed from carbon-epoxy woven fabric prepregs, 36th International SAMPE Symp., (1991) pp. 1437-1448.
- 10) J.T. Hartness, R.Y. Kim; A comparative study on fatigue behavior of polyetheretherketon and epoxy with reinforced graphite cloth, 28th National SAMPE Symp., (1983) pp. 535-544.
- 11) K. Schulte, E. Reese, T.W. Chou; Fatigue behaviour and damage development in woven fabric and hybrid fabric composites, *ICCM-6* (1987) pp. 4.89-4.99.
- 12) 村上理一, 他4名; 平織布CFRPの疲労特性に及ぼす繊維方向の影響, 日本機械学会論文集(A編) 59-560 (1993) pp. 883-889.
- 13) 竹村兼一, 藤井透; 平織りカーボン布強化積層板の引張り荷重下における疲労損傷および破壊に関する研究, 日本機械学会論文集(A編) 59-560 (1993) pp. 714-721.
- 14) M. Kawai, M. Morishita, K. Fuzi, T. Sakurai, K. Kemmochi; Effect of matrix ductility and progressive damage on fatigue strength of unnotched and notched carbon fiber plain woven roving fabric laminates, *Composites:Part A* 27A (1996) pp. 493-502.
- 15) ASTM D3479; Standard test methods for tension—tension fatigue of oriented fiber, resin matrix composites (1982).
- 16) JIS K7083; 日本工業規格 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張—引張疲れ試験方法 (1993).
- 17) ASTM D3039; Standard test methods for tensile properties of fiber-resin composites (1982).
- 18) JIS K7073; 日本工業規格炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法 (1988).
- 19) 野口義男; 直交積層CFRPの曲げ疲れ試験における試験片形状の評価に関する研究, 航空宇宙技術研究所報告 TR-1159 (1992).

付 録

各種層材における個々の試験結果として、静的引張特性の弾性率、強さと最大ひずみ、及び疲れ試験の繰返し最大応力と破断までの繰返し数の一覧表を以下にまとめて示す。

付表 1 C 3 直交材の試験結果

静的試験						
実測値	平均値	変動率				
弾性率 E_t (GPa)						
64.1	62.9	64.6	66.8	64.4	65	2%
強さ σ_B (MPa)						
601	675	549	567	656	610	9%
最大ひずみ ϵ_{max} (%)						
0.91	1.05	0.84	0.84	1.00	0.9	10%
疲れ試験						
繰返し最大応力 \max (MPa)	静的強さとの比 \max / σ_B	破断までの繰返し数 (N)				
599	0.984	1.03E+04				
599	0.984	1.39E+04				
599	0.984	1.03E+06				
596	0.979	1.38E+04				
596	0.979	2.83E+04				
596	0.979	4.91E+04				
590	0.969	2.42E+04				
590	0.969	9.86E+04				
590	0.969	3.72E+05				
599	0.984	1.86E+06 中止				
584	0.959	5.19E+06 中止				
578	0.949	1.49E+06 中止				
547	0.898	1.58E+06 中止				

付表 2 C 4 直交材の試験結果

静的試験						
実測値	平均値	変動率				
弾性率 E_t (GPa)						
72.9	67.9	65.5	68.4	67.2	68	4%
強さ σ_B (MPa)						
1048	949	967	977	911	970	5%
最大ひずみ ϵ_{max} (%)						
1.41	1.38	1.41	1.43	1.35	1.4	2%
疲れ試験						
繰返し最大応力 \max (MPa)	静的強さとの比 \max / σ_B	破断までの繰返し数 (N)				
891	0.92	1.56E+03				
891	0.92	4.82E+03				
891	0.92	8.65E+03				
872	0.90	1.15E+03				
872	0.90	1.37E+03				
872	0.90	1.50E+03				
862	0.89	5.40E+02				
862	0.89	4.73E+03				
853	0.88	1.05E+04				
853	0.88	2.24E+03				
843	0.87	1.16E+03				
843	0.87	4.14E+05				
833	0.86	6.25E+05				
833	0.86	2.35E+06				
853	0.88	1.70E+06 中止				
843	0.87	3.02E+06 中止				

付表 3 C 5 直交材の試験結果

静的試験						
実測値		平均値	変動率			
弾性率 E_t (GPa)						
81.6	83.6	84.0	82.6	83.2	83	1%
強さ σ_B (MPa)						
1347	1322	1387	1337	1302	1340	2%
最大ひずみ \max (%)						
1.60	1.54	1.54	1.60	1.50	1.6	3%

付表 4 F 3 織物材の試験結果

静的試験						
実測値		平均値	変動率			
弾性率 E_t (GPa)						
63.9	65.7	65.1	66.1	65.5	65	1%
強さ σ_B (MPa)						
486	492	462	645	596	536	15%
最大ひずみ \max (%)						
0.78	0.75	0.73	0.97	0.91	0.8	13%

疲れ試験

繰返し 最大応力 \max (MPa)	静的強さ との比 \max / σ_B	破断までの 繰返し数 (N)
1260	0.94	5.48E+03
1260	0.94	1.74E+04
1247	0.93	1.97E+04
1247	0.93	9.90E+03
1247	0.93	6.30E+03
1221	0.91	1.77E+04
1194	0.89	1.78E+04
1194	0.89	2.40E+05
1194	0.89	7.72E+04
1168	0.87	1.45E+05
1168	0.87	9.60E+04
1168	0.87	1.12E+05
1151	0.86	7.01E+05
1125	0.84	1.69E+06
1125	0.84	3.90E+05
1100	0.82	9.47E+05
1100	0.82	7.23E+05
1100	0.82	2.54E+05

疲れ試験

繰返し 最大応力 \max (MPa)	静的強さ との比 \max / σ_B	破断までの 繰返し数 (N)
456	0.85	1.60E+06
456	0.85	1.44E+03
551	1.03	6.07E+03
466	0.85	84
480	0.87	82
530	0.90	594
534	0.99	432
540	1.00	57
540	1.01	189
540	1.01	78
545	1.02	57
545	1.02	59
545	1.02	770
551	1.03	71
551	1.03	57
408	0.76	1.60E+06 中止
451	0.84	1.37E+06 中止
461	0.86	1.66E+06 中止
505	0.94	2.51E+06 中止
506	0.94	2.03E+06 中止
534	0.99	2.20E+06 中止

付表 5 F 4 織物材の試験結果

静的試験

	実測値				平均値	変動率
弾性率 E_t (GPa)						
67.0	66.4	66.7	64.6	67.3	66	2%
強さ σ_B (MPa)						
783	846	809	795	844	815	4%
最大ひずみ ϵ_{max} (%)						
1.22	1.30	1.23	1.22	1.25	1.2	3%

疲れ試験

繰返し 最大応力 max (MPa)	静的強さ との比 max / σ_B	破断までの 繰返し数 (N)
715	0.88	1.09E+03
715	0.88	1.47E+03
691	0.85	5.43E+03
691	0.85	5.17E+04
691	0.85	6.64E+04
670	0.82	1.93E+05
670	0.82	3.13E+05
650	0.80	5.09E+05
650	0.80	2.19E+05
650	0.80	1.23E+05
626	0.77	4.13E+05
626	0.77	4.59E+05
626	0.77	1.09E+06