

フィラメント・ワインディング材の接手強度

植村益次・阿部慎蔵・井山向史

On the Joint Strength of Fiberglass Reinforced Plastics by Filament Winding

By

Masuji UEMURA, Shinzo ABE and Hisashi IYAMA

Abstract: A series of experiments are carried out to obtain the fundamental design data on the mechanical joint strengths in the fiber reinforced plastic rocket chambers manufactured by filament winding. First, the three kinds of fundamental joints, that is, bolt or rivet joint, screw joint and insert type of joint, are checked in the cylindrical specimens under tension and compression and then the small models of chambers using bolt joints are checked under internal pressure. As a result, the practical data including various influence factors on the joint strength are obtained which are useful for the design of joints to join the upper and lower stages and to assemble the cylindrical and spherical parts in a chamber. These experimental results will be applied to the design of large FRP chambers for Lambda and Mu rockets which are now being developed in our Institute.

概 要

多段ロケット構造の軽量化のために、フィラメント・ワインディング法による強化プラスチック材を用いて、ロケット・チャンバーを製作するときに重要な問題となる上下段ロケットの接合部強度、およびチャンバーの円筒・鏡板両部の接合部強度を得るために、実験的研究を行なった。まずビス接手・ねじ接手・埋め込み接手の3種の基本的接手方式について基礎的資料を求め、さらにビス接手方式による小型チャンバーの内圧試験によって実用的資料を求め、各種の影響因子について考察を行ない、現在試作中のラムダ・ミュー用大型ロケット設計のための有用な資料を得た。

は し が き

最近フィラメント・ワインディング法 (FW 法) による FRP 材が多く使用されるようになってきた。この材料は金属材料に比べて比重が小さく、比引張強度の高いことがおもな特徴である。したがってその長所を生かし、航空機、ロケットの構造部材として特に引張力の作用する圧力容器等に広く用いられている。わが国のように鏡板とシリンダー部の一体巻きの技術がいまだ確立していない現状では、このような材料を構造部材として使用する場合に、各部材間の結合という問題が生じてくるが、現在のところこの材料の結合強度に関するデータはあまり発表されていない。我々の研究所では FW 法による大型のロケットチャンバーを開発しつつあるが、その際円筒部と鏡板部、ノズル部との結合、あるいは各ステージ

の結合をいかに合理的に行なうかということは強度、剛性上重要な問題である。このような観点から、次のような3種の結合方法について基礎的試験を行なって接手強度を求め、更に試験を一步進めて FRP チャンバーの内圧負荷状態でのビス接手の強度を求め、有益な設計資料にしたいと思う。

試験項目

1. ビス接手の面圧強度
2. ねじ接手のねじ部のせん断強度
3. 埋め込み接手の引張と圧縮強度
4. チャンバーでの内圧によるビス接手の強度

1. ビス接手の面圧強度

チャンバーを一体巻きではなく、シリンダー部と鏡板を別々に製作した場合に、最も問題となるのは、両者のビス接手部における面圧強度であり、これらの基礎資料を得るために下記の試験を行なった。

1.1 試験片

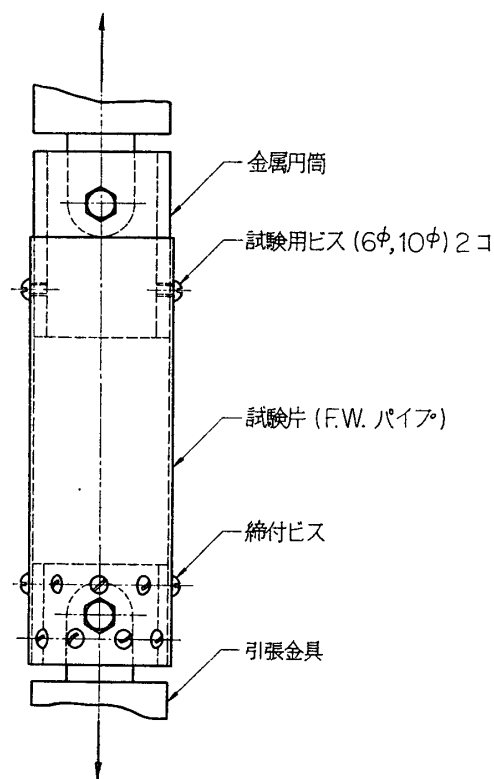
- a) 巻き角度 $\alpha=35^\circ, 55^\circ, 75^\circ$ の3種
- b) 厚さ 約 1.5 m/m, 内径 100 m/m
- c) 硝子繊維 ; 60 ends, 3層
- d) 樹脂 シェルエピコート 828
- e) 硝子繊維含有量 65% (重量)

1.2 試験方法

試験片を1.1図に示すように、FW パイプの両端に金属円筒をそう入し、下部固定側で破壊しないように、下部は6m/m ねじ16本で締付けた。上部は2本のねじを使用し、その径は6m/m と10m/mの2種とし、各径に対して孔心からの距離を $1.5d$, $2.0d$, $3.0d$ の3通りにして試験を行ない、引張による面圧破壊荷重と伸びを測定した。

1.3 試験結果

3種の巻き角度の試験片についてビスを介して引張試験を行なったが、 35° , 55° はビス孔上部における面圧破壊が見られ、 75° については真横孔縁における集中引張応力により、繊維間の引張による破壊が見られた。各試験片とも白化現象が徐々に進行して完全破壊に至るが、白化現象時にわずかながら荷重降下が見られ、完全に破壊するまでにはかなりの耐荷能力がある。したがって式(1.1)により、白化現象発生時の荷重と、完全破



1.1 図 面圧試験方法

1.1 表 孔径 6 m/m および 10 m/m の場合の面圧強度

| 孔径 d (mm) | 巻き角度 α (°) | 孔心と端縁との距離 e | 孔数 n | 最大荷重 P_m (kg) | 1孔当りの耐荷重 $P_{m0}=P_m/n$ (kg) | $d \cdot t$ (mm ²) | 面圧強度 σ_m (kg/mm ²) |
|----------------|----------------------|------------------|-----------|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| 6 | 35 | 1.5 d | 2 | 409 (275) | 205 (138) | 10.6 | 19.3 (13.0) |
| | | 2.0 d | | 538 (355) | 269 (178) | 10.9 | 24.7 (17.0) |
| | | 3.0 d | | 706 (438) | 353 (219) | 10.5 | 33.6 (20.9) |
| | 55 | 1.5 d | 2 | 442 (325) | 221 (163) | 8.90 | 24.8 (18.3) |
| | | 2.0 d | | 590 (435) | 295 (218) | 8.10 | 36.4 (26.9) |
| | | 3.0 d | | 695 (575) | 348 (288) | 9.07 | 38.4 (31.8) |
| | 75 | 1.5 d | 2 | 250 (138) | 125 (69) | 8.61 | 14.5 (8.01) |
| | | 2.0 d | | 418 (150) | 209 (75) | 9.27 | 22.5 (8.10) |
| | | 3.0 d | | 645 (184) | 323 (92) | 9.69 | 33.3 (9.49) |
| 10 | 35 | 1.5 d | 2 | 610 (457) | 305 (229) | 17.2 | 17.7 (13.3) |
| | | 2.0 d | | 885 (475) | 443 (238) | 18.0 | 24.6 (13.2) |
| | | 3.0 d | | 1240 (720) | 620 (360) | 18.2 | 34.1 (19.8) |
| | 55 | 1.5 d | 2 | 930 (600) | 465 (300) | 14.6 | 31.8 (20.5) |
| | | 2.0 d | | 1120 (713) | 560 (357) | 14.7 | 38.1 (24.3) |
| | | 3.0 d | | 1220 (875) | 610 (438) | 15.0 | 40.7 (29.2) |
| | 75 | 1.5 d | 2 | (180) | (90) | 17.4 | (5.18) |
| | | 2.0 d | | (182) | (91) | 17.2 | (5.28) |
| | | 3.0 d | | — | — | — | — |

() は白化現象発生時の値を示す。

壊までの荷重に注目し、各孔当りについてビス接触見かけ面積 ($d \cdot t$) で割った面圧強度について検討することにした。

各試験片の試験結果を孔径 6 m/m と 10 m/m の場合についてそれぞれ 1.1 表に示すが、各値は 2~4 本の平均値であり () 内は白化現象発生時の値を示す。

$$\sigma_m = \frac{P_{m0}}{d \cdot t} \quad (1.1)$$

P_{m0} ; 1孔当りの耐荷重

d ; ビスの外径

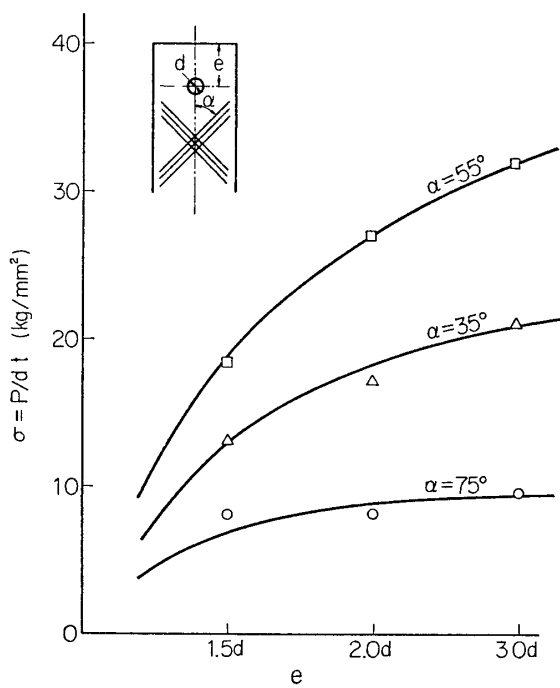
t ; 試験片肉厚

面圧強度を縦軸にとり、孔心から端縁との距離 e を横軸にとり、孔径 $d=6$ m/m と 10 m/m の場合の実験結果をそれぞれ 1.2 図、1.3 図に示す。

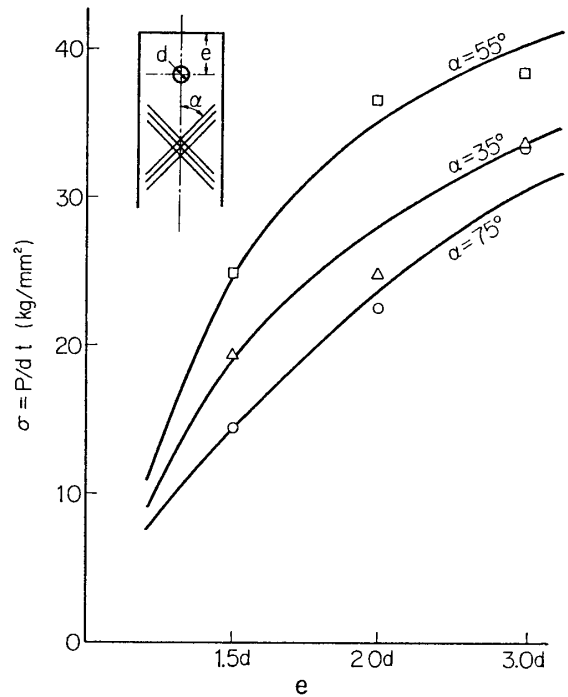
1.4 試験結果の検討

この試験では破壊様相から見て面圧強度として検討するのが妥当であり、1.2 図、1.3 図から次のようなことが考えられる。

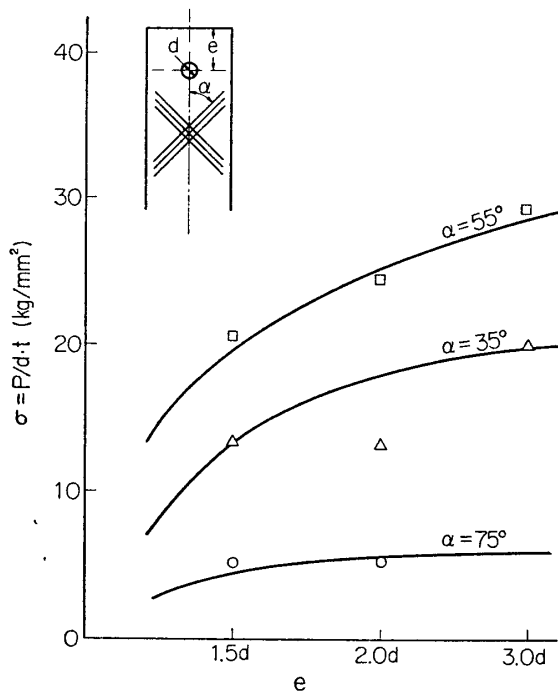
- 1) ビスによる接合方式で面圧が孔に作用する場合、引張・圧縮方向と直角の孔縁に大きな引張集中が発生すると思われる。それゆえにこの場合巻き角度 75° では硝子繊維の強度が



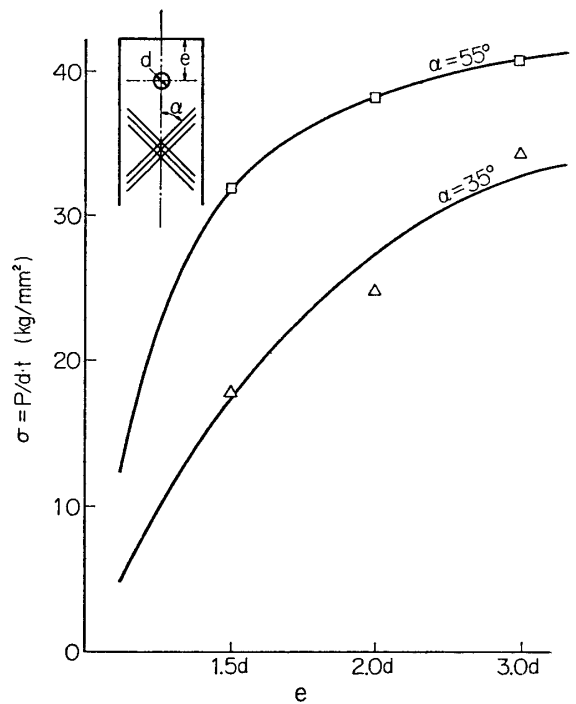
1.2 図(a) ボルト径 $d=6\phi$ (白化現象発生時応力)



1.2 図(b) ボルト径 $d=6\phi$ (破壊応力)



1.3 図(a) ボルト径 $d=10\phi$ (白化現象発生時の応力)



1.3 図(b) ボルト径 $d=10\phi$ (破壊応力)

引張力に対してあまり寄与しないので繊維間での引張破壊が容易に起る，したがってビス中心から端縁までの距離を大きくしても耐荷能力はあまり増加しない。

- 2) 各巻き角度に対し共通しているが，ビス径を 6~10 mm の範囲で変えても面圧強度の変化はあまり認められなかった。
- 3) 試験を行なった巻き角度の範囲から， $\alpha=55^\circ$ 近傍で面圧強度が最大になることがわかった。
- 4) 端縁距離 e については，金属材料では普通 $e=2\sim 3d$ で十分と見られているが，FW 材では $e=3d$ でもなお面圧強度の増加があり，実際に FW 構造材の接合設計を行なう場合，金属材料の場合と異なり孔心から端縁までの距離 e を $3\sim 4d$ 程度にとることが必要と思われる。

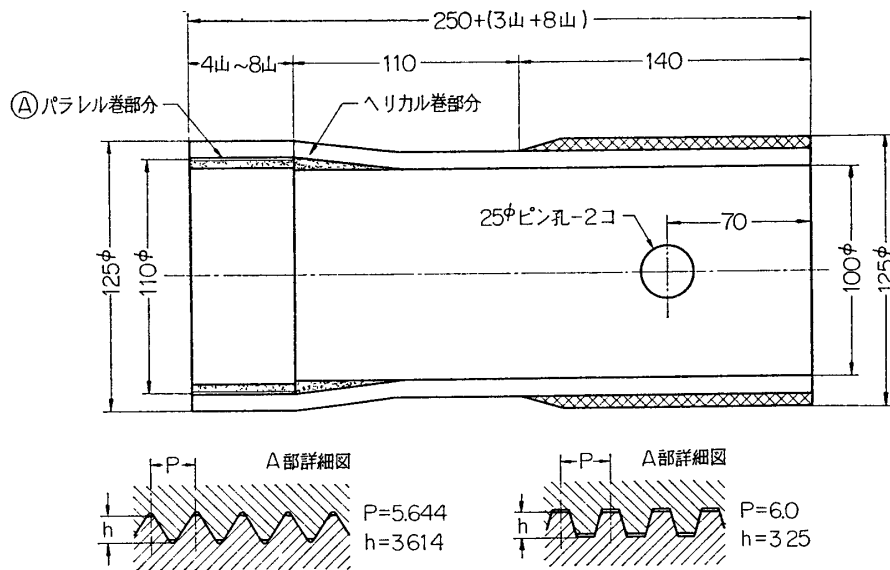
2. ねじ接手のせん断強度

チャンバーをロケット・ボディの一部として利用する場合には，上・下段ロケットとの接合が問題となる。その一つの方法としてねじ接手が考えられるので，これらについて試験を行なった。

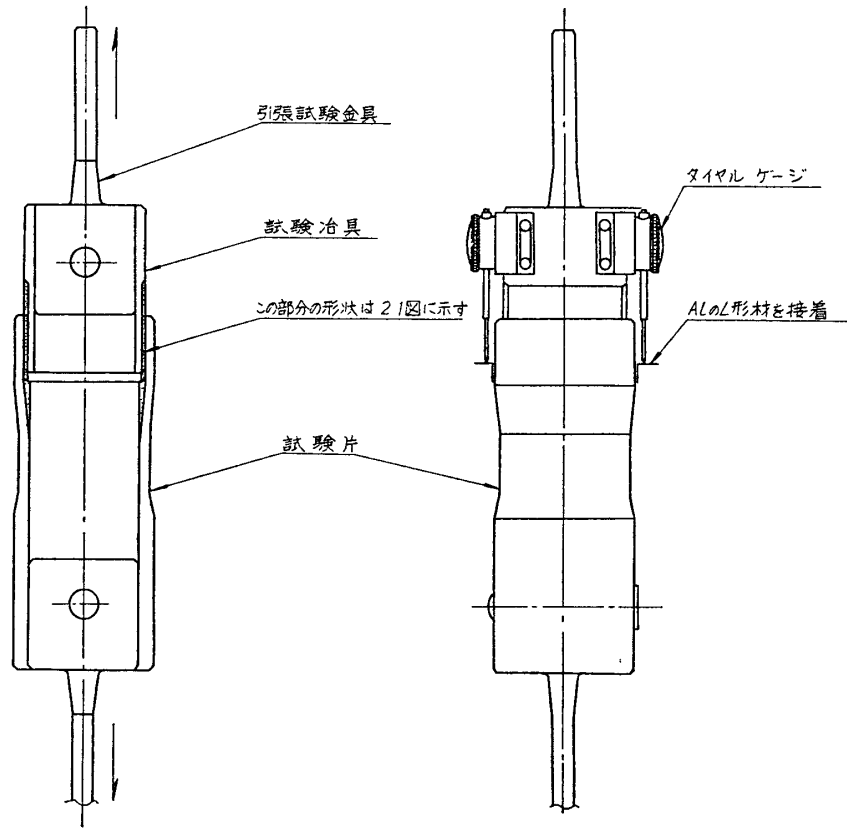
2.1 試験片

- a) ヘリカル巻きの巻き角度 30°
- b) 硝子繊維 GYR 60 ends \times 2, 5層
- c) 樹脂 シェルエピコート 828
- d) 硝子繊維含有量 65% (重量)
- e) ねじの種類

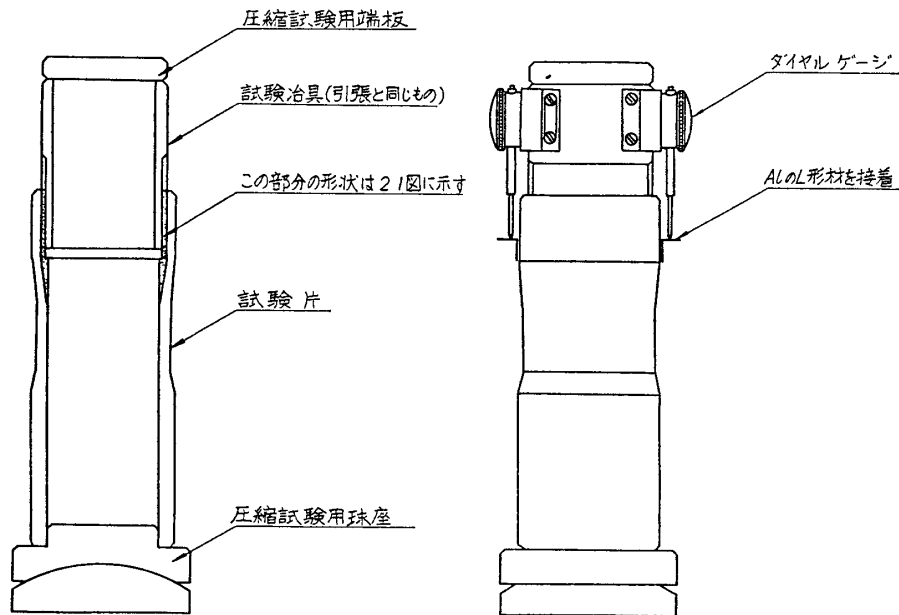
| | | |
|------------|---|-----|
| ウイトオース並目ねじ | } | 2種類 |
| 台形ねじ | | |
- f) ねじ部の長さ 各4山~8山



2.1 図 ねじ接手強度試験片



2.2 図 引張試験方法概略図



2.3 図 圧縮試験方法概略図

ワインディング法で各種の巻き角度の円筒を作ったのちに、切削法によって良好なねじを切るとは現在のところむずかしいので、本試験は2.1図に示すようにパラレル巻きでねじ部および傾斜部を成形し、その周りを上記(a)のヘリカル巻きで包んだものである。他端の厚肉部分は引張試験における孔部の面圧強度を増すためにガラスクロスを用いて補強した。

2.2 試験方法

FW法で作っためねじに、鋼製のおねじを所定の山数(3山, 5山, 7山)だけねじ込み、2.2図, 2.3図に示す方法で引張と圧縮の試験を行なった。

両試験共に弾性試験を行なったあとで破壊試験を行ない、破壊荷重と伸びを測定した。

2.3 試験結果

引張・圧縮による最大荷重を、ねじ込んだねじ底部での全面積で割り、せん断応力 τ_m について検討することにした。

各試験結果を2.1表, 2.2図に示すが各値は2~3本の試験片の平均値である。

$$\tau_m = \frac{P_m}{\pi \cdot D \cdot p \cdot n}$$

D ; ねじ底部の直径

p ; ねじのピッチ

n ; ねじの山数

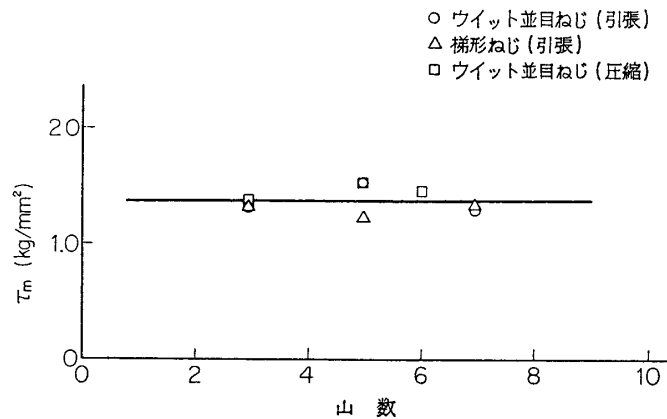
ウイトオース並目ねじでは、底部面積 $\pi D p$ を 2000 mm^2 とし、台形ねじでは、底部面積を 2150 mm^2 として計算した。

2.1 表

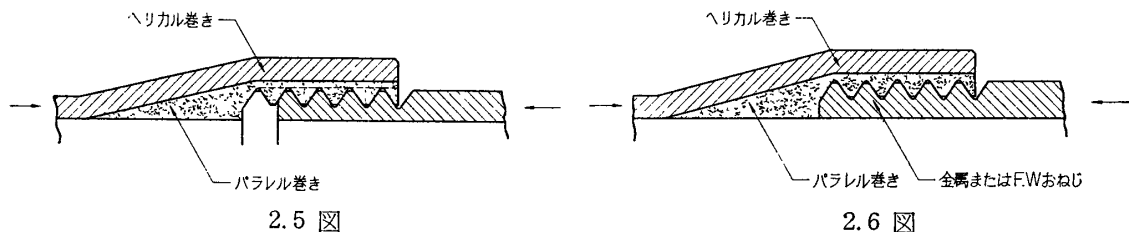
| ねじ型式 | 荷重の種類 | 試験片の山数 n | 破断荷重 P_m (kg) | 1山当りの耐荷重 P_m/n (kg) | せん断強度 τ_m (kg/mm ²) |
|--------------------|-------|---------------|--------------------|--------------------------|---|
| ウイト オース並 目ねじ | 引張 | 3 | 7950 | 2650 | 1.33 |
| | | 5 | 15100 | 3020 | 1.51 |
| | | 7 | 17500 | 2500 | 1.25 |
| | 圧縮 | 3 | 8160 | 2720 | 1.36 |
| | | 5 | 15500 | 3100 | 1.51 |
| | | 6 | 17000 | 2830 | 1.42 |
| 台形 ねじ | 引張 | 3 | 8490 | 2830 | 1.32 |
| | | 5 | 12500 | 2500 | 1.16 |
| | | 7 | 19900 | 2840 | 1.32 |

2.4 試験結果の検討

- 1) 金属の場合と異なり、FRPの場合は変位が大きくなると、ねじ部の当りが均一になりねじ込み山数に比例して耐荷能力 P_m も大きくなるので τ_m の値は2.4図に示すようにねじ込み山数に無関係に一定となる。
- 2) 引張も圧縮もねじ山底部でのせん断による破壊であるから両者の負荷形式による τ_m の差はない、しかしながら、圧縮の場合にはねじ部の破壊を無視すれば、ねじ端面でのつき



2.4 図 ねじ接手強さと山数との関係



2.5 図

2.6 図

当りがあり耐荷能力は大きくなり、したがって τ_m の値も大きくなる。

- 3) 多くの試験片の破壊様相はパラレル巻き部とヘリカル巻き部の両繊維の層間剥離によるもので、特にねじ底部では応力集中などで複雑な応力状態になるので両層の境界を2.5図破線に示すようにねじ底部に作らぬことが望ましい。

また、層間のすべりを防ぐ意味でチョップドストランドを用いるのもよい。

- 4) 圧縮の場合設計に際し図2.6に示すように、おねじをめねじの端部につき当てることにより耐荷能力を増すように工夫するとよい。
- 5) ねじの型式の影響を検討すると、ねじ底部でのせん断によって破壊がきまるので、 τ_m としては大きな差はない。

3. 埋め込み接手の引張強度と圧縮強度

チャンバーをロケット・ボディとして用いる場合、上下段ロケットとの接合方法の一つとして埋め込み接手が考えられるので、これらについて試験を行なった。

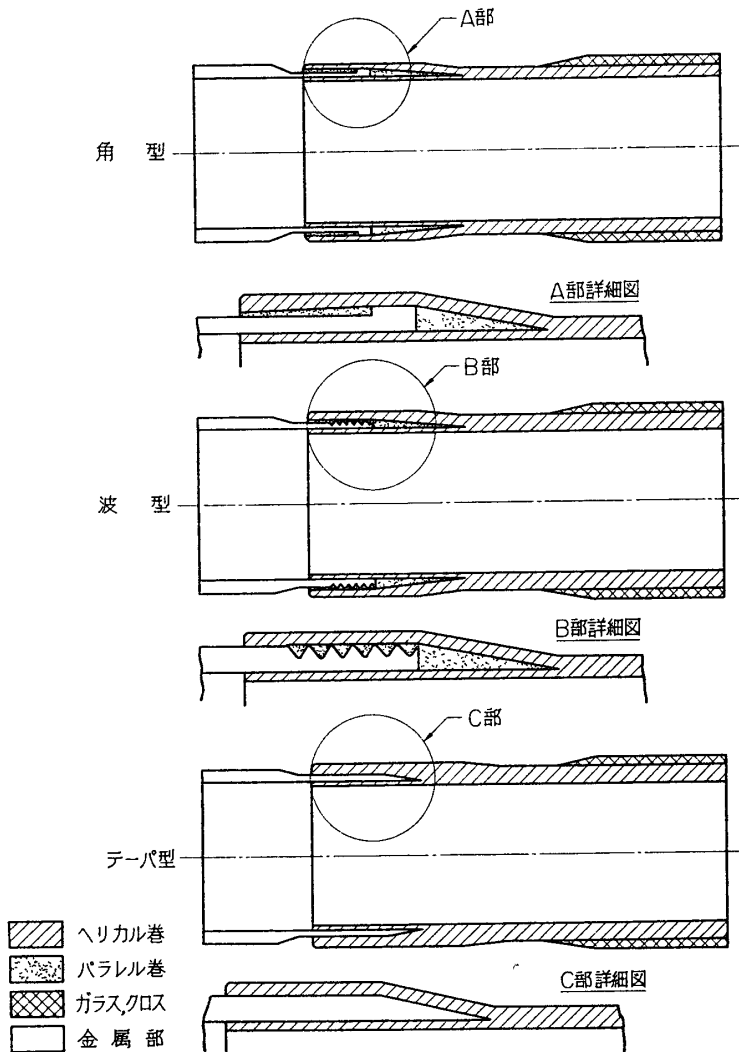
3.1 試験片

- ヘリカル巻きの巻き角度 30°
- 硝子繊維 GYR-60 ends×2, 5層
- 樹脂 シェルエピコート 828
- ガラス繊維含有量 65% (重量)
- 試験片形状 角型, 波型, テーパー型の3種類

3.1 図に示すように上記3種の形状をした鋼製円筒を、FW法のパイプに巻き込んだ試験片である。製作に当っては、まず内層となるFW部を作り、そのほかに鋼製円筒をおき、次

3.1 表

| 試験片形状 | 試験種目 | 最大荷重 P_m (kg) | そう入部の長さ l (mm) | τ_m (kg/mm ²) |
|-------|------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 角型 | 引張 | 8060 | 13 | 0.86 |
| | " | 19200 | 23 | 1.02 |
| 波型 | 引張 | 2620 | 30 | 0.12 |
| | " | 22400 | 40 | 0.83 |
| | 圧縮 | 1950 (24800) | 30 | 0.0895 |
| | " | 30000 で破壊せず | 30 | — |
| テープ型 | 引張 | 6000 | 70 | 0.12 |
| | " | 19700 | 50 | 0.504 |
| | 圧縮 | 22200 (30000 で破壊せず) | 55 | 0.555 |
| | " | 25000 (29800) | 55 | 0.625 |



3.1 図 埋め込み接手試験片

に図に示すように、角型では段部、波型では凹部および傾斜部を平行巻きで埋め込み、その周りをヘリカル巻きで包んだものである。

3.2 試験方法

試験方法は前記ねじ接手の場合と全く同様で、巻き込んだ鋼製円筒に直接取付けたダイヤルゲージで変位を測定し、また鋼製円筒と FW パイプのそう入部の長さを変えて引張と圧縮の両試験を行なった。

なお、両試験共ねじ接手の場合と同様に弾性試験を行なった後で破壊試験を行なった。

3.3 試験結果

3.1 図に示すように3種類の形状の埋め込み金具のある試験片について、そう入部の長さ l をいろいろ変えて、引張と圧縮の試験を行なった。破壊は接着部においてせん断によって起っているので、せん断応力 τ_m と考えた。 τ_m の値を 3.1 表に示すが、その計算は一応の目安として鋼製円筒の内面と外面を考慮してそう入部の面積を2倍にし、次の式によるものである。

$$\tau_m = \frac{P_m}{2\pi \cdot D \cdot l}$$

D ; 平行巻き部の直径

l ; そう入部の長さ

なお、圧縮試験での P_m は、負荷途中で層間剝離により荷重降下が見られたときの値を示し、() 内の値は圧縮で完全に破壊したときの値を示す。

3.4 試験結果の検討

- 1) 引張試験と圧縮試験の値に相当のバラツキがあるが、金属と FRP の接着に際しては、時々低い値があるので注意しなければならない。その原因として次ぎのようなことが考えられる。
 - i) 鋼製円筒で特に内側の表面処理の不良による樹脂の接着不良。
 - ii) 平行巻きとヘリカル巻きの両行程の時間的なズレによって最初の樹脂が乾燥状態になり、そのために両層間の接着が不良になった。
- 2) 圧縮の場合には、鋼製円筒と樹脂間の剝離による荷重降下を無視して、更に荷重を上げれば 25~30 ton 程度まで耐荷能力がある。
- 3) 圧縮に際しては、接着不良によるずれがあっても、最大耐荷重は大きくなるのであまり問題にならないが、引張りに際してはそのまま引き抜けることがあるので注意しなければならない。
- 4) 埋め込み型式としては、突起部のある角型が最も信頼できると思われる。テーパ型では接着に、波型では平行巻きとヘリカル巻き部の接着に注意する必要がある。

4. 内圧によるビス接手の強度

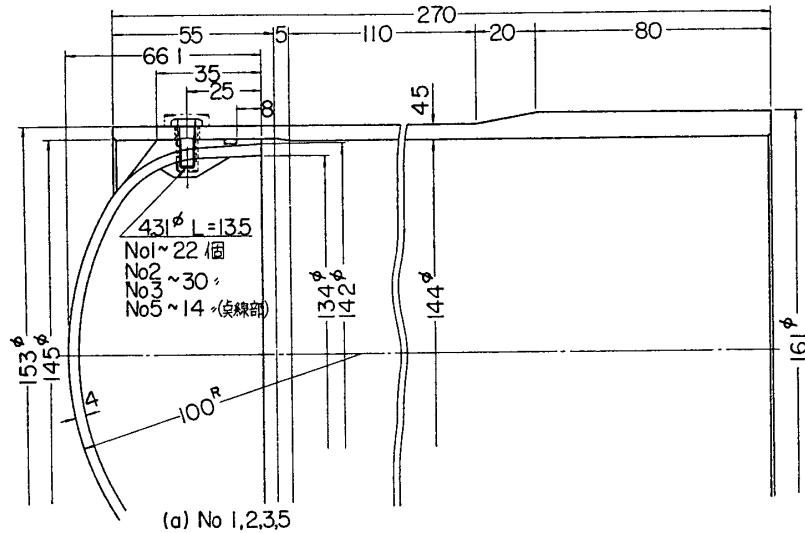
以上1~3章まで各種の接手方式について基礎的な実験的研究を行なった。一方我々の研究所では、FW法によるラムダ3段用の大型のロケットチャンバーを開発中であり、一体巻き工法が試作研究の段階にあるので、とりあえず円筒部と鏡板部のビス結合による方式がとられた。そのため実際のチャンバーを作り、小型試験片で内圧試験を行なってビス接手部の

強度を検討した。

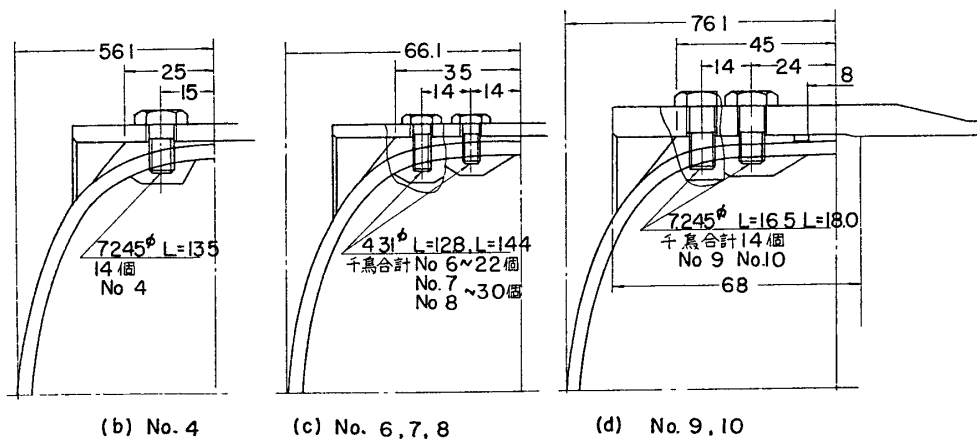
4.1 試験片の設計と寸法

- 円筒部の内径 144 mm (プライマー塗布後)
- 円筒部の肉厚 4.5 mm
- 円筒部の長さ 270 mm
- 鏡板部の半径 100 mm
- 樹脂 エポキシ樹脂エポン 828 (円筒部の一部は耐熱ポリエステル)
- 硝子繊維 硝子クロスとロービング (主としてボラン処理)

上記試験片は (4.1) 表に示すように、ビス径、ビスの本数、ビスの配列、円筒・鏡板間接合部長さ、チャンバー接手部厚さおよび接合部接着剤の有無により 10 種類に分けてある。また各試験片の寸法、特に接手部寸法を 4.1 図に示し、FRP 積層構成を 4.2 図に示す。4.2 図における EC は、硝子繊維クロス MIL-143 のエポキシ樹脂による FRP 層であり、ER

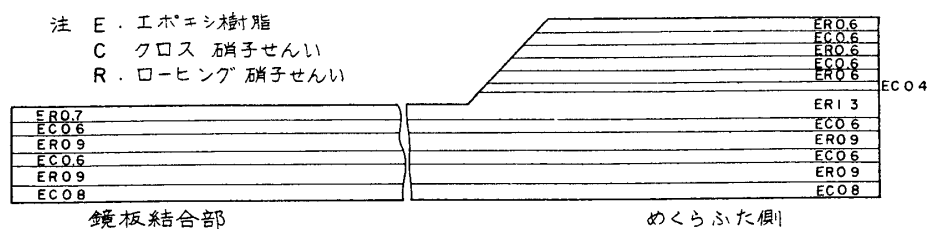


4.1 図(a) 内圧試験片寸法

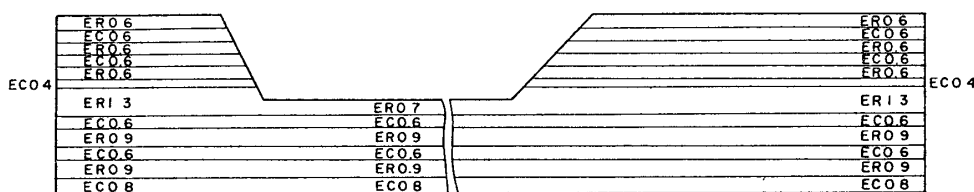


4.1 図(b) 内圧試片寸法

No 1~8 試験片



No 9, 10 試験片



4.2 図 円筒部 FRP 積層構成図

4.1 表 試験片の種類

| 試片番号 | 接 合 ビ ス | | | 円 筒・鏡 板 間接着剤有無 | 鏡板接合部 長さ (mm) | 円筒接手部 厚さ t_c (mm) | 円筒部の樹脂 |
|------|--------------|----------|-----|-------------------|------------------|------------------------|----------|
| | 径 d_u (mm) | 数 n | 列 数 | | | | |
| 1 | 4.31 | 22 | 1 | | 35 | 4 | 耐熱ポリエステル |
| 2 | " | 30 | 1 | 有 | " | " | " |
| 3 | " | 30 | 1 | | " | " | " |
| 4 | 7.245 | 14 | 1 | 有 | 25 | " | エポキシ |
| 5 | " | 14 | 1 | | 35 | " | " |
| 6 | 4.31 | 11 11 | 2 | | " | " | 耐熱ポリエステル |
| 7 | " | 15 15 | 2 | 有 | " | " | エポキシ |
| 8 | " | 15 15 | 2 | | " | " | " |
| 9 | 7.245 | 7 7 | 2 | 有 | 45 | 8 | " |
| 10 | " | 7 7 | 2 | | " | 8 | " |

は硝子繊維ロービングのエポキシ樹脂によるフィラメントワインディング層であり、厚さを mm 単位で示している。

試験片の設計製作に際しては、接手部の強さの検討が実験の主目的であるので、円筒部では内圧によって破壊しないように配慮した。円筒平行部ではクロス FRP 層 (EC) 2.0 mm, ロービング FW 層 (ER) 2.5 mm の配分になっている。従来の経験から破壊軸応力 15 kg/mm² (破壊周応力 30 kg/mm²) として、 $t=4.0$ mm の燃焼室であれば内圧 166 kg/cm² まで強度を保持し得るので、これを基にして接手部の破壊圧力を 120 kg/cm² になるように接手部を設計することにした。まためくらふた側の接手部で破壊しないように、めくらふた側のシリ

ンダー肉厚を 8.5 mm に厚くし、2列ビス止めにした。

接合ねじの径、数、列数、円筒部の接手部厚さ、鏡板接合部の長さを種々変え、また円筒部と鏡板部間の接着剤の有無など種々条件を変え、下記の項目について検討できるようにした。

- | | |
|-------------|-----------------|
| 1. 円筒部の面圧強度 | 5. 接着強度 |
| 2. ビスのせん断強度 | 6. 円筒部ビス穴間の引張強度 |
| 3. 鏡板の面圧強度 | 7. 鏡板ビス穴間の引張強度 |
| 4. 鏡板の強度 | |

4.2 試験方法

前述の試験片に鏡板と反対側にめくらふたを施し試験容器に立てた状態で入れ油圧ポンプを用いて負荷した。

圧力油はチャンバー接手部からの油の漏洩を防止するために粘度の高いもの（昭和石油製ゲルコオイル # 2140）を用いた。

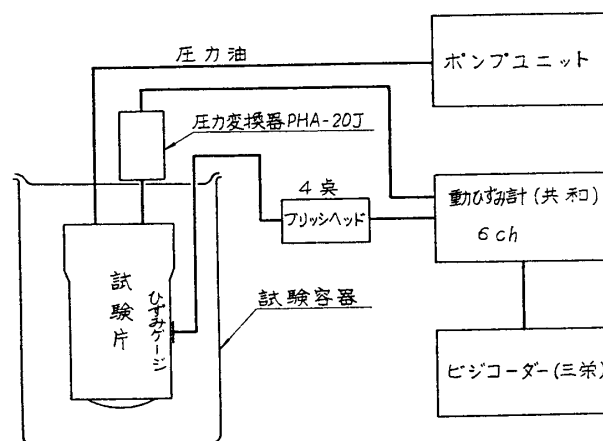
測定項目

1. ストレンゲージによる円筒中央部のひずみ測定
2. 最大圧力（破壊圧力）

ストレンゲージの貼付位置はシリンダー頂部より 105 mm の円筒部で 180° 対称位置に2軸ゲージ（共和電業製 KP-20-B2）を2か所相對して貼付した。

破壊圧力は試験片底部に取り付けた圧力変換器（PHA-20J）とポンプユニットに装備された、ペンデュラム式荷重計の二つによって確認した。

なお、試験システムを 4.3 図に示す。



4.3 図 内圧試験負荷・計測系統図

4.3 試験結果とその検討

1) 円筒部のひずみ

破壊圧力 p_r と圧力・ひずみ比 p/ϵ (ϵ : ひずみゲージによるひずみ値) の値を 4.2 表に示すが、 p/ϵ は内圧～ひずみ曲線の直線部の勾配から求めたもので、ひずみ測定を行なっ

4.2 表

| 試片番号 | 破壊圧力 p_r (kg/cm ²) | $\frac{p}{\varepsilon_x}$ (kg/cm ²) | $\frac{p}{\varepsilon_y}$ (kg/cm ²) |
|------|-------------------------------------|---|---|
| 1 | 88.9 | 3.648×10^4 | 2.130×10^4 |
| 2 | 135.0 | 4.125×10^4 | 2.506×10^4 |
| 3 | 139.0 | 3.882×10^4 | 2.740×10^4 |
| 4 | 90.7 | 3.740×10^4 | 2.340×10^4 |
| 5 | 96.0 | 3.648×10^4 | 2.031×10^4 |
| 6 | 129.3 | 4.041×10^4 | 2.560×10^4 |
| 7 | 133.0 | 3.466×10^4 | 2.116×10^4 |
| 8 | 148.3 | 3.558×10^4 | 2.050×10^4 |
| 9 | 120.8 | 4.488×10^4 | 2.671×10^4 |
| 10 | 143.0 | 4.432×10^4 | 2.671×10^4 |
| | | 3.903×10^4 | 2.382×10^4 |

No. 1, 2, 3, 6 円筒部の樹脂が耐熱性ポリエステルであるが、他のエポキシ樹脂のものと比較し、剛性値に大差はない。

た点の平均値を示す。(ε_x: 軸ひずみ, ε_y: 周ひずみ)

2) 破壊様相の分類

破壊様相としては、次の3種類に分類されるようで、4.3表に示す。すなわち

- Ⓐ 円筒部でのビス接合部が面圧で破壊し、ビス孔が繋がって破壊したもの……No. 2, 3, 6, 8
- Ⓑ 鏡板ビス接合部が面圧で破壊し、そこからクラックが進行したり、鏡板ビス孔が繋がって破壊したもの……No. 4, 5, 7, 10
- Ⓒ No. 1, 9 は鏡板繊維をシラン処理したためか鏡板の色が白色じみており、他のものは青味がかっており、製作条件の相異によると思われるが強度が弱く鏡板が破壊したもの……No. 1, 9

3) 各部の強度

接合部の複雑な応力分布を解析することはむずかしいので問題となる次のような各部の平均応力を破壊時について破壊圧力に基づき、いろいろ計算した結果を4.3表に示している。

① 円筒平行部応力

$$\text{周(軸)応力 } \sigma_t(\sigma_z) = \frac{pr}{t_c} \left(\frac{pr}{2t_c} \right)$$

$$\text{円筒半径 } r = 72.5 \text{ mm, 円筒厚さ } t_c = 4 \text{ mm}$$

② 鏡板応力

$$\sigma_m = \frac{pR}{2t_m}$$

$$\text{鏡板曲率半径 } R = 100 \text{ mm, 鏡板厚さ } t_m = 4 \text{ mm}$$

③ ビスのせん断応力

$$\tau_v = \frac{\pi r^2 p}{\frac{\pi}{4} d_v^2 \cdot n}$$

ビスの数; n , ビス有効径; $d_v=4.31$ mm と 7.245 mm

④ 円筒部面圧応力

$$\sigma_{BC} = \frac{\pi r^2 p}{n \times t_c \times d_m}$$

ビス外径; $d_m=4.79$ mm と 7.9 mm, $t_c=4$ mm

⑤ 鏡板部面圧応力

$$\sigma_{BS} = \frac{\pi r^2 p}{n \times l \times d_v}$$

l ; 鏡板部でのビス接合長さ = 7 mm

l として鏡板厚 = 4 mm をとったものは 4.3 表で () で示す。

⑥ 円筒部ビス孔間の引張応力

$$\sigma_{mc} = \frac{\pi r^2 p}{(2\pi r - n d_m) t}$$

⑦ 鏡板部ビス孔間の引張応力

$$\sigma_{ms} = \frac{\pi r^2 p}{(2\pi r - n d_m) l} \quad (l = t_m = 4 \text{ mm})$$

4) 各部の強度の検討

これらの諸応力と破壊様相を対比して種々検討を加える。

- ① 周応力の最大値は 23.7 kg/mm² であり, 設計で予想した 30 kg/mm² 以下なので, 円筒部で破壊したことはなかった。
- ② ビスのせん断応力の最大値は 82.3 kg/mm² であるが, 材質は NAS・STD (Ni-Cr-M₀ 鋼) である。設計では 78 kg/mm² を予想したが, せん断破壊したものはなく, かなり耐荷したようである。
- ③ 鏡板応力は, 同一の鏡板寸法であるため p_r に比例した応力であるが, 鏡板が破壊した No. 1, 9 は鏡板の色が白色じみており, シラン処理をしたものらしく製作条件が異なり, かえって材質が弱かったためと思われる。 σ_m は球型部の応力であるが, 破壊はすべて接合部に近く, 固定モーメントが作用し, しかもビス孔のある近くの高応力部で起っている。
- ④ 数多くの破壊様相④を示したものは, ビス孔面圧で破壊が発生し, ビス列でつながってクラックが進行しており, No. 2, 3, 6, 8 では σ_{BC} がいずれも高く, 第1章のビス接手強度結果と一致し, 35 kg/mm² くらいが面圧強さの限度と思われる。2列ある時には鏡板から円筒部への応力流を考えると理解されるように円筒部に近い方の列で破壊している。
- ⑤ 鏡板のビス孔で破壊したものはビス径 7.245 mm のものが多く, ビス剛性の大きいときには, 鏡板ビス孔の方が苛酷になるとと思われる。面圧長さとして鏡板厚 ($l=4$ mm) のみをとると, 値が大き過ぎ, 円筒部と鏡板との間の接合層も幾分寄与するようであるが, 鏡板から円筒部への応力流を考えると, 全厚さ $l=7$ mm は寄与していない様である。2列あるときには, 鏡板側の列で破壊している。

- ⑥ ビス孔間の引張強さは面圧強さと全く無関係のものとは思われず、孔部面圧縮破壊に次いで孔間に引張破壊が伝わるものと思われる。孔間平均引張にして約 15 kg/mm^2 でビス孔をつなげる破壊が発生している。
- ⑦ 接着剤の影響について見ると、その影響はないばかりか、むしろ円筒部と鏡板部を、接着剤でなく、単にビス結合したものの方が面圧強度が強い。
- ⑧ ビス列1列と2列を比較すると、ビス孔間隔を大きくした2列の方がやはり耐圧強度は大きい。
- 5) 設計に対する指針
- ① ビス数が多いときには、円筒部のビス面圧強さやビス孔間の引張強さが問題となり、ビス数が少なく径の大きいときには、鏡板部のビス面圧部のビス面圧強さやビス孔間の引張強さが問題となる。
- ② ビス結合部においては、円筒部から鏡板部への応力流に注目すれば了解されるが、円筒部ビス部では円筒中央に近い方、鏡板ビス部では鏡板に近い方に注意する必要がある。
- ③ ビス結合部には固定モーメントが発生し、更にビス孔による応力集中や面圧効果で強度が問題となるので、円筒中央部より多小厚肉にすることが望ましい。
- ④ 円筒部と鏡板部の結合面が十分ならば、接着剤を入れる必要はない。

4.3 表

| 試片 番号 | 破壊圧力 p_r (kg/cm^2) | シリンダー 周(軸)応力 $\sigma_t(\sigma_z)$ (kg/mm^2) | 鏡板応力 σ_m (kg/mm^2) | ビスせん 断 応 力 τ_v (kg/mm^2) | 円筒部面 圧 応 力 σ_{BC} (kg/mm^2) | 鏡板面圧 応 力 σ_{Bm} (kg/mm^2) | 円筒部ビス 孔間引張 応力 σ_{mc} (kg/mm^2) | 鏡板ビス孔 間引張応力 σ_{ms} (kg/mm^2) | 破壊 様相 |
|----------|---------------------------------------|---|--|---|--|--|---|---|----------|
| 1 | 88.9 | 14.2 (7.10) | 11.1 | 56.8 | 34.4 | 21.9 (38.3) | 10.1 | 10.4 | C |
| 2 | 135.0 | 21.6 (10.8) | 16.9 | 63.2 | 38.3 | 26.2 (42.5) | 17.3 | 18.0 | A |
| 3 | 139.0 | 22.2 (11.1) | 17.4 | 65.0 | 39.4 | 25.0 (43.8) | 17.8 | 18.6 | A |
| 4 | 90.7 | 14.5 (7.25) | 11.3 | 30.6 | 33.5 | 20.8 (36.5) | 10.5 | 11.1 | B |
| 5 | 96.0 | 15.3 (7.65) | 12.0 | 32.2 | 35.3 | 22.0 (38.4) | 11.1 | 11.7 | B |
| 6 | 129.3 | 20.7 (10.4) | 16.1 | 82.3 | 49.8 | 31.7 (55.5) | 13.1 | 15.3 | A |
| 7 | 133.0 | 21.2 (10.6) | 16.6 | 62.1 | 37.6 | 23.9 (41.8) | 14.2 | 17.7 | B |
| 8 | 148.3 | 23.7 (11.9) | 18.6 | 69.3 | 41.9 | 26.6 (46.7) | 15.7 | 19.7 | A |
| 9 | 120.8 | 19.3 (9.65) | 15.1 | 40.3 | 22.1 | 27.5 (48.0) | 7.0 | 14.4 | C |
| 10 | 143.0 | 22.9 (11.5) | 17.9 | 47.9 | 26.3 | 32.6 (57.2) | 8.3 | 17.2 | B |

⑤ ビス孔間の干渉を避けるためになるべく、2列千鳥形式にした方がよい。

以上小型チャンバーの内圧試験によって、複雑な接合部の応力分布のもとでの基礎的な設計資料が得られ、各部の応力について臨界値が得られたので、これに基づき大型の 500m/m 径のラムダ 3 段用のロケットチャンバーの設計を行なった。

む す び

以上、FW 法による強化プラスチック材でチャンバーを製作し更にロケットに用いる場合について各種の接合方式について基礎的な実験を行ない、大型ロケットチャンバーの設計に対する有益な指針を得た。

まず初めに引張試験を行なって検討した 3 種の接合方式については、それぞれ一長一短があるが、埋め込み方式は信頼性に乏しく、ビス接合あるいはねじ接合が望ましいように思われた。次に耐圧チャンバーとしてビス接合によるものについて内圧試験を行ない、ビス本数、ビス径、列数、接着など各種の影響を検討し、有益な設計資料が得られた。これらに基づいて目下大型の FW ロケットチャンバーを開発中である。

最後にフィラメント・ワインディング接合試験片の製作にご尽力下さった日東紡強化プラスチック研究所と内圧試験体の製作にご尽力下さった名古屋航空機製作所の関係の方々に謝意を表す。

1967 年 12 月 6 日 航空力学部