

UDC 620.179:
620.168:
620.174:

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-627

応力塗料を用いたFRP円筒結合部の強度試験

野原利雄・江川幸一・野口義男

1980年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. 供試体および試験片	1
2.1 供試体	1
2.2 試験片	3
3. 破損強度と破損様相の解析	3
3.1 解析方法	3
3.2 解析	4
3.2.1 軸方向外力による各層内の平面応力成分	4
3.2.2 各種破壊メカニズムに対応する応力成分	4
3.2.3 供試円筒の応力計算	5
3.2.4 一方向強化材の基礎的強度	5
3.2.5 軸方向強度	5
4. 実験	5
4.1 実験方法	5
4.2 応力塗料の特性と使用方法	6
4.3 試験片による曲げ試験	6
4.3.1 ひずみゲージによる試験片表面のひずみ測定	7
4.3.2 応力塗料による試験片表面のひずみ測定	8
4.3.3 破損応力の算定	11
4.3.4 実験結果	11
4.3.5 破損と安全の判定基準の設定	11
4.4 FRP円筒結合部の曲げ試験	12
4.4.1 曲げ応力とひずみの計算	12
4.4.2 応力塗料によるひずみ測定	12
4.4.3 ひずみゲージによるひずみ測定	15
4.4.4 実験結果	18
5. 結論	18
付録	19
参考文献	20

応力塗料を用いたFRP円筒結合部の強度試験*

野原利雄** 江川幸一** 野口義男**

The Role of Brittle Lacquer Techniques in the Strength-test of FRP Joints

Toshio NOHARA, Koichi EGAWA, Yoshio NOGUCHI

ABSTRACT

A brittle lacquer mapping technique was used to check the strength of the jointed part of a composite F.W. cylinder. The test was done by using the following steps;

- 1) By using the results from the analysis and the bending test of specimens made from the same kind of composite F.W. cylinder, the brittle lacquer map of fracture and the map on the location of sufficient strength in the specimen were found.
- 2) Comparing these two maps with the brittle lacquer mapping on the test structure, a search was made to find fractures, cracks around holes and stress concentrated areas of the test structure, especially its jointed part.

The test structure, NAL-7P one stage rocket, was bent by the 15G load applied in the center of its joint. There were not any fractures or cracks in the test structure, but a few stress concentrated and hoop stressed areas were found.

1. ま え が き

航空機やロケット構造の軽量化をはかるため、複合材料の採用は近年ますます増大してきている。複合材料の使用に際して、航空機では主な荷重を担う主材との結合、ロケットでは各段間の結合など、複合材料と金属材料あるいは複合材料と複合材料との結合をいかに合理的に行うかが強度上重要な問題になっている。このために、結合部附近の応力を求め、その強度上の安全性を確かめることは設計上とくに必要とされる。しかし、結合部には結合用の孔、ねじ部、テーパ部分などの繊維の不連続な個所があり、さらに結合用金具やねじの孔への片当りなどがあって解析でその強度を評価することはかなり困難である。したがって、実験的な手法で評価ができればきわめて有用である。実験的な手法としては光弾性皮膜法、応力塗料法などがあるが、ここでは塗装や除去が簡単な応力塗料法を採用した。応力塗料は高応力個所を見落とすことなく全体の応力分布と主応力方向を容易に求めるこ

とができる。そこで、その求めた高応力個所の主応力方向にひずみゲージを接着してひずみを測定すれば経済的に信頼度の高い測定ができる。ここでは、フィラメント・ワインディング(FW)法^{*}によるガラス繊維強化複合材円筒をアルミニウム合金製継手を介して結合した構造を持つロケット(NAL-7P)に曲げ荷重を负荷した場合について、応力塗料を適用して応力分布を求めるとともに、解析によって破損様相および破損強度を求め、応力塗料による塗膜き裂の発生との関係を検討し、解析の困難な個所の強度を実験的に評価することを試みた。その結果について述べる。

2. 供試体および試験片

2.1 供試体

結合部を持つ供試体として、ガラス繊維強化複合材ロケット¹⁾(NAL-7P)を取り上げた。供試体の形状および寸法を図1(a)に示す。FW円筒製の計器部(直

*) ガラス繊維を引きそろえたものに液状の樹脂を含ませながら、円筒状型に巻きつけたのち硬化させ、その後脱型する方法である。

* 昭和55年7月21日受付

** 機体第一部

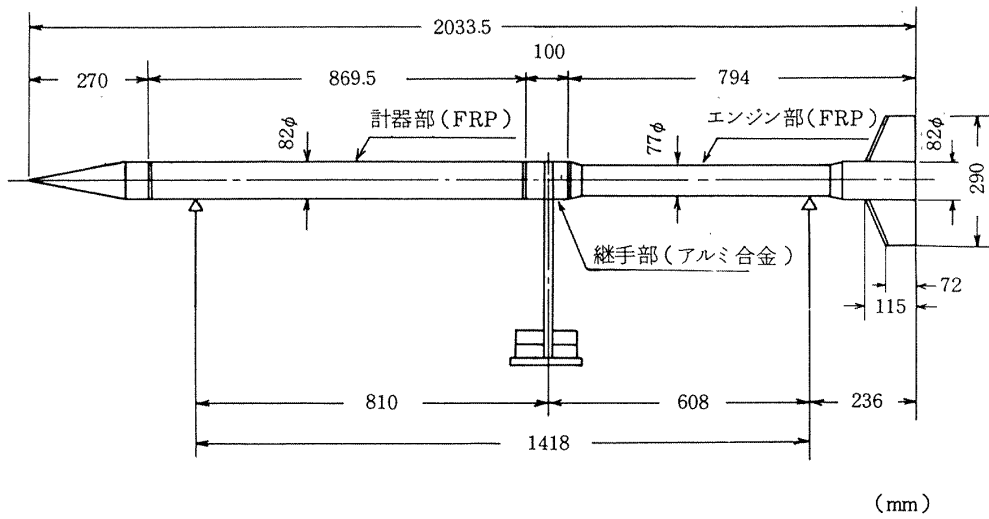


図 1 (a) 供試体の形状および試験方法

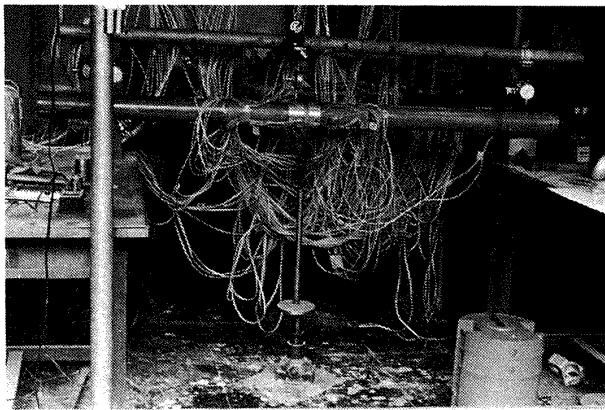


図 1 (b) 試験状況

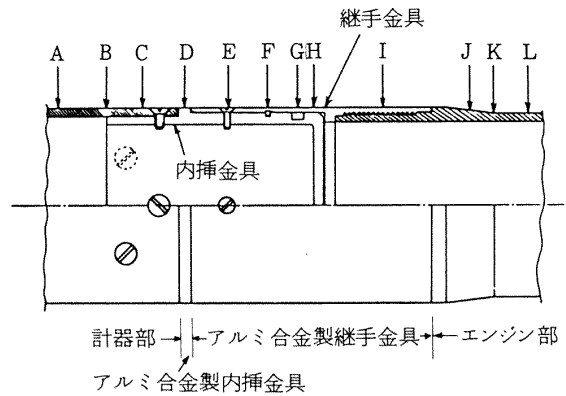
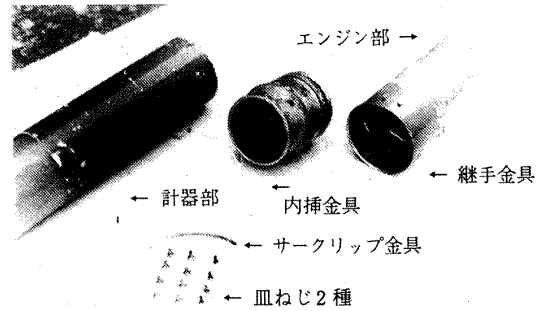


図 3 供試体結合部の構成と組立方式

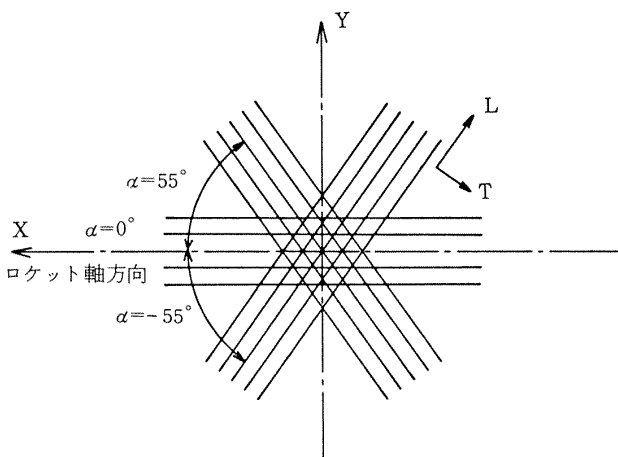


図 2 供試 FW円筒の構成

径 82mmφ) とエンジン部 (直径 77mmφ で結合部分は 82mmφ) はアルミニウム合金製継手で結合されている。FW円筒は厚さ 0.2mm の E ガラスクロス^{**} とエポキシ系樹脂のプリプレグを図 2 に示すように 0° (ロケット軸方向) 層に +55° 層を巻き、さらに、0° 層を重ね、その上

に -55° 層を巻く方法で、これを 5 回繰返し最後に +55° 層を巻いて成形した後、機械仕上で厚さ 3.5mm としたものである。ここで、巻角度 55° は内圧による軸方向と円周方向応力が釣合っている角度で、0° は曲げ応力に対して最大強度を示す角度である。0° と 55° との層の全厚さに対する比はそれぞれ 0.5 で、表面は 55° 巻き層となっている。

FW円筒の結合はアルミニウム合金製継手金具とアルミ

^{**}) 一般のガラス繊維布を指し、特に分類すれば、電気絶縁用無アルカリガラス繊維を織物にしたものである。

ニウム合金製内挿金具を用いて行っている。その結合方法は図3に示すが概要は下記の通りである。

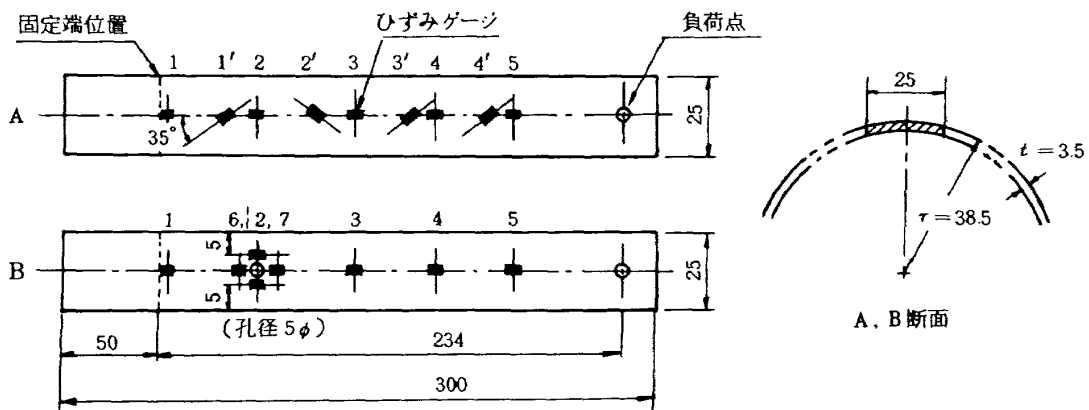
- (1) エンジン部はFW円筒外側にねじを切り、継手金具を廻し込んで結合する（I矢視）。
- (2) 計器部は千鳥型に配列された呼び径4mmの皿ねじ8本で内挿金具に結合され（B-D矢視中間部）、さらにこれが継手金具に内挿されて呼び径3mmの皿ねじ4本（E矢視）と一部分が継手金具の長円孔に突出するサークリップ金具（F矢視）とで結合する。

継手金具の厚さはねじ部とストッパ用突起部を除いて2mm、内挿金具の厚さは計器部との結合部で3.5mm、継手金具との結合部では5mmである。

2.2 試験片

供試体の構成材料の破損様相と破損応力を求めて解析と比較し、また、応力塗料膜に発生したき裂模様と試験片の破損との関係を求めるために、供試体の一部から切り取った材料で試験片を製作した。

試験片は供試体エンジン部のFW円筒の予備品を図4に示すように円周方向にはば10等分して製作したもので、幅25mm、長さ300mmの曲率のついた短さく形試験片である。試験片はAおよびBの2種で、B試験片は孔まわりの塗膜き裂模様を観察するために固定端から50mmの位置に5mmφの孔をあけたものである。なお、荷重の荷重点には荷重皿を吊るための5mmφの孔をあけた。



ゲージ番号	1	2	3	4	5	6	7	1'	2'	3'	4'
固定端からの距離mm	4	50	100	140	180	44	56	33	78	125	165

図4 試験片形状とゲージ接着位置

3. 破損強度と破損様相の解析

3.1 解析方法

ここでは、破損メカニズムの分類による方法²⁾により解析を行った。この方法は図5に示すような一方向強化材について4種類の破損メカニズム、すなわち、

- (1) 繊維方向の引張
- (2) 繊維方向の圧縮
- (3) 繊維に垂直方向の引張
- (4) 繊維に沿う層間せん断

を導入し、それらに対応する基礎的強度を同一成形条件による試料によりあらかじめ実験的に求めておき、一方、各積層構成層における繊維を含む任意の面に関する3次元の応力を解析し、前記の4種類の破損メカニズムに対応する応力成分を求め、これらがそれぞれ一方向材の破損強度に達した時に供試体構成層中の対応する層が破損するとし、この時の単位面積当りの外力($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)を各破損様相に対応する強度として破損強度および破損様相を決めるものである。

解析では、複合材の構成各層中でこの外力により最初に破損する層が生じると、その層のプラスチックの弾性率を零とおいてまだ破損にいたらない層への応力の再配分を行い、順次この手順を繰返して全体的な最終破損強度を求めるが、ここでは、構成層中に最初に破損する層が生じた時を破損とし、供試円筒と同一構成の複合材の破損強度を求める。

この理論を適用して供試円筒の曲げに対する強度を求

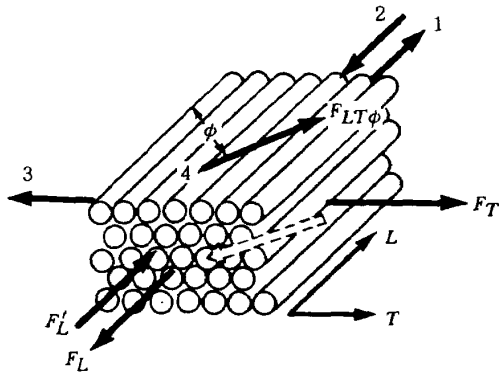


図5 基礎的破壊様相(1~4)と基礎的破壊強度($F_L, T, LT\phi$)

めるために次のように考えた。すなわち、供試円筒は薄肉と考え、円筒に作用する曲げモーメントにより生じる最大曲げ応力は最大引張応力と最大圧縮応力によって与えられると仮定し、FW円筒の曲げ強度を単軸応力状態にある引張応力と圧縮応力により求める。したがって、円筒として問題になる局部変形やそれに関連して生じる局部座屈などによる円筒の破壊には関与せず、FW円筒として完全に曲げ変形によって破損にいたる基礎的な強度を求める。

3.2 解析

3.2.1 軸方向外力による各層内の平面応力成分

全厚さに対するヘリカル巻層および軸方向層の厚さの割合、 t_h および t_a が $t_h + t_a = 1$ の関係の円筒に軸方向外力 σ_x が作用したとき、層間ではすべりがなく相対的なずれを起さないとすれば、各層内の平面応力成分およびひずみの関係は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xh} t_h + \sigma_{xa} t_a &= \sigma_x \\ \sigma_{yh} t_h + \sigma_{ya} t_a &= 0 \\ \sigma_{xh}/E_{xh} - \nu_{yh} \sigma_{yh}/E_{yh} &= \sigma_{xa}/E_{xa} - \nu_{ya} \sigma_{ya}/E_{ya} \\ \sigma_{yh}/E_{yh} - \nu_{xh} \sigma_{xh}/E_{xh} &= \sigma_{ya}/E_{ya} - \nu_{xa} \sigma_{xa}/E_{xa} \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、 E は縦弾性係数、 ν はポアソン比、添字 h と a はそれぞれヘリカル巻層と軸方向層、 x と y はそれぞれ円筒の軸方向と周方向を表す。

したがって、各構成層内の平面応力成分は

$$\sigma_{xh} = \sigma_x / t_h - \sigma_{xa} t_a / t_h \quad (2)$$

$$\sigma_{yh} = -\sigma_{ya} t_a / t_h \quad (3)$$

$$\sigma_{xa} = \sigma_x / (E_{xh} t_h C) + \sigma_{ya} D / C \quad (4)$$

$$\sigma_{ya} = \sigma_x \{ \nu_{xh} C - A \} / (AD - BC) E_{xh} t_h \quad (5)$$

ここで、

$$A = \nu_{xh} t_a / E_{xh} t_h + \nu_{xa} / E_{xa}$$

$$B = t_a / E_{yh} t_h + 1 / E_{ya}$$

$$C = t_a / E_{xh} t_h + 1 / E_{xa}$$

$$D = \nu_{yh} t_a / E_{yh} t_h + \nu_{ya} / E_{ya}$$

各層の軸方向と周方向の E と ν の算出については文献3を参照されたい。

3.2.2 各種破壊メカニズムに対応する応力成分

一方向強化材の破壊メカニズムに対応する基礎的破壊様相として先に述べた4種類を考え、ヘリカル巻層と軸方向層による円筒に曲げ外力が作用した場合の引張側に生じる各種応力成分を軸方向応力 σ_x が作用したとして求める。いま、添字 L を繊維方向、 T を繊維に垂直方向とし、 $\sigma_x = 1$ として、ヘリカル巻層のこれらの応力成分は、

$$\begin{aligned} \sigma_{Lh} &= \sigma_{xh} (\cos^2 \alpha + \chi_1 G_{xyo} \sin 2\alpha) \\ &\quad + \sigma_{yh} (\sin^2 \alpha + \chi_2 G_{xyo} \sin 2\alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Th} &= \sigma_{xh} (\sin^2 \alpha - \chi_1 G_{xyo} \sin 2\alpha) \\ &\quad + \sigma_{yh} (\cos^2 \alpha - \chi_2 G_{xyo} \sin 2\alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau_{LT, \phi h} &= (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)^{1/2} \\ &= \{ [\sigma_{xh} (-\sin 2\theta / 2 + \chi_1 G_{xyo} \cos 2\theta \cos \phi) \\ &\quad + \sigma_{yh} (\sin 2\theta / 2 \cos^2 \phi + \chi_2 G_{xyo} \cos 2\theta \cos \phi)]^2 \\ &\quad + [\sigma_{xh} (\chi_1 G_{xyo} \sin \theta \sin \phi) \\ &\quad + \sigma_{yh} (-\cos \theta \sin 2\phi / 2 + \chi_2 G_{xyo} \sin \theta \sin \phi)]^2 \}^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 α は巻き角度、 τ はせん断応力成分、 G は横弾性係数、 χ_1, χ_2 は歪曲せん断効果、添字 o は一方向層の弾性係数である。角度 ϕ, θ, α の関係は

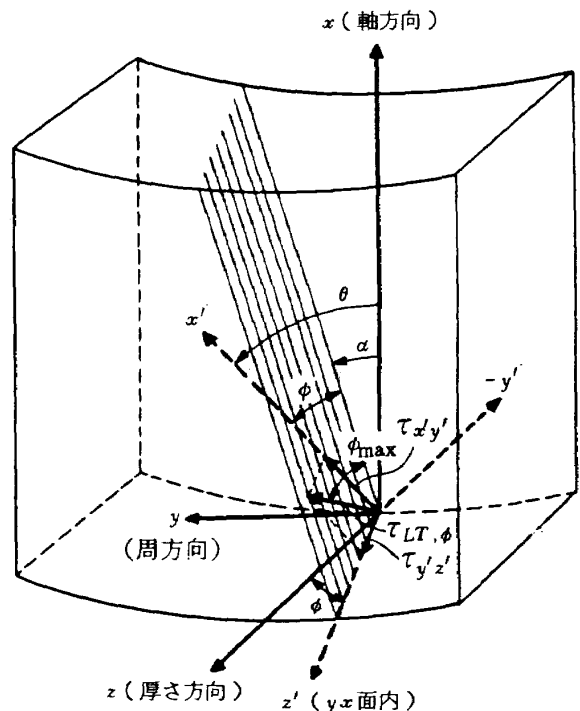


図6 繊維を含む面に関する応力成分

$$\cos \phi = \tan \theta / \tan \alpha \quad (9)$$

ただし、 $0 \leq \theta \leq \alpha$ の範囲で、 $\tau_{LT, \phi h}$ の最大値をせん断応力成分とする。(図6参照)

また、最大せん断方向 ϕ_{max} は

$$\phi_{max} = \tan^{-1}(\tau_{yz} / \tau_{xy}) + \phi \quad (9')$$

ここで、 ϕ は図5に示す層間せん断力と繊維方向とのなす角度である。

軸方向層での応力成分は $\alpha = 0$ を(6)~(8)式に代入することにより求められる。すなわち、

$$\sigma_{La} = \sigma_{xa} \quad (10)$$

$$\sigma_{Ta} = \sigma_{ya} \quad (11)$$

$$\tau_{LT, \phi a} = 0 \quad (12)$$

3.2.3 供試円筒の応力計算

ここで、巻角度 α がヘリカル巻層で 55° 、軸方向層で 0° 、両層の全厚さに対する比 t_a と t_h とが共に0.5、ガラス繊維(f)とエポキシ樹脂(m)の特性値を、それぞれ、 $E_f = 7400 \text{ kg/cm}^2$ 、 $E_m = 350 \text{ kg/mm}^2$ 、 $\nu_f = 0.23$ 、 $\nu_m = 0.36$ 、繊維容積含有率 $V_f = 60\%$ として、一方向材の繊維方向と繊維に垂直方向の材料常数(E , ν , G)を求め、次に、積層理論³⁾により積層材の材料常数を求め、これらの値を(2)~(5)式に代入して平面応力成分を、次に、(6)~(12)式により破壊メカニズムに対応する応力成分をそれぞれ計算した。その結果を表1に示す。表1は単位の σ_x が作用した場合のヘリカル巻層と軸方向層の繊維方向応力 σ_{Li} ($i = h, a$)、繊維に垂直方向応力 σ_{Ti} および繊維に沿う層間せん断応力 $\tau_{LT, \phi h}$ の値である。

3.2.4 一方向強化材の基礎的強度

破壊メカニズムに対応する基礎的破壊強度は、一般には供試体と同一成形条件の一方向材を用いて実験的に求める。しかし、ここでは、ほとんど同一構成の複合材についての実験値を参考文献4より引用した。すなわち、

$$\text{繊維方向の引張強さ} \quad F_L = 120 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{繊維方向の圧縮強さ} \quad F_L' = 55 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{繊維に垂直方向の引張強さ} \quad F_T = 2 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{繊維に沿う層間せん断強さ} \quad F_{LT, \phi} = 2.8 \text{ kg/mm}^2$$

3.2.5 軸方向強度

表1に示した各種破壊メカニズムに対応する応力 σ_{Li} 、 σ_{Ti} ($i = h, a$)、 $|\tau_{LT, \phi h}|_{max}$ がそれぞれ一方向強化材の破壊強度の F_L 、 F_L' 、 F_T 、 $F_{LT, \phi}$ に達した時に供試体の構成層中の対応する層は破壊する。そこで、その時の外応力 σ_x を求めれば、これが各破損様相に対応する強度となる。これは $\sigma_{Li} \rightarrow F_L$ 、 $\sigma_{Ti} \rightarrow F_T$ 、 $|\tau_{LT, \phi h}|_{max} \rightarrow F_{LT, \phi}$ とすることにより求められる。

表1 軸方向外力による複合材各層内の応力成分

構成層 \ 応力成分	σ_{Li} / σ_x	σ_{Ti} / σ_x	$ \tau_{LT, \phi h} / \sigma_x$
ヘリカル巻層 ($\alpha = \pm 55^\circ$)	0.2196	0.2858	0.2185
軸方向層 ($\alpha = 0^\circ$)	1.5404	-0.0457	0.0

$i = h, a$

表2 各破損様相を生じる場合の軸方向引張強さ(解析値)

(kg/mm^2)

破損様相 \ 構成層	繊維方向の引張	繊維に垂直方向の引張	繊維に沿う層間せん断
ヘリカル巻層 ($\alpha = \pm 55^\circ$)	546.5	7.0	13.2
軸方向層 ($\alpha = 0^\circ$)	77.9	—	—

表3 各破損様相を生じる場合の軸方向圧縮強さ(解析値)

(kg/mm^2)

破損様相 \ 構成層	繊維方向の圧縮	繊維に垂直方向の引張	繊維に沿う層間せん断
ヘリカル巻層 ($\alpha = \pm 55^\circ$)	250.5	—	13.2
軸方向層 ($\alpha = 0^\circ$)	35.7	43.2	—

引張の場合の計算結果を表2に示す。圧縮側についても同じ考え方で圧縮強さを求める。ただし、外応力 $\sigma_x \rightarrow -\sigma_x$ として繊維方向の圧縮強度は $\sigma_{Li} \rightarrow F_L'$ とすることにより求める。計算結果を表3に示す。

表2、表3に示す結果から、供試円筒すなわち巻角度 55° と 0° のヘリカル巻層と軸方向層の併用円筒($t_h + t_a = 1$)が曲げ外力を受けた場合の各層内応力成分を軸方向力が作用したとして検討した結果、破損様相は次の順序で生じることが明らかになった。すなわち、

- (1) 引張り側におけるヘリカル巻層の繊維に垂直方向の引張りによる破損
- (2) 引張りおよび圧縮側におけるヘリカル巻層の繊維に沿う層間せん断による破損

4. 実 験

4.1 実験方法

応力とひずみの全体的な分布状態、特に、高応力部分の検知を目的とする測定法で、現在、現場で実用に供し

うる方法としては光弾性皮膜法と応力塗料法とがある。皮膜法は繰返し測定が可能であるが、皮膜の製作と接着に技術を要し、実験後の皮膜の除去が困難である。応力塗料法は温湿度にその感度が大きく影響され、繰返し試験を行うことが難かしいなどの欠点はあるが、塗膜の形成と除去がきわめて容易である。

そこで、航空機やロケットの構造部材への適用を考慮して、ここでは応力塗料を用いることとし、定量的なデータを必要とする個所には応力塗料による実験後に電気抵抗ひずみゲージによる測定を行うこととした。試験は供試円筒から製作した試験片による予備試験をまず行い、それらのデータをもとにして供試円筒結合部の負荷荷重に対する強度上の安全性を検討した。

4.2 応力塗料の特性と使用方法

応力塗料は特殊な脆い塗料で、これを測定部分に塗装し、乾燥後に荷重を負荷すれば高い引張応力を生じている部分の塗料膜にき裂が発生する。したがって、応力塗料を複雑な形状の構造物の強度試験に用いれば、高応力の個所を見落すことなく全体の応力（ひずみ）分布と主応力方向を求めることができる。また、これにひずみゲージによる測定を併用すれば、測定すべき高応力の個所とその主応力方向が定まっているので、経済的で信頼度の高い測定ができる。

本実験では、自然乾燥エアゾル式の CRUX（特殊塗料製）を使用した。応力塗料は使用時の温度と湿度により感度がかかなり変化するため、温湿度に合せた数種類の製品が作られている。塗膜の感度は板幅 20mm、板厚 3mm、長さ 210mm のアルミニウム合金材の検定用試験片に供試体と同様に塗装を行い、乾燥後に図 7 に示すような感度検定器に挿入してセットし、片持梁として支持された試験片に指圧で一定たわみを与えて求める。ここでは供試体が金属材料でないため、塗膜の付着状態が異なり感度差が生じることを考えて、ガラス繊維一方向強化材で

検定用試験片を製作し合わせて使用した。

応力塗料の使用法については付録に述べてあるので参照されたい。

4.3 試験片による曲げ試験

試験片による曲げ試験の目的は次の 3 つである。

- (1) 曲げ荷重による試験片の破損様相と破損応力を求めて解析と比較する。
- (2) 応力塗料の塗膜き裂模様と試験片の破損との関係を求める。
- (3) 塗膜き裂模様とひずみゲージによって測定したひずみ値との関係を求める。

この目的のために、試験片は、図 4 に示すように、A および B の 2 種製作し、そのうちの B 試験片は孔まわりの塗膜き裂模様を観察するため固定端から 50mm の位置に 5mmφ の孔をあけたものである。試験片の破損は目視、破損応力はひずみゲージによる表面ひずみの測定により求めることとし、塗膜き裂と試験片の破損は応力塗料による測定と測定後の試験片の観察により関係づけることとした。試験片は端部から 50mm の位置が固定端となるように固定金具で試験片を上下からはさんで固定し、荷重端では試験片に 5mmφ の孔をあけて、これに鎖で荷重皿（自重 90g）を吊り負荷を行った。なお、固定金具は試験片の曲率に合致する曲面をもつ鉛製である。試験片番号、測定方法および最大負荷荷重の組合せを表 4 に示す。

表 4 測定方法別使用試験片，最大荷重一覧

測定方法	ひずみゲージ		応力塗料			
	A 2	B 2	A 1	B 1	B 3	B 4
試験片番号	—	—	—	—	—	—
試験片形状	—	有孔	—	有孔	有孔	有孔
最大荷重	2400g	2100g	1800g	2000g	2000g	2000g

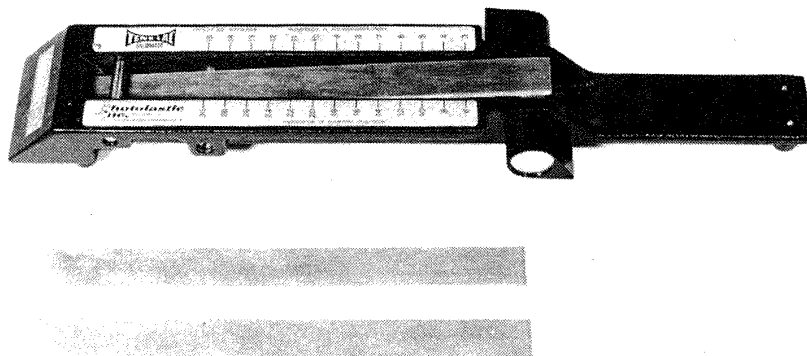


図 7 塗膜感度検定器と同試験片

4.3.1 ひずみゲージによる試験片表面のひずみ測定
 応力塗料による測定が引張側について行われるため、ひずみゲージによる測定も試験片表面（凸側）について行った。使用したひずみゲージは大ひずみ測定用共和KFE-5-C1（ゲージ抵抗120Ω，G.F.2.04）で、接着剤はシアノアクリレート系の共和CC-15Aである。ひずみゲージの接着位置を図4に示す。表2および表3に示す破損応力は試験片の軸方向（長手方向， $\alpha=0^\circ$ ）に作用する応力であるから、軸方向にゲージを接着して試験片の破損時のひずみを求め、これから破損応力を算出し、また同方向の縦弾性係数 E_0 を求めると、また、1'～4'のひずみゲージをヘリカル巻層に垂直方向（ $\alpha=35^\circ$ ）に接着して同層の破損時のひずみを測定し、ヘリカル層に沿う方向の塗膜き裂と試験片の破損との関係を求めることとした。なお、 E_0 を求めるために荷重点のたわみを同時に測定した。測定はまず荷重を200g（荷重皿の重量を含む）おきに800gまで負荷して表面のひずみと荷重点のたわみを測定した。たわみはダイヤルゲージを用いて測定した。目視による観察では、この時には試験片表面にクラックは発生していない。A-2試験

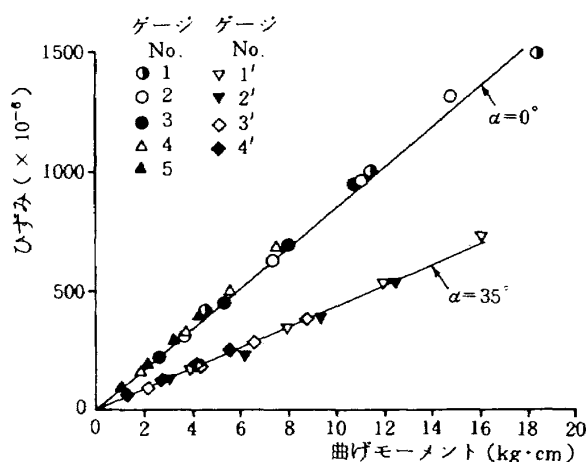


図8 試験片の曲げモーメントとひずみの関係

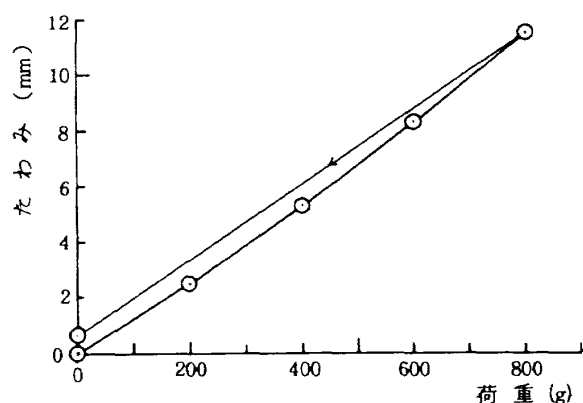


図9 負荷点のたわみと荷重の関係

片についての測定結果を図8および図9に示す。図8ではひずみ1～5までの測定結果が一直線上に乗っていることがわかる。この測定結果 ϵ/M を曲げモーメントとひずみの関係式

$$\sigma = \epsilon E = M/Z \tag{13}$$

に代入し、断面係数 $Z = 45.75 \text{ mm}^3$ を代入して軸方向の縦弾性係数 E_0 を求めると、 $E_0 = 2,570 \text{ kg/mm}^2$ となる。図9の負荷点のたわみも荷重に対しほぼ直線的に増大していること、ヒステリシスが約5%と小さいことがわかる。負荷点のたわみと荷重の関係式

$$\delta = Wl^3 / 3EI \tag{14}$$

（ここで、 W は荷重、 l は負荷点からの距離）に図9の測定値 δ/W と断面2次モーメント $I = 109.8 \text{ mm}^4$ を代入して E_0 を求めると $E_0 = 2,730 \text{ kg/mm}^2$ となる。以上の結果から、本複合材の軸方向の縦弾性係数は $E_0 = 2,600 \sim 2,700 \text{ kg/mm}^2$ と求められた。

これは別に求められた E_0 の値⁴⁾2,700 kg/mm²とほぼ一致する。ひずみゲージ1'～4'による $\alpha=35^\circ$ 方向のひずみの測定値 ϵ_{35} も図8にみられるようにほぼ直線になり、 $\alpha=0^\circ$ のひずみ ϵ_0 との比は $\epsilon_{35} / \epsilon_0 = 0.5$ となった。

次に、同じA2およびB2試験片について、破損応力を求めるために、試験片が破損するまで荷重を漸増して試験を行った。

試験片表面のクラック発生状態は目視により観察し、スケッチした。結果を図10に示す。固定端および孔のまわりは図4に示すようにゲージが接着されているので、ゲージの下の部分のクラックは推定で描いてある。

クラックは非常に見にくく、その上、照明方法や試験片表面の状態により異常のない部分をクラック発生と誤認する可能性もあった。図11に試験終了後の試験片の写真を示す。これは試験片を裏面から照明し、光を透過させて撮影したもので、短い2本の線は発生したクラック先端を示す。軸線に対して反時計方向の回転を+として $\pm 55^\circ$ 方向、すなわち、ヘリカル巻層に平行な方向のクラックが2つの層に発生していることがわかる。図10のスケッチでは、 $+55^\circ$ 方向のクラックがほとんどで -55° 方向のクラックは描かれていない。これは -55° 方向のクラックは微細で、この図に見られるように裏面から照明し拡大するまで見出しなかったものである。試験片のクラックはいずれもヘリカル巻層に沿う方向（ $\alpha = \pm 55^\circ$ ）に発生している。これは解析で求めた破損様相と一致している。図10のスケッチにしたがえばクラックの発生時の荷重にはかなりばらつきがあること、また、荷重2,000gでは両試験片にかなりのクラックが発

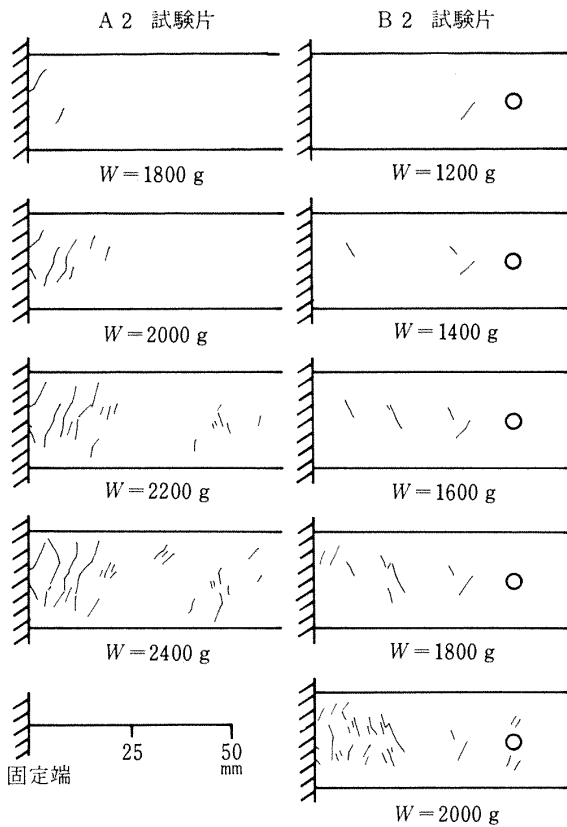


図 10 ヘリカル巻層に沿う試験片のクラック発生状況

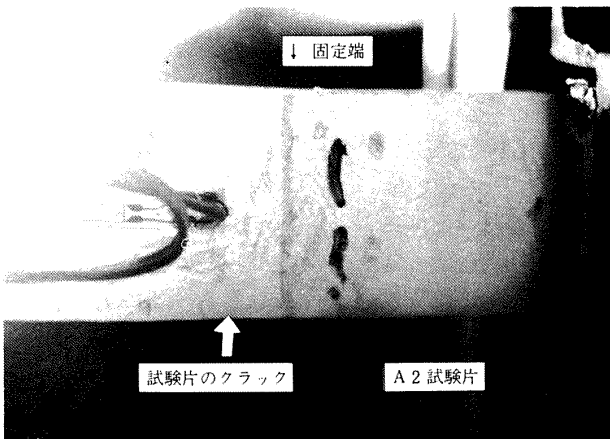


図 11 ヘリカル巻層に沿う試験片のクラック

生していることがわかる。A 2 試験片表面のひずみおよび荷重端のたわみの測定値を図 12 および図 13 に示す。同図からひずみおよびたわみ荷重 1,800g までは直線上にあるが、2,000g で傾きが少し増大し、2,200g でさらに増大し、2,400g では時間の経過と共に増大しつづけた。このことから、荷重 2,400g 以上では試験片の破損が順次進行して全体的な破壊へいたるものと推定される。

B 2 試験片では、荷重は 2,100g までしか与えていないが、1,800g、2,000g 荷重時のクラック発生状態を

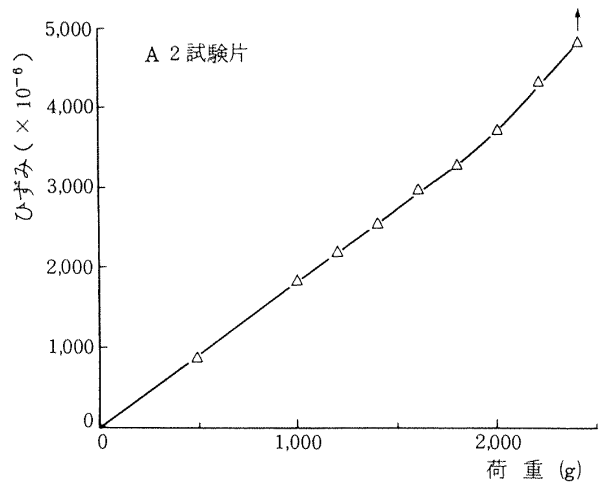


図 12 試験片のひずみ（固定端から 4mm の位置）と荷重の関係

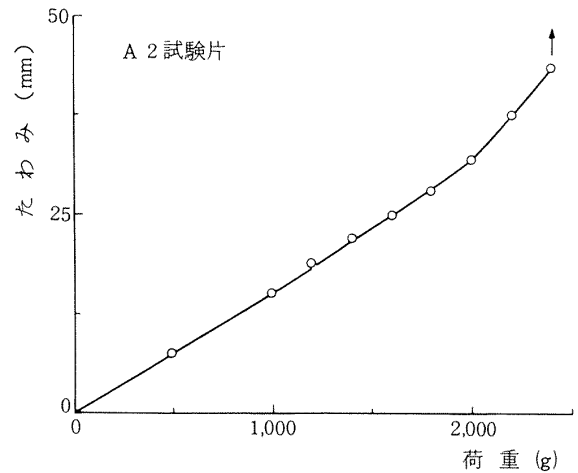


図 13 試験片のたわみ（負荷点）と荷重の関係

A 2 試験片のそれと比較すれば、2,200g 以上の荷重ではそのひずみおよびたわみが A 2 試験片と同様な傾向をたどるものと推察できる。

以上の実験結果から次のことがわかった。

- (1) 試験片のクラックはいずれもヘリカル巻層の破損によって生じ、これは解析で求めた破損様相と一致した。
- (2) 測定結果では、クラックを見落している可能性があるため、結果として破損応力を高めに推定する可能性があった。
- (3) 試験片数が少ないことと(2)の結果から破損応力の推定はこの段階で行わず、引続いて行う応力塗料による実験結果と合わせて行う方が望ましいことがわかった。

4.3.2 応力塗料による試験片表面のひずみ測定

本実験は片持梁の曲げ試験のため、まず曲げに対応す

る塗膜き裂が試験片の軸線に直角に発生するが、荷重をさらに増大して試験片が破損または破損に近い状態となった時、曲げに対応する塗膜き裂上にさらに $\alpha = +55^\circ$ あるいは -55° 方向の塗膜き裂が発生するかを調べ、また発生した場合は試験片表面の応力の大きさと表面クラックとの関係を調べた。

試験に先立ち、感度試験片に応力塗料を塗布して塗膜感度を調べた。

感度試験結果

1) 使用応力塗料

CRUX SC-20

CRUX UC

2) 塗膜のき裂感度(平均値)

$1,200 \times 10^{-6}$ (7回塗り)

$1,100 \times 10^{-6}$ (8回塗り)

3) 実験場の温湿度

26 ~ 27°C, 40 ~ 45 % R.H

次に、表4に示す4本の試験片(A1, B1, B3およびB4)に応力塗料を塗布(8回塗り)して、後に示すひずみゲージによる実験と同一条件で曲げ試験を行った。塗膜はき裂が発生すると感度が低下するので、負荷回数はできるだけ少ないことが望ましい。ここでは、塗膜き裂の発生状況を勘案しつつ1,800~2,000gまで負荷した。各負荷段階で塗膜き裂を観察し、写真撮影を行い、次の負荷段階に進んだ。この時荷重を除去して塗膜を緩和していないので、後の負荷時では塗膜感度が低くなっている可能性がある。

塗膜き裂は、図14に示すように、まず曲げによる引張りひずみに対応するものが軸方向と直角に発生し、そ

の先端は荷重の増大に伴って漸次荷重端方向へ発生位置が移ってくる。試験片の形状が上方に凸なので、図に見られるように、塗膜き裂の分布は試験片の先端に行くにしたがってその幅が減少し舌状になっている。さらに、荷重を増加すると $\alpha = +55^\circ$ あるいは -55° 方向、すなわち巻層に平行な方向の塗膜き裂が曲げに対応する塗膜き裂を斜めに横断して発生した(図15, 16および17参照)。図15では矢印の方向に5本ほどの斜めの塗

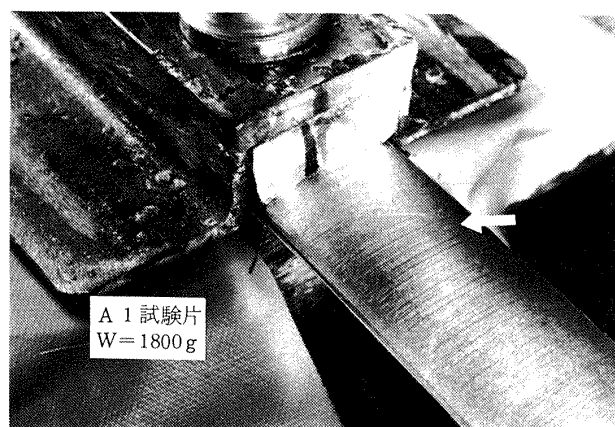


図15 ヘリカル巻層に沿う塗膜き裂

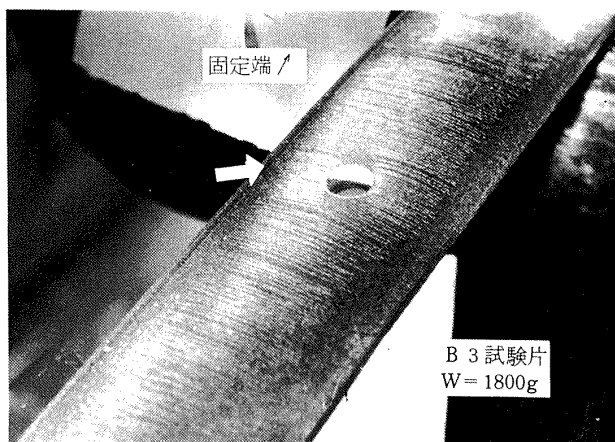


図16 ヘリカル巻層に沿う塗膜き裂

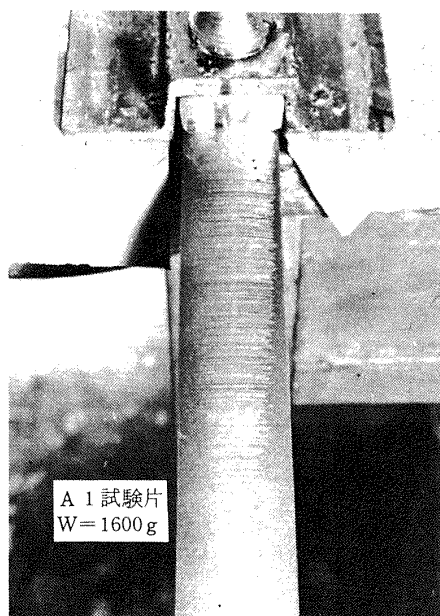


図14 曲げによる塗膜き裂分布

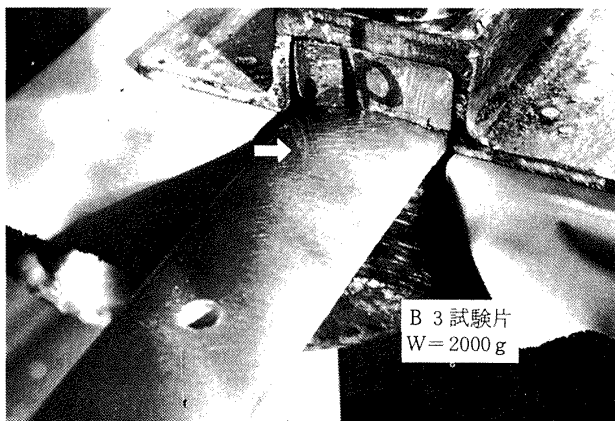


図17 固定端附近に発生したヘリカル巻層に沿う塗膜き裂

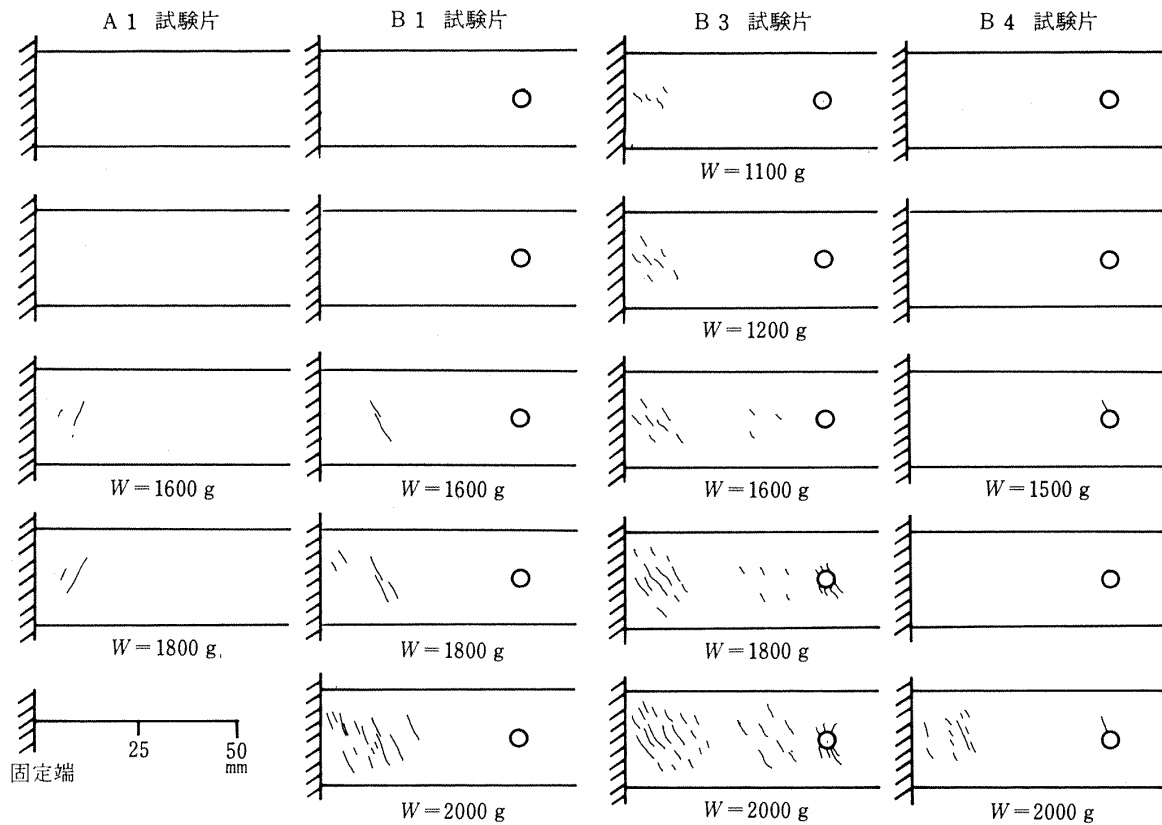


図 18 ヘリカル巻層に沿う塗膜き裂の発生状況

膜き裂が見える。図 16 では孔べりの左下から左下方に孔の直径 (5mm) より少し短かい長さの斜めの塗膜き裂が見える。図 17 では固定端附近に数多くの斜めの塗膜き裂が見出される。塗膜き裂は以上の写真に見るように非常に明瞭に観察された。

斜めの、すなわち、ヘリカル巻層に平行な塗膜き裂の発生状況のスケッチを図 18 に示す。この塗膜き裂はいずれもまず固定端近くに発生し、B 試験片では負荷の増大に伴って孔まわりからも発生した。B 4 試験片では小さな荷重で孔まわりからき裂が発生しているが、これは試験片の孔の加工時に孔まわりに欠陥が生じたため、小さな荷重で塗膜き裂が発生したものと推定された。

試験終了後、試験片の塗膜を溶剤で除去し、その表面を観察した。試験片には固定端近傍のヘリカル巻層に沿う方向のクラックが数多く発生していること、また、このクラックは塗膜き裂のき裂方向とほとんど一致していることがわかった。一例として、図 17 に示したヘリカル巻層方向に沿った塗膜き裂を固定端近傍に生じた試験片の塗膜除去後の表面のクラック発生状況を図 19 に示す。

以上の実験結果から、塗膜き裂発生時の試験片表面の応力を推定する。

1) 本試験では試験片表面は曲げによる引張りの単軸応

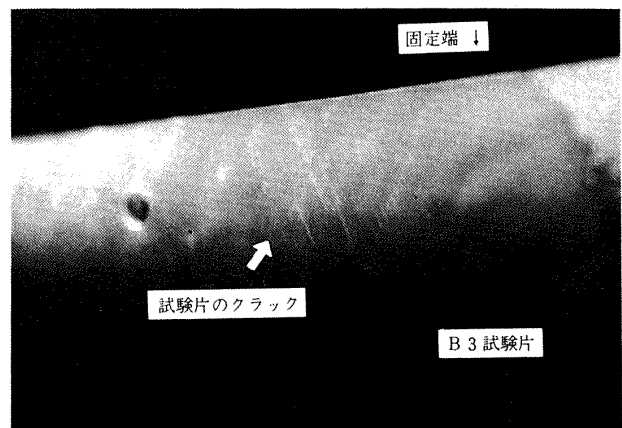


図 19 ヘリカル巻層に沿う試験片のクラック

力状態のため塗料にはまずそれに対応するき裂が発生し、その後の荷重の増加により曲げ応力のヘリカル巻層に垂直方向 ($\alpha = 35^\circ$) の応力成分が増大して塗膜の同方向のき裂を生じるものと考えられる。そこで、曲げに対応する塗膜き裂が生じた上にヘリカル巻層に沿ってき裂が発生する状態なので、これを塗膜き裂 A に直交して新しい塗膜き裂 B が発生する場合の B のき裂感度⁵⁾ から推定して、本実験での $\alpha = \pm 55^\circ$ 方向の塗膜き裂感度を曲げに対応する塗膜き裂感度の 1/2 とした。したがってその塗膜感度は $2,200 \times 10^{-8}$ となる。そこで、 $\alpha = 35^\circ$ 方向

に $2,200 \times 10^{-6}$ のひずみを生じさせる軸方向 ($\alpha = 0^\circ$) 応力 σ_x を解析によって求めると、約 20 kg/mm^2 となる。これは表 2 に示すヘリカル巻層を同層に垂直方向の引張によって破損せしめる σ_x の値 7 kg/mm^2 を大幅に越えている。

2) ひずみゲージによる測定結果 ($\epsilon_{35} / \epsilon_0 = 0.5$) から、この時のひずみは $\epsilon_0 \approx 4.400 \times 10^{-6}$ となり、固定端で 4.400×10^{-6} のひずみが発生する時の荷重は図 12 の測定結果から $2,200 \text{ g}$ とわかる。荷重 $2,200 \text{ g}$ の時の試験片表面の状態は図 10 および図 18 における荷重 $2,000 \text{ g}$ の場合の状態から推定するとかなりクラックが発生していることがわかる。

以上から、本試験では塗膜き裂は試験片のクラック発生によるひずみの急増により生じるものと推論される。

4.3.3 破損応力の算定

以上の実験結果から試験片の破損応力を求める。ヘリカル巻層に沿う方向の塗膜き裂は試験片のクラックに対応するものと考えられるから図 10 と図 18 の結果を 1 つにまとめて、固定端から 50 mm までの範囲について、試験片に発生したクラックと塗膜に発生したき裂の個数をかぞえて、負荷荷重の増大とき裂の個数の増大との関係を図示すると図 20 のようになる。この図から①ヘリカル巻層に沿う塗膜き裂の初期発生時の荷重はかなりばらつくこと、②荷重 $1,900 \text{ g}$ 以上では塗膜き裂数が急激に増大すること、がわかる。

そこで、図 10, 18 および 20 から破損時の荷重を求

めると、荷重 $1,800 \text{ g}$ では B 4 試験片を除き全ての試験片にクラックを生じ、B 4 試験片も荷重 $2,000 \text{ g}$ におけるクラック発生状態を B 1 や B 2 試験片の発生状態と比較すると、 $1,800 \text{ g}$ 負荷して試験すればクラックが発生したであろうと推定できる。荷重 $1,600 \text{ g}$ では 4 つの試験片にクラックを生じ、B 2, B 3 試験片はかなりのクラック数となっている。荷重 $1,400 \text{ g}$ は試験結果があまりなく、荷重 $1,200 \text{ g}$ では B 2, B 3 試験片を除いてクラックが発生していない。これらのことから、破損時の荷重を $1,400 \sim 1,600 \text{ g}$ と推定した。

この破損荷重が負荷された時の固定端近傍の試験片表面のひずみを既で行った実験結果 (たとえば図 8) から求め、これに軸方向の縦弾性係数を乗じて固定端における軸方向応力 σ_x を求めると約 $7 \sim 8 \text{ kg/mm}^2$ となり、解析値とほぼ一致した。

4.3.4 実験結果

以上の実験結果から次のことが明らかになった。

- (1) 解析で予知された強度最小の破損様相で試験片は破損し、最小破損強度は解析値にほぼ等しい値となる。
- (2) 応力塗料の塗膜において、曲げに対応するき裂の上にヘリカル巻層に沿う方向、すなわち、約 $\pm 55^\circ$ 方向のき裂が発生した場合は、試験片表面にクラックがほぼ発生している。

4.3.5 破損と安全の判定基準の設定

実験結果から、ヘリカル巻層に沿う方向に塗膜き裂が

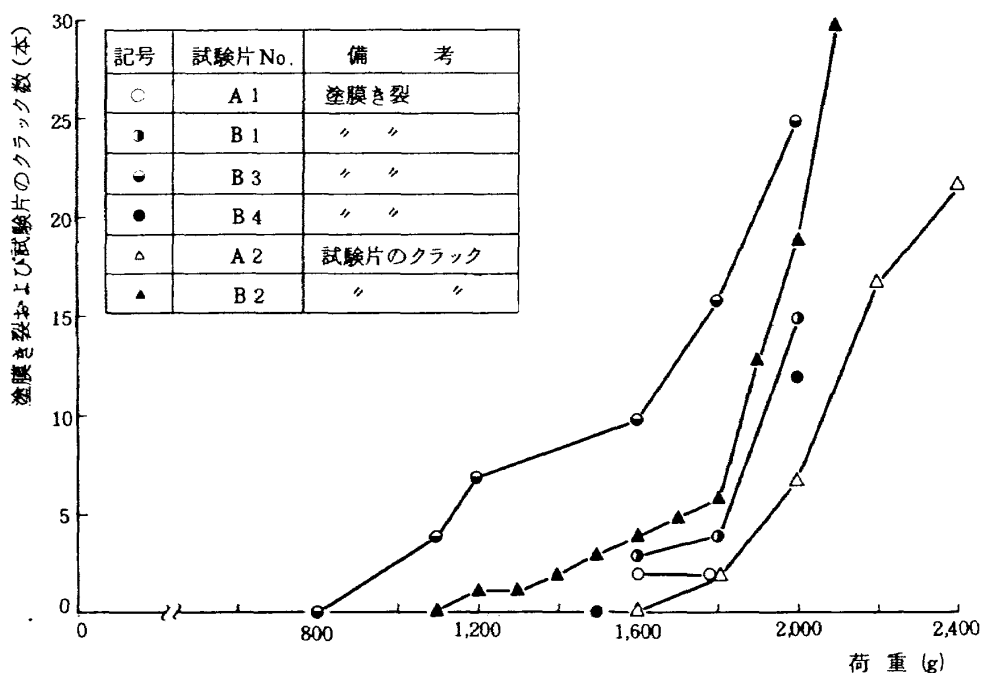


図 20 負荷荷重と塗膜き裂および試験片のクラック発生数

発生すれば、供試体は破損したと考えられるので、この塗膜き裂を破損の判定基準とする。安全の判定基準は次のように定めた。すなわち、実験結果から求められた破損荷重 1,400 g ~ 1,600 g の下限をとり、荷重 1,400 g が負荷された時の試験片の固定端のひずみ $2,200 \times 10^{-6}$ の約 10% 減の $2,000 \times 10^{-6}$ のひずみを安全限界と定めた。いくつかの試験片についてひずみ $2,000 \times 10^{-6}$ の発生個所を試験片上に求め、その位置を中心として幅 10mm の間の曲げ荷重により発生した塗膜き裂本数を求めた所 19 ~ 20 本/cm であった。したがって、塗膜き裂密度 20 本/cm 前後を供試体が安全と判定される限界とする。

当然のことながら、これは塗料膜の感度に依存するので、20 本/cm という値は塗膜き裂感度 $1,100 \times 10^{-6}$ の場合のものであり、き裂感度が大幅に変れば修正が必要である。

4.4 FRP 円筒結合部の曲げ試験

主として応力塗料により FRP 円筒結合部の孔、テーパ部分などの繊維の不連続部分および複雑に組合された継手部でのねじその他の片当りによる局所的な高ひずみ発生部分を検知し、試験片による実験結果を基として円筒結合部の強度上の安全性を検討した。

4.4.1 曲げ応力とひずみの計算

供試体寸法、支点と荷重点の位置を図 1(a) に、試験状況を図 1(b) に示す。負荷応力とひずみの大体の値を知る目的で、複雑に組合されている継手部分(図 3 参照)を一体構造と考えて断面係数を求め、継手部中心から ±300mm の範囲の応力とひずみを計算した。ここでは、計器部およびエンジン部の軸方向の縦弾性係数をそれぞれ $2,400$ および $2,700 \text{ kg/mm}^2$ ⁴⁾ とし、15 G の集中荷重約 100 kg がアルミニウム合金製継手の中央に負荷されるとした。その計算結果を図 21 に示す。図中の A ~

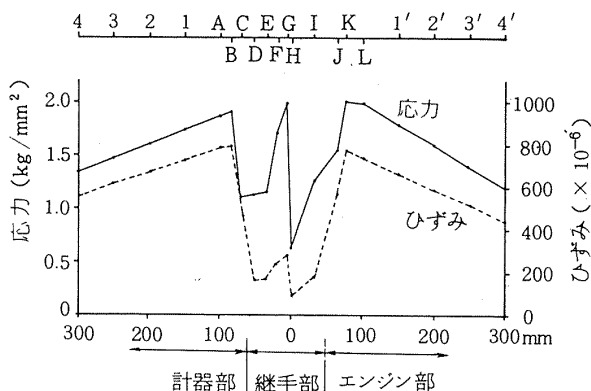


図 21 曲げ応力とひずみの計算値 (荷重 100kg 時)

L の位置は図 3 に示す円筒の結合方式(図中の A-L の位置)に対応する。また荷重点 H を中心として A と L は各 100mm の位置にあり、そこから 50mm おきに 1 ~ 4, 1' ~ 4' の記号を付けた。なお、図 25 以降の図面でも同じスケール記号を用いている。最大応力は断面が急変する位置 B とテーパ終了部(位置 K)に生じ、 $\sigma_x \approx 2 \text{ kg/mm}^2$ である。一方、応力塗料による実験の際に曲げに対応する塗膜き裂を発生させるのに十分なひずみ値を 700×10^{-6} と推定すると、計算による 700×10^{-6} 以上の発生個所は計器部の試験区域で荷重点から約 200mm、エンジン部で約 150mm まで含まれることが図 21 からわかり、本試験に応力塗料を使用して特に増感法を用いなくても十分な試験結果が得られることが確かめられた。

4.4.2 応力塗料によるひずみ測定

実験場内の温湿度は $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、45 ~ 50 % R.H. で、CRUX SC-20 の使用が適正と判定された。

感度試験は 1) ~ 3) の条件で行い、4) に示す感度が得られた。

- | | |
|------------|-------------------------------|
| 1) 使用応力塗料 | CRUX SC-20 |
| | CRUX UC |
| 2) 塗装回数 | 下塗り 2回 |
| | 上塗り 8回 |
| 3) 塗膜厚さ | 下塗り 0.02mm |
| | 上塗り 0.09mm |
| | (いずれも標準膜厚の範囲内) |
| 4) 塗膜のき裂感度 | アルミ材 730×10^{-6} |
| | FRP 一方向材 790×10^{-6} |

ここで述べた塗膜のき裂感度は感度試験片それぞれ 5 枚の平均値であり、個々の測定結果は表 5 に示すとおりである。試験片のき裂模様一例を図 22 に示す。この値は予備試験における塗膜感度 $1,100 \times 10^{-6}$ に比べて、約 30% も感度が高い。このため、予備試験結果にもとづいて定めた 20 本/cm の安全限界は本試験ではかなり安

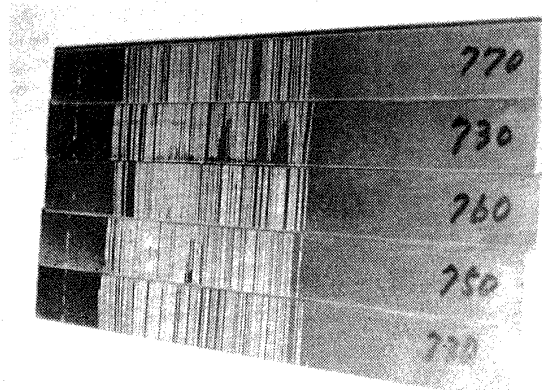


図 22 感度試験片のき裂模様

表5 感度試験片の塗膜厚さおよびひずみ感度

材 料	上塗り塗膜厚さ	下塗り塗膜厚さ	ひずみ感度	感度平均値
A 1	0.07 mm	0.01 mm	760×10^{-6}	730×10^{-6}
	0.10	0.02	730	
	0.08	0.01	800	
	0.09	0.02	650	
	0.09	0.01	700	
FRP	0.09	0.01	720	790×10^{-6}
	0.09	0.02	790	
	0.08	0.02	720	
	0.08	0.01	760	
	0.08	0.02	940	

全側にある判定基準となる。

次に、供試円筒の継手部を中心として約600mmの範囲にCRUX SC-20を塗布し、約23時間乾燥後に、継手部中心に荷重吊り金具を用いて100kgの荷重を一度に負荷した曲げ試験を行ない、引張りひずみ分布を求めた。その後、18時間荷重を保持して塗膜を十分に緩和させた後に荷重を一度に除荷して圧縮ひずみ分布を求めた。CRUX塗料膜は図23に示すように3時間以上で90%は緩和すると云われている⁵⁾。従って、本実験の場合は18時間の保持時間を有しており、十分緩和しているものと考えられる。

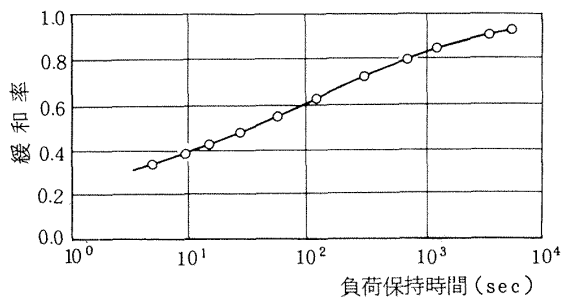


図23 塗料膜の緩和特性

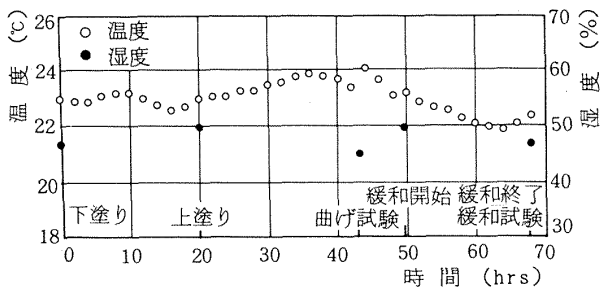


図24 塗膜の乾燥、試験、緩和中の温湿度変化

塗装、乾燥、試験、緩和などの時間とその間の実験室の温湿度の変化を図24に示す。

試験の結果得られた塗膜き裂の写真の一例を図25および図26に示す。また、曲げ試験の塗膜き裂分布のスケッチを図27に、緩和試験の塗膜き裂分布のスケッチ

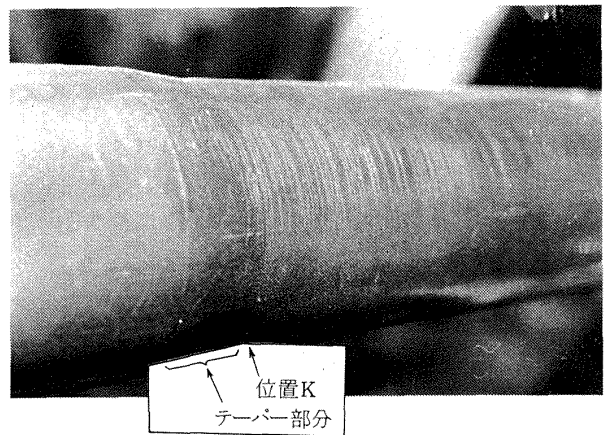


図25 供試円筒エンジン部の塗膜き裂

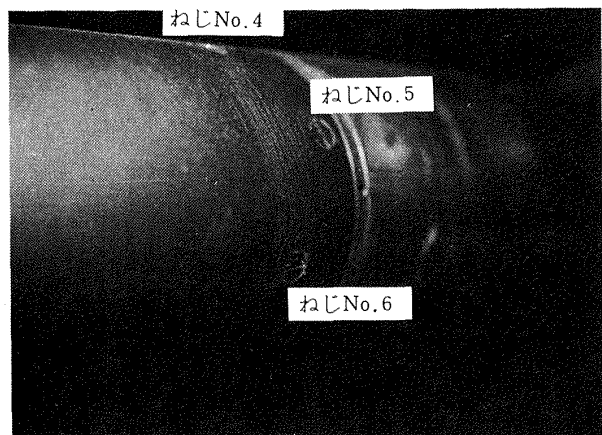


図26 供試円筒計器部の塗膜き裂

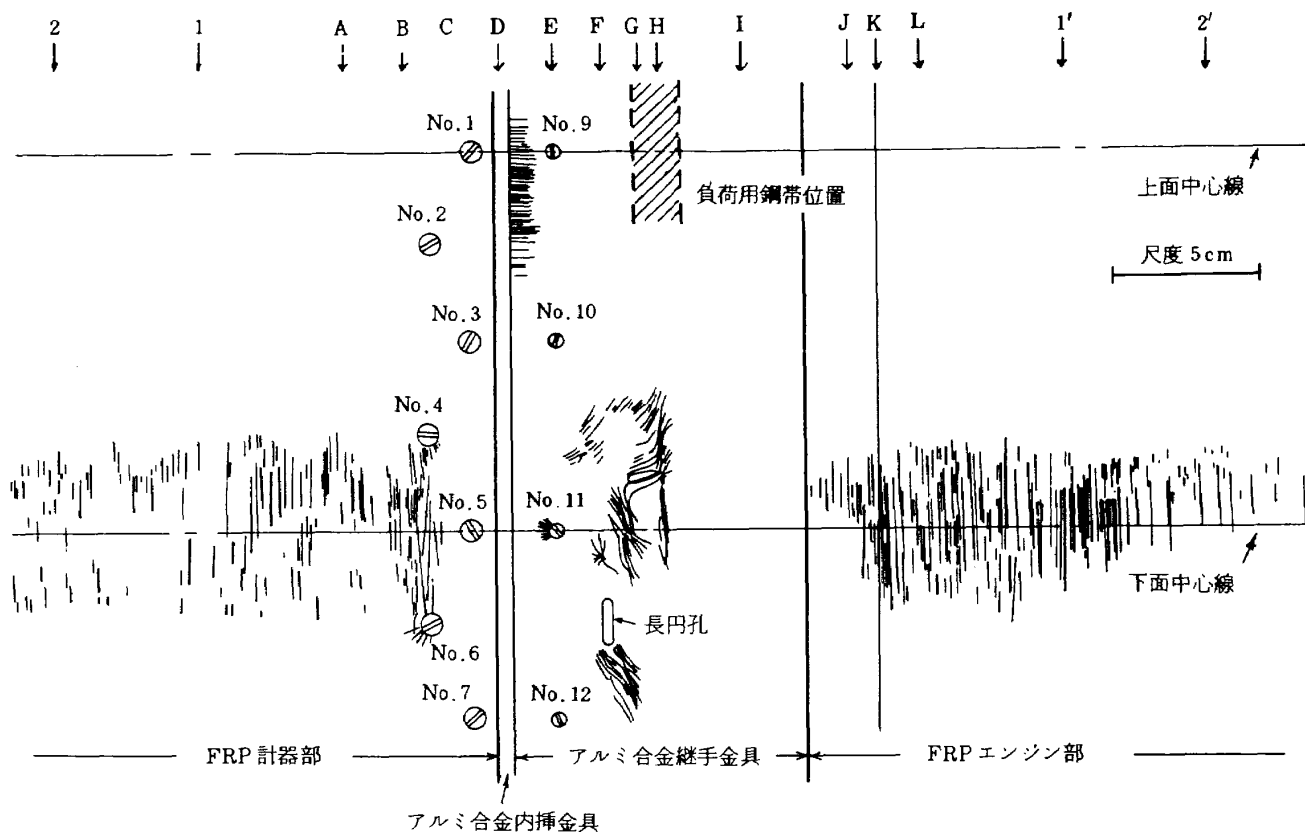


図 27 供試円筒の曲げ試験による塗膜き裂分布

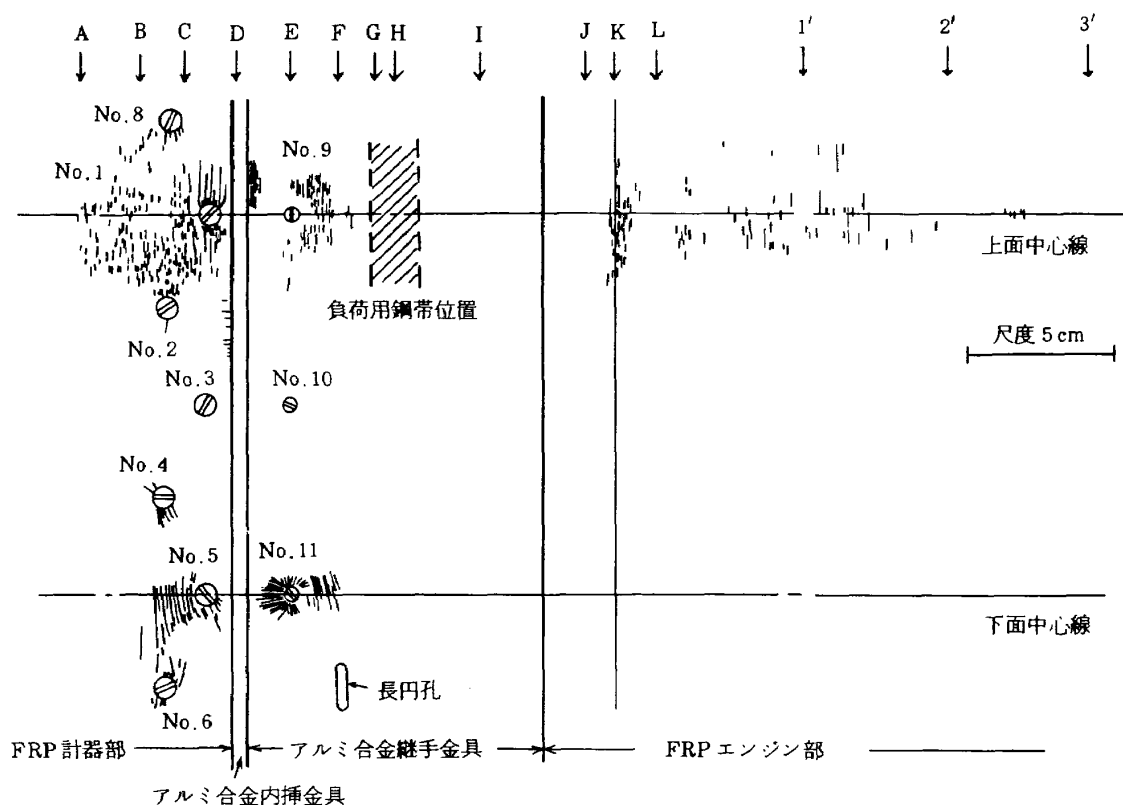


図 28 供試円筒の緩和試験による塗膜き裂分布

を図28に示す。図25は図27の位置J, K, L間の塗膜き裂の写真, 図26はねじNo.4, 5, 6間の写真である。図25ではテーパ終了部からロケット後部にかけて漸次き裂密度が密から粗に変わってゆく状態, 図26ではねじNo.4~6間の塗膜き裂の発生状態とねじNo.6まわりから放射状に発生した塗膜き裂がわかる。

実験結果のスケッチである図27および図28から, 次のことがわかる。

円筒結合部の引張側のき裂分布(図27)

1) 下面中心線上では

- (1) FRP円筒部分の塗膜き裂は曲げの引張応力に対応してその方向に直角に発生している。供試体表面のクラック発生を示すヘリカル巻層に沿う方向の塗膜き裂は発生していない。
- (2) 円筒直径の小さなFRPエンジン部の塗膜き裂密度は直径の大きなFRP計器部のそれより高い。FRPエンジン部の塗膜き裂は位置Jのテーパ部まで発生している。
- (3) FRP計器部の塗膜き裂はねじNo.4とNo.6を結ぶ線上にまで発生し, ねじNo.5の近傍には発生していない。
- (4) FRP円筒部分の塗膜き裂は荷点より遠ざかるにしたがってき裂密度が密から粗に変化している。
- (5) アルミニウム合金製継手部分では荷点直下はかなり密度の高い塗膜き裂が2箇所発生した。また, 長円孔下端より右下方に, さらに下面中心線に対して長円孔とはほぼ対称な位置に45°方向の密度の高い塗膜き裂が発生した。

(6) FRP円筒部分で塗膜のき裂密度の高い位置は,

- ① 位置BからねじNo.4とNo.6を結ぶ線上
- ② 位置Kのすぐ近傍の部分

であり, これらの塗膜き裂密度は10~13本/cmである。

2) 上面中心線上では

- (1) ねじNo.9の左方にアルミニウム合金製内挿金具の突起(D矢視)とアルミニウム合金製継手金具の片当りにより継手金具にフープ応力が発生し, それに対応する塗膜き裂が明瞭に表われた。

円筒結合部の圧縮側のき裂分布(図28)

1) 上面中心線上では

- (1) 塗膜き裂は曲げの圧縮応力に対応してその方向に直角に発生している。ヘリカル巻層に沿う方向の塗膜き裂は発生していない。
- (2) 塗膜き裂がいずれも短かく, ひずみの小さなAの左方では塗膜き裂が発生していない。

- (3) FRP円筒部分の塗膜き裂の分布状態は引張側の分布状態とほとんど同じである。ただし, ねじNo.8とNo.2を結ぶ線からねじNo.1までの間にも塗膜き裂は発生している。

- (4) ねじNo.1のまわりに, はじめ放射状に発生し, すぐに圧縮応力方向に直角になっている長い塗膜き裂が発生した。

- (5) 位置Kで密度の大きなき裂が発生した。

- (6) 継手金具上のねじNo.9の孔まわりに圧縮応力に対応するき裂が発生した。ねじのまわりに塗膜き裂が円状に抜けているのは塗装むらのためである。

- (7) ねじNo.2の右側でアルミニウム合金製内挿金具の突起(D矢視)とFRP計器部との片当りによりFRP計器部にフープ応力を生じ, それらに対応する塗膜き裂が発生した。

- (8) FRP円筒部分で塗膜き裂密度が高い位置は,

- ① ねじNo.1のまわり
- ② 位置AからねじNo.1までの範囲
- ③ 位置Kのすぐ近くの部分

である。これらの塗膜き裂密度は10~13本/cmである。

2) 下面中心線上では

- (1) ねじNo.4とNo.6を結ぶ線上からねじNo.5までの範囲に圧縮ひずみに対応する塗膜き裂が発生した。図27の引張側のひずみ分布と合せてみると, ねじNo.4とNo.6を結ぶ線をほぼ境としてひずみ分布が引張から圧縮に変化するものと推察される。

- (2) 継手金具上のねじNo.11のまわりに放射状に密な塗膜き裂が発生した。また, ねじNo.11のすぐ右側にも圧縮の塗膜き裂が発生した。

- (3) FRP円筒部分で塗膜のき裂密度の高い位置は, ねじNo.4とNo.6を結ぶ線上からねじNo.5までの範囲である。ここでの塗膜き裂密度は12本/cmである。

以上の実験結果では, 引張側, 圧縮側ともに直接FRP円筒部分の破損を示す塗膜き裂は発生していない。

また, 安全限界を示す塗膜き裂密度19~20本/cmと比較しても結合部の塗膜密度の高い部分でただか10~12本/cmであり, さらに, 特に変ったき裂分布模様は発生していない。

4.4.3 ひずみゲージによるひずみ測定

塗膜のき裂密度の高い個所に重点をおいて, ひずみゲージによる測定を実施した。応力塗料による測定で塗膜のき裂密度の高い個所は引張側も圧縮側もほとんど同じ位置にあったので, ひずみゲージによる測定は主として

引張側について行った。

負荷 20 kg ずつ段階的に増加して 100 kg まで与え、負荷点のたわみと各点のひずみを測定して定量的なひずみ分布を求め、さらに、測定値の負荷に対する直線性と履歴を求めて載荷状態を検討した。負荷点直下のダイヤルゲージで測定した変位と負荷との関係を図 29 に示す。荷重 102.35 kg (内 2.35 kg は荷重皿の重量) 時のたわみは約 4.3 mm で直線性は良好であり、戻りは 0.1 mm ほどの残りが出たがヒステリシスは小さかった。また、図 30 には負荷点直下 (ゲージ No. 75) と FRP 計器部のね

じ No. 5 の左 (ゲージ No. 61) のひずみについて示してあるが、いずれもひずみ履歴は良好と考えられる。以上から既に行なった応力塗料による実験も含めて、その載荷方法には不都合はなく、試験は支障なく行われたことがわかった。

ひずみゲージによる測定点を図 31 に示す。また、測定点のうち、下面中心線上のゲージによる曲げひずみ分布を図 32 に、ねじ No. 5 まわりの周方向のひずみ分布を図 33 に示す。

1) 下面中心線上のひずみ分布 (図 32)

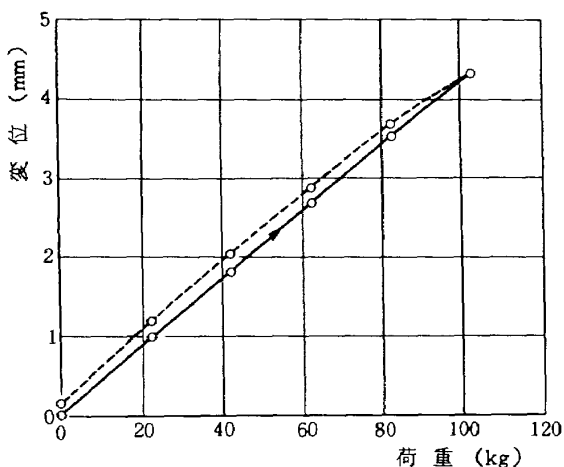


図 29 供試円筒の負荷点のたわみ履歴

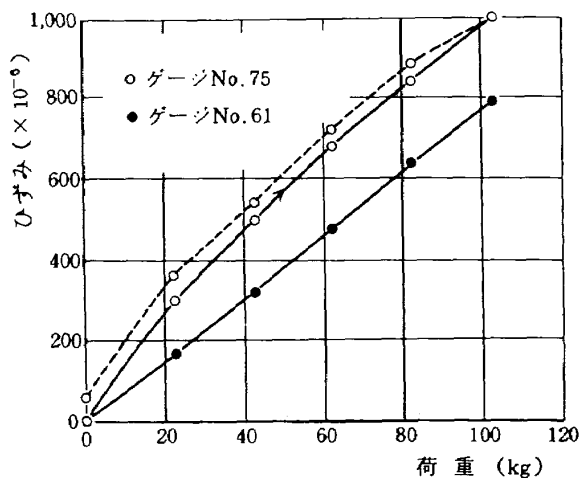


図 30 供試円筒の負荷・除荷時のひずみ履歴

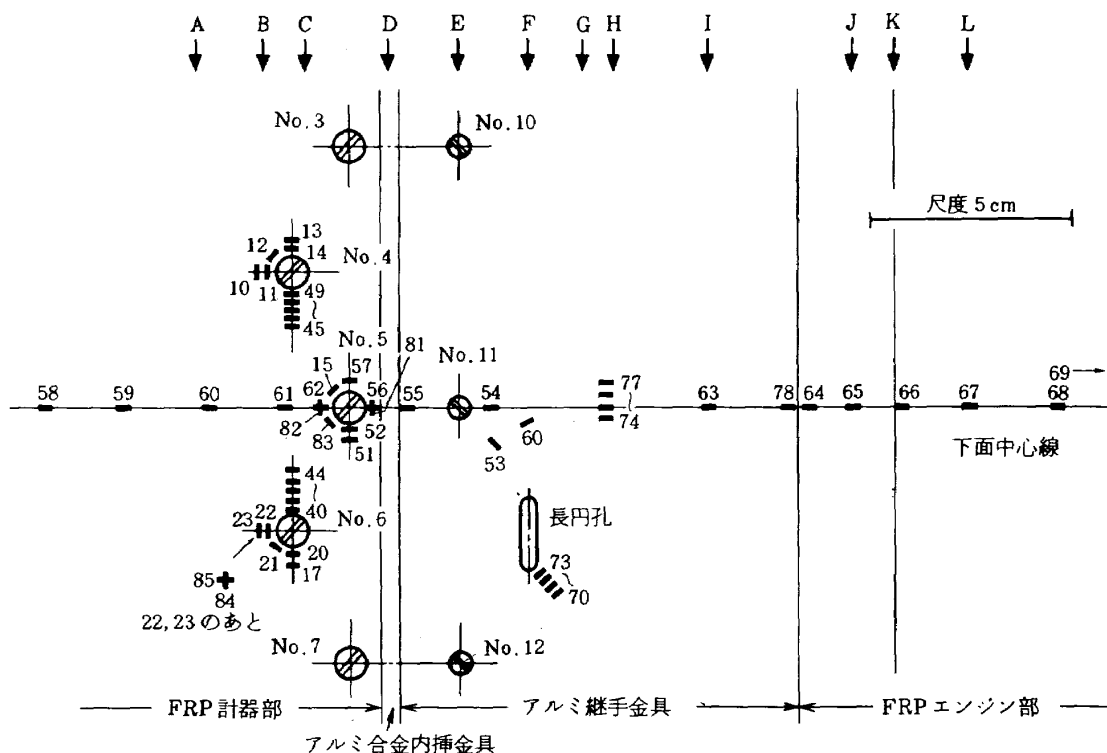


図 31 供試円筒のひずみ測定点

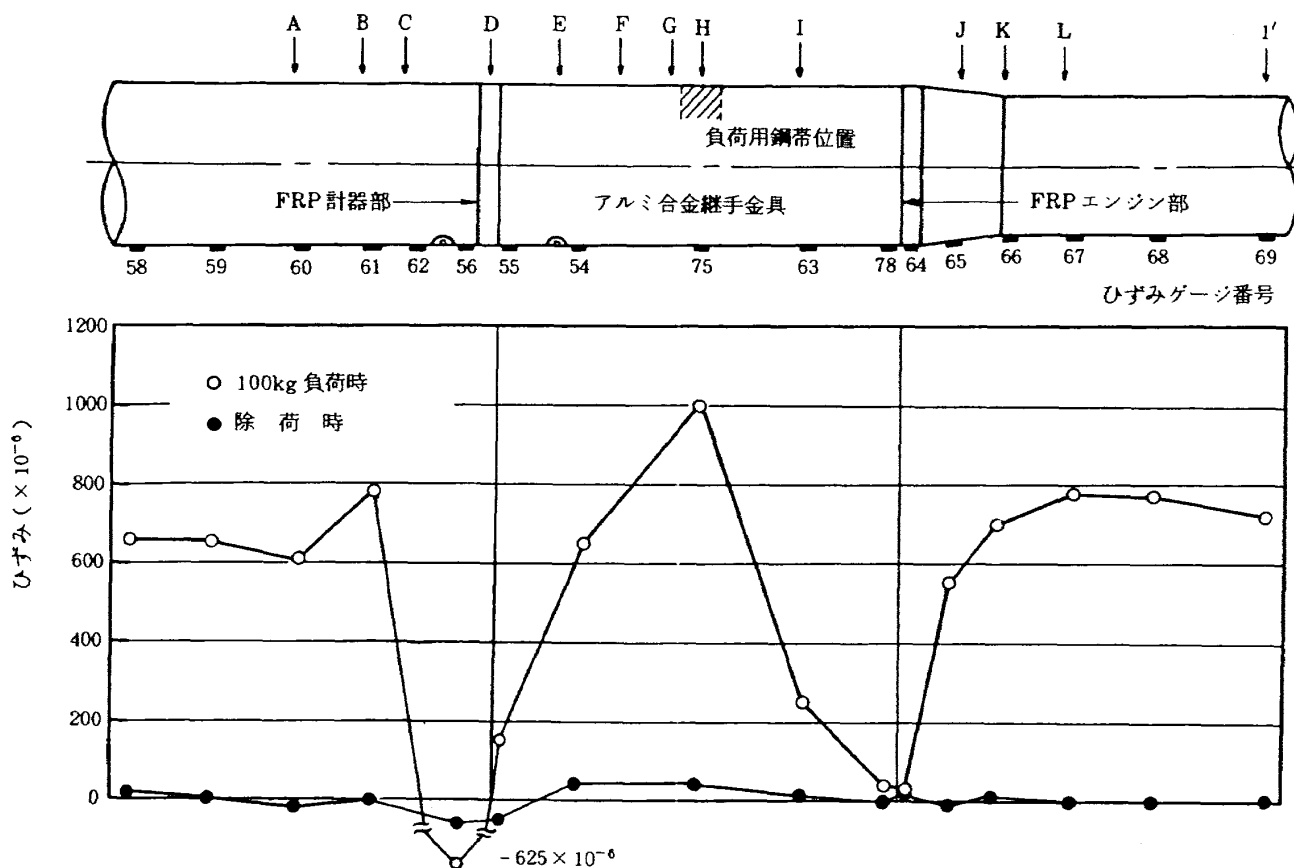


図 32 供試円筒結合部の曲げひずみ分布

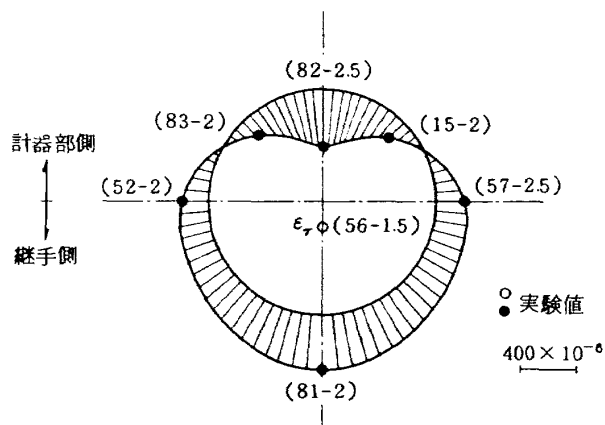


図 33 ねじ孔No.5の孔まわりのひずみ分布 (荷重 100 kg 時)

供試円筒の左手からそのひずみ分布をみると、

- ① 位置 B (ゲージ No. 61) でひずみが約 200×10^{-6} 急増してはほぼ 800×10^{-6} となっている。位置 B はアルミニウム合金製内挿金具の端部で、円筒の断面積が急変する位置である。
- ② ねじ No. 5 の孔べりで圧縮ひずみで塗膜き裂が発生した位置の測定はゲージ (ゲージ No. 62) の結線

ミスで失敗した。孔の右手 (ゲージ No. 56) では -625×10^{-6} の圧縮ひずみを生じているが、これはねじの孔べりへ片当りによるものと推定できる。

- ③ 荷重点直下 (ゲージ No. 75) で $1,000 \times 10^{-6}$ のひずみを生じている。
- ④ アルミニウム合金製継手金具と FRP エンジン部の継目の両側 (ゲージ No. 78 と 64) ではひずみはほとんど発生していない。これは継目が開口するためと思われる。FRP 計器部との継目 (ゲージ No. 55) では状況は同じと考えられるが、約 150×10^{-6} のひずみを生じている。
- ⑤ FRP エンジン部のテーパ (位置 J) は有効で、そのひずみ分布を円滑なものとしていることが実験結果からわかる。テーパ終了部 (ゲージ No. 66 と 67) で約 800×10^{-6} のひずみを生じ、塗膜のき裂分布 (図 27 参照) がゲージ (ゲージ No. 65 ~ 69) によるひずみ分布の測定結果を定性的に良く示していたことが確認できた。
- 2) ねじ孔まわりのひずみ分布
ねじ孔まわりでは、ひずみの最も大きなねじ No. 5 のまわりのひずみ (ϵ_θ) の分布を図 33 に示す。図中

の縦軸は下面中心線に一致する。かっこ内の数字はゲージ番号と孔べりからゲージ中心までの距離(mm)を示す。ゲージ側端を孔べりに合せて接着しても、ゲージ中心は約2mm離れた位置になる。4mmφの孔には直径8mmφ、深さ2.5mmの皿もみがされている。孔のテーパは半頂角38°である。テーパ孔を持つ帯板が引張りあるいは曲げを受ける場合の皿孔べりの応力集中係数は板幅100mm、板厚30mm、孔径30mm、半頂角0°~30°の場合引張りで3.2~2.3、曲げで1.9~2.7であり、半頂角が0°でない場合も孔べりから離れるにしたがって円孔の場合のように応力集中の程度が急速に1に近づくことが報告されている^{6,7)}。供試円筒は板厚3.5mmで、中立軸から板厚中心までの距離が約40mmであることから、供試体形状のちがいはあるがその負荷状態を引張りともみなしてその応力集中係数を3とし、⁸⁾さらに、半頂角0°の場合の解析結果を用いてひずみゲージによる測定値から孔べりのひずみ値を推定してもそれほど大きな誤差は生じないであろうと考えた。そこで、図33の(52-2)と(57-2.5)のゲージの位置を考えて孔べりのひずみを求めるためにその測定値を2倍すると約 400×10^{-6} のひずみとなる。一方これに直交する方向、すなわち、下面中心線上の2つの ε_{θ} (82-2.5)と(81-2)および ε_r (図中の白丸)はねじの片当りなどによって生じたものと思われるが、いずれも $500 \sim 600 \times 10^{-6}$ で特に大きな値ではない。

ねじNo.4とNo.6の孔まわりのひずみも測定したが、いずれもねじNo.5の孔まわりのひずみ値の半以下であった。

4.4.4 実験結果

応力塗料による実験結果から、本円筒結合部では断面積が急変する位置B、位置BからねじNo.5までの間および位置Kでのひずみが大きいことがわかった。しかし、その塗膜き裂密度は10~13本/cmで特に高くはない。さらに試験片の実験で明らかにされた供試体表面のクラック発生と関連のあるヘリカル巻層に沿う方向の塗膜き裂はこれらの部分を含む試験区域のどこにも発生していない。このことから、本円筒結合部は15Gの負荷荷重に対して十分な強度を持つものと判定できる。この判定を定量的に確かめるために、ひずみゲージによる測定を行なったが、FRP円筒部では孔まわりも含めてひずみは最大 800×10^{-6} 程度にとどまり、特に問題となる大きさをでないことが確認された。

5. 結 論

複合材構造物は結合部の不連続部を含み、解析でその強度を評価することは困難な場合が多い。本報告では、フィラメント・ワインディング法によるガラス繊維強化複合材円筒をアルミニウム合金製継手で結合した構造のNAL-7Pロケットについて、取り扱いが簡単で、複雑な構造物の全体的なひずみ分布や主ひずみ方向の求めやすい応力塗料を使用して実験的解析を行った。さらに、応力塗料によって求めたひずみの大きな部分の主ひずみ方向にひずみゲージを接着してひずみ値を求め、応力塗料の塗膜き裂との対応を検討するとともに、解析可能な部分について求めた解析値と応力塗料による結果とを比較した。その結果、次のことが結論された。

- (1) 解析で示された最小破損強度とその破損様相は供試体円筒の一部から製作した試験片による破損様相と一致し、ヘリカル巻層に平行な方向の塗膜き裂は試験片に発生したクラックとほぼ一致することがわかった。
- (2) 孔などの繊維の不連続部分を含む複合材構造に対して、応力塗料を用いてひずみの全面測定を行い、ひずみの大きな部分とその主ひずみ方向を求めた。ひずみの大きさは試験直前に応力塗料の感度試験片によって求め、さらに、(1)で述べた試験片の破損に対応する塗膜き裂模様が発生すれば当該部分に破損を生じたものと考えてそのき裂模様の発生も調べた。試験は応力塗料によるほかに、塗膜き裂により示された主ひずみ方向にひずみゲージを接着してひずみ値を求めた。この結果きわめて効果的に解析の困難な複合材結合部のひずみを求めることができた。

おわりに本研究を行うにあたり、応力塗料の使用法、特性など全般的にわたって御教示いただいた日本非破壊検査協会410小委員会委員長京都工芸繊維大学菅野教授ならびに有益な討論をいただいた委員各位に感謝の意を表す。

付録 応力塗料の使用方法

付図1に応力塗料の実験手順を示す。この手順中特に重要と思われる項目について説明を加える。

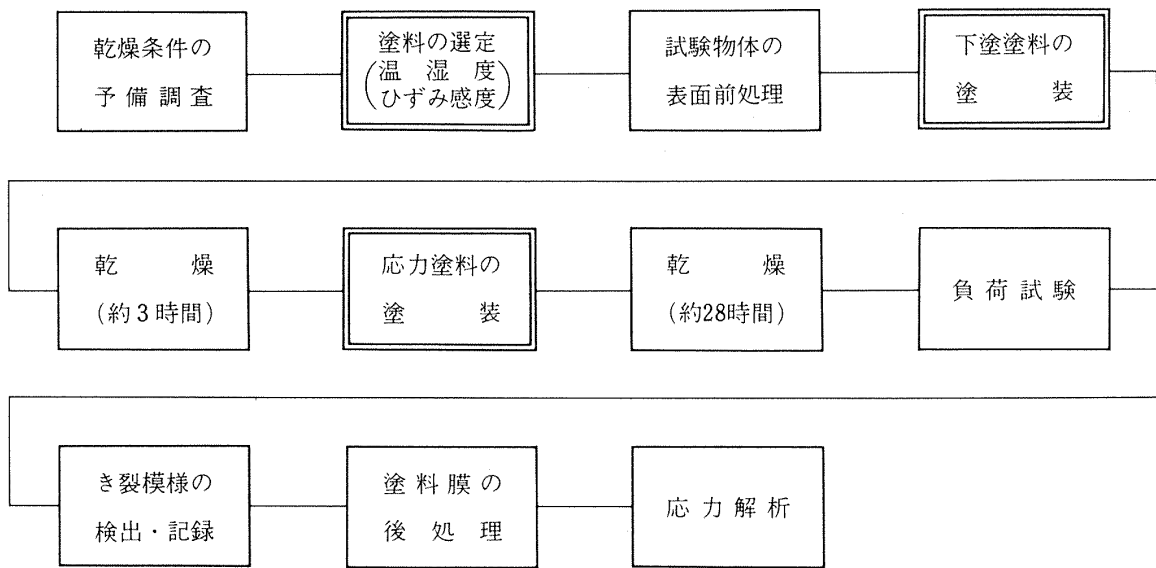
(1) 乾燥温湿条件の調査および塗料の選定

応力塗料は乾燥時および試験時の温湿度によってその感度特性が大きく異なる。したがって、温湿度によって使用する塗料を選定する必要がある。

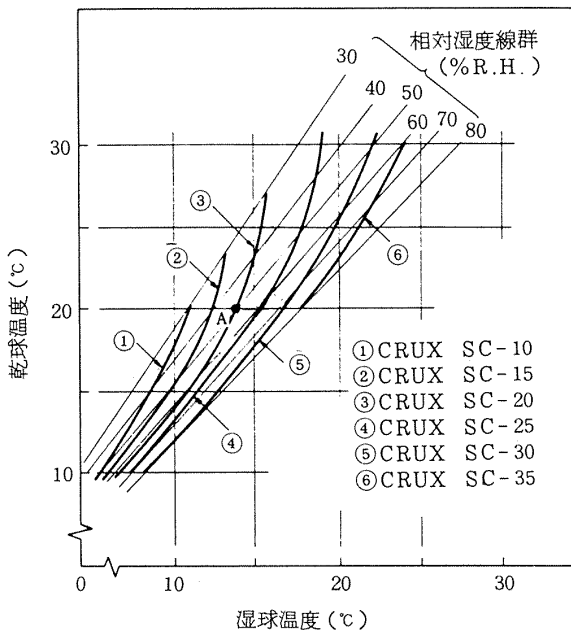
そこで、実験に先だて、実験室の温湿度を所要乾燥時間(約1昼夜)にわたって記録し、その測定

結果を参考として適正な応力塗料を選定する。付図2は応力塗料CRUX SCの選定用図⁹⁾で、縦軸には乾燥時の乾球温度を横軸には湿球温度を表わしている。例えば、温度20℃、湿度50% R.H.を下まわらない場合は縦軸の20℃と相対湿度線50% R.H.との交点Aを通る塗料番号曲線を求め、即ち、CRUX SC-20(曲線③)を選定する。付図3は使用した応力塗料を示す。

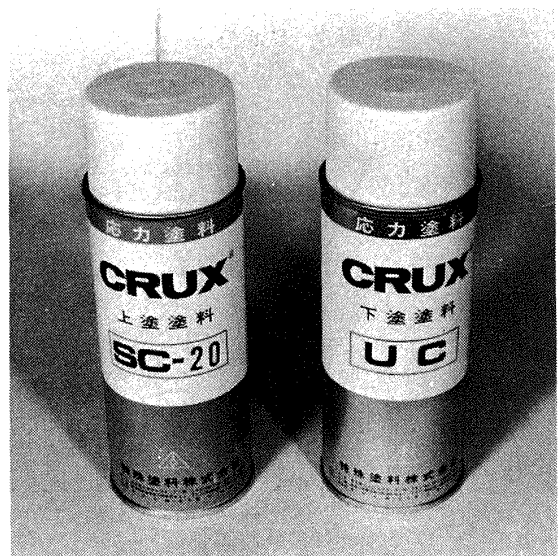
(2) 試験物体および感度検定用試験片の表面前処理
試験物体表面の凹凸が著しい時には塗料がのりに



付図1 応力塗料の実験手順



付図2 応力塗料CRUX SCの選定用図



付図3 応力塗料

くく、生じるき裂模様も乱れるので表面処理を行う必要がある。一般には、100 番程度のサンドペーパーで軽く仕上げ、トリクロロエチレンのような溶剤で十分に脱脂する。

(3) 下塗り塗料の塗装

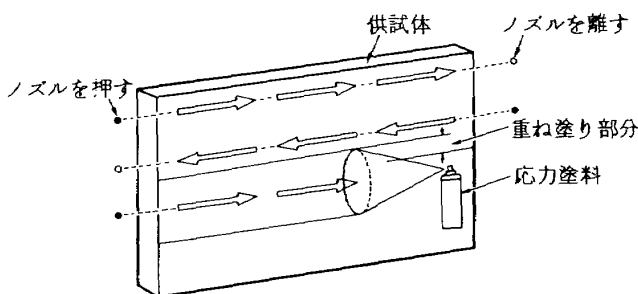
下塗り塗料は表面仕上げの状態が悪い場合に、塗膜き裂模様の乱れを防ぐ効果がある。塗装面との距離を約 30 ~ 40 cm に保ち、一定速度で塗装する。広い部分を塗装する場合は、付図 4 に示すように、塗料缶のノズルを往復させて、1/3 ~ 1/4 を塗り重ねるようにする。塗装は 1 ~ 2 分おきに、2 ~ 3 回重ね塗りし、膜厚は 0.03 mm が適当である。乾燥は 3 時間以上行う。

(4) 上塗り塗料の塗装

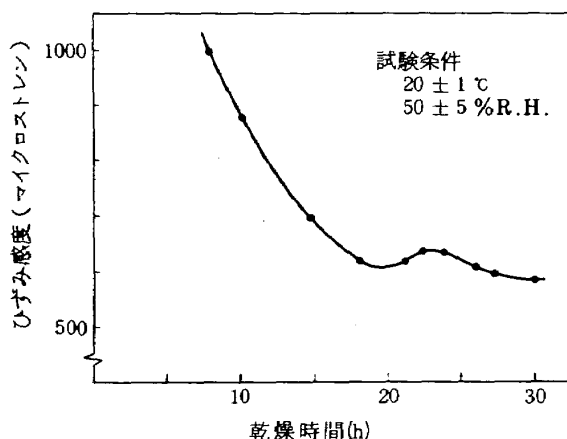
下塗り塗料が硬化した後、上塗り塗料を塗装する。上塗り塗料は塗装面との距離を約 20 ~ 30 cm に保ち、一定速度で塗装する。塗装は 1 ~ 2 分間隔で 7 ~ 8 回塗り、膜厚は 0.09 ~ 0.12 mm が標準とされている。流動しやすい形状の物体では、上記の時間間隔を更に大きくとる必要がある。

(5) 塗膜の乾燥

塗膜は室内の温湿度を規定の値にできるだけ保ち、



付図 4 塗装方法



付図 5 乾燥過程における CRUX SC-20 のひずみ感度特性

約 28 時間以上自然乾燥する。乾燥時間とひずみ感度の関係^{9),10)}を付図 5 に示す。乾燥温度が 3°C、湿度で 5 % R.H. ほど低下すれば焼割れが生じることがある。

(6) 負荷試験

(1) ひずみ感度検定

ひずみ感度とは単軸応力状態で塗料膜にき裂が生じる時の最小ひずみ値で、感度検定試験片に片持ち曲げ荷重を負荷し、発生したき裂から次式により計算する。

$$\varepsilon = 6 W l_0 / E b h^2$$

ここで、 l_0 は負荷点より最初のき裂までの距離、 W は荷重、 b は板幅、 h は板厚、 E は縦弾性係数である。

一般に市販の検定用具を用いれば感度を直読できるようになっている。

(2) 試験物体の負荷

試験物体に負荷した後、発生したき裂模様の先端をつらねた曲線は検定試験片で求めたひずみ感度の値にはほとんど一致する。

荷重を段階的に負荷する場合には、必ず一度無負荷状態にもどし、負荷時間の 3 ~ 4 倍ほどの時間が経過し、塗膜が十分緩和してから次の段階まで一気に負荷することが望ましい。

(7) き裂模様の検出と記録

塗料膜は透明であるので、斜光線をあてれば鮮明なき裂模様が観察される。光源に通常の写真電球を用いると塗膜が加熱され、き裂が閉じることがあるので、電池式の携帯ランプを使用するとよい。

(8) 塗膜の後処理

上塗り塗料を除去する場合は、物体表面に損傷を与えないように、竹べら等でこすってはく離させ、その後、トリクロロエチレンを含ませた布でふき取る。

参考文献

- 1) 竹中、ほか；NAL-7P ロケットの強度および燃焼試験結果、航技研資料、TM-122 (1967)。
- 2) 山脇、植村；ヘリカル巻き FW 円筒の破壊強度（1.引張強度）、材料、19-206 (1970)、pp. 974 ~ 980。
- 3) 植村、ほか；フィラメント・ワインディング材の剛性について、東大宇航研報告、4-3(B) (1968)、pp. 448 ~ 463。
- 4) 山脇、植村；ヘリカル巻き FW 円筒の破壊強度

- (II. ねじり強度). 材料, 21-233 (1972), pp. 330 ~ 336.
- 5) 菅野; 応力塗料膜とその応用. 非破壊検査, 25 - 5 (昭 51), pp. 252 ~ 260.
- 6) 渋谷, ほか; 面外曲げによる円錐孔を有する帯板の応力集中. 非破壊検査, 22 - 12 (昭 48), pp. 753 ~ 756.
- 7) 渋谷, ほか; 引張をうける円錐孔を有する帯板の応力集中. 非破壊検査, 24 - 2 (昭 50), pp. 53 ~ 58.
- 8) 西田; 応力集中. [森北出版], (昭 42), pp. 217 ~ 227.
- 9) 菅野; 応力塗料によるひずみ測定. 塑性と加工, 13 - 136 (1972), pp. 379 ~ 389.
- 10) 特殊塗料株式会社; 応力塗料CRUX取扱説明書.
- 11) A. M. Wootton, et al.; The Role of Brittle Lacquer Techniques in the Efficient Design of GRP Fan Blades. Strain, (1977-10), pp. 132 ~ 136.
- 12) J. W. Dally, et al.; Experimental Stress Analysis (1965), McGraw-Hill, pp. 91 ~ 139.

航空宇宙技術研究所報告 627号

昭和55年9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 2 27-12
