

CFRP パイプを構造材料に適用するための基礎的研究

BASIC STUDY TO APPLY CFRP PIPES TO STRUCTURAL USE

米丸啓介*, 藤崎忠志**, 杉崎健一***, 中辻照幸****, 鈴木弘之*****

*Keisuke YONEMARU, Tadashi FUJISAKI, Kenichi SUGIZAKI,
Teruyuki NAKATSUJI and Hiroyuki SUZUKI*

The development to apply CFRP as a structural material of building is being done. As a first step, a series of research to use CFRP pipes to Double-Layer Lattice Shell is progressing. A basic experimental study about mechanical properties of the CFRP pipe is argued by this paper. With several temperature parameters, the experiments to grasp mechanical properties of CFRP were done by using test pieces cut out from the CFRP pipes and the CFRP plates (the same composition as the CFRP pipe). As a result, some useful knowledge about mechanical properties including temperature dependence have been obtained.

Keywords : CFRP, pipe, double-layer lattice shell, mechanical property, temperature dependence
炭素繊維強化複合材料, パイプ, 複層立体トラス構造, 力学的特性, 温度依存性

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いわれる。筆者らは、21世紀の新しい構造空間を実現するために、新しい構造材料の開発及び用途開発を続けている。

現在、車両や航空機の分野で注目を浴びている構造材料に繊維強化複合材料 (Fiber Reinforced Plastics ; 以下FRP) がある。このFRPはそれほど高価ではなくしかも大量生産ができ、また既存の建築構造材料にくらべて特に比強度、耐久性、軽量化という面で大きなメリットを有している。

建築、土木分野におけるFRPの構造体への適用としては、棒状や格子状のFRP筋でコンクリートを補強する連続繊維補強コンクリートが挙げられる¹⁾。いわば「鉄筋の代替」といった使われ方であるが、このような使い方では、先に挙げたFRPならではのメリットが構造体に十分に活かされてこない。筆者らは、FRPの特色を十分発揮させることを念頭に置き「鉄骨の代替」を開発の目標とした。

「鉄骨の代替」として、様々な構造が考えられるが、ここではその第一段階として複層立体トラス構造を採用した (図1参照)。立体トラス構造は外力を部材の軸力のみで負担し力学的にシンプルであること、システム化しやすく大量生産にむいていること、部材の大きさをあまり変えずに様々なスパンに対応が可能であること等が

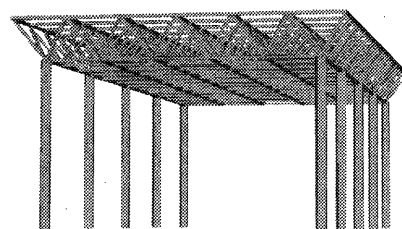


図1 複層立体トラス構造

採用の大きな理由である。また、H形や箱形断面に比べてパイプ断面のFRPは、成形方法によっては成形しやすいことも理由の一つである。立体トラス構造は、通常、デザイン性の求められる建築空間の比較的小さいスパンの大きい屋根構造として用いられることが多いが、耐久性に優れ軽量であるFRPをその構造材料として用いることはまさに適材適所であると言える。

ところが、通常、FRPを建築構造の素材として鋼と比較した場合に、弾性係数が低いことや耐熱性などが問題になると予想される。そこで、前者についてはFRPを構成する繊維に剛性の高い炭素繊維を使用し、構造として鋼と同等以上の性能を確保することで対処し、後者についてはFRPを構成する樹脂を比較的熱に強いフェノール樹脂とし、高温時の力学特性を把握し、火災時の構造設計を可能にすることで対処することとした。

* 清水建設技術研究所 研究員・工修
** 清水建設技術研究所 主任研究員
*** 清水建設技術研究所 部長・博士(工学)
**** 清水建設技術研究所 部長・工博
***** 筑波大学機能工学系 教授・工博

Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Co., M. Eng.
Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Co.
Project Manager, Institute of Technology, Shimizu Co., Dr. Eng.
General Manager, Institute of Technology, Shimizu Co., Dr. Eng.
Prof., Institute of Engineering Mechanics and Systems, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

フェノール樹脂を用いた炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics ; 以下CFRP) 製のパイプ (以下CFRP パイプ) の力学的特性を把握することを目的とする一連の研究のうち、本論文ではCFRPパイプからの切り出し試験片による力学的試験、並びに、CFRPパイプと同等の積層構成で成形されたCFRP平板からの切り出し試験片による力学的試験の結果からCFRPパイプを構成するCFRPの力学特性について論じる。

2. 立体トラス部材の構成

適用目標である、CFRPパイプを主構造材料とする立体トラス構造 (以下CFRP立体トラス構造) の部材の構成を図2に示す。部材どうしの接合部分に関しては、現状の技術ではFRPで成形することが困難であることから、既存のアルミニウム製立体パイプトラス²⁾のボールジョイント部品を採用した。CFRPパイプ (図中①) をノーズコーン (②) にブラインドリベット (⑥) を用いて取付け、ノーズコーンとハブ (⑤) の間にカラー (④) をはさみベアリングボルト (③) で締め付ける構造になっている。この部材は生じる力の向きによって、引張力の場合は①→⑥→②→③→⑤、圧縮力の場合は①→②→④→⑤と応力伝達機構が異なっている。部材としての性能や継手の応力伝達に関しては別途論じることとし、本論文ではCFRPパイプを構成するCFRPの基礎的な力学特性について論じる。

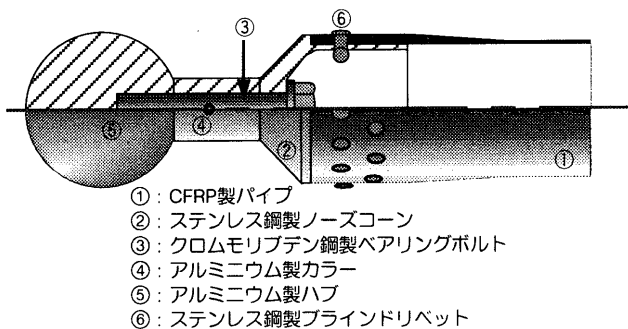


図2 CFRPトラス部材

3. CFRPパイプの構成

CFRPパイプは、炭素繊維にフェノール樹脂を含浸させながら円筒状のマンドレルと呼ばれる芯金に巻き付けて炉で硬化させるフィラメントワインディング (Filament Winding ; 以下FW) 成形法で成形する (図3参照)。マンドレルの回転軸に沿った方向に動く炭素

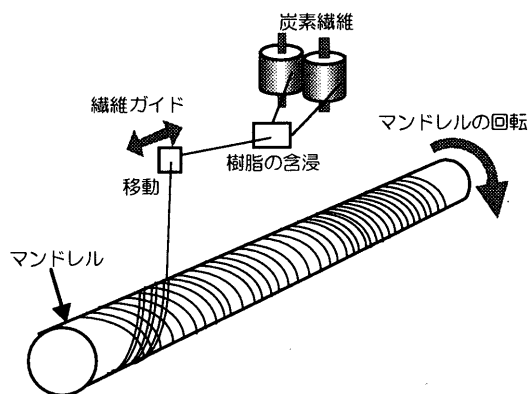


図3 フィラメントワインディング (FW) 成形法の概要

表1 炭素繊維の力学的特性

引張弾性係数 : E_f	235 GPa
引張強度 : σ_{ft}	4.90 GPa
引張破断のび : ϵ_{ft}	2.1 %

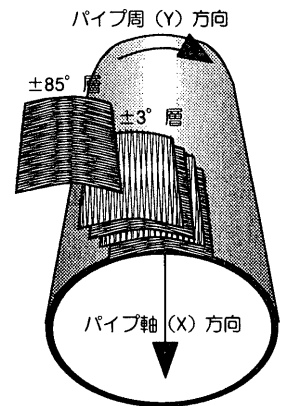


図4 CFRPパイプの積層状況

繊維を送り出す繊維ガイドの移動速度と、マンドレルの回転速度の組み合わせで、炭素繊維をパイプの軸に対して任意の角度で巻き付けることができる。また、巻き付ける際の炭素繊維の張力を一定に保つことができることから、他の成形法によるFRPと比較して力学的性能にバラツキの少ないFRPを成形することが可能である。使用する炭素繊維は、原料であるアクリル繊維を焼成して製造するPAN系の高強度糸と呼ばれているもので、直径は約 $5\mu\text{m}$ 、比重は1.8、また、表1に示すような力学的特性を有する。本CFRPパイプにおいては、この炭素繊維を軸方向と周方向の2方向に巻き付けている。図4に示すように軸方向がパイプの軸に対し $\pm 3^\circ$ 、周方向が $\pm 85^\circ$ の角度をもち、軸方向と周方向とも力学的に対称となるように、それぞれの正負の角度を組み合わせるとして1層とし、数層に分けて交互に積層しパイプ状に成形する。炭素繊維の量は軸方向：周方向=3：1の割合になっている。ただし、パイプ両端部のリベット継手付近は、ブラインドリベットの支圧力に十分耐えられるよう、 $\pm 45^\circ$ 方向に炭素繊維の2軸面状織物 (以下クロス) による支圧補強層を設けており、厚みは通常部の2倍で、繊維量は軸方向：周方向：支圧補強=3：1：4の割合になっている。CFRPの比重は1.6、単位体積あたりに炭素繊維の含まれる割合 (繊維体積含有率= V_f) は60%、樹脂の割合が40%である。

炭素繊維は製造過程で 1500°C 程度の高温で焼成すること、また、その炭素繊維を空气中で加熱しても重量減少がみられるのは 300°C 以上であることを考慮すると、CFRPの耐熱特性については $100\sim 200^\circ\text{C}$ で性能劣化を起こすマトリックス樹脂に依存すると言える。図5にCFRPパイプから切り出した試験片による曲げ強度の温度依存性と樹

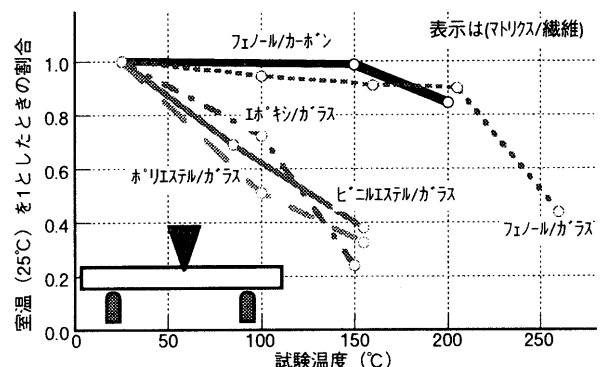


図5 樹脂の種類によるFRPの曲げ強度の温度依存性

脂の種類をパラメータとしたGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) の曲げ強度の温度依存性を示すが、今回採用したフェノール樹脂は、ビニルエステル、ポリエステルやエポキシなどの樹脂と比較して200℃までは良好な高温特性を示している。また、フェノール樹脂を用いたFRPは、防火性能としては、準不燃材料としての性能を有している³⁾。

本論文では、CFRPパイプを構成するCFRPの各強度や各材料定数について、温度依存性を考慮した実験を行い、その結果を検証し、基礎的な力学特性について論じる。

4. 実験概要

実験は大きく分けて、CFRPパイプから直接切り出した試験片（以下、パイプ試験片）による実験と、CFRPパイプと同様の積層構成のCFRP平板からの切り出し試験片（以下、平板試験片）による実験の二つに分けられる。

パイプ試験片による実験は、CFRPパイプが立体トラス部材の一部として用いられる際に必要とされる性能を直接把握することを目的としている。立体トラス部材には引張、圧縮の軸力のみが作用するが、CFRPパイプとしては、引張力と圧縮力に加えてリベット継手周りで発生する支圧力に対する性能を把握する必要がある。

平板試験片による実験は、パイプ試験片では実験が困難である部分を補うことを目的としている。使用している炭素繊維の強度や、成形方法が異なることから、パイプ試験片と平板試験片で得られた材料定数を直接比較することはできない。しかし、各材料定数の温度依存性の傾向を論じるには問題ないと考えた。CFRPパイプは直交異方性を示すような繊維配向となっている。この直交異方性は、パイプ軸方向をX方向と定義すると、パイプ軸方向の弾性係数 E_X 、パイプ軸方向のポアソン比 ν_X 、パイプ周方向の弾性係数 E_Y 、パイプ周方向のポアソン比 ν_Y 、せん断弾性係数 G_{XY} の5つの材料定数で説明される。これら5つの材料定数を得るためには、パイプ軸と0°、45°、90°の角度をなす試験片の引張試験を行う必要がある。しかし、パイプから45°方向、90°方向の試験片を切り出し、正確な引張荷重を行うことは事実上困難であることから、任意の方向に切り出すことのできる平板試験片による引張試験を行うこととした。表2にCFRPパイプとCFRP平板の比較を示す。平板は、図6に示すように、X方向のみの繊維を有する1方向繊維シートとX,Y方向に同じ量の繊維を有するクロスを交互に積層して成形する。それぞれの層の1方向シートとクロスの繊維量は同じであるために、両者を同じ数だけ積層すれば、平板の炭素繊維の配向の割合はCFRPパイプと同じX:Y=3:1となる。

表2 CFRPパイプとCFRP平板の比較

	CFRPパイプ	CFRP平板
炭素繊維	PAN系高強度	PAN系高強度
弾性係数	235GPa	
強度	4900MPa	クロス: 3720MPa シート: 3820MPa
板厚	2mm	1.93mm
共通事項	樹脂: フェノール樹脂、繊維体積含有率: $V_f=60\%$ 、繊維量の割合→縦:横=3:1	
備考	パイプ軸に対し、±45°と±90°を積層 X(0°)とY(90°)を積層	

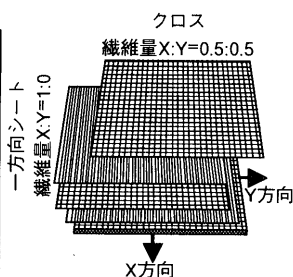


図6 平板の積層状況

4. 1 パイプ試験片の引張実験

(1) 実験方法

図7に引張試験片図を示す。試験片は、外径94mm、肉厚2mmのCFRPパイプから切り出した。試験片の幅は25mmである（試験片幅1mmあたりに含まれる軸方向炭素繊維の本数は約45,000本）。パイプから切り出した曲率のついた試験片を定着するために鋼管内に膨張モルタルを充填し、鋼管を直接チャックでつかみ引張荷重を行った。FRPの引張強度はそれを構成する繊維の強度に依存するところが大きい。FW成形による本CFRPパイプは軸方向繊維とパイプ軸の間に±3°の角度がついている。これからパイプ軸に沿った短冊状の試験片を切り出した場合、図8に示すように、試験片側面で切断され、上下定着部間でつながっていない軸方向繊維が存在することになる。この部分では、炭素繊維の引張強度よりかなり低い樹脂と炭素繊維の付着強度により耐力が決定されてしまい、本来のCFRPの引張強度は得られない。このため、試験区間長をパラメータとした実験を計画し、試験区間長と引張強度の関係を検証することにした。表3に試験片の一覧を示す。実験はJIS K 7073（炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法）に準じて行った。測定項目は荷重と試験区間中央部での加力方向ひずみならびに加力方向に直交する横方向ひずみである。

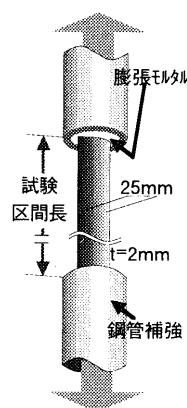


図7 引張試験片

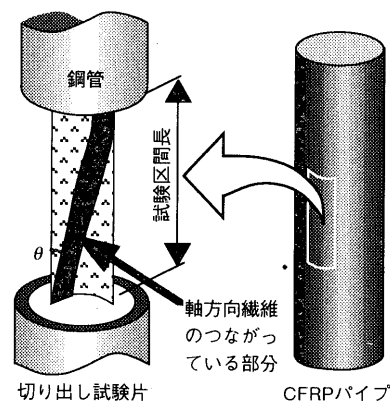


図8 切り出し試験片

表3 試験片一覧

試験片名	TP050	TP100	TP200	TP300	TP400	TP500
厚さ (mm)	2					
幅 (mm)	25					
試験区間長 (mm)	50	100	200	300	400	500
軸方向繊維のつながっている割合 (%)	89.5	79.0	58.1	37.1	16.1	0.0
試験片数	5					

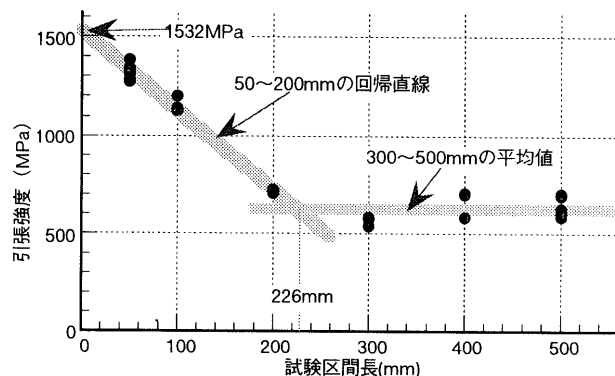


図9 引張強度と試験区間長の関係

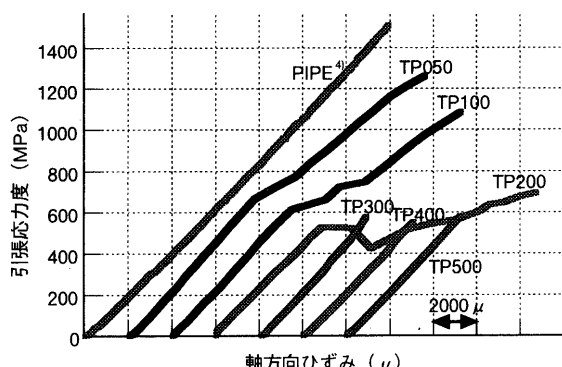


図10 引張応力度と軸方向ひずみの関係

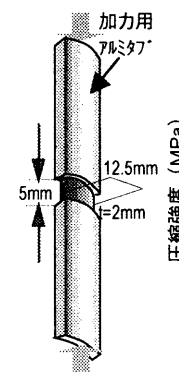


図12 圧縮試験片

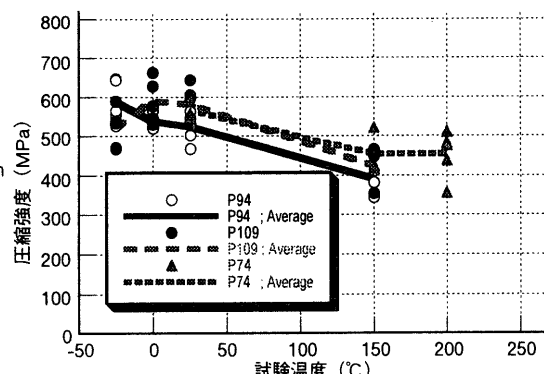


図13 圧縮強度の温度依存性

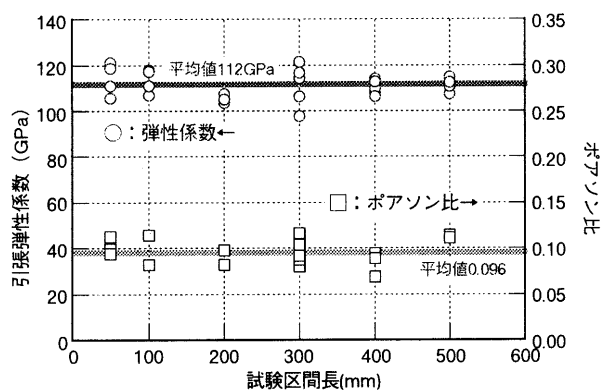


図11 引張弾性係数、ポアソン比と試験区間長の関係

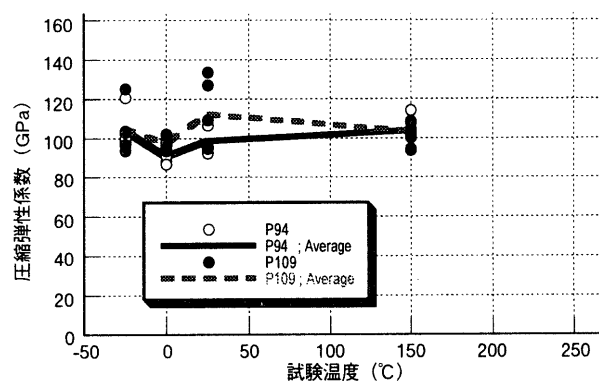


図14 圧縮弾性係数の温度依存性

(2) 実験結果

図9に各試験片の引張強度を示す。試験区間長300mmまでは、試験区間長が長くなるにつれて引張強度が低下している。それ以上の長さの試験片ではほぼ一定の引張強度（約600MPa）となった。試験区間長200mmまでのデータを用いて求めた回帰直線のY切片より、試験区間長0mm（すべての軸方向繊維がつながっている＝パイプ）の引張強度は1532MPaと読める。この値は、CFRPパイプの引張実験¹⁾によって得られた引張強度の値（1512MPa）にほぼ等しい。図10に引張応力度と軸方向ひずみの関係の一例を示す。CFRPパイプの引張実験²⁾より得られたデータについても併せて示す。パイプとすべての試験片において、初期剛性はほぼ同じであった。試験区間長200mm以下の試験片においては、300mm以上の試験片の引張強度である600MPa付近で剛性低下がみられた。この剛性低下は樹脂と炭素繊維の付着破壊に起因するものであり、それ以降の挙動には、定着部間でつながっている繊維の割合が反映されている。本実験結果の範囲内では、つながっている繊維の割合がおおよそ半分以下であると、剛性低下点が破壊点となり、半分以上であればその繊維量に応じた第二剛性がみられた。CFRPパイプのようにすべての軸方向繊維がつながっている場合には剛性低下はみられない。図11に各試験片の引張弾性係数とポアソン比を示す。なお、ポアソン比（ ν ）は加力初期の線形挙動区間における加力方向の応力度の増分（ $\Delta\sigma_1$ ）に対応する同方向のひずみの増分（ $\Delta\epsilon_1$ ）と直交する方向のひずみの増分（ $\Delta\epsilon_2$ ）より次の式を用いて計算した。

$$\nu = -(\Delta\epsilon_2 / \Delta\sigma_1) / (\Delta\epsilon_1 / \Delta\sigma_1)$$

以下、ポアソン比については同様の方法で求めた。引張弾性係数の平均値は112GPa、ポアソン比の平均値は0.096であった。

4. 2 パイプ試験片の圧縮実験

(1) 実験方法

図12に圧縮試験片図を示す。試験片は外径74mmと94mm、109mm（肉厚は共に2mm、それぞれP74、P94、P109試験片）のCFRPパイプより切り出した。試験片の幅は12.5mm、試験区間長は5mmである。実験はJIS K 7076（炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法）のA法に準じて行った。曲率のついている試験片を保持するために、端部補強のアルミタブと、載荷時に用いる押さえ具に、試験片と同様の曲率になるような加工を施した。CFRPの圧縮強度に対しては、樹脂が繊維を所定の方向に保持する能力が支配的な影響を及ぼすと予想されるため、樹脂の性質が現れやすいと考えられる。このため、試験温度をパラメータとした実験を計画し、CFRPの圧縮強度の温度依存性を検証することにした。設定した試験温度は、-25℃、0℃、25℃、150℃、200℃の5水準である。測定項目は荷重と試験区間での加力方向ひずみである。

(2) 実験結果

図13に圧縮強度と試験温度の関係を示す。試験片の種類による圧縮強度の差は見られなかった。試験温度25℃における試験片の圧縮強度の平均値は555MPaであった。圧縮強度の温度依存性について、低温側については、実験を行った-25℃までの範囲内では、圧縮強度の変化は生じなかった。高温側については、150℃、200℃共に、20%程度の強度低下がみられた。図14に圧縮弾性係数と試験温度の関係を示す。150℃以下の温度であれば圧縮弾性係数に変化は見られなかった。なお、試験温度200℃においては、ひずみゲージの不具合のためデータが取れなかった。得られた圧縮弾性係数の平均値は104GPaであった。

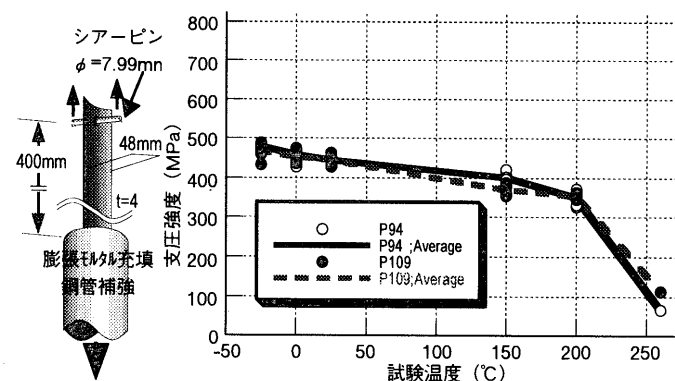


図15 支圧試験片

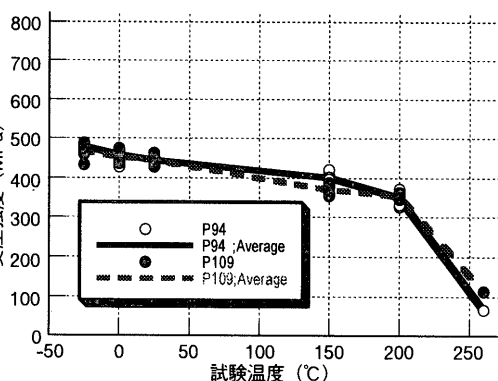


図16 支圧強度の温度依存性

4. 3 パイプ試験片の支圧実験

(1) 実験方法

実験は、JIS K 7080 (炭素繊維強化プラスチックの面圧強さの試験方法) を参考に行った。JIS規格ではシアーピンの直径は4mm、試験片の幅はシアーピンの直径の6倍である24mmとなっているが、本実験においてはシアーピンの直径を実際の部材で使用するリベット径相当の約8mmとしたために試験片の幅は48mmとなっている。支圧破壊は局所的な圧縮破壊であり圧縮強度と同様に樹脂の性質が現れやすいと予想されたため、-25℃、0℃、25℃、150℃、200℃、260℃の6水準の温度をパラメータとした実験を行った。加力は端部補強の鋼管と治具を介したシアーピンを引っ張り、孔の縁半周分のCFRPに支圧载荷を行った。測定項目は荷重である。

(2) 実験結果

全試験体ともシアーピンが母材の孔を加力方向に徐々に押し広げ、最終的には試験片の非定着側から抜け出し耐力低下するような破壊性状を示した。最終的な破壊性状だけから判断すると、鉄骨構造の継手における縁端距離が不足した場合の母材のせん断破壊のようである。しかし、本実験の場合は、シアーピンが抜け出すまでは耐力低下していないことから、試験片の破壊の過程としては、CFRPの支圧強度に達したところでシアーピンが接している部分のCFRPが潰れ母材の孔が広がり始め、その後、孔の広がりにより縁端距離が不足してせん断破壊に達したものと考えられる。実際の部材のリベット継手においても、適切なリベットの配置が行われればステンレス鋼製のリベットが破断しない限り同様の破壊性状を示すと考えられるので、本研究においては、このCFRPの破壊のことを支圧破壊、その強度のことを支圧強度と称することにした。図16に支圧強度と試験温度の関係を示す。なお、支圧強度は最大荷重をピン径と試験片の厚みの積で除して求めた。CFRPパイプの外径の違いによる支圧強度の差はみられなかった。試験温度25℃における試験片の支圧強度平均値は444MPaであった。

支圧強度の温度依存性は、低温側については、圧縮強度と同様に変化はみられなかった。高温側については、200℃まで直線的に支圧強度が低くなり、それ以上260℃までの温度範囲では急激な強度低下がみられた。150℃、200℃、260℃における支圧強度の値は室温下のそれに対してそれぞれ、87%、79%、20%であった。

4. 4 平板試験片の引張実験

(1) 実験方法

図17に試験片の切り出し方法の概要を示す。X軸方向より0°、

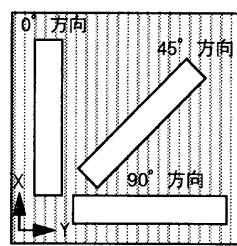


図17 試験片切り出し方法

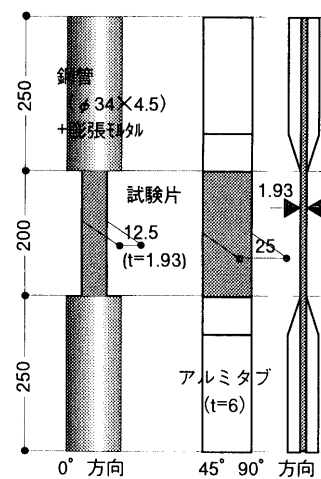


図18 試験片図

45°、90°の3種類の試験片を切り出した。図18に試験片図を示す。試験片の全長は700mmである。両端には250mmの長さの端部補強が施されており、試験部は中央部の200mmの区間である。45°ならびに90°方向の試験片についてはJIS K 7073 (炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法)、JIS K 7079 (炭素繊維強化プラスチックの面内せん断試験方法) を参考にして、幅を25mm、端部補強をアルミタブとした。0°方向の試験片については、引張荷重がアルミタブの定着限界を超えることが予想されたため、試験片の幅を半分の12.5mmとし、より定着力の高い膨張モルタルを用いた鋼管補強とした。本実験の目的は既述の通り力学的特性の温度依存性を把握することであり、試験温度を室温、50℃、100℃、150℃、200℃、250℃の6水準に設定した。測定項目は荷重と試験区間中央部での加力方向ひずみ、横方向ひずみである。

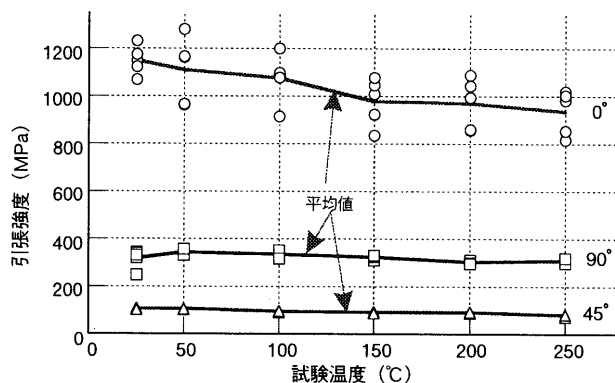


図19 引張強度の温度依存性

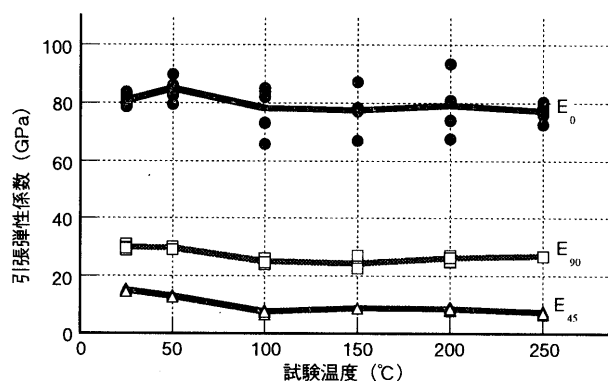


図20 引張弾性係数の温度依存性

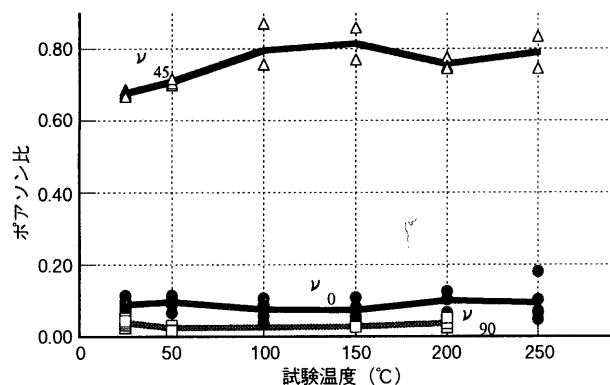


図21 ポアソン比の温度依存性

(2) 実験結果

図19に各試験片の引張強度を示す。室温における0°、45°および90°方向の引張強度の平均値は、それぞれ、1151MPa、105MPa、および335MPaであった。すべての角度において試験温度の上昇に伴いほぼ直線的に強度低下する傾向がみられた。250℃における0°、45°および90°方向の引張強度の平均値の保持率は、それぞれ、81%、75%、および93%であった。各試験片の弾性係数を図20に示す。室温における0°、45°および90°方向の弾性係数の平均値は、それぞれ、80.7GPa (=E₀)、15.0GPa (=E₄₅)、および29.8GPa (=E₉₀)であった。温度依存性については、すべての角度において、試験温度100℃までは、試験温度の上昇に伴い値が低下し、それ以上ではほぼ一定の値を示す傾向がみられた。250℃における0°、45°および90°方向の弾性係数の平均値の保持率は、それぞれ、96%、48%、および90%であった。図21に各試験片のポアソン比を示す。室温における0°、45°および90°方向のポアソン比の平均値は、それぞれ、0.088 (=ν₀)、0.675 (=ν₄₅)、および0.038 (=ν₉₀)であった。試験温度の影響については、45°方向の試験片で、100℃まで若干値が大きくなり、それ以上の温度ではほぼ一定(平均値は0.785)である傾向がみられたが、0°、90°方向については試験温度の影響は見られなかった。全体を通して、0°方向のデータのバラツキが大きめであるが、これは端部補強の違いによるものと推定される。

5. 考察

5. 1 引張強度

パイプ試験片の実験結果より得られたCFRPパイプの力学特性をまとめると、表4のようになる。

CFRPの引張強度について、本CFRPパイプや、軸方向繊維に傾きのない0°と90°の平板試験片のように、引張力を負担する部分全域にわたってその方向の炭素繊維が“つながっている場合”と“つ

ながっていない場合”で破壊の機構が異なることがわかった。

“つながっている場合”の引張強度は炭素繊維の破断によって決定される。軸方向繊維のみが引張力を負担すると考え、CFRPパイプの引張強度時の軸方向繊維の応力度を計算すると次のようになる。

$$1532\text{MPa} \div 0.6 (\text{繊維体積含有率}) \div 0.75 (\text{軸方向繊維の割合}) = 3404\text{MPa}$$

この値は、表1に示す炭素繊維の引張強度(4900MPa)の69.5%であり、CFRPパイプの軸方向炭素繊維は引張強度に達していないことになる。これは、繊維をFRPとしたときの個々の繊維の状態のバラツキに起因するものと考えられ、FRP中ではすべての繊維が一樣に応力を負担していないことを示している。成形時に補強繊維の張力を一定に保つことができるFW成形法においても、補強繊維の強度の有効率は約0.7であるといえる。“つながっている場合”の破壊の直接の原因は炭素繊維の破断であるが、4. 4において0°と90°の平板試験片の引張強度が試験温度の上昇に伴い低下する傾向がみられたことから、この有効率にはフェノール樹脂のマトリックスとしての役割が寄与していることがわかる。

“つながっていない場合”の引張強度は、炭素繊維の引張強度ではなく、炭素繊維とフェノール樹脂の付着強度によって決定される。この付着強度には、繊維表面とマトリックスの接着性、繊維の径や剛性、マトリックスの剛性等様々な要素が影響を与えるため、補強繊維とマトリックスの組み合わせによる固有の値であると考えられる。本CFRPパイプを構成する炭素繊維とフェノール樹脂の組み合わせにおける“つながっていない場合”のCFRPの引張強度は約600MPaであった。

本CFRPパイプのように切り出し試験片とすることで破壊の機構が本来と異なる場合には、試験片の実験結果から直接引張強度を得ることはできない。本研究で行ったように、複数の試験区間長の切り出し試験片による引張実験結果から、外挿により本来の引張強度を計算することが可能となる。

5. 2 圧縮強度

表4より、圧縮と引張で弾性係数がほぼ同じであり、どちらの向きの力に対しても同様の弾性挙動を示すことがわかる。本来糸状である炭素繊維に引張と同等の剛性で圧縮力を負担させるには、繊維の位置や方向を保持するマトリックスの性能が支配的であると言える。パイプ試験片による圧縮強度の平均値555MPaは、CFRPパイプの引張強度に対して36.2%と低めの値ではあるが、“つながっていない場合”の引張強度とはほぼ同等である。このことから、圧縮破壊の場合についてもマトリックスと繊維の付着強度によって決定されていることが推定できる。軸方向繊維のみが圧縮力を負担すると考えると次のように計算できる。

$$555\text{MPa} \div 0.6 (\text{繊維体積含有率}) \div 0.75 (\text{軸方向繊維の割合}) = 1233\text{MPa}$$

この値が、CFRPパイプの圧縮強度時(フェノール樹脂と炭素繊維の付着強度時)の軸方向繊維の圧縮応力度である。

5. 3 支圧強度

支圧強度の平均値は444MPaで、引張強度の29.0%であった。CFRP

表4 パイプ試験片による実験結果

	強度	弾性係数	ポアソン比
引張	1532 MPa	112 GPa	0.096
圧縮	555 MPa	104 GPa	—
温度依存性	150℃, 200℃で80%保持	150℃まで変化無し	—
支圧	444 MPa	—	—
温度依存性	200℃で79%保持	—	—

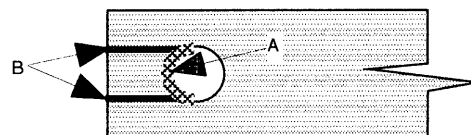


図22 支圧載荷部(支圧試験片)

パイプに支圧補強を行わずにリベット継手とした場合、支圧力を直接受けている図22中Aの部分よりもBの太線部分のフェノール樹脂のせん断破壊が先行し、十分な支圧力が得られない。このため、CFRPパイプの継手部分にはB部分のせん断補強を目的として炭素繊維クロスによる $\pm 45^\circ$ 層の支圧補強を行っている。この部分における繊維配向の割合は支圧補強繊維が50%、軸方向繊維が37.5%、周方向繊維が12.5%となっており、このうち軸方向繊維と支圧補強繊維が支圧力を負担していると考えられる。支圧力を受けるCFRPの部分について、支圧強度時に支圧補強層の炭素繊維に生じる応力度の軸方向成分を α MPa、軸方向繊維層は圧縮破壊を起こしている（炭素繊維の圧縮応力度＝1233MPa）と仮定すると次式が成り立つ。

$(\alpha \text{ MPa} \times 0.50 + 1233 \text{ MPa} \times 0.375) \times 0.6$ (繊維体積含有率) = 444 MPa
これを α について解くと

$$\alpha = 555 \text{ MPa}$$

となる。このことは、支圧補強層の補強効果が十分であることを示している。支圧補強層の破壊機構はクロスを構成する正負 45° 方向の炭素繊維の局所的な圧縮破壊の組み合わせにより説明されと考えられる。したがって、支圧強度においても、フェノール樹脂のマトリックスとしての役割は支配的であると推測できる。

5. 4 強度の温度依存性

CFRPパイプの引張、圧縮、支圧のいずれの強度に対しても、マトリックスとしてのフェノール樹脂の性質が影響を及ぼしていることがわかった。各強度の温度依存性の比較を図23に示す。若干のバラツキはみられるが、 200°C まではいずれの強度も同様の低下傾向を示し、緩やかに20%程度強度低下した。これは、図5に示すフェノールFRPの曲げ強度の温度依存性とよく一致している。それ以上の

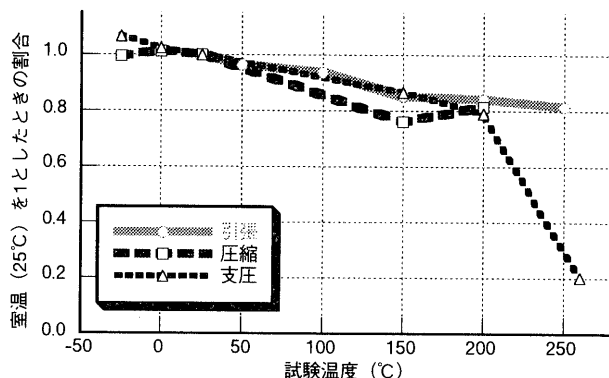


図23 各強度の温度依存性の比較

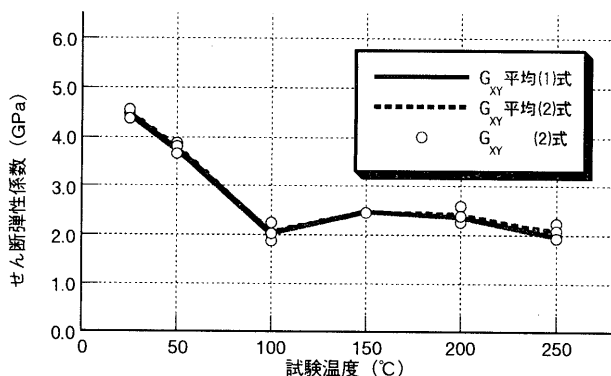


図24 せん断弾性係数の温度依存性

温度では炭素繊維の破断強度が支配的な引張強度だけが高い強度保持を示している。圧縮強度については、 200°C を上回る温度域のデータはないが、破壊時にフェノール樹脂の役割が支配的であることを考慮すると、支圧強度や曲げ強度と同様の急激な強度低下を生じるものと推定できる。

5. 5 材料定数の温度依存性

平板試験片による実験により、パイプの軸方向に相当するX軸より 0° 、 45° 、 90° 方向についての力学的特性の温度依存性を把握した。直交異方性を表す材料定数のうち、軸方向(X方向)と周方向(Y方向)についてはそれぞれ 0° 、 90° を直接読み替えることができる。せん断弾性係数(G_{XY})については、直交異方性が成り立つ場合、(1)式あるいは(2)式を用いて求めることができる。

$$1/G_{XY} = 4/E_{45} - (1/E_0 + 1/E_{90} - 2 \cdot \nu_0/E_0) \dots (1)$$

$$G_{XY} = E_{45} / [2 + (1 + \nu_{45})] \dots (2)$$

計算結果による G_{XY} と試験温度の関係を図24に示す。(1)式と(2)式による計算値に差は無く、CFRP平板が直交異方性であることの一端が実験的に確認できた。室温でのせん断弾性係数は(1)式の計算結果より4.47 GPaであった。その温度依存性については、他の弾性係数と異なり、 100°C まで直線的で急激な値の低下が生じ、それ以上の温度ではほぼ一定の値(室温時の50%程度)を示した。

CFRPパイプの弾性係数は、これを繊維の向きの異なる板を数層重ねた積層板と見なすことによって、理論的に求めることができる⁹⁾。計算方法を付録に示す。この計算には、積層構成や成形方法、繊維の強度は反映されない。これによると、CFRPパイプの材料定数の計算値は表5のようになる。これまでの実験により得られた材料定数も併せて示す。平板試験片の弾性係数は計算値に比べて低めであるが、これには、積層材としてクロスを用いているため、炭素繊維のうねりが大きく影響していると考えられる。パイプ試験片の引張実験より得られた弾性係数とポアソン比については、計算値とよく対応している。図25に材料定数の温度依存性の比較を示す。 0° 方向の試験データには試験方法が原因のバラツキがみられたが、そのバラツキ幅には温度依存性が無く、また、各温度水準においてほぼ同

表5 CFRPの材料定数 (室温)

	計算値	平板試験片	パイプ試験片	単位
E_x	108	80.7	112	GPa
ν_x	0.086	0.089	0.096	
E_y	41.4	29.8	—	GPa
ν_y	0.033	0.038	—	
G_{xy}	5.95	4.47	—	GPa

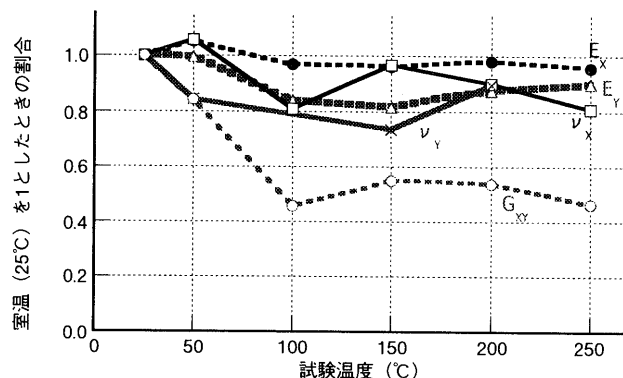


図25 材料定数の温度依存性の比較

じ幅であったことから、図25のように温度依存性を室温との比として表す場合には、各温度水準における平均値を用いても十分にその傾向を示しているといえる。この図によると、 E_X や E_Y のように応力の向きに炭素繊維が配されている場合と、 G_{XY} のようにそうでない場合で、温度依存性が異なっている。このことは、ある特定の方向の応力に対して設計されたCFRPの場合、予想しない方向の材料定数については温度上昇に伴う変化が特に大きいことを示している。火災による熱の問題を避けられない建築構造部材にCFRPのような材料を適用する際には、特に注意しなければならない点である。CFRP製立体トラス構造の場合、構造上、 G_{XY} が直接影響する部材のねじりは生じないため問題はない。

6. 結論

パイプ試験片および平板試験片の実験結果とそれらに関する考察より、CFRPパイプを構造材料として適用するのに必要な強度、材料定数、ならびにそれらの温度依存性を得ることができた。得られた知見について以下にまとめる。

(1) 切り出し試験片を用いて、FW成形によるCFRPパイプの引張強度試験を行う場合、少なくとも2水準以上の試験区間長による実験結果を外挿することによって、パイプ本来の強度を推定することができる。

(2) 本CFRPパイプの引張強度の評価に際して、炭素繊維の引張強度、パイプ軸方向の炭素繊維体積比率、および有効率0.7を用いることができる。

(3) 本CFRPパイプは圧縮、引張とも同じ弾性剛性を示す。

(4) 引張、圧縮、支圧の各強度とも、200℃までは温度依存性の傾向は同じであり、200℃での強度低下率は20%程度である。

(5) 本CFRPパイプの材料定数は積層板の理論により計算できる。

(6) 材料定数の温度上昇に伴う変化は、その材料定数の方向と補強繊維の方向が一致する場合と一致しない場合とでは異なり、一致しない場合のほうが著しい。

謝辞

本実験的研究を進めるにあたっては、東レ(株)木本幸胤氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：特集*新素材—連続繊維によるコンクリートの補強—，コンクリート工学Vol.29 No.11, 1991.11
- 2) 檜山裕二郎，高島英幸，飯島俊比古：アルミ合金単層ラチスドームに用いるボールジョイントの載荷実験及び弾塑性解析，日本建築学会構造系論文集，第502号，pp85～92, 1997.12
- 3) 強化プラスチック協会：フェノールFRP特集，強化プラスチック，Vol.37, No.10, 1991.10
- 4) 米丸啓介，藤崎忠志：CFRP製立体トラスの開発（その6：CFRPパイプの切り出し試験片の引張特性），日本建築学会大会，A-1分冊，pp251～252, 1999.9
- 5) 宮入裕夫，他6名：複合材料の事典，朝倉書店，1991
- 6) 林毅：複合材料工学，日化技連，1972

付録

直交異方性板の場合

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_y \frac{\sigma_y}{E_y}, \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_x \frac{\sigma_x}{E_x}, \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}$$

が成立する。これをマトリックス表示すると

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [S] \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$S_{11} = \frac{1}{E_x}, S_{12} = \frac{\nu_y}{E_y} = \frac{\nu_x}{E_x} = S_{21}, S_{22} = \frac{1}{E_y}, S_{66} = \frac{1}{G_{xy}}$$

となる。X軸から θ だけ傾いたLT座標を考えると、

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos^2 \theta & \sin^2 \theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{pmatrix} \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{pmatrix} \cdots \cdots \textcircled{3}$$

が成立する。

積層板のXY座標とそれぞれの層の座標軸のなす角 θ が異なるn層の積層板を考える（各層→LT座標）。層どうしの接着が完全であるとすると、②式の関係は各層で成立するが、③式は各層の応力の足し合わせとなる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i [T]_i \begin{pmatrix} \sigma_L \\ \sigma_T \\ \tau_{LT} \end{pmatrix}_i \cdots \cdots \textcircled{4}$$

α_i ：各層の断面比率

i層についても①式は成立するので、④式は次のように変形できる。

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i [T]_i [s]_i^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LT} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i [T]_i [s]_i^{-1} [T]_i^{-1} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \cdots \cdots \textcircled{5}$$

$[s]_i$ ：各層の物性を表すマトリックス

①式と⑤式より

$$[S] = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i [T]_i [s]_i^{-1} [T]_i^{-1} \right]^{-1}$$

となる。

※CFRPパイプを構成するCFRPの物性値を計算するにあたり、各層の物性値に一方炭素繊維シートに樹脂を含浸させたもの（プリプレグ）のカタログデータを用いた。

炭素繊維：PAN系炭素繊維（高強度系）

樹脂：エポキシ樹脂

$$V_f = 60\%, E_L = 140 \text{ GPa}, E_T = 8.90 \text{ GPa}, G_{LT} = 4.90 \text{ GPa},$$

$$\nu_L = 0.340, \nu_T = 0.022$$

※CFRPパイプの積層構成については、1種類の繊維配向を1層と考え、計4層を以下の断面比率で計算した。

$$+3^\circ : -3^\circ : +85^\circ : -85^\circ = 37.5\% : 37.5\% : 12.5\% : 12.5\%$$

結果は以下のように計算される。

$$E_x = 107.5 \text{ GPa}, E_y = 41.4 \text{ GPa}, G_{xy} = 5.95 \text{ GPa}, \nu_x = 0.086, \nu_y = 0.033$$

(2000年7月10日原稿受理，2000年11月21日採用決定)