

CFRP 製立体トラスの開発 (その2)

—部材と架構の力学特性—

米 丸 啓 介
(技術研究所)

藤 崎 忠 志
(技術研究所)

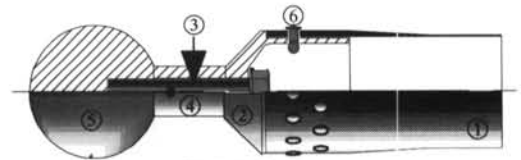
杉 崎 健 一
(技術開発センター)

中 辻 照 幸
(技術研究所)

§ 1. はじめに

CFRP製のパイプを主な構造材料としたCFRP製立体トラス構造を開発中である。開発中の立体トラスは図-1に示すように、弦材を格子状に組んだ上レイヤー、上レイヤーと同様に弦材を格子状に組んだ下レイヤー、上下のレイヤーを繋ぐラチス材で構成される。一般に複層立体トラスと呼ばれている構造であり、主に屋根架構に使用されるものである。一般の立体トラスには鋼が、そして最近ではアルミニウム合金、ステンレス鋼といった材料も用いられているが、通常の屋根架構等と比較してデザイン性に富むが単位面積重量が重くなるこのような構造に、軽量(比重が約1.6)であるCFRPのような材料を適用することの構造的な意義は大きいと考える。

この開発の最終目標はCFRPだけで立体トラス構造を成立させることである。しかし、異方性でありネジ切り部の強度の低いCFRPでは図-2に示す球形のハブやベアリングボルトを製造するのは現状では難しい。“新素材を建築構造材料に適用する”という目的を持った開発の第一ステップとしての本立体トラス構造では、CFRPを主な構造材料として用いることに重きをおき、接合部等の部分のCFRP化については次期ステップで扱うことにした。したがって、トラス部材の構成要素としては主要構造であるパイプにはCFRPを用いたが、ノーズコーンとブラインドリ



- ①: CFRP製パイプ
- ②: ステンレス鋼製ノーズコーン
- ③: 高張力鋼製ベアリングボルト
- ④: アルミニウム合金製カラー
- ⑤: アルミニウム合金製ハブ
- ⑥: ステンレス鋼製ブラインドリベット

図-2 CFRP製トラス部材

ベットにはステンレス鋼を、ベアリングボルトには高張力鋼を、カラーとハブにはアルミニウム合金を採用した(図-2参照)。

(その1) -CFRPの力学特性-では、CFRP製立体トラス構造の構成要素に着目して行った、CFRPの材料試験(引張、圧縮、支圧)、CFRP製パイプの引張実験と圧縮実験、およびノーズコーンとCFRP製パイプのリベット継手の性能を明らかにするために行った引張実験と圧縮実験の結果から、CFRP製立体トラス構造を成立させるために必要な基礎データを得た。本編では接合部を含む部材と架構の力学的挙動に着目して行った部材の引張実験と圧縮実験、架構の曲げ実験結果について報告する。

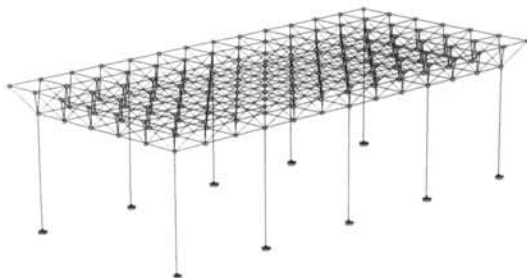


図-1 複層立体トラス構造の例(屋根部分のみ)

§ 2. 部材の力学特性

立体トラス構造では、外力により部材には主に軸方向力のみが作用するというように、個々の部材については力学的に明解であるが、部材がいろいろな傾斜角度で存在する構造全体の力学的挙動を推定するには構造解析を行う必要がある。この際に節点間を部材と同じ剛性を持った線材と仮定するの

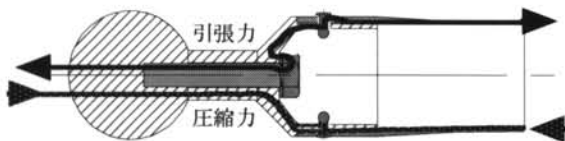


図-3 CFRP製トラス部材の応力伝達機構

単位はkgf/mm²(MPa)

	引張	圧縮	支圧	部位	備考
CFRP	89 (873)	61 (598)	43 (422)	パイプ	
アルミニウム合金	33 (324)	33 (324)	-	ハブ・カラー	A6061-T6
ステンレス鋼	61 (598)	61 (598)	-	ノーズコーン	SUS304
高張力鋼	90 (883)	-	-	ベアリングボルト	SCM435

表-1 使用材料の破壊強度

径	一面せん断	備考
6.4φ	1080kgf/本 (10.6kN/本)	※メーカー
7.9φ	3270kgf/本 (32.1kN/本)	規格下限値

表-2 ブラインドリベットの破壊耐力

が一般的である。しかし、材料の異なるそれぞれの要素が直列に繋がり複雑な形状をした部材が構成され、また、図-3のように引張と圧縮で応力伝達機構が異なっているCFRP製トラス部材の力学的挙動を各要素の単純な足し合わせで正確に推定することは困難である。そのため、ここでは構造解析に用いる部材の全体剛性を得ることを主な目的に、ハブを含むCFRP製トラス部材の引張および圧縮実験を行った。各部の耐力を検討するのに用いた使用材料の破壊強度を表-1に、ブラインドリベットの破壊耐力を表-2に示す。

2.1 部材の引張実験

2.1.1 実験方法

表-3に部材の引張試験体の仕様を示す。P-94×2、P-113×4の2種類の断面の部材を用い、それぞれ3体ずつ実験を行った。図-4に部材の引張試験体の概略を示す。試験体は両端にハブを取り付けた1本の部材であり、端からハブ-ベアリングボルト(カ

呼称	ハブ径	ベアリングボルト	カラー	ブラインドリベット
P-94×2	100φ	M20	40φ	6.4φ, 24本
P-113×4	140φ	M27	54φ	7.9φ, 20本

表-3 部材の引張試験体の仕様

ラー)-ノーズコーン-リベット継手-CFRP製パイプで構成される。両端のハブの中心間の距離は2,000mmで、このうち端部の金属部品の区間とリベット継手のための補強巻きの区間を除く中央部の約1,300mm(P-113×4は約1,000mm)の区間が試験体の呼称通りの断面寸法を持つCFRP製パイプの通常断面部である。図-5に各構成要素の引張破壊耐力の比較を示す。この図から判断すると、試験体はベアリングボルトが破断して耐力低下を起こすことになる。加力は両端のハブにM24(P-113×4はM30)のテンションロッドを取り付け、材軸方向に引っ張ることで行い、4サイクルの繰り返し漸増引張載荷で

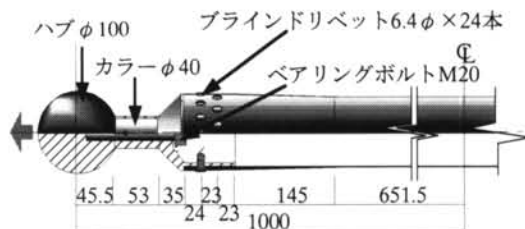


図-4 部材の引張試験体の概略 (P-94×2)

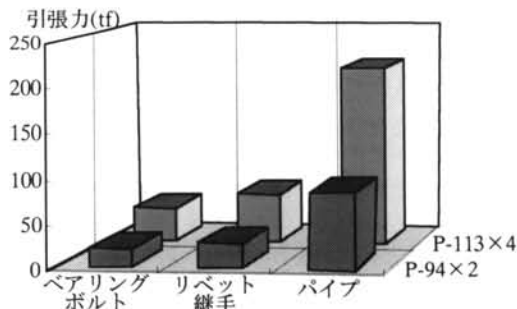


図-5 各構成要素の引張破壊耐力の比較

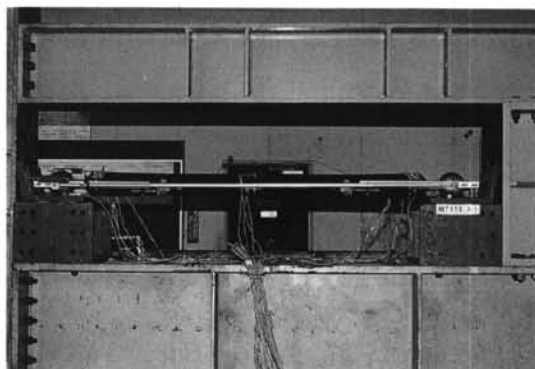


写真-1 加力装置 (部材の引張実験)

試験体を破壊させた。写真-1に加力装置を示す。計測項目は荷重、両端のハブ間の変形量、部材端の変形量（接合部+継手の変形量、ハブと通常断面部との相対変位）、試験体中央部のCFRPのひずみである。

2.1.2 実験結果

表-4に実験結果を示す。すべての試験体で、一方の端部のベアリングボルトが破断し耐力低下を起こした。最大荷重はベアリングボルトの破断荷重の計算値、P-94×2では20.2tf (198kN)、P-113×4では

単位はtf(kN)

呼称	No.	最大荷重	破壊形態
P-94×2	1	21.2 (208)	ベアリングボルト破断
	2	21.6 (212)	"
	3	22.6 (222)	"
P-113×4	1	33.2 (326)	"
	2	33.2 (326)	"
	3	33.6 (330)	"

表-4 実験結果 (部材の引張実験)

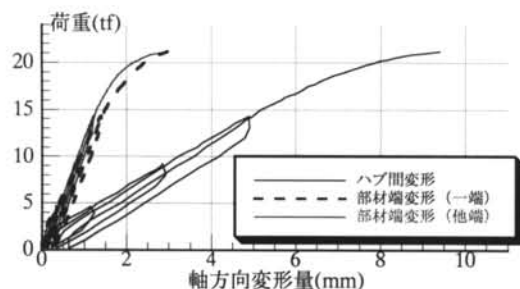


図-6 引張荷重と軸方向変形量 (P-94×2, No.1)

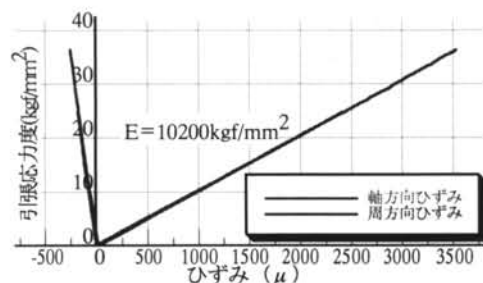


図-7 通常断面部の応力度とひずみの関係 (P-94×2, No.1)

31.5tf (309kN)、とほぼ一致した。図-6に引張荷重と軸方向変形量の一例を示す。ハブ間の変形量、部材端の変形量とも加力の初期段階では線形挙動を示しているが、P-94×2で約15tf、P-113×4で約22tfを超えたあたりから凸カーブを描いている。この傾向はすべての試験体で認められた。今回の最大荷重は、(その1)で報告した継手の引張試験体の弾性域を超えている(リベット孔回りのCFRPにつぶれが生じている)こと、ベアリングボルトの0.2%耐力に達していることから、この両方が凸カーブの原因であると推測される。ハブ間の変形量の線形部分より求めた部材の剛性の平均値はP-94×2が2,630kgf/mm (25.7kN/mm)、P-113×4で5,500kgf/mm (53.9kN/mm)であり、標準偏差はそれぞれ37.0kgf/mm (0.363kN/mm)、98.4kgf/mm (0.961kN/mm)であった。図-7に通常断面部の応力度とひずみの関係の一例を示す。ひずみの値は通常断面部分の中央に試験体断面の中心角90°おきに貼った4枚のひずみゲージの平均値である。終始弾性挙動がみられ、通常断面部は最終破壊時まで健全であったと考えられる。この関係より得られた軸方向の引張弾性率の平均値はP-94×2で10,600kgf/mm² (104kN/mm²)、P-113×4で11,400kgf/mm² (112kN/mm²)であった。

2.2 部材の圧縮実験

2.2.1 実験方法

試験体にはP-94×2、P-113×4の2種類の断面の部材を用いた。図-8に部材の圧縮試験体を示す。両端にハブをとりつけた1本の部材に対して軸方向に圧縮力を加えることは困難であるために、試験体は4本の斜辺をすべて同じ断面のCFRP製トラス部材、底面の正方形の辺をPC鋼棒 (P-94×2ではM20、P-113×4ではM27)とした1辺2mの四角錐形状とし、頂部のハブを鉛直下向きに載荷することでCFRP製トラス部材に圧縮力を導入した。支持部をピンローラー支持とするために支承と脚部のハブの間にテフロンシートをはさみ変位を拘束しないよう工夫した。CFRP製トラス部材の詳細は引張実験と同様であるが、ハブは、1箇所に複数の部材とPC鋼棒が取り付くため、互いに干渉しないようにP-94×2で120φ、P-113×4で167φとした。試験体は4サイクルの繰り返し漸増載荷で加力し破壊させた。試験体数は各断面3体である。写真-2に加力装置を示す。計測項目は荷重、各ハブの絶対変位、部材端の変形量 (ハブと通常断面部との相対変位、接合部+継手の変形量、1箇所のみ)、すべてのCFRP製トラス部材の通常断面部でのひずみである。最終破壊時の衝撃により変

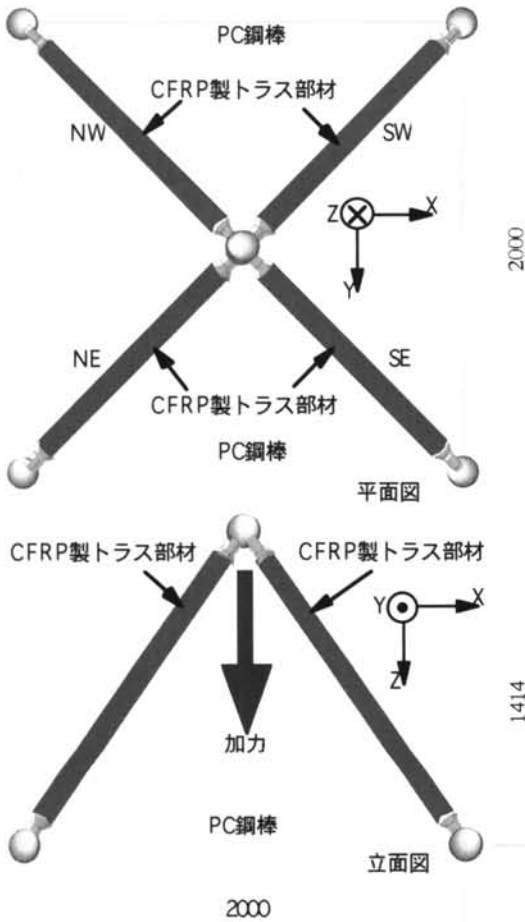


図-8 部材の圧縮試験体

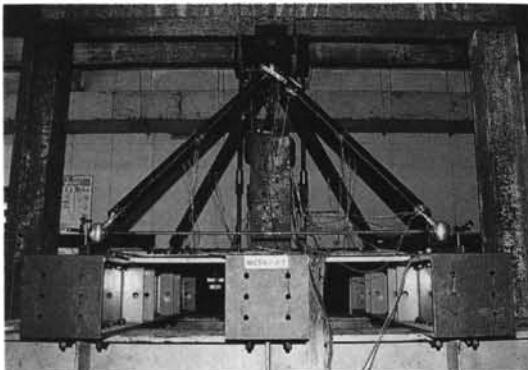


写真-2 加力装置 (部材の圧縮実験)

位計が破損するのを避けるために、頂部ハブの鉛直方向変位計以外は3サイクル目終了時に取り外した。

2.2.2 実験結果

表-5に実験結果を示す。すべての試験体で4本の斜材のうちの1本がオイラー座屈し耐力低下を起こした。全試験体とも最大荷重は斜材の軸力がハブ中心間距離2,000mmを座屈長さとするオイラー座屈計算値となるときの荷重値、P-94×2では41.9tf (411kN)、P-113×4では139tf (1360kN)、とほぼ一致した。表中の破壊した部材の最大軸力は、該当する部材の通常断面部の中央部に試験体断面の中心角90°おきに貼り付けた4枚のひずみゲージの軸方向ひずみの平均値に断面積とCFRPの弾性係数を乗じて求めたものである。図-9に荷重と頂部ハブの変位の関係の一例を示す。一部の試験体では繰り返し載荷を行った際に試験体が移動し、除荷後も初期の位置に戻らず、水平変位が大きめに出たが、最終破壊状況と最大荷重値から試験体の加力には問題がなかったと推測される。鉛直変位に関しては第1サイクル目の初期段階で、試験体と支承との接触面のなじみ、接合部部品間のガタ等が原因と考えられる凹カーブを描

単位はtf(kN)

呼称	No.	最大荷重	破壊形態	破壊した部材の最大軸力
P-94×2	1	45.4 (445)	斜材の材行-座屈	14.7 (144)
	2	44.3 (434)	"	15.6 (153)
	3	45.9 (450)	"	15.8 (155)
P-113×4	1	136 (1333)	"	43.7 (429)
	2	141 (1383)	"	46.7 (458)
	3	144 (1412)	"	49.4 (484)

表-5 実験結果 (部材の圧縮実験)

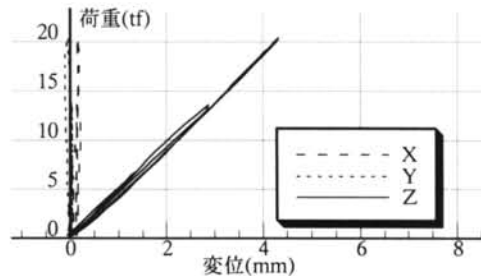


図-9 荷重と頂部ハブの変位の関係 (P-94×2, No.1)

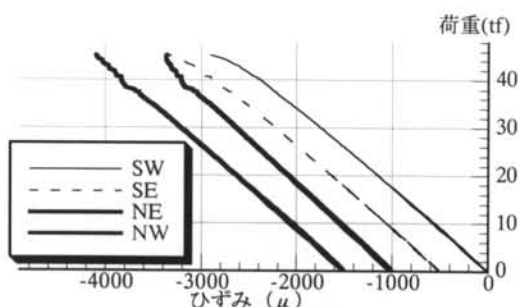


図-10 荷重とCFRP製トラス部材の軸方向ひずみの関係 (P-94×2, No.1)

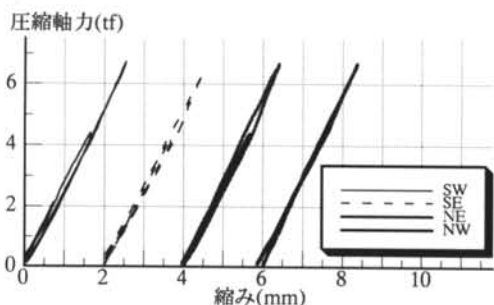


図-11 圧縮軸力と軸方向縮み量の関係 (P-94×2, No.1)

き除荷後も残留変位がみられたが、その後はほぼ線形挙動を示している。図-10に荷重とCFRP製トラス部材の軸方向ひずみ(平均値)の関係の一例を示す。全試験体とも同様の傾向であった。荷重-ひずみ関係はオイラー座屈寸前に若干挙動が乱れるものの、概ね線形挙動を示した。また、同一試験体内の4本のCFRP製トラス部材の挙動はほぼ同じであり、均等に圧縮力が導入されたことが伺える。図-11に圧縮軸力と軸方向変形量の関係の一例を示す。軸力は軸方向ひずみの平均値より求め、軸方向変形量はハブ間の相対変位より求めた。この関係より計算される12本の部材の剛性の平均値はP-94×2が2,650kgf/mm(26.0kN/mm)、P-113×4が5,240kgf/mm(51.4kN/mm)であり、標準偏差はそれぞれ155kgf/mm(1.52kN/mm)、904kgf/mm(8.87kN/mm)であった。

2.3 考察

部材の引張および圧縮実験結果より、試験体として採用したハブ中心間距離2,000mmの部材の全体剛性(ハブ間の剛性)が得られた。縦軸に部材の軸力、横軸に軸方向変形量を取り、引張実験結果を第1象限に、圧縮実験結果を第3象限に描いた図を図-12に示す(P-94×2)。P-113×4も同様の傾向であった。全体変形(ハブ間変形)を表す線は、原点付近での折

れ曲がりも見られず、引張と圧縮ではほぼ同程度の全体剛性であることがわかる。部材端の変形も併せて示すが、全体剛性同様、引張と圧縮ではほぼ同様の剛性である。表-6に各部の剛性の平均値を整理する。部材の長さも変化しても、接合部および継手の仕様、寸法に影響はないために、実験結果より得られた部材端の剛性と任意の長さの通常断面部のCFRP製パイプの剛性(CFRPの弾性係数と通常断面部の断面積、長さから求めたもの)を合成することで、任意の長さの部材の剛性を推定することが可能である。この推定値からハブ中心間をすべて通常断面部と同じ様な断面を持った部材と考えたときの等価弾性係数を計算すると図-13のようになる。この図より部材長が2,000mmの等価弾性係数はP-94×2で8,820kgf/mm²(86.5kN/mm²)、P-113×4で8,030kgf/mm²(78.8kN/mm²)と読めるが、この値はCFRPの弾性係数9,800kgf/mm²(96.1kN/mm²)と比較してそれぞれ90%、82%である。実験結果の全体剛性の平均値より計算した等価弾性係数も併せて示す(●)が、これらの値とよく対応している。

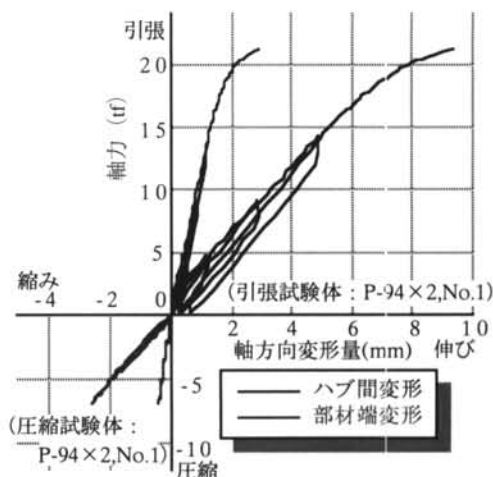


図-12 CFRP製トラス部材の軸力と軸方向変形量の関係

単位はkgf/mm(kN/mm)

呼称	部材端		ハブ間	
	引張	圧縮	引張	圧縮
P-94×2	11,200 (110)	17,900 (175)	2,670 (26.2)	2,540 (24.9)
P-113×4	14,600 (143)	27,400 (269)	5,140 (50.4)	4,350 (42.6)

表-6 部材各部の剛性

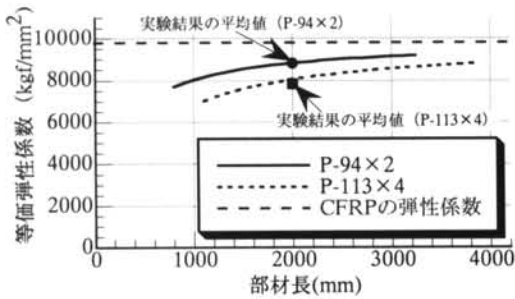


図-13 部材長と等価弾性係数の関係

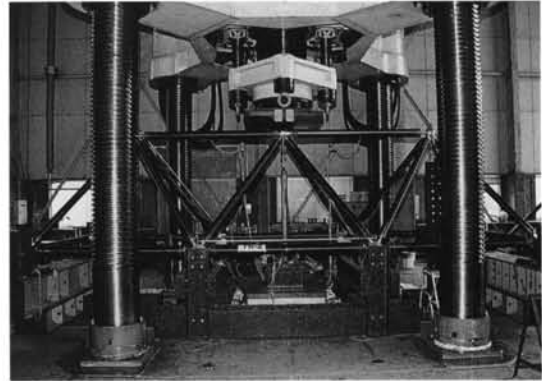


写真-3 加力装置（架構の曲げ実験）

§ 3. 架構の力学特性

3.1 架構の曲げ実験

CFRP製立体トラス部材を実際に架構に組んだ際の力学的挙動を把握するために、立体トラス架構を用いた曲げ実験を行った。同時に、3次元フレーム解析プログラムを用いて解析を行い、実験結果を検証した。この際の部材剛性には§ 2の結果をを反映させた。

3.1.1 実験方法

図-14に架構の曲げ試験体を示す。試験体は1辺2mの四角錐を3つ並べ、その頂部のハブを部材で繋いだ形状である。主に曲げ応力を負担する上弦材と上弦材に平行な下弦材にはP-109×2を、前記以外の下弦材とラチス材にはP-94×2を用いた。P-94×2は部材実験で用いたものと同様である。P-109×2の詳細は、ベアリングボルトがM20、カラーが40φ、

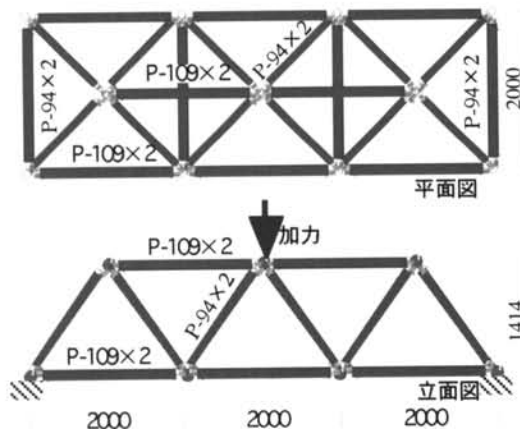


図-14 架構試験体図

ブラインドリベットが6.4φのものを30本である。ハブはその内部で隣り合う部材のベアリングボルトどうしが接触しないよう検討し、139φのものを採用した。加力点は2本の上弦材を繋ぐ中央のハブで、鉛直下向きに加力した。支持点は底面の4隅のハブであり、試験体の長辺方向にはローラー支持、短辺方向にはピン支持となるようにした。また、底面の支持点以外のハブについても、支持点の不具合、破壊時の飛散等を考慮して短辺方向のピン支持とした。加力は繰り返し荷重に対する架構全体の性状を把握するために段階的に3水準の荷重値までそれぞれ5サイクルずつ載荷し、16サイクル目で破壊させた。計測項目は荷重、支持点以外の底面のハブおよび加力点のハブの鉛直変位、支持点の水平方向変位、一部の部材の軸方向変形量、通常断面部のひずみである。加力点のハブの鉛直変位以外の変位計は最終破壊時の衝撃による破損を避けるために15サイクル終了時に取り外した。加力装置を写真-3に示す。試験体数は2体である。

3.1.2 構造解析

3次元フレーム解析モデルでは節点はピン節点、節点間是对應する部材の通常断面部と同じ様な断面を持った部材とし、弾性係数には§ 2で得られた等価弾性係数を用いた。この際、部材実験を行わなかったP-109×2の等価弾性係数にはCFRP製パイプの肉厚が等しく、また、同じ径のリベットを用いているP-94×2のものをそのまま用いた。支持条件は試験体と同様に長辺方向をローラー、短辺方向をピンとした。構造解析の結果では、最も早く破壊荷重に達するのは2本の上弦材であり、荷重値が32.9tf (323KN)のときに軸力がオイラー座屈破壊荷重23.3tf (228KN)に達する。

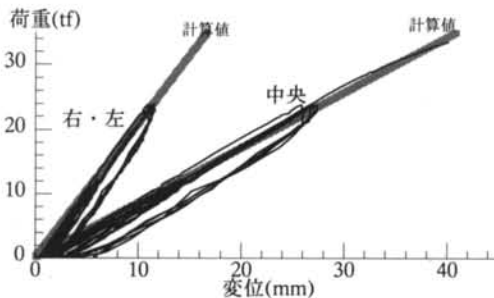
3.1.3 実験結果

表一七に実験結果を示す。最終破壊形態はいずれも片方の上弦材のオイラー座屈破壊であった。最大荷重も2体とも構造解析の結果と良く対応しており、計算値に対する比率がNo.1が1.02、No.2が1.05であった。図一15にNo.1試験体の荷重と上弦材ハブの鉛直変位の関係を示す。繰り返し载荷の範囲では、いずれのハブの変位にもループを描く挙動がみられるものの、概ね線形挙動を示した。左右のハブの変位が描く線はほとんど重なっており、試験体の挙動が左右対称であった様子が伺える。加力点である中央部ハブの変位には、荷重値が25tfを超えた付近から若干凸カーブを描く傾向がみられた。構造解析による計算値も併せて示すが、いずれのハブの挙動も線形域では非常に良く対応している。図一16にNo.1試験体について11サイクル目ピーク時(荷重12.0tf(118kN)処女载荷時)の各部材の軸力の状態を示す。軸力はそれぞれの部材の通常断面部に貼ったストレインゲージのひずみの値に断面積とCFRPの弾性係数を乗じることで求めた。全体として上弦材の軸力

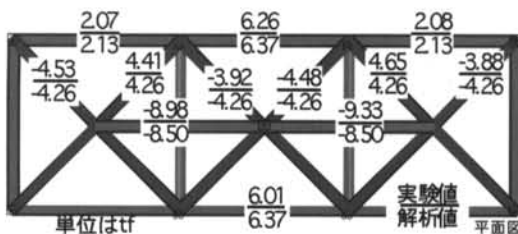
単位はtf(kN)

No.	①最大荷重	②計算値	①/②	破壊形態
1	33.5 (329)	32.9 (323)	1.02	上弦材の材行-座屈
2	34.7 (340)		1.05	"

表一七 実験結果(架構実験)



図一15 荷重と上弦材ハブの変位の関係 (No.1)



図一16 各部材の軸力の状態
(試験体No.1,荷重12.02tf時)

が計算値よりもやや高め、下弦材がやや低めの傾向にはあるが、軸力の得られた部材では実験値と計算値の差はほとんどなかった。No.2もほぼ同様の結果であった。

3.2 考察

CFRP製トラス部材の実験で得られた結果を用いて、複数の部材で構成されるCFRP製立体トラス架構の力学的挙動を推定できることが検証できた。しかし、特に変形に関しては、繰り返し载荷時にループを描く、大変形時に凸カーブを描くといった、異種材料どうしを繋ぐ部分で生じるガタやなじみ等が原因と考えられる定量的に評価できないような挙動もみられた。また、CFRP製トラス部材の破壊部位および破壊性状については、§2でみられたように、圧縮では脆性的なCFRP製パイプのオイラー座屈であり、引張では比較的靱性のあるベアリングボルトの破断であるというように異なっている。部材数が多く、荷重条件も複雑な実際の架構では、上記の理由により解析的には変形量が小さめに評価されたり、大変形時や終局に近い状態では部材応力や破壊性状の予測が困難になることが考えられるため、CFRP製立体トラス構造を設計する際には、変形と破壊に対する安全率を十分に考慮する必要がある。

§4. 結論

本報では前報に引き続き、接合部を含むCFRP製トラス部材およびCFRP製立体トラス架構の力学的挙動に着目した。部材の引張および圧縮実験、架構の曲げ実験を行い、その結果を検討し、以下のような知見を得た。

- 1) CFRP製トラス部材の全体剛性は圧縮と引張ではほぼ等しい。
- 2) 任意の長さのCFRP製トラス部材の全体剛性は、部材端剛性と通常断面部のCFRP製パイプの剛性から推定可能である。
- 3) CFRP製立体トラス架構の力学的挙動は、推定したCFRP製トラス部材の全体剛性を用いて評価できる。

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る。

<参考文献>

- 1) 米丸啓介ほか：“CFRP製立体トラスの開発（その1）－CFRPの力学特性－” 清水建設研究報告第64号（1996年10月）
pp.41～47