

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-425

炭素繊維織物複合材の静的強度特性

野口義男 ・ 古田敏康

1980年12月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

炭素繊維織物複合材の静的強度特性*

野口 義男** 古田 敏康**

1. ま え が き

炭素繊維強化樹脂複合材料(CFRP)は比強度(強さ/比重),比剛性(弾性率/比重)において優れた特性を示し,軽量構造材料として多くの分野で注目されている。

すでに,我々は一方向や多層積層によるCFRPの静的強度特性および曲げ疲れ強度特性について検討を加えデータの蓄積を行ってきた^{1)~5)}。これらに適用した素材形態は繊維を一方向に引き揃えたものである。一方,炭素繊維の特徴を生かした用途開発の拡大にとともに,取扱い性の良い中間素材としての織物が供給されるに至り,従来のガラス繊維と同様な成形法が利用でき,軽量構造材料としても品質の安定化が図られつつある。

このようなCFRPを航空機構造に適用する技術確立を目的として,航空宇宙技術研究所においては「ファンジェットSTOL機の研究」の一環として水平尾翼を想定したCFRP構造の研究が進められている。本報告では,その基礎資料となる炭素繊維織物強化樹脂複合材料の各種静的強度特性試験の検討結果を述べる。

2. 素 材

織物の素材となる炭素繊維の主な特性(PYROFIL・ASのカタログ値)を表1に示す。織物は8枚朱子織で横糸が縦糸7本と1本を交互にくぐって組合わされており,交差が疎で組織点が連続点とならず,密度の大きな割に柔軟で平滑な織物であることが特徴となっている。その主な仕様を表2に示す。試験素材には,上記織物とエポキシ樹脂によるプリプレグ(S410 三菱レイヨン[®])を使用して各繊維方向を揃え8層積層し,ホットプレスにより表3に示す条件で三菱レイヨン[®]にて成形した。試験素材の大きさは約300×300×2.8mmである。なお,この8枚朱子織物プリプレグは,STOL機の水平尾翼構造の研究で主体を成すものでもある。

3. 試 験 法

試験項目としては比重と繊維含有率の測定を行い,さらに引張りによる弾性率とポアソン比,および引張り,圧縮,4点曲げ,層間せん断の各強さを縦糸方向と横糸方向について求めた。なお,これらの試験法はガラス繊維強化樹脂複合材料(GFRP)に適用されている規格を主な参考資料として行った。試験は温度22~24℃,相対湿度45~50%の恒温室内で実施し,負荷用試験機には万能試験機(IS-20T 島津製作所[®])を使用した。試験片の数は,引張り弾性特性には2本,他は6

表1. 炭素繊維の主な特性値

引張り弾性率	21000 Kgf/cm ²
引張り強さ	260 Kgf/cm ²
破断伸度	1.3 %
比 重	1.8
単糸直径	7~9 μ

表2. 織物の主な仕様

糸種	縦糸	3000 フィラメント
	横糸	3000 フィラメント
密度	縦糸	10 本/cm
	横糸	10 本/cm
目付		400 g/m ²
組織		8枚朱子
幅		1000 mm
厚さ		0.4 mm

表3. 成 形 条 件

予備加熱	135℃で30分
加圧,加熱	10~12 Kgf/cm ² , 175℃で2時間
後硬化	204℃で2時間

* 昭和55年8月27日受付

** 機体第一部

本づつとし、各結果の算術平均、標準偏差および変動率
そして繊維体積含有率 60% における換算値を求めた。

3.1 比重と繊維体積含有率

3.1.1 水中置換法による比重

約 0.2 g の試験片を試験素材よりダイヤモンドカッターにより切り出し、切削面は研磨紙で仕上げた。感度 0.1 mg の直示天秤 (ST-160 長計量器製作所製) により空気中での質量と水中での質量を測定し、比重 (ρ_c) を次式により算出した⁶⁾。

$$\rho_c = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \cdot \rho_L \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m_1 : 試験片の空気中における質量 (g)
 m_2 : 試験片の水中における質量 (g)
 ρ_L : 水の比重

3.1.2 燃焼法による繊維体積含有率

比重測定を行った後の試験片をニクロム線ではばりブレンゼンバーナの還元炎中で約 2 分間加熱して、樹脂を完全に燃やした後、直ちに金属板の上に置き急冷した。残った炭素繊維の質量を測定し、繊維の体積含有率 (V_f) を次式により算出した⁷⁾。

$$V_f = \frac{m_3}{m_1} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_f} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 m_3 : 残った炭素繊維の質量 (g)
 ρ_f : 炭素繊維の比重 (カタログ値)

3.2 引張り弾性率とポアソン比

試験片形状は 180×25 mm の短冊形である。あらかじめ試験片中央部には直交して、ひずみゲージを接着しておき、万能試験機により引張り荷重を加え、最大ひずみが 1000 μ 程度までの応力とひずみ関係を求めた。その直線部分を用いて引張りによる弾性率 (E_t) を次式

により算出した。

$$E_t = \Delta \sigma / \Delta \epsilon \text{ (Kgf / mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\Delta \sigma$: 応力とひずみ関係の直線上における 2 点間の平均原断面積による応力差 (Kgf / mm²)

$\Delta \epsilon$: 同じ 2 点間における縦方向ひずみの差
ポアソン比 (ν) は直交ひずみ関係より、次式により算出した。

$$\nu = -\epsilon_y / \epsilon_x$$

ここで、 ϵ_y : 横方向ひずみ
 ϵ_x : 縦方向ひずみ

3.3 引張り強さ

試験片形状は図 1 に示すような 180×12.5 mm の短冊形で、両端には AL 合金のタブを接着して、つかみ具が確実に固着するようにした。万能試験機のつかみ具間距離は 110 mm で試験片を取り付けた。試験速度はクロスヘッド移動速度を 5 mm/min と規定した。破断時の最大荷重を求め、引張り強さ (σ_t) を次式により算出した⁸⁾。

$$\sigma_t = P_{max.} / A \text{ (Kgf / mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $P_{max.}$: 破断時の荷重 (Kgf)
 A : 平均原断面積 (mm²)

3.4 圧縮強さ

試験片形状は図 2 に示すようなダンベル形で、特に試験片加工に際しては両端面の平行度など仕上げ精度には注意した。座屈を防ぐために図 3 に示す保持具を試験片両側面にあて、直径 5 mm のボルトとナット各 4 個で固定した。試験片は保持具より 4 mm 長いため、両端よりそれぞれ 2 mm づつはみだした状態となる。試験片は圧縮盤へ垂直度を要するため、一方の圧縮盤には球面座を使用して垂直度の確保には充分注意した。試験速度はクロスヘッド移動速度を 1 mm/min と規定した。破壊時の最大荷重を求め、圧縮強さ (σ_c) を次式により算出した^{9),10)}。

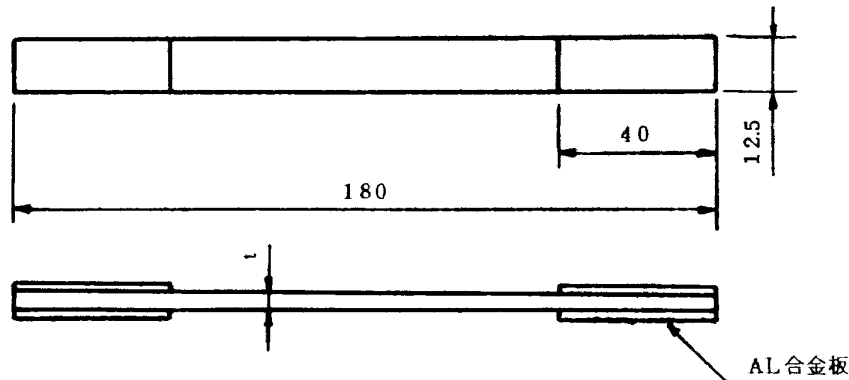


図 1. 引張り試験片

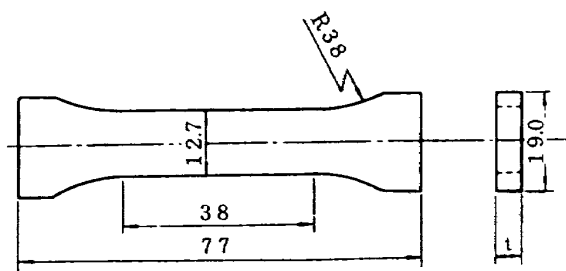


図 2. 圧縮試験片

$$\sigma_c = P_{max.} / A \quad (Kgf / mm^2) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $P_{max.}$: 破壊時の荷重 (Kgf)

A : 平均原断面積 (mm^2)

3.5 曲げ弾性率と強さ

3点曲げでは、負荷点下で圧壊し易い、また最大曲げモーメント部が1点のみであるのに対し、4点曲げは、曲げモーメントの一樣な部分があるので純粋な曲げが行える。そこで図4に示す4点曲げ試験法により弾性率と強さを求めた。試験片形状は120×12 mmの短冊形である。

曲げによる弾性率 (E_b) は、荷重と感度 0.001 mm のダイヤルゲージで求めた支点間中央部のたわみとの関

係の直線部分を用いて次式により算出した¹¹⁾。

$$E_b = \frac{23}{108} \frac{L^3}{bh^3} \cdot \frac{P}{\delta} \quad (Kgf / mm^2) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 L : 支点間距離 (mm)

b : 試験片の幅 (mm)

h : 試験片の厚さ (mm)

P/δ : 荷重とたわみ関係における直線部分の

勾配 (Kgf / mm)

強さ測定試験速度はクロスヘッド移動速度を 5 mm/min と規定した。破壊時の最大荷重を求め、平均原断面寸法による曲げ強さ (σ_b) を次式により算出した。

$$\sigma_b = \frac{P_{max.} \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (Kgf / mm^2) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $P_{max.}$: 破壊時の荷重 (Kgf)

L : 支点間距離 (mm)

b : 試験片の幅 (mm)

h : 試験片の厚さ (mm)

3.6 層間せん断強さ

FRPの強化材と樹脂との界面特性に直接的な関係のある層間せん断強さを、短いりの曲げ試験において、スパン/試験片厚さを小さくするとせん断破壊が優先す

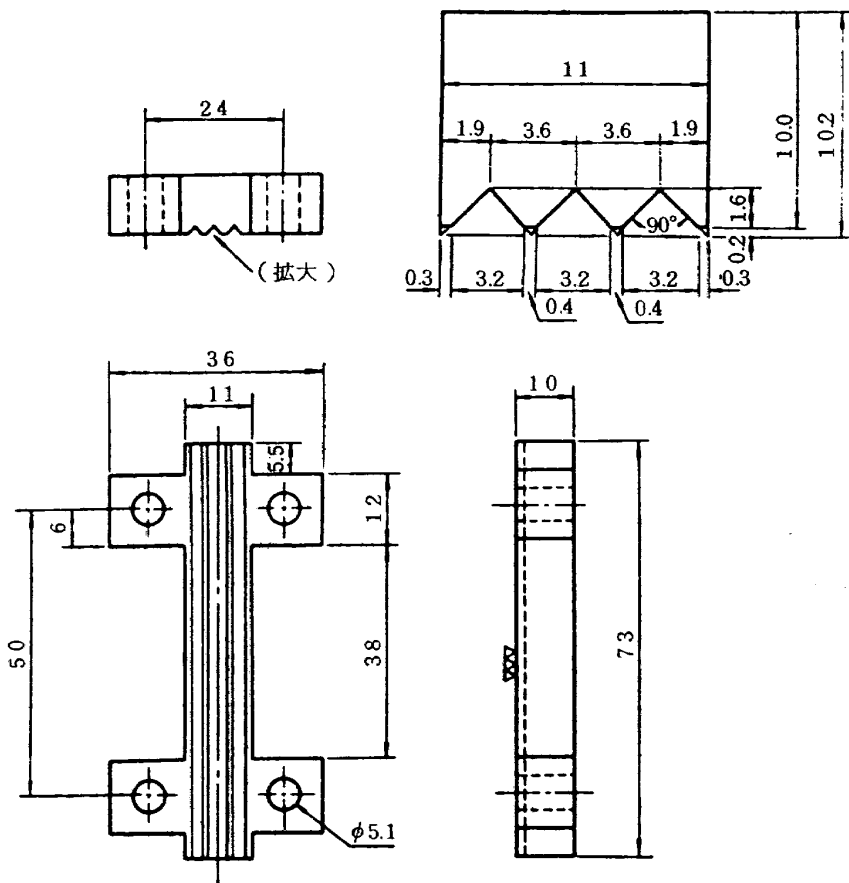


図 3. 試験片保持具

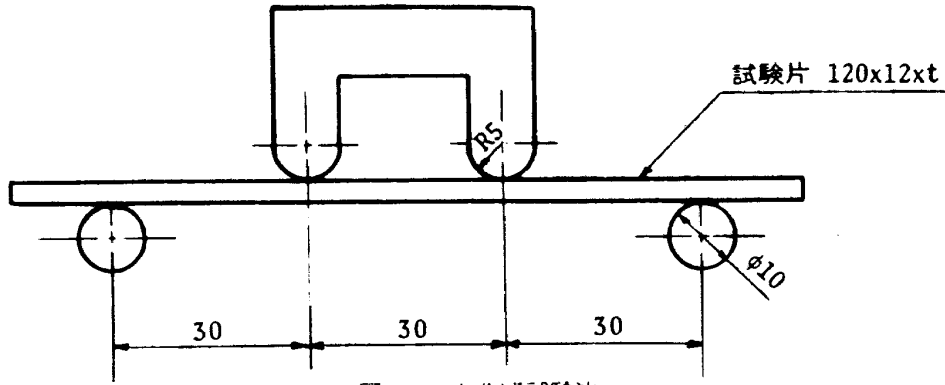


図4 4点曲げ試験法

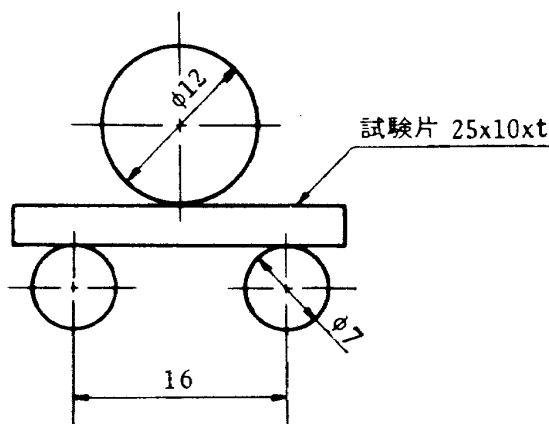


図5 ショートビーム3点曲げ試験法

ることを利用しているショートビームの3点曲げ試験法により求めた。試験片形状は25×10mmの短冊形である。スパン／試験片厚さの比は図5に示すように約5とした。試験速度はクロスヘッド移動速度を1.5mm/mmと規定した。破壊時の最大荷重を求め、層間せん断強さ(τ)を次式により算出した^{12),13)}。

$$\tau = \frac{3 P \max.}{4 A} \quad (Kgf / mm^2) \dots\dots (9)$$

ここで、P max.: 破壊時の荷重 (Kgf)
A: 平均原断面積 (mm²)

4. 結果の検討

4.1 比重と繊維体積含有率

FRPの諸特性に影響する基本的因子である繊維と樹脂の含有率が明示されなければ、試験結果を他の同一構成基材および成形法によるデータでも比較するには困難がともなう。さらに、これらの結果を複合則などで検討することにより、FRPとしての材料設計に対する基礎データが得られる。

試験板素材の各部より、試験片を切り出し水中置換法による比重と燃焼法による繊維体積含有率の測定を行っ

た。結果を表4に示す。平均値はρc = 158とVi = 66.3%である。

4.2 引張り弾性率

試験板素材の繊維方向(縦糸, 横糸)について各2本の弾性率とポアソン比の試験結果を表5に示す。織物によるFRPの弾性特性値を一方向強化材が直交方向に積層されたものとしての積層理論により、直交異方性板の弾性主軸x, yに関する弾性率ExとEyおよびポアソン比νxとνyを次式で推定し¹⁴⁾ 試験結果との比較を試みる。

$$E_x = E_y$$

$$= \frac{E_L^2(1-\nu_T^2)^2 + E_T^2(1-\nu_L^2) + 2E_L E_T(1-\nu_L \nu_T)}{2(E_L + E_T)(1-\nu_L \nu_T)}$$

$$(Kgf / mm^2) \dots\dots\dots (10)$$

$$\nu_x = \nu_y = 2 \nu_L E_T / (E_L + E_T)$$

$$= 2 \nu_T E_L / (E_L + E_T) \dots\dots\dots (11)$$

ここで、添字L: 繊維方向, T: 繊維に垂直方向。

上式に必要な一方向強化材の弾性特性値は、プリプレグ素材となっている繊維と樹脂特性値およびVi = 60%とした場合の計算結果より¹⁵⁾ EL = 12740 Kgf / mm², ET = 940 Kgf / mm², νL = 0.313, νT = 0.0231とすれば Ex = Ey = 6870 Kgf / mm², νx = νy = 0.0430となる。試験結果の弾性率の60 vol.%換算値は理論的推定値とほぼ一致しており、織物による弾性率の低下

表4. 比重と繊維体積含有率の試験結果

項目	実測値	平均値	標準偏差	変動率(%)
比重	1.57 1.57 1.57	1.58	0.00837	0.5
	1.57 1.58 1.59			
繊維体積含有率(%)	65.3 65.7 65.8	66.3	0.896	1.4
	66.0 67.1 67.6			

表5. 弾性試験結果

項	目	実 測 値	平均値	標準偏差	変動率(%)	60vol.%換算値
引張り弾性率 (Kg f / mm ²)	縦糸方向	7190 7300	7250	77.8	1.1	6600
	横糸方向	7300 7440	7370	99.0	1.3	6700
ポアソン比	縦糸方向	0.0749 0.0769	0.0759	0.00141	1.9	
	横糸方向	0.0633 0.0649	0.0641	0.00131	2.0	
4点曲げ弾性率 (Kg f / mm ²)		6850 6940				
	縦糸方向	7010 7090	7040	135	1.9	6400
		7150 7210				

表6. 各種強さ試験結果

項	目	実 測 値	平均値	標準偏差	変動率(%)	60vol.%換算値
引張り強さ (Kg f / mm ²)	縦糸方向	62.2 62.8 66.6	67.4	4.35	6.4	61
		68.4 71.5 72.7				
	横糸方向	64.6 65.5 65.7	67.1	2.64	3.9	61
		66.5 68.4 71.8				
圧縮強さ (Kg f / mm ²)	縦糸方向	44.6 45.4 46.6	49.5	4.74	9.6	45
		50.0 55.0 55.2				
	横糸方向	45.5 47.2 48.6	49.3	3.47	7.0	45
		48.8 50.2 55.6				
4点曲げ強さ (Kg f / mm ²)	縦糸方向	79.2 80.1 80.2	83.1	3.94	4.7	75
		83.4 86.8 88.7				
層間せん断強さ (Kg f / mm ²)	縦糸方向	5.25 5.26 5.50	5.49	0.198	3.6	5.0
		5.59 5.62 5.73				
	横糸方向	4.07 4.26 4.32	4.38	0.237	5.4	4.0
		4.36 4.46 4.78				

はほとんどないを考える。したがって8枚朱子織物によるCFRPの繊維方向の弾性率は一方向強化材のE₁の約50%である。なおポアソン比の推定値は試験結果よりやや低目となった。

4.3 引張り強さ

縦糸方向における引張り応力とクロスヘッド移動量線図の一例を図6に示す。低応力(約15Kg f / mm²)において屈曲点(Knee point)を生じたが、以後は破壊応力まで直線的である。なお図の屈曲点は横糸の繊維に垂直方向の引張り破損によるものと推定している。破壊状況の一例を図7に示すが板幅方向において、横糸の繊維に垂直方向の引張り破断、および縦糸の引張り破断である。破断は1あるいは2箇所で見られ、さらに部分的に引張り破損が生じているものも観察された。

各試験結果を表6に示す。一方向強化材の引張り強さと同様に、近似的に線型複合則が成り立つとすれば、繊維方向の引張り強さ(σ_t)は次式で推定できる。

$$\sigma_t = K_c [\sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)] \quad (\text{Kg f / mm}^2) \dots\dots\dots (12)$$

ここで、K_c : 引張り強さの低減係数

σ_f : 繊維の引張り強さ (Kg f / mm²)

σ_m : 樹脂の引張り強さ (Kg f / mm²)

V_f : 繊維の体積含有率 (%)

カタログ値より σ_f = 260 Kg f / mm², σ_m = 4.5 Kg f / mm² とし実測値より V_f = 66.3% を代入すれば、実測の引張り強さでは K_c = 0.36 ~ 0.42 となる。

4.4 圧縮強さ

縦糸方向における圧縮応力とクロスヘッド移動量線図

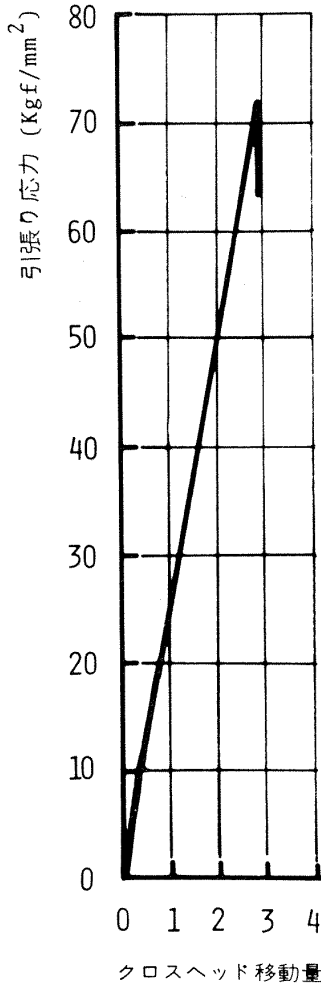


図 6 引張り応力とクロスヘッド移動量の関係

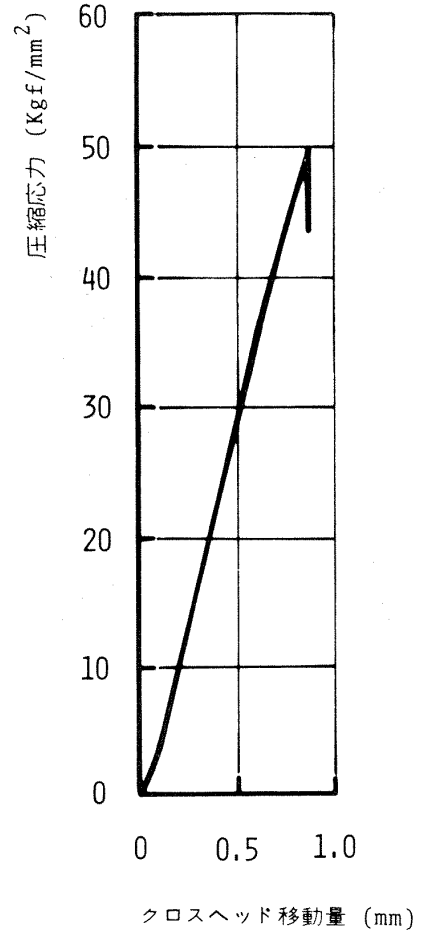


図 8 圧縮応力とクロスヘッド移動量の関係

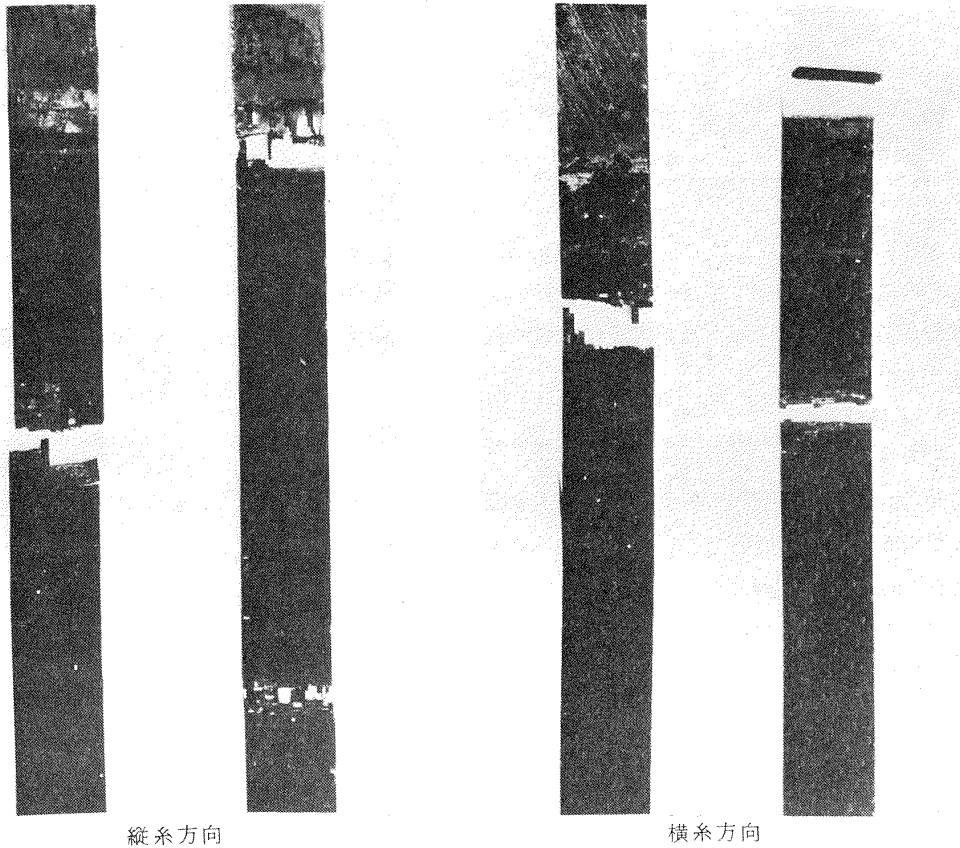


図 7 引張り破壊状況

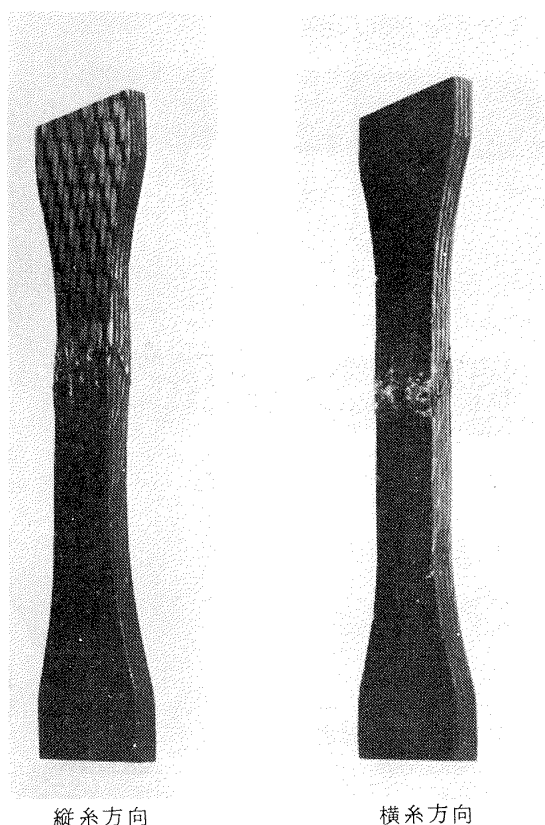


図 9 圧縮破壊状況

の一例を図 8 に示す。破壊応力近くで、わずかに屈曲が観察された。これには、縦糸の座屈および横糸における繊維に垂直方向の圧縮破損が考えられる。

破壊状況の一例を図 9 に示すが最外層の座屈破壊が全板幅にわたり生じている。ただし両面での位置は約板厚分づれており、それを板厚方向で観察すると全板厚にわたり縦糸は圧縮破壊となっていた。

各試験結果を表 6 に示す。繊維強化複合材の特徴である繊維の座屈により、圧縮強さは引張り強さに比較して低めとなっている。

4.5 曲げ弾性率と強さ

縦糸方向における弾性試験結果を表 5 に示す。曲げによる弾性率は引張りによる結果に比べて、わずかに低めとなった。

強さ試験における曲げ応力とクロスヘッド移動量線図の一例を図 10 に示す。破壊応力近くで、わずかに屈曲が見られた。破壊状況の一例を図 11 に示すが、すべて引張り側破壊であり、縦糸は全板幅にわたり比較的直線状に繊維の引張り破断を生じている。最外層における横糸が繊維に垂直方向の引張り破損を先行するため、図 10 の破壊応力近くで変化が表われたと推定している。最大応力以後負荷を続行すると引張り側にて同様な破壊が繰

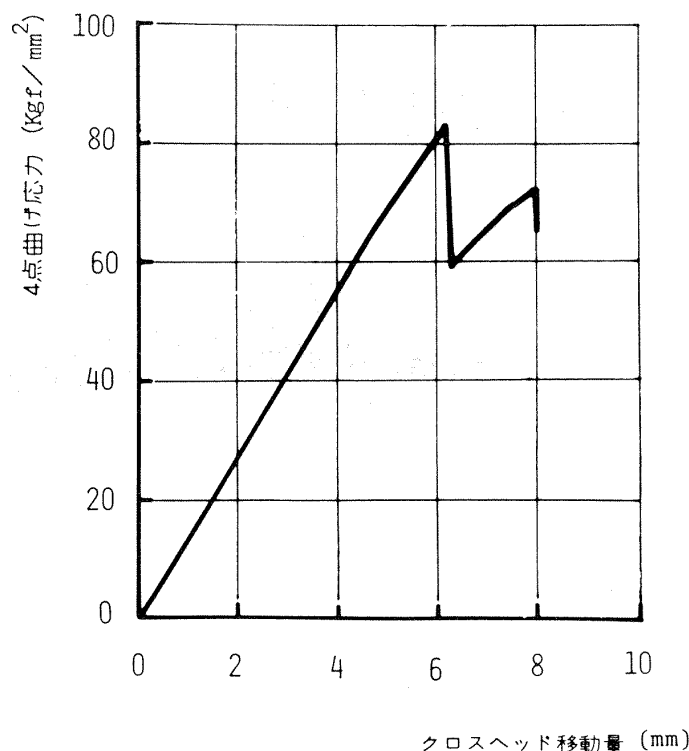


図 10 4点曲げ応力とクロスヘッド移動量の関係

返された。

各試験結果を表 6 に示す。曲げ強さは引張りによる強さより大きい値である。ただし、曲げ強さは最大曲げモーメント/断面係数で定義していること、また応力勾配についても考慮しなければならない。

4.6 層間せん断強さ

層間せん断特性には、繊維の強さは余り影響せず、繊維と樹脂間の界面強さ、および樹脂の強さが関係する。したがって、FRPの強さの中でも層間引張り強さとともに非常に小さいので注意を要する特性である。

縦糸方向における層間せん断応力とクロスヘッド移動量線図の一例を図 12 に示す。最大応力において、一方の支持点と負荷点間で、ほぼ板厚中央の積層面にて層間せん断破壊を生じた。以後負荷を続行すると同一側にて他の積層面で同様な破壊が繰返された。破壊状況の一例を図 13 に示す。

各試験結果を表 6 に示すが、縦糸方向が横糸方向に比較して大きい値となった。他の特性では縦糸と横糸方向で大差ない結果が得られており、本特性については今後更に検討を加える必要がある。

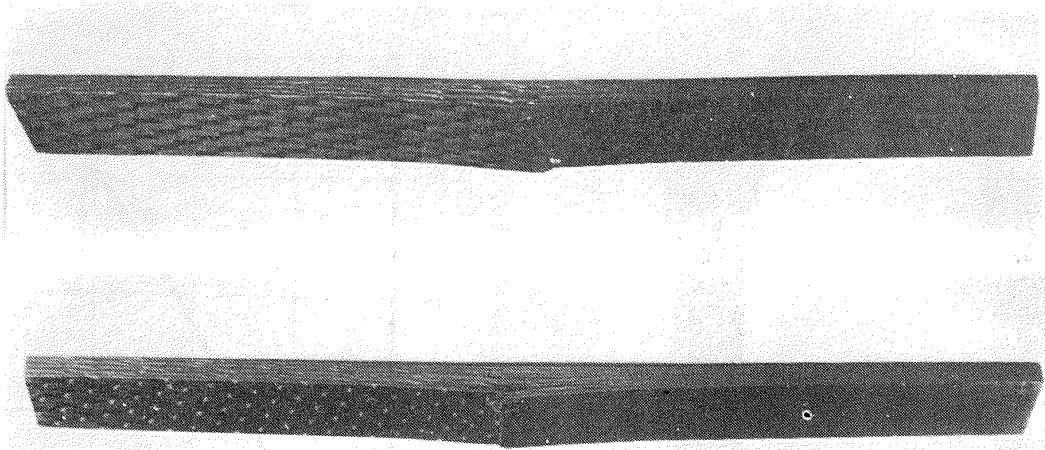


図 11 4点曲げ破壊状況

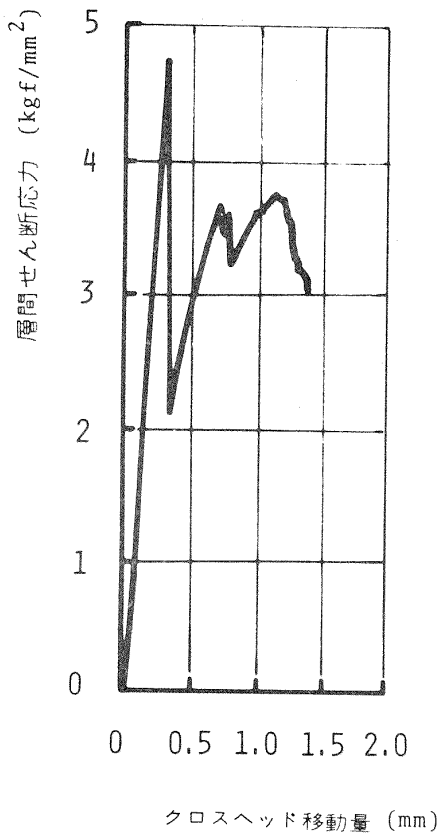


図 12 層間せん断応力とクロスヘッド移動量の関係

5. ま と め

各繊維方向の試験結果の算術平均に対する繊維体積含有率60%換算値としては、表5、6に示したように、弾性率6400~6700Kgf/mm²、引張り強さ61Kgf/mm²、圧縮強さ45Kgf/mm²、4点曲げ強さ75Kgf/mm²、層間せん断強さ4~5Kgf/mm²となった。これらの変動率は5%程度と考える。なお圧縮強さではそれを上回るが、

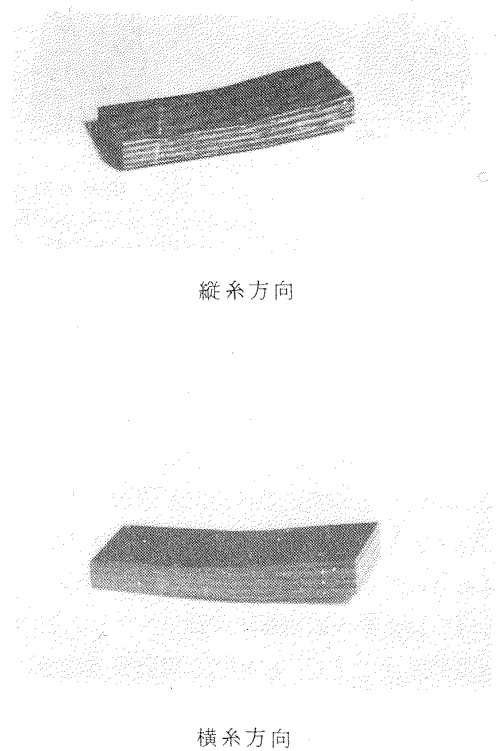


図 13 層間せん断破壊状況

これは座屈防止用保持具を固く締付けてはいけなかったため、固定力が各試験片で必ずしも同一でないことが影響したと考えている。

繊維体積含有率60%換算による引張り特性値を他の複合材料および金属材料と比べた結果を表7に示す。ここで、GFRPはガラス繊維による複合材料であり、Kevlar FRPは芳香族ポリアミドのKevlar-49織

表7. 引張り特性値の比較

材 料		比 重	強 さ	弾 性 率	比 強 度	比 剛 性
		ρ_c	$\sigma_t(\text{Kgf}/\text{mm}^2)$	$E_t(\text{Kgf}/\text{mm}^2)$	$\frac{\sigma_t(\text{Kgf}/\text{mm}^2)}{\rho_c}$	$\frac{E_t(\text{Kgf}/\text{mm}^2)}{\rho_c}$
一方向強化 複合材料	CFRP	1.6	130~160	11000~13000	81~100	6900~8100
	GFRP	2.0	90~140	4000~6000	45~70	2000~3000
	Kevlar FRP	1.4	110~150	8000~9000	78~107	5700~6400
織物強化 複合材料	CFRP	1.6	56~66	6600~6700	35~41	4100~4200
	GFRP	2.0	30~50	2000~3000	15~25	1000~1500
	Kevlar FRP	1.4	35~55	2800~3500	25~39	2000~2500
アルミ合金(7075)		2.8	64	7400	23	2600
チタン合金(6AL-4V)		4.5	105	10000	23	2200
ニッケル・クロム・モリブデン鋼		7.8	80	21000	10	2700

織物による複合材料である。各複合材料ともエポキシ樹脂を使用し、織物体積含有率は約60%のFRPの特性である。金属は航空機構造材料として慣用されているものを引用した。このように織物強化によるCFRPは比強度、比剛性において優れた特性があることがわかった。

6. あとがき

8枚朱子織物は織糸の交錯があらく、縦糸と横糸の密度が同じで2方向性織物として優れている。このような織物を強化材としたCFRPの織糸方向すなわち縦糸方向と横糸方向の静的強度特性は、織物にしたことによる強度低下は少なく炭素繊維の特徴が十分生かされていることが明らかとなった。ただし、層間せん断強さが、一方向強化CFRPの特性結果³⁾の50%程度であることは近時改善されねばならない課題と考えている。

ここでは、静的基礎強度特性を述べたが疲労試験も行ったので順次報告する。織物によるCFRPを構造材料に適用するには、より広範囲なデータの蓄積が必要である。本報告がその一助となることを期待する。

最後にCFRP試験素材の製作について便宜をはかっていただいた三菱レイヨン㈱パイロフィル部の寺西伸秀部長、今尾正治主任とその関係者に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 古田敏康, 野口義男, 松嶋正道; カーボン複合材の強度特性, 航技研資料TM-241(1973)
- 2) 古田敏康, 野口義男, 松嶋正道; カーボン複合材の曲げ疲労強度, 航技研報告TR-366(1974)
- 3) 古田敏康, 松嶋正道, 野口義男; 各種カーボン複合材の静的強度特性, 航技研資料TM-330(1977)

- 4) 古田敏康, 松嶋正道, 野口義男; 各種カーボン複合材の曲げ疲労強度, 航技研報告TR-525(1978)
- 5) 古田敏康, 野口義男, 松嶋正道; 含水積層CFRPの曲げ強度と疲労強度, 航技研報告TR-547(1978)
- 6) JIS K7112; プラスチックの密度と比重の測定方法(1977)
- 7) 東レ㈱技術資料; CF04R2C, "トレカ"コンポジットの試験法(1977)
- 8) ISO 3268; Plastics glass reinforced materials determination of tensile properties. (1978)
- 9) ASTM D695; Test for compressive properties of rigid plastics. (1969)
- 10) JIS K7208; プラスチックの圧縮試験方法(1975)
- 11) ISO (Draft proposal); Textile glass reinforced plastics determination of flexural properties four point loading method. (1972)
- 12) ASTM D2344; Apparent horizontal shear strength of reinforced plastics by short beam method. (1976)
- 13) 規格標準委員会; ガラス繊維強化プラスチックの層間せん断強さ測定方法(原案)(ショートビーム法), 強化プラスチック, Vol. 22, No. 10(1976)
- 14) 植村益次編; FRP(強化プラスチック)設計便覧, 強化プラスチック技術協会.(1979)
- 15) 野口義男, 古田敏康; CFRP・ハニカムサンドイッチパネルの面内せん断特性, 航技研報告TR-621(1980)

航空宇宙技術研究所資料 425 号

昭和55年12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 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
