

CFRP製立体トラスの開発（その1）

—CFRPの力学特性—

米 丸 啓 介
(技術研究所)
藤 崎 忠 志
(技術研究所)
杉 崎 健 一
(技術開発センター)
中 辻 照 幸
(技術研究所)

§1. はじめに

新しい建築構造材料の出現が新しい空間を実現すると言われる。数百年前に出現した鉄筋コンクリートや鉄骨が新しい空間を提供してきたのは周知の通りである。筆者らは、21世紀の新しい構造空間を実現するために、新しい構造材の開発および用途開発を続けている。

現時点で、それ程高価でなくしかも大量に入手でき、鉄鋼材料と性能においても遜色の無い材料としては、繊維強化複合材料(FRP)が挙げられる。筆者らはこのFRPに的を絞り、建築構造材料として利用するための研究・開発を行っている。その一つの成果としては、コンクリート補強用格子状FRP筋「ネフマック」の商品化があげられる。

今回の開発では、「ネフマック」のようにコンクリートと複合させて用いるのではなく、FRP単独で構造材として用いることを試みた。言わば、「ネフマック」のような「鉄筋の代替」という使い方から、「鉄骨の代替」というような使い方へのチャレンジである。

FRPの「鉄骨の代替」としての利用方法として、一般的なH形断面材や箱形断面材を用いたラーメン構造への利用、形材を用いた平面トラス構造への利用、パイプ材を用いた立体トラス構造への利用等が考えられる。これらの利用法のうち、今回は次のような理由から立体トラス構造への利用を試みた。すなわち、●鉄鋼よりコストの高いFRPは、デザイン性の高い立体トラスのような付加価値の高い部位への利用が重要であること ●プールなどの屋根構造に適する立体トラス材には耐腐食性の高い材料のニーズが高いこと ●立体トラスは外力を軸力のみで負担するというように力学的にシンプルであること ●立体トラスはシステム化しやすく大量生産に向いていること ●立体トラスは小さなスパンから

大スパンまで適用できること、などが理由として挙げられる。

立体トラスの開発に関して、力学的な観点からは、「ネフマック」の場合は引張力のみを考慮すればよかったが、立体トラスの場合は圧縮力も考慮しなければならない。また、継手の問題として、「ネフマック」の場合は重ね継手が使えたが、立体トラスの場合はFRPを直接接合しなければならないという問題がある。さらに、防災の観点からは、「ネフマック」と違いコンクリートの被覆が無いので、防火性能や耐熱性能について十分な検討をしなければならない。

なお、FRPを構成する繊維には、ガラス繊維、アラミド繊維など何種類か考えられるが、今回の開発では固定荷重による変形を押えるために剛性の高い炭素繊維を用いることにした。

本論文では、炭素繊維強化複合材料(CFRP)の力学特性に着目して行った種々の実験結果について報告する。

§2. 立体トラス部材の構成

立体トラス部材の構成は、図-1に示すように、CFRP製のパイプとアルミニウム合金製のハブおよび

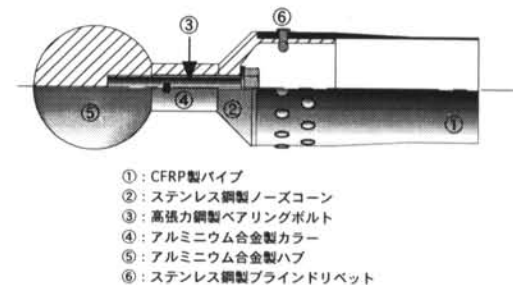


図-1 CFRP製トラス部材

びそれらを繋ぐステンレス鋼製のノーズコーン、高張力鋼製のベアリングボルト、アルミニウム合金製のカラーの構成要素からなる。CFRP製パイプとステンレス鋼製ノーズコーンはステンレス鋼製のブラインドリベットで接合する。この部分を本論文では「継手」と称し、ハブとベアリングボルトの接合部分を「接合部」と称することにする。

なお、ハブ、ベアリングボルト、カラーの部分は既存のシステムを採用することとし、本開発からは除外するものとする。

§ 3. CFRP製パイプの構成

CFRP製パイプは、炭素繊維(T700S、表-1参照)にフェノール樹脂を含浸させながら円筒状の心金に巻付け、炉で硬化させるというフィラメントワインディング法(FW法)で成形した。炭素繊維の配向は、心金の軸心に対し、軸方向は約3度、周方向は約85度で巻付け、その量は軸方向：周方向=3：1の割合となっている。炭素繊維とフェノール樹脂との体積比率は6：4、すなわち炭素繊維の体積含有率は60%である。

なお、マトリックスとしてフェノール樹脂を選定したのは、通常用いられるエポキシ樹脂の防火性能が「難燃」であるのに対し、フェノール樹脂は「準不燃」であることによる。

実験に供したCFRP製パイプは表-2に示すように、全部で4種類用意した。

引張弾性率 : E_f	23,500 kgf/cm ²
引張強度 : σ_{ft}	500 kgf/cm ²
引張破断伸度 : ε_{ft}	2 %

表-1 炭素繊維の力学的特性

記号	P-74×2	P-94×2	P-109×2	P-113×4
外径	74mm	94mm	109mm	113mm
内径	70mm	90mm	105mm	
肉厚	2mm			4mm
断面積	452mm ²	578mm ²	672mm ²	1370mm ²
繊維	炭素繊維 (T700S)			
樹脂	フェノール樹脂			
成形法	フィラメントワインディング (FW) 法			
積層構成	軸方向 (3°) : 周方向 (85°) = 3 : 1			
繊維含有率	60% (体積比)			

表-2 実験に供したCFRP製パイプ

§ 4. CFRPの材料強さ

CFRP製パイプの力学的特性を調べるに先立ち、切り出し試験片による材料強度試験を行った。

試験項目は、端部をピンとした立体トラスの構造体の一次応力が軸力のみであること、ブラインドリベットを介して応力を伝える「継手」のあることを考慮して、引張試験、圧縮試験、支圧試験の3種類とした。試験方法は、それぞれJIS K 7073, JIS K 7076, JIS K 7080(炭素繊維強化プラスチックの試験方法)に準じて行った。各試験片の形状および試験方法の概要を図-2に示す。

各試験片は、P-94×2(外径94mm, 肉厚2mm)およびP-109×2(外径109mm, 肉厚2mm)からそれぞれ5本ずつ切り出して試験に供した。ただし、支圧試験片には、軸方向と周方向のみの繊維配向では十分な支圧強さが得られないことが予想されたので、炭素繊維による巻付け補強を行った。補強は、フェノール樹脂を含浸した炭素繊維を45度方向に母材の

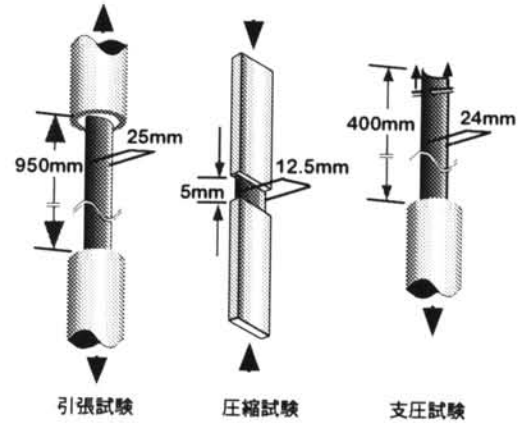


図-2 材料強度試験概要

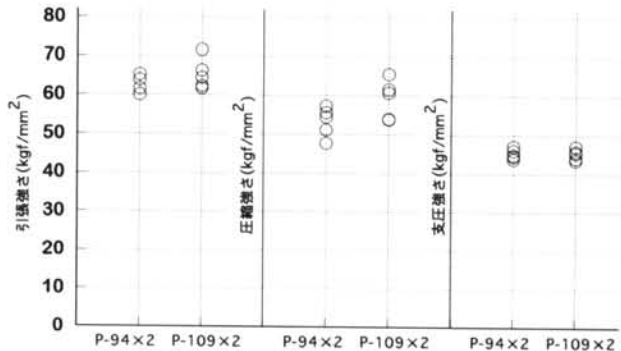


図-3 材料強度試験結果 (強度)

パイプの肉厚と同じ厚さだけ巻きたすことによって行った。

各試験の結果を図-3、図-4に示す。なお、支圧強さは(1)式によって求めた。

$$\sigma_c = \frac{P}{d \cdot t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

σ_c : 支圧強さ(kgf/mm²)
 P : 荷重 (kgf)
 d : 孔径(mm)
 t : 板厚(mm)

図-3から、各種試験結果はパイプ径の違いによる差は認められず、平均引張強さは64.3kgf/mm²、平均圧縮強さは56.3kgf/mm²、平均支圧強さは45.3kgf/mm²であることがわかる。また、図-4から、平均引張弾性係数は9,300kgf/mm²、平均圧縮弾性係数は10,700kgf/mm²であることがわかる。

§5. CFRP製パイプの強さ

5.1 CFRP製パイプの引張強さ

5.1.1 試験体

図-5にCFRP製パイプの引張試験体を示す。実験に供したCFRP製パイプはP-94×2(外径94mm、肉厚2mm)で、長さは900mmである。長さ900mmのうち試験区間は中央部の長さ330mmの区間である。CFRP製パイプを直接試験機のチャックで掴むことは困難であるため、鋼製(SS400)の引張試験用治具を静的膨張材による摩擦継手を介してその両端に取り付けた。試験区間外(上下端)のCFRP製パイプは膨張材の膨張圧に耐えるよう周方向の補強巻き2mm厚を施した。試験体数は3体(No.1~3)である。

5.1.2 実験方法

実験には6MN万能試験機を用い、試験体両端に

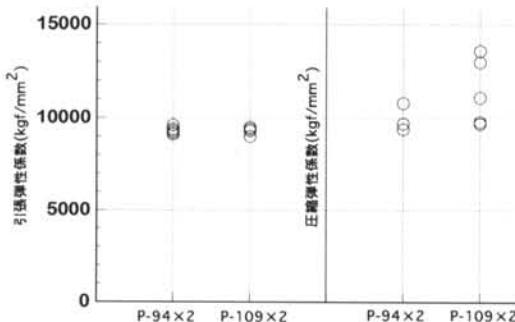


図-4 材料強度試験結果(弾性係数)

取り付けた治具を加力装置のチャックで掴み、4サイクルの繰り返し漸増引張载荷を行った。計測項目は荷重、および試験区間中央部のひずみである。

5.1.3 実験結果および考察

表-3に実験結果を示す。最大荷重は、3体ともCFRPの材料強さから推定した軸力の2~3倍程度であった。最終破壊状況は、No.1試験体が加力用治具の継手部分の抜けだし、No.2試験体が試験区間中央部の破断、No.3試験体が加力用治具の降伏であった。図-6に軸力を断面積で除して求めた応力度と、試験体中央部に90°おきに4枚貼った二方向ひずみゲージによる平均ひずみの関係を示す。試験体による大きな差はなく、軸方向のひずみは終始

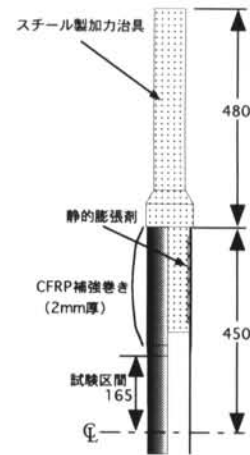


図-5 CFRP製パイプの引張試験体

試験体	最大荷重 σ_{Tmax} tf	最大引張応力度 σ_t kgf/mm ²	備考
No.1	86.6	150	引張加力用治具抜けだし
No.2	89.1	154	試験区間中央部破断
No.3	103.8	180	引張加力用治具降伏

表-3 CFRP製パイプ引張実験結果

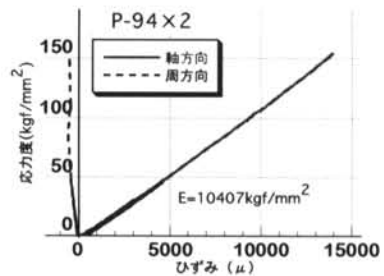


図-6 CFRP製パイプ引張実験における応力度とひずみの関係

弾性挙動、周方向のひずみについては応力度-ひずみ関係に若干の凹の傾向が見られた。この関係より得られた3体の試験体の軸方向弾性係数の平均値は11,750kgf/mm²、標準偏差は527kgf/mm²であった。

所期の目的通りCFRP製パイプの引張強さが測定できたのはNo. 2 試験体だけであり、No. 1, No. 3 試験体に関しては、CFRP製パイプの引張強さが材料強さから予想していた値よりも大幅に高い値を示したため、治具部の破壊が先行した。しかし、No. 1, No. 3 試験体の最大荷重は、試験区間中央部で破断したNo. 2 試験体の最大荷重と近い値を示しているため、No. 1, No. 3 試験体も引張強さ近くまで加力できたものと考えられる。

このように、CFRP製パイプからの切り出し試験片による材料強さがCFRP製パイプそのものの引張強さより小さいのは、CFRP製パイプの軸方向の炭素繊維は3度傾いており、切り出し試験片では図-7に示すようにチャック間で繊維が繋がっていないためと推察される。したがって、実際のCFRP製パイプの引張強さはCFRP製パイプそのものの引張試験の結果の方が正しい値を示しているものと考えられる。このことは、(2)式から推定したCFRPの引張強さと良く一致することからも伺える。

$$\sigma_t = \alpha \cdot V_f \cdot \sigma_s \quad \dots \dots \dots (2)$$

σ_t : FRPの引張強さ(kgf/mm²)
 α : 有効率(=0.7)
 V_f : 軸方向繊維含有率
 σ_s : 炭素繊維の引張強さ(kgf/mm²)

表-1, 表-2より

$$\sigma_t = 0.7 \times 0.45 \times 500 = 158 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

5.2 CFRP製パイプの圧縮強さ

5.2.1 試験体

試験体の種類は、表-4に示すように、P-109×2 (外径109mm, 肉厚2mm), P-94×2 (外径94mm, 肉厚2mm), P-113×4 (外径113mm, 肉厚4mm)の3種類とし、座屈長さ(l_b)をパラメータとして4~5種類の長さの試験体を各2体ずつ計28体用意した。

5.2.2 実験方法

試験体の加力には6MN万能試験機を用い、繰返し漸増圧縮荷重により破壊に至らしめた。実験は、図-8に示すように試験体の両端部に取り付けた金型を球座で支持し、球座の曲率中心間距離が座屈長さとなるように計画した。試験体の長さをほぼ4等分する位置および上下端の円周に各4枚(中央部は



図-7 切り出し試験片の軸方向繊維の様子(概念図)

CFRPパイプ	P-109×2	P-94×2	P-113×4
パイプ長(mm)	試験体記号		
2000 ($l_b=2136$)	A1 $\lambda=56.5$	B1 $\lambda=65.7$	C1 $\lambda=55.3$
1600 ($l_b=1736$)	A2 $\lambda=45.9$	B2 $\lambda=53.4$	C2 $\lambda=45.0$
1200 ($l_b=1336$)	A3 $\lambda=35.3$	B3 $\lambda=41.1$	C3 $\lambda=34.6$
800 ($l_b=936$)	A4 $\lambda=24.8$	B4 $\lambda=28.8$	C4 $\lambda=24.2$
400 ($l_b=536$)	A5 $\lambda=14.2$	B5 $\lambda=16.5$	-

l_b : 座屈長さ, λ : 細長比

表-4 CFRP製パイプ圧縮実験の試験体の種類

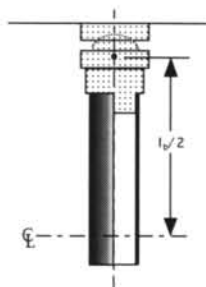


図-8 CFRP製パイプの圧縮試験体

8枚), 計24枚の2方向ひずみゲージを貼り表面のひずみを計測した。

5.2.3 実験結果および考察

図-9に破壊箇所が一番近いひずみ計測断面での荷重とひずみの関係の例を示す。圧縮破壊形式は、全断面圧縮破壊、局部座屈破壊およびオイラー座屈破壊の3形式に分類できる。全面圧縮破壊は荷重-ひずみ関係の初期の傾きを保った状態で破壊に至っているのに対し、局部座屈、オイラー座屈では破壊の前にひずみ値の急激な増あるいは減が認められる。局部座屈の場合は増と減が入り乱れるが、オイラー

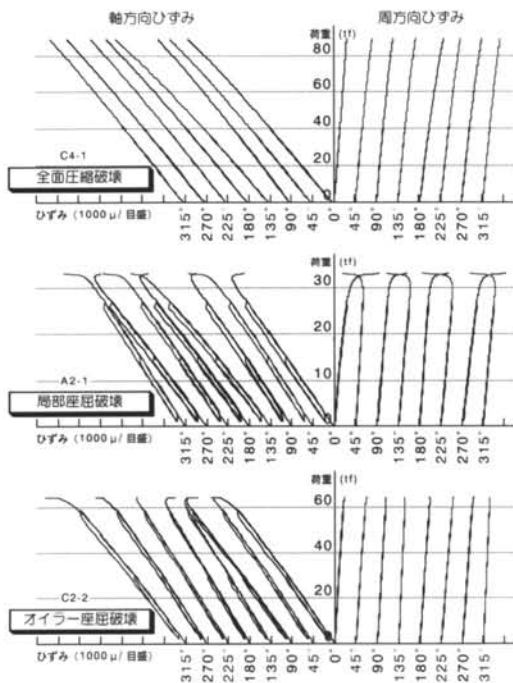


図-9 CFRP製パイプの圧縮実験における荷重とひずみの関係

座屈でははらみ出しにより増と減が半面ずつに分かれている。実験における破壊形式は、破壊直前のCFRP製パイプ表面のひずみの分布状態および実験時の試験体の挙動の観察により判定した。図-10～図-12に破壊応力の計算値と実験値の比較を示す。図中に実線で示した計算値は、(3)式に示す各破壊応力の計算式から求めたものである。オイラー座屈領域にもかかわらず、一部の試験体で全面圧縮破壊あるいは局部座屈破壊しているものが見られた。また、オイラー座屈破壊に関しては全体的に実験結果が計算値より高めに出的傾向が見受けられた。

全面圧縮破壊あるいは局部座屈破壊の実験値と計算値は比較的良く一致している。なお、オイラー座屈領域における全面圧縮破壊あるいは局部座屈破壊、および計算値より高いオイラー座屈破壊応力度の原因としては、試験体端部を支持している球座の回転が軸力の影響で拘束されていることが挙げられ、実際の座屈長さは、よりも短いものと考えられる。オイラー座屈破壊した試験体では軸方向に沿ったひずみ分布から実際の座屈長さを推定することが可能である。推定した座屈長さに換算した値を用いて実験結果を再プロットした結果を図-11、図-12中に■

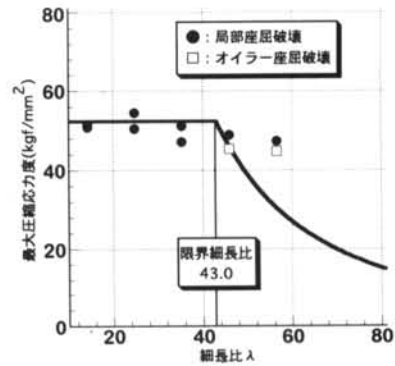


図-10 CFRP製パイプの圧縮実験における実験値と計算値の比較 (P-109×2)

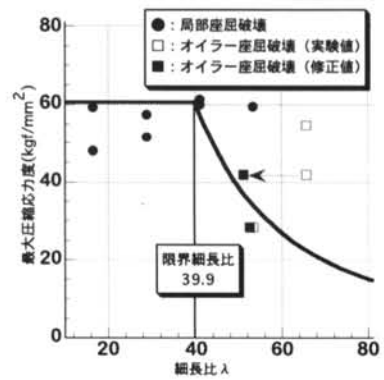


図-11 CFRP製パイプの圧縮実験における実験値と計算値の比較 (P-94×2)

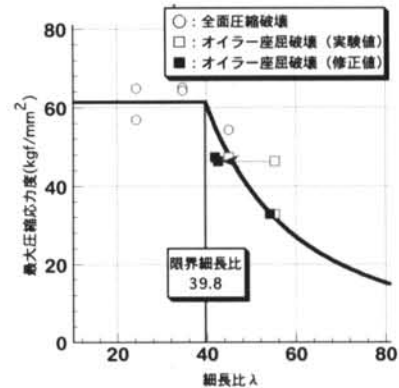


図-12 CFRP製パイプの圧縮実験における実験値と計算値の比較 (P-113×2)

で示す。オイラー座屈破壊の実験値はほぼ計算値を示す実線付近に修正された。これにより、(3)式に示した計算式でFW法により成形されたCFRP製パイプの圧縮破壊性状を評価できることが確認された。

$$f_t = \min(f_{t1}, f_{t2}, f_{t3}) \dots \dots \dots (3)$$

f_t : CFRP 製パイプの圧縮強さ(kgf/mm²)

f_{t1} : CFRP 製パイプの全面圧縮強さ(kgf/mm²)

$$f_{t1} = 61.2 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

f_{t2} : CFRP 製パイプの局部座屈強さ(kgf/mm²)²⁾

$$f_{t2} = \kappa \sqrt{\frac{E_c \cdot E_s}{3(1-\nu_c \cdot \nu_s)}} \cdot \frac{t}{R}$$

E_c : CFRP 製パイプの軸方向ヤング係数(9,800kgf/mm²)

E_s : CFRP 製パイプの周方向ヤング係数(3,800kgf/mm²)

G_{cs} : CFRP 製パイプのせん断弾性係数(470kgf/mm²)

ν_c : CFRP 製パイプの軸方向加力による周方向ポアソン比(0.096)

ν_s : CFRP 製パイプの周方向加力による軸方向ポアソン比(0.037)

t : CFRP 製パイプの肉厚(mm)

R : CFRP 製パイプの平均半径(mm)

κ : CFRP 製パイプの軸対称座屈・非対称座屈の判定係数

$$\kappa = \sqrt{\frac{\sqrt{E_c \cdot E_s + 2G_{cs}(1-\nu_c \cdot \nu_s)} + E_c \cdot \nu_c}{\sqrt{E_c \cdot E_s + 2G_{cs}} - E_c \cdot \nu_c}}$$

$\kappa \geq 1$ のとき軸対称座屈 $\kappa = 1$ とする

$\kappa < 1$ のとき非対称座屈

f_{t3} : CFRP 製パイプのオイラー座屈強さ(kgf/mm²)

$$f_{t3} = \frac{\pi^2 \cdot E_c}{\lambda^2}$$

λ : CFRP 製パイプの細長比

§ 6. 継手の強さ

6.1 引張強さ

6.1.1 試験体および実験方法

図-13に継手の詳細図、表-5に継手の仕様を示す。なお、継手部には支圧試験片と同様に、フェノール樹脂を含浸した炭素繊維を45度方向に母材のパイプの肉厚と同じ厚さだけ巻きたす補強を行った。

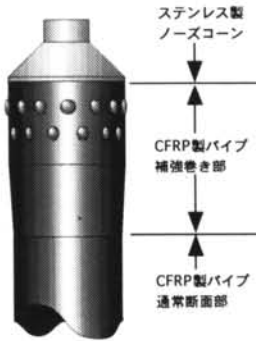


図-13 CFRP製パイプの継手の詳細図

CFRPパイプ	通常部外径 d(mm)	補強部外径 D(mm)	リベット 本数	リベット 径(mm)	継手距離 a(mm)	ピッチ b(mm)
P-74×2	74	78	20	6.4	20	30
P-94×2	94	98	24		20	30
P-109×2	109	113	30	7.9	20	30
P-113×4	113	121	20		27	28

表-5 継手の仕様

実験に用いたCFRP製パイプ材はP-74×2 (外径74mm, 肉厚2mm), P-94×2 (外径94mm, 肉厚2mm), P-109×2 (外径109mm, 肉厚2mm), P-113×4 (外径113mm, 肉厚4mm)の4種類である。それぞれ3体ないし4体ずつ計13体の実験を行った。加力はノーズコーンの部分を引張実験用治具に加工し、これをシアーピンあるいは楔形チャックを介して引っ張ることで行い、4サイクルの繰り返し漸増引張载荷にて破壊せしめた。測定項目は荷重、継手の抜けだし量である。

6.1.2 実験結果

全試験体とも継手が治具から抜け出すことで破壊した。図-14にP-94×2試験体について荷重と継手の抜け出し量の関係を示す。最大荷重の2/3程度の位置で急激に剛性が低下しているが、この傾向はすべての試験体でみられた。図-15に最大引張荷重を通常断面部の断面積で除した値を継手の引張強さとして縦軸に、通常断面部の断面積を横軸にとったグラフを示す。P-94×2, P-109×2試験体が若干低めではあるが、パイプ断面のちがいによる最大強さの差は認められなかった。

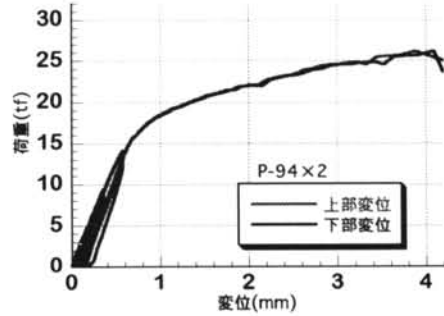


図-14 継手の引張実験における荷重と継手の抜け出し量の関係

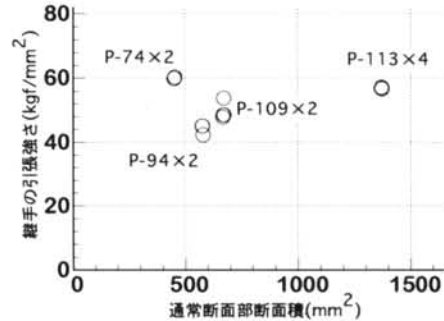


図-15 継手の引張強さとパイプ断面積の関係

6.2 圧縮強さ

6.2.1 試験体および実験方法

実験に用いたCFRP製パイプ、継手の仕様は引張実験で用いたものと同じ（P-109×2は未実施）である。加力は、ノーズコーンの端部を平らに加工し、直接圧縮荷重をかけることで行い、4サイクルの繰り返し漸増圧縮载荷にて破壊せしめた。測定項目は荷重、加力ヘッドの変位、継手の変位である。

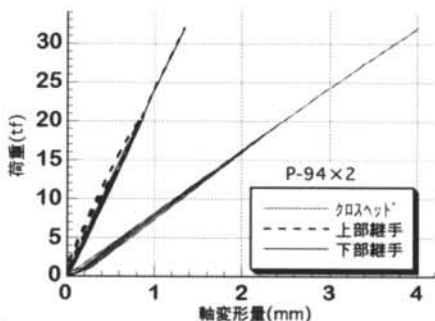


図-16 継手の圧縮実験における荷重と各部の変位の関係

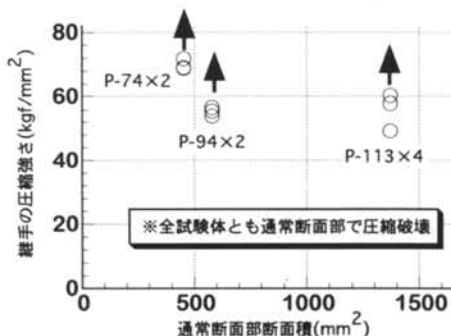


図-17 継手の圧縮強さとパイプ断面積の関係

6.2.2 実験結果および考察

全試験体ともCFRP製パイプの通常断面で圧縮破壊を起こしており、目視では継手部のダメージは確認できなかった。図-16にP-94×2試験体について荷重と各変位の関係を示す。全試験体とも引張実験と異なり、終始弾性挙動を示した。図-17に試験体の圧縮強さと通常断面断面積の関係を示す。パイプ通常断面部分の全面圧縮破壊あるいは局部座屈破壊で試験体の圧縮強さが決定されているため、継手の圧縮強さは少なくともこれらの値以上であることが確認された。

継手の特性として、図-15と図-17より引張力より圧縮力の伝達能力が高いことが把握され、圧縮力伝達能力は計画した試験体の範囲内ではCFRP製パイプの圧縮強さを伝えきることがわかった。これは継手が引張力にはリベット部分だけで抵抗するのに対して、圧縮力にはリベット部分とCFRP製パイプ端部断面-ノーズコーン間の面接触部分の両方で負担することによるものと考えられる。

§7. 結論

本報告では、CFRPを立体トラスに適用することを目的として、CFRPの力学特性を把握するための実験を行った結果を述べた。これらの実験の結果、CFRPの建築構造材としての利用の可能性のあることが確認された。

謝辞 本開発は、東レ(株)および(株)日本アルミと共同で行ったものである。末筆ながら謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 松山裕二郎ほか：“アルミニウム合金製システムトラス-アーバンスペースフレームによる構造デザイン-”，住友軽金属技報Vol.33 No.2, 1992.4
- 2) 林毅：“直交異方性円筒殻の座屈について”，造船協会会報, No.81(1947), p85-98

