

角形断面を有する炭素繊維強化プラスチック管部材の強度特性に関する実験的研究

小野紘一¹・杉浦邦征²・大島義信³・三木亮二⁴・小牧秀之⁵

¹正会員 Ph.D. 京都大学教授 国際融合創造センター融合部門(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²正会員 Ph.D. 京都大学大学院助教授 工学研究科土木システム工学専攻(同上)

³学生会員 工修 京都大学大学院博士課程 工学研究科土木システム工学専攻(同上)

⁴学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科土木システム工学専攻(同上)

⁵正会員 工修 日石三菱(株)中央技術研究所研究員 複合材料グループ(〒231-0815 横浜市中区千鳥町八番地)

本論文では、炭素繊維強化プラスチック材(CFRP)の構造部材への適用性を検討することを目的とする。角形断面を有する CFRP 管部材の基本物性、強度特性ならびに破壊性状を把握するために引張試験、圧縮試験、曲げ試験を実施した。炭素繊維の配置方向および積層厚を変えて、5種類の積層構造について検討した。本載荷実験により、CFRP 部材は、引張応力下では十分な強度および剛性を有するものの、圧縮応力下では材料本来の強度を発揮できない場合もあり、薄肉鋼構造と同様に適切な補剛構造とする必要がある。一方で、構造体としての品質確保のため、規格の整備ならびに標準試験法の確立を早急に進める必要がある。

Key Words: carbon fiber reinforced polymers, strength, compression, tension, bending, buckling

1. 概要

繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Polymers: 以下 FRP と略す) は、耐久性に優れ、また軽量かつ高強度であり、宇宙航空構造物、自動車などに広く用いられている。また、小型タンク、圧力容器、配管、さらには各種機材の収納箱、遊具等の素材としてその需要は飛躍的に伸びてきている。しかしながら、我が国の土木・建築構造物においては、これまで補修・補強材としての利用が中心であり、2000年に供用開始された小スパンの歩道橋建設において初めて大型構造物の主構造材料として活用された¹⁾。一方で、建設資材としては、年間約30万トンの使用実績があるが、その多くは、バスユニット、窓枠、家具、外壁等として使用されているのが現状である。

社会基盤構造物の整備においても、FRP 本来の優れた特性を十分に活かすことができれば、一般構造部材として利用できるだけでなく、新たな構造形態の創造に役立てることが可能と考えられる。特に、高い重量比強度の観点から、架設時に大型の重機を

必要とせず、工期の短縮が可能となり、架設費用を大幅に削減することが出来ると考えられる。また、塩害が問題となる海浜地区での社会基盤施設の耐久性向上には、おおいに貢献できると考えられる。このように、現有の構造材料である鋼、コンクリートにかわり FRP を主な構造材料として利用することで、もしくはこれらの構造材料を有効にハイブリッド使用することができるならば、今後の社会基盤整備における設計、施工の合理化や、省力化が一層可能となると考えられる。

現在、FRP として主に用いられているのは、ガラス繊維を用いた GFRP と炭素繊維を用いた CFRP である。アラミド繊維を用いた FRP も使われ始めている。表-1に、現時点での主な既存の構造材料と FRP 系の材料の強度、弾性係数、重量、価格の比較結果を示す。なお、特性値には幅があるので、代表的な数値、もしくは規格値を示す。ここで、価格差の優劣は、明確であるが、単位強度当たりの価格、単位重量当たりの価格においては、その差が大幅に縮小されることがわかる。価格差が比較的小さい GFRP は欧米を中心として既に多くの土木・建築構造物の

表-1 代表的な構造材料の性能比較

材料	基準強度	弾性係数	密度	価格*
	MPa	GPa		円/kg
鉄筋コンクリート	24	20	2.5	6
鉄鋼(SS400)	400	200	7.9	40
アルミ合金(2024-T4)	470	70	2.7	600
チタン合金(6-6-2Ti)	1,176	127	4.6	3,000
GFRP	750	38	1.5	1,000
CFRP	2,300	240	1.6	16,000

*2002年1月時点での市場調査(マカヒリツ)に基づく

建設に使用されている²⁾。一方、価格差の大きなCFRPは、GFRPより高性能であるが、現在のところ補強・補修材としての利用が主で、その優れた特性は十分活かされていない。しかし、これらのFRP系材料を社会基盤構造物に適用するには、宇宙航空構造物には見られない構造安定の観点からの厚肉FRP構造の挙動の解明、これまで引張材としての活用が主であったため鋼構造に代表されるような薄肉構造特有の圧縮応力下における座屈破壊に対する安全性の検討が不可欠である。

そこで、本論文では、GFRPより高剛性、高強度であり、構造形態を劇的に変化させる可能性の高いCFRPを取り上げ、その構造部材としての実用化に際して不可欠な基本的な物性値、破壊形態を解明することを目的とする。引張試験、圧縮試験、曲げ試験を順次行い、特に、大型構造物への適用に際しての厚肉化の影響、すなわち積層数の弾性係数、強度への影響について実験的に検討を行い、構造設計に不可欠な基礎理論の適用性などについても別途考察を加えた。

2. 実験概要

(1) 供試体の製作

a) 製造方法

載荷実験で用いた供試体は、シートワインディング成形法によって製作した。製造工程としてはまず、炭素繊維を所定の目付け量となるように一方向に並べ、所定量の130℃熱硬化型エポキシ樹脂を含浸させたシートをつくる。これをプリプレグというが、今回用いたプリプレグは炭素繊維の目付けで125g/m²、樹脂量33wt%にしたがい製作した。なお、このプリプレグによる一方向炭素繊維を有するCFRPの物性値を表-2に示す。

次に、所定の形状の角型マンドレル(芯金)に、切

表-2 CFRPの物性値(単位: N/mm²)

引張	繊維方向	強度	2,550
		弾性係数	135,000
	繊維直角方向	強度	69
		弾性係数	8.5
圧縮	繊維方向	強度	1,470
	繊維直角方向	強度	69*

*引張時の特性に準ずる

り出したプリプレグを1層ずつ手作業で丁寧に巻きつける。この際、炭素繊維の方向が部材軸方向と一致する層は、シート端を突き合わせて巻き立てる。また、炭素繊維の方向が部材軸直角方向と一致する層においては、10mmの重ね部をもうけ、部材軸直角方向の炭素繊維の連続性を確保した。また、各層の重ね部は千鳥に配列し、断面内に特定の弱点を設けないよう配慮した。こうしてできた積層構造体に所定の形状の外枠をかぶせ、中は真空に引き、外側からは0.588N/mm²で加圧しながら130℃で加熱し樹脂を硬化させる製法を用いた。これにより、供試体内部にある微量の空気を極限まで取り除くことができ、均一な成形体とすることができる。冷却後、外枠をはずし、マンドレルを引き抜き装置によって抜くことで角形断面を有するCFRP管部材が完成する。

b) 供試体の諸元

供試体は、圧延成形の鋼部材との比較を容易とするように、またねじり剛性の高い中空角形断面部材を対象とする。したがって、CFRP製の角形管の破壊性状を検討するため、5種類の積層構造を用意した。供試体一覧を表-3に示す。

供試体は炭素繊維の配列法の違いによりAタイプ、Cタイプの2種類があり、Aタイプは炭素繊維が部材軸方向(0°方向)のみに存在するものであり、Cタイプは部材軸方向に炭素繊維を有する層(コア層と呼ぶ)の外内の両面から部材軸直角方向(90°方向)の炭素繊維を有する層を巻き立てたもの(比率は部材軸直角方向が2割、部材軸方向が8割)である。ここで、表-2から分かるようにCFRPは、異方性材料であり、炭素繊維方向に直角な方向の弾性係数、強度等の物性値は、炭素繊維方向のそれらに比して無視できるほど小さい。一方で、角形断面の隅角部で部材軸方向に亀裂を生じて破断させないために必要な材料強度が不明であるので、部材軸方向のみに炭素繊維を有するAタイプとの比較の目的で、部材軸直角方向に炭素繊維を有する層を、全積層数の20%としたCタイプを設定した。また、部材軸方向の炭素繊維を有する層が、弾性係数、強度に大きく

影響を与えるため、本論文では、このコア層を有効積層と定義し、その層数を供試体名の表記に用いた。例えば、C-16は、部材軸方向と部材軸直角方向に炭素繊維を有する層が存在するが、部材軸方向の層数が16層、部材軸直角方向の層数は16層の1/4で4層（内側2層、外側2層）という供試体である。なお、1層あたりの層厚は約0.125mmであり、有効積層厚に対する部材断面構成板の幅厚比パラメータ R は、弾塑性座屈を生じると予想される1.0以下、弾性座屈もしくは後座屈強度が期待できるとされる1.0以上の各ケースを設定している³⁾。

(2) 各試験項目

a) 引張試験

幅12.5mm、長さ270mmの板状試験片を用い、各層厚に対して3体ずつ引張試験を行った。供試体の形状を図-1に示す。引張試験の供試体は、曲げ試験、圧縮試験を行う中空の角形断面供試体の1つの板面から板状の片を取り出し、両端にプラスチック板を接着補強し製作した。なお、材料の品質保証のためのJISの試験法⁴⁾にしたがわず、製作した角形断面のCFRP管の物性を把握するために成形体から切り出すことが可能である試験体形状を用いた。

ここで、ひずみの計測位置は、各供試体の両面中央であり、2軸ゲージを用いている。この試験は、弾性係数、ポアソン比、引張強度、引張最大ひずみを評価するために行った。また、試験は載荷速度1mm/minで行った。

b) 圧縮試験

1辺35mm、長さ100mmの中空の角形断面供試体（角部曲率半径 $r=2\text{mm}$ ）を用いて、各層厚に対して2体ずつ圧縮試験を行った。供試体の形状を図-2に示す。なお、事前に載荷試験を行った際、供試体端部が載荷板に食い込みそのまま端部が破壊したことを踏まえて、供試体端部の初期不整等に起因した応力集中による局部破壊を防ぐため、中空断面の内側に厚さ2mmの鉄板をはめ込み、接着し、ダイアフラムとした。また、断面外側からは載荷板に供試体断面と同形状で2mmのくぼみを設け、断面の外への広がりを拘束した。さらに、載荷板への食い込みを抑えるため、載荷板には焼入れを施し、CFRPの高強度に十分対応できるようにした。

ひずみゲージは、供試体の各4面中央に2軸ゲージを、短柱4隅に1軸ゲージを貼り付けるとともに、アムスラー型万能試験機のクロスヘッドに変位計を取り付け、載荷板間の距離の変化を測定し、供試体の縮み量とした。この試験は、弾性係数、ポアソン比、圧縮強度を求めると同時に、座屈などによる破

表-3 供試体一覧（肉厚単位：mm）

供試体名	積層位置	積層数	方向*	積層厚
A-08 (** $R=2.5$)	内側層	0	90°	0.000
	コア層	8	0°	1.000
	外側層	0	90°	0.000
	(合計)	8		1.000
C-08 (** $R=2.5$)	内側層	1	90°	0.125
	コア層	8	0°	1.000
	外側層	1	90°	0.125
	(合計)	10		1.250
C-16 (** $R=1.25$)	内側層	2	90°	0.250
	コア層	16	0°	2.000
	外側層	2	90°	0.250
	(合計)	20		2.500
A-24 (** $R=0.8$)	内側層	0	90°	0.000
	コア層	24	0°	3.000
	外側層	0	90°	0.000
	(合計)	24		3.000
C-24 (** $R=0.8$)	内側層	3	90°	0.375
	コア層	24	0°	3.000
	外側層	3	90°	0.375
	(合計)	30		3.750

*0°：部材軸方向、90°：部材軸直角方向

**設計幅厚比パラメータ（詳細は、3(4)を参照）

壊性状に関する検討を行うため実施した。なお、有効積層厚に対する各板要素の幅厚比パラメータ R は、 $R=2.5$ (A-08, C-08), $R=1.25$ (C-16), $R=0.8$ (A-24, C-24) を設計値として目標とし角形断面の形状を決定した。ただし、幅厚比パラメータは、表-2のCFRPの弾性係数、強度を用い、ポアソン比は0.3を仮定した。

c) 曲げ試験

曲げ試験においても、圧縮試験と同様に、1辺35mm、長さ400mmの中空の角形断面供試体（角部曲率半径 $r=2\text{mm}$ ）に対し、各層厚について2体ずつ載荷試験を行った。曲げ載荷は、4点曲げで行い、支点間は300mm、載荷点は支点の3等分点上にあり、等曲げモーメント区間は中央の100mmである。両方の載荷点下側にたわみを測定するため変位計を設置した。供試体の形状および載荷条件を図-3に示す。

供試体と載荷点および支持点で接触する治具の曲率半径を極力大きくし、さらに、テフロンシートを接触部に挿入することで、集中荷重近傍での応力集中を低減する工夫をした。また、載荷点下での角形断面腹板の局部破壊を防止するために、中空断面内に鉄板（板厚2mm）をはめ込んだ。この試験は、平

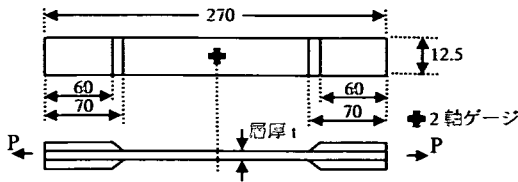


図-1 引張供試体の形状 (単位: mm)

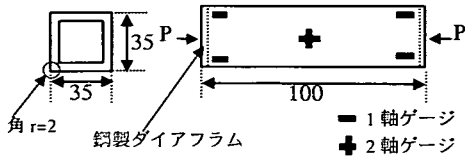


図-2 圧縮供試体の形状 (単位: mm)

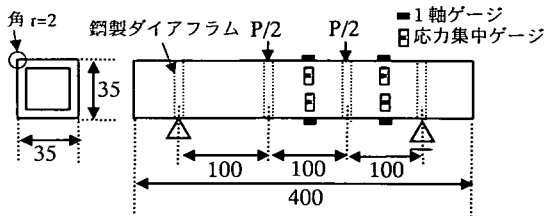


図-3 曲げ供試体の形状と荷重条件 (単位: mm)

面保持の仮定の適用性を検討するとともに、曲げ強度、破壊性状を明らかにするために実施した。なお、ひずみ計測に関しては、腹板には5つの微小なゲージを近接して配置した応力集中計測用のゲージ（以下、応力集中ゲージと呼ぶ）を貼り、上下フランジには、1軸ゲージを貼り、曲げひずみ分布、断面の曲げ曲率の算定に用いた。

3. 試験結果および考察

各試験で得られた結果は、有効断面積（部材軸方向の炭素繊維を有するコア層である有効積層の全層厚に基づき求めた断面積）を用いて算定した応力により整理した。なお、有効積層厚を直接計測することは不可能であるため、全層数に占めるコア層の層数の割合で、全板厚から計算して評価した。

(1) 引張試験結果

引張試験により得られた弾性係数 E_t 、ポアソン比 ν_t 、引張強度 σ_{tu} と有効積層数の関係をそれぞれ図-4～図-6 に示す。引張弾性係数は全ての供試体で $132\sim 146(\text{kN}/\text{mm}^2)$ の範囲に収まり部材軸直角方向の炭素繊維を有する層の有無に関わらずほぼ一定となり、有効積層厚の考え方の妥当性が示された。この

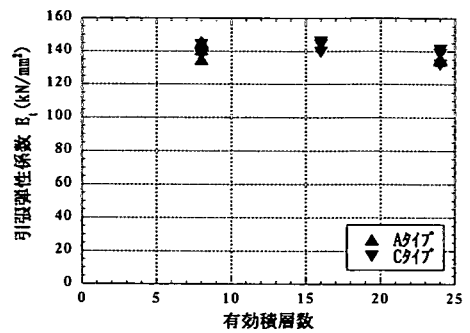


図-4 有効積層数と引張弾性係数の関係

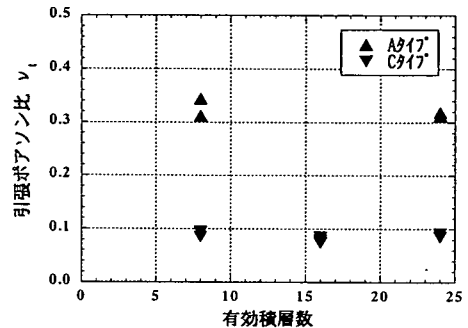


図-5 有効積層数と引張ポアソン比の関係

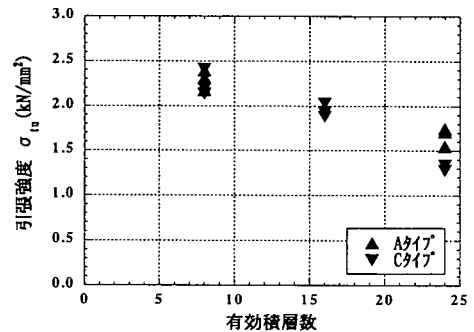


図-6 有効積層数と引張強度の関係

ことは、直交異方性材料に対する複合則の適用からも明らかである。また、ポアソン比については、部材軸方向の炭素繊維のみを有するAタイプにおいては $0.312\sim 0.344$ 、一方で、部材軸直角方向の炭素繊維も含むCタイプにおいては、 $0.074\sim 0.095$ でそれぞれのタイプでほぼ等しくなった。ポアソン比が供試体タイプで異なるのは、部材軸直角方向の炭素繊維がコア層の部材軸直角方向への変形を妨げるためと考えられる。また、引張強度については、部材軸直角方向の炭素繊維を有する層の有無にかかわらず、積層数が大きくなると低下する傾向にある。これは、層厚が増加するにつれて、内部欠損が含まれる可能性

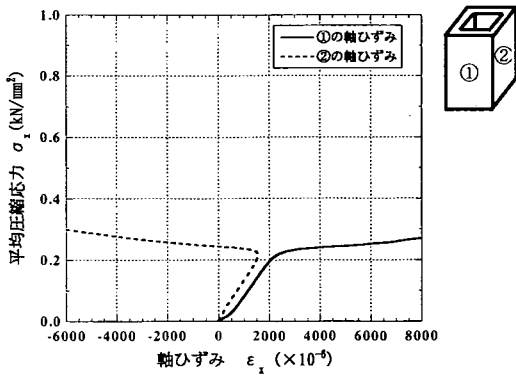


図-7 薄肉断面の平均応力-平均ひずみ関係 (C-08)

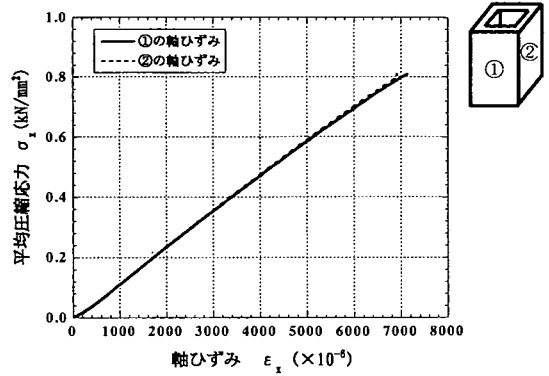


図-8 厚肉断面の平均応力-平均ひずみ関係 (C-24)

が高くなるためや、試験片つかみ部付近で破断したのものもあることから、つかみ部近傍では試験片断面内応力が不均一で、表層部において高い軸応力が発生している可能性があることが挙げられる。特に、厚肉な試験片においては、この応力集中が顕著となるために強度が低下する可能性が高いと考えられる。このことから、弾性的挙動から突然破断に至る FRP 材では、鋼材のような塑性化による応力再分配が期待できず、応力集中が部材強度、ひいては構造物の耐力に大きく影響することがうかがえる。したがって、現行 JIS 試験法で規定されていない 3mm 厚以上の CFRP に対する品質保証のための試験方法、特に、試験体形状および載荷方法等について、今後の検討が望まれる。

(2) 圧縮試験結果

圧縮試験における C-08 および C-24 の平均応力-平均ひずみ曲線を一例としてそれぞれ図-7、図-8 に示す。図-7 より C-08 では、載荷初期の線形な応力-ひずみ関係からある応力レベルに達すると、急激なひずみ増加もしくはひずみの反転が発生していることがわかる。これは、角形断面を構成する隣り合う 2 面の板要素において、①面は外側に、②面は内側に変形する局部変形がある荷重レベルで卓越したためである。層厚が小さく、部材軸直角方向に炭素繊維を有する層が無い供試体 A-08 では、載荷途中で、角形断面の隅角部で断面を構成する板要素が破断し、断面形状を維持できず、4 面がそれぞれ独立して挙動し、C-08 と同様な応力-ひずみ曲線が顕著にあらわれた。一方、図-8 より C-24 では、角形断面を構成する隣接する板要素での平均ひずみはほぼ等しく、破壊までほぼ線形の応力-ひずみ関係を保ちつつ終局状態に至ったことがわかる。

次に、弾性係数 E_c 、ポアソン比 ν_c 、および圧縮強度 σ_{cu} と有効積層数の関係をそれぞれ図-9～図-11 に示す。圧縮弾性係数は、層厚にかかわらず

115~121(kN/mm²)でほぼ一定となり、引張弾性係数の約 90%となった。また、圧縮ポアソン比については、部材軸直角方向の炭素繊維を有する C-08、C-16、C-24 では 0.093~0.129 と引張試験における値と有意な差異が見られない結果となったが、部材軸方向の炭素繊維のみを有する A-08、A-24 では 0.436~0.476 と、引張試験におけるそれと比べると大きくなった。これは、A タイプの部材軸直角方向（繊維方向と直角）の変形が、樹脂の弾性係数に依存し、引張・圧縮のそれぞれの応力下において大きな差異は無いものの、A タイプの部材軸方向（繊維方向と一致）の弾性係数に対しては、圧縮応力下における値が引張応力下におけるそれより小さいためと考えられる。

破壊性状については、A タイプでは中空の角形断面隅角部に沿って縦に亀裂を生じ、断面を構成する各薄板要素が別々に座屈破壊（柱座屈）した。これは、圧縮力を受け、断面外寸が大きくなるようとするが、樹脂の抵抗力だけでは断面形状を維持することができず、隅角部で破壊に至ったと予想される。一方、部材軸直角方向の炭素繊維を有する C-08 では隅角部付近に亀裂は生じず、角形断面を構成する各薄板要素で局部座屈（板座屈）が発生し破壊した。また、厚肉板で構成される C-16、C-24 においては部材端部において圧壊した。これは、板要素が、座屈安定性に対しては十分厚く、弾性局部座屈強度が材料自身の終局強度を大幅に下回らなかったためと考えられる。しかし、供試体の端部の内側に鋼板をはめ込み断面の変形を拘束したにもかかわらず、供試体端部における炭素繊維の含浸樹脂内での座屈や、積層間でのせん断剥離等に起因して破壊した可能性も否定することはできず、強度のばらつきが若干大きいので、試験体数を増やし、今後も継続してデータベースの充実を図る必要がある。

なお、部材軸直角方向に炭素繊維が存在すると圧縮強度が増す傾向を示すが、座屈破壊を起こさな

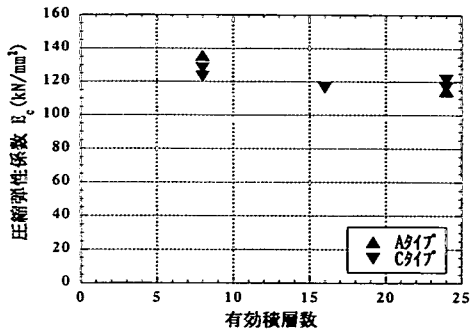


図-9 有効積層数と圧縮弾性係数の関係

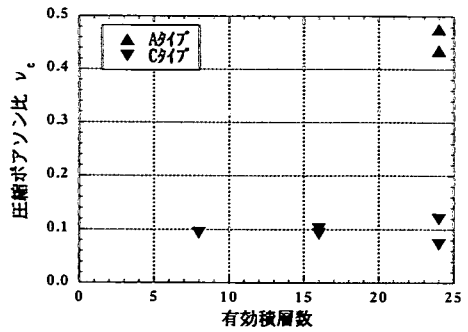


図-10 有効積層数と圧縮ポアソン比の関係

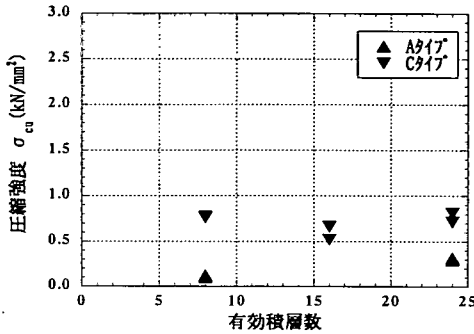


図-11 有効積層数と圧縮強度の関係

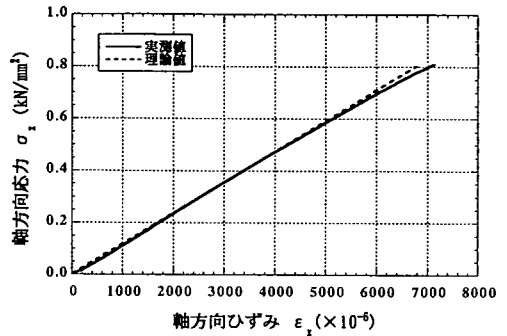


図-12 理論値と実測値を比較した応力-ひずみ曲線

った C-16, C-24 においても、圧縮力下の終局強度が引張力下の終局強度の約 50% と非常に低い値となった。FRP 材は、主に引張部材として活用され、圧縮応力下における強度・変形特性は、十分明らかにされていない。したがって、厚肉化にともなう圧壊のメカニズム、および圧縮下での物性値評価のための試験方法等も含め、今後の検討が望まれる。

(3) 2 方向応力分布に関する検討

部材軸方向に圧縮力が作用した時に、部材軸直角方向に発生する応力を検討するため、各供試体の 4 面の中央に貼付した 2 軸ゲージによるひずみ値を参考に応力評価を行った。1 方向繊維を有する FRP 板を異方性板と考えると、その 2 方向応力-ひずみ関係は次式で与えられる^{5),6)}。ここで、C タイプに対しては、部材軸直角方向の炭素繊維を有する層が存在するが、この層の部材軸方向の弾性係数は、部材軸直角方向の弾性係数に対して十分小さいが、厚さ方向のひずみ分布は均等と仮定し、単純に重ね合わせて求めた。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{1 - \nu_{xy}\nu_{yx}} \begin{bmatrix} E_x & E_x\nu_{yx} \\ E_y\nu_{xy} & E_y \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、上式中の各記号は、下記の通りである。

- σ_x : 繊維軸方向の応力(kN/mm²)
- σ_y : 繊維軸直角方向の応力(kN/mm²)
- E_x : 繊維軸方向の弾性係数(kN/mm)
- E_y : 繊維軸直角方向の弾性係数(kN/mm²)
- ν_{xy} : 繊維軸方向のポアソン比
- ν_{yx} : 繊維軸直角方向のポアソン比
- ε_x : 繊維軸方向のひずみ
- ε_y : 繊維軸直角方向のひずみ

式(1)によって評価した応力状態を、断面形状が破壊荷重まで変化しなかった C-24 に対して計測した平均応力-平均ひずみ曲線をあわせて図-12 に示す。この結果より、部材軸方向の平均応力は、終局時に至るまで測定値と計算値が非常によく一致しており、複合材料に対する単純な複合則の妥当性が明らかである。

次に、部材軸方向の応力を縦軸に部材軸直角方向の応力を横軸に取り、理論値と実験値を比較した結果を図-13 に示す。この図より、破壊時での各面中央部の部材軸直角方向の応力は 0.005(kN/mm²)であり、部材軸方向の応力に比べはるかに小さいことが分かる。しかし、部材軸直角方向の炭素繊維が断面形状を維持することに少なからぬ貢献があり、C タ

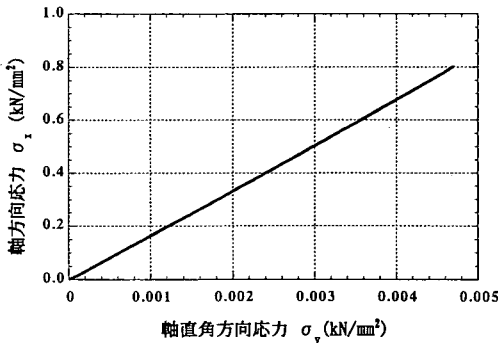


図-13 部材軸方向と部材軸直角方向の応力

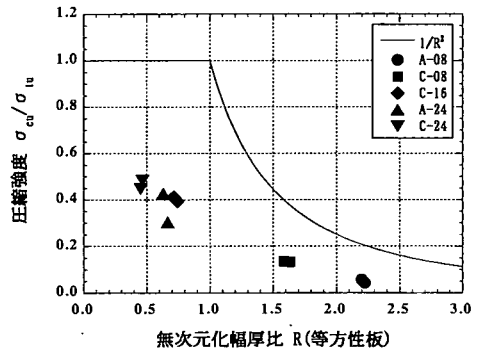


図-14 中空の角形断面供試体の各面を等方性板と仮定した場合の座屈強度評価

表-4 式(2)で対象となる物性値

供試体名	圧縮弾性係数 E_c (kN/mm ²)	圧縮 ポアソン比 ν_c	引張強度 σ_{tu} (kN/mm ²)	
A-08	1-1	135.8	0.456	2.29
	1-2	135.8	0.456	
C-08	2-1	123.0	0.093	1.79
	2-2	126.9	0.093	
C-16	3-1	116.6	0.101	1.56
	3-2	116.4	0.092	
A-24	4-1	114.9	0.436	1.67
	4-2	115.0	0.476	
C-24	5-1	116.8	0.104	1.32
	5-2	121.2	0.129	

イブ試験体では、圧縮強度の改善が見られる。したがって、角部に発生する応力を詳細に検討し、必要な角補強を明らかにする必要がある。

(4) 圧縮強度に関する検討

ここでは、圧縮応力下での座屈強度を検討するために、既存の耐荷力評価曲線等と比較した。まず、圧縮供試体の4面がともに板として挙動していると仮定し、これらが全ての辺で単純支持され、1方向に圧縮力を受けるものとして、板の弾性座屈曲線と比較した。用いた式と値を以下に示す。また、図-14に弾性座屈曲線および実験による測定値を示す。ただし、縦軸には、圧縮強度 σ_{cu} を引張強度 σ_{tu} で除した値を、横軸には以下で定義される板の幅厚比パラメータ R (実測：等方性板と仮定)をとった。

$$R = \frac{b'}{t'} \sqrt{\frac{12(1-\nu_c^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_{tu}}{E_c}} \quad (2)$$

ここで、式中の各記号は下記の通りである。また、

関連する物性値をまとめて表-4に示す。

- b' : 供試体の対象板の有効幅 (mm)
($=b-2t$: b は断面の全幅, t は全積層厚)
- t' : 有効積層厚 (mm)
- ν_c : 圧縮ポアソン比
- k : 座屈係数 ($k=4$)
- E_c : 圧縮弾性係数(kN/mm²)
- σ_{tu} : 引張強度(kN/mm²)

この図-14からわかるように、全ての実験結果が弾性座屈強度曲線を大きく下回った。これは、等方性の板として扱う仮定に矛盾があると同時に、さらに圧縮・引張応力下における材料強度の異方性によるものと考えられる。

一方、中空の角形断面の隅角部に縦亀裂を生じ、座屈破壊したAタイプの破壊形状を参考に、中空の角形断面を構成する4面の薄板を独立した4つの柱により構成されていると考え、軸圧縮力を受ける両端単純支持の等断面圧縮柱であると仮定し耐力を求めた。実験結果を弾性座屈強度と比較し、図-15に示す。なお、縦軸には圧縮強度 σ_{cu} を引張強度 σ_{tu} で除した値、横軸には柱の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ をとった。ただし、細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は、以下で与えられる。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_{tu}}{E_c}} \frac{\ell}{r} \quad (3)$$

ここで、式中の記号は下記の通りである。

- E_c : 圧縮弾性係数 (kN/mm²)
- ℓ : 部材長 ($\ell=100$ mm)
- r : 断面2次半径(mm)

この比較結果からわかるように、実験結果は全て弾性座屈強度曲線の上側に位置した。これは、断面を

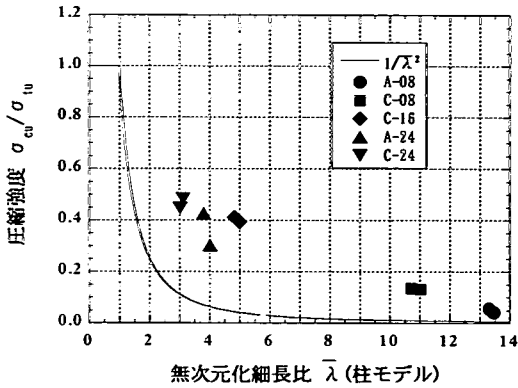


図-15 圧縮供試体の各面を柱と見た時の耐荷力曲線

構成する4面の薄板が隅角部で小さいながら相互に拘束しているとともに、両端での支持条件が単純支持ではなく、弾性回転拘束を受ける等、柱としての等価長さが増えるためと考えられる。

以上から判断すると、積層構造に大きく依存すると考えられるが、CFRPは強い異方性を有する板であることを前提に座屈強度を評価する必要があることを示唆している。これに基づき、板を直交異方性板と仮定した場合の評価結果をまとめて表-5に示す。ここでは、以下の式(4)を用いた⁷⁾。また、Aタイプの E_y には下限値として、樹脂の弾性係数 $3.5(\text{kN/mm}^2)$ を、Cタイプは、部材軸方向に炭素繊維を有する層が8割、部材軸直角方向に炭素繊維を有する層が2割であるため、 E_y には樹脂の弾性係数の80%の値と炭素繊維方向の層の E_x の20%の値を足し合わせた値を用いた。この結果より、等方性の板とし仮定するより、幅厚比が大きい弾性座屈が支配的な領域では実測値と理論値が近づくことが分かる。

$$\sigma_k = \frac{(\sqrt{D_x D_y} + D_{xy}) \frac{2\pi^2}{(b-2t)^2 t}}{\quad} \quad (4)$$

ここで、

$$2D_{xy} = 4(GJ)_{xy} + \nu_{yx} D_x + \nu_{xy} D_y$$

$$D_x = E_x \frac{t^3}{12(1-\nu_{xy}^2)}$$

$$D_y = E_y \frac{t^3}{12(1-\nu_{yx}^2)}$$

$$G = \frac{E_y}{2(1-\nu_{xy})}$$

$$J = \frac{t^3}{12}$$

式中の各記号は、以下の通りである。

表-5 式(4)による座屈強度と実験値の比較

供試体名	座屈強度 σ_k (kN/mm^2)	圧縮強度 σ_{cu} (kN/mm^2)	破壊形態
A-08	1-1	0.070	座屈
	1-2	0.070	
C-08	2-1	0.421	座屈
	2-2	0.432	
C-16	3-1	1.877	圧壊
	3-2	1.874	
A-24	4-1	0.727	座屈
	4-2	0.730	
C-24	5-1	5.014	圧壊
	5-2	5.151	

- σ_k : 圧縮強度 (kN/mm^2)
- E_x : x方向*の弾性係数 (kN/mm^2)
- E_y : y方向**の弾性係数 (kN/mm^2)
- ν_{xy} : x方向*のポアソン比
- ν_{yx} : y方向**のポアソン比
- b : 供試体の幅 (mm)
- t : 有効積層厚 (mm)

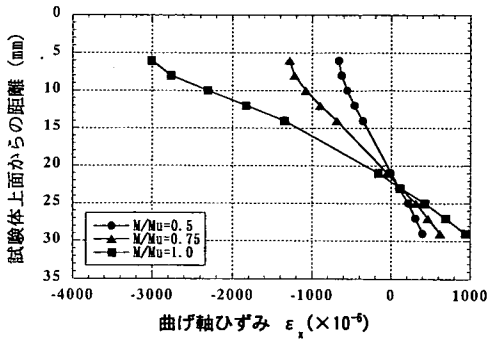
*x方向は部材軸方向

**y方向は部材軸直角方向

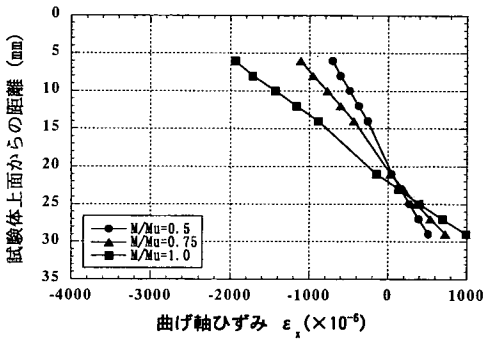
(5) 曲げ試験結果

供試体側面(腹板)に貼った応力集中ゲージおよび上下フランジに貼った1軸ゲージから、断面における軸方向の曲げひずみ分布を求めた。一例として、C-08およびC-24に対して、破壊荷重の50%の時、75%の時、そして破壊荷重時の3段階の荷重レベルの分布形を図-16に示す。この図より、破壊荷重の50%及び、75%の作用荷重時では、軸ひずみ分布はほぼ直線状になっており、平面保持の仮定が成立していることが認められる。また、3(1)および3(2)で示したように圧縮応力および引張応力下での弾性係数がお互いに異なるため、曲げ変形下における中立軸は断面図心位置(上面より17.5mm)とはならず、荷重の増加に伴い断面下方に移動することが曲げ試験結果からも得られた。

次に、部材の曲げ曲率 ϕ は、等曲げモーメント区間において供試体側面(腹板)および上下面に貼り付けたひずみゲージの測定値に基づき、その近似直線から算定した。C-24に対して、算定した曲率 ϕ と部材断面力である曲げモーメント M を関係付けた曲線を図-17に示す。これにより、最大耐力の約65%



(a) C-08



(b) C-24

図-16 軸方向曲げひずみ分布性状

の荷重レベルまで $M-\phi$ 曲線の線形関係が維持されていることが分かる。

さらに、A-24 および C-24 の作用荷重-たわみ曲線を図-18 に示す。図中の理論値は、微小変形梁理論による式(5)の載荷点たわみを用いた。なお、弾性係数 E に関しては圧縮試験と引張試験から得られた弾性係数を断面の曲げひずみ分布に応じて考慮し、弾性係数の異なる材料で構成された複合断面として等価曲げ剛性 $K=EI_c$ を正しく評価した。この結果、載荷初期におけるたわみ剛性の理論値と実験値がよく一致していることが分かる。

$$\delta = \frac{5}{324} \cdot \frac{PL^3}{K} \quad (5)$$

ただし、式中の各記号は下記の通りである。

- δ : 載荷点でのたわみ量(mm)
- P : 荷重(kN)
- K : 複合断面の等価曲げ剛性 EI_c
- L : スパン長(300mm)

曲げ試験における軸応力の比較結果を表-6 にまとめて示す。曲げ強度の算定には、微小変形梁理論を用いた。部材軸直角方向の炭素繊維を有する層の

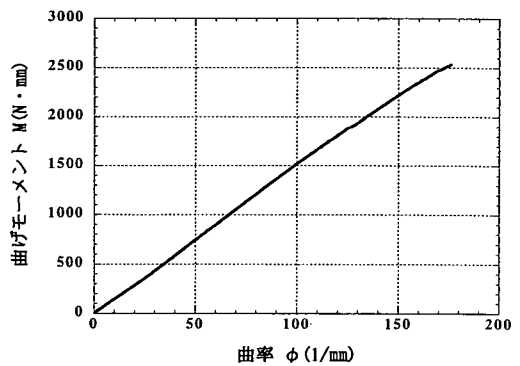
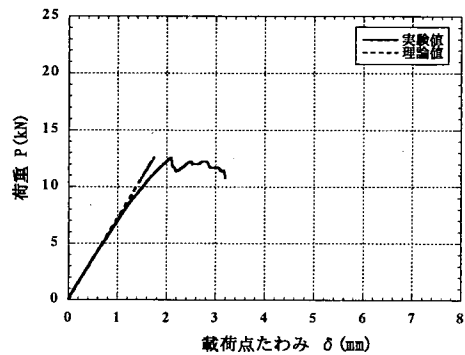
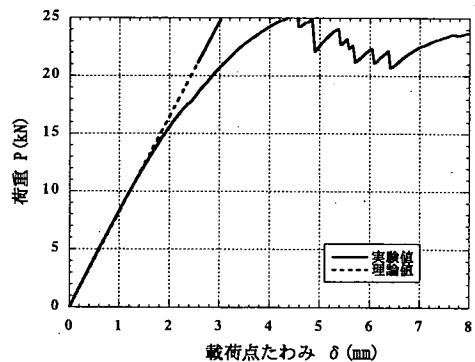


図-17 曲げモーメント-曲率曲線 (C-24)



(a) A-24



(b) C-24

図-18 作用荷重-たわみ曲線

ないAタイプでは角形断面隅角部による破壊であった。一方、Cタイプにおいては、圧縮側において座屈破壊することが予想されたが、層厚の小さいC-08では、支点近傍での腹板の面内座屈破壊が顕著であった。このことから支点部での腹板の補剛の必要性が考えられる。各供試体の曲げ強度は圧縮試験と同様に予想耐力より下回ったが、鋼構造と同様に支点での破壊を起こさないように適切な補剛・補強を行う必要がある。したがって、十分な補剛が施されれば、引張応力・圧縮応力下における、弾性係数およ

び強度の相対比から、圧縮フランジに発生する応力が梁の曲げ耐力に大きく影響すると考えられる。また、部材軸直角方向に炭素繊維を有する層が存在すると、各層の一体性が増し、曲げ耐力が増加する傾向がうかがえる。

4. 結論

本実験的研究では、角形断面を有する CFRP 管部材に対して、引張試験、圧縮試験、および曲げ試験を行った結果、限られた積層数、積層形態、部材寸法を有する試験体の結果に基づくと、以下の結論が得られた。

①引張試験

- ・ 引張強度は、1.6~2.4(kN/mm²)となった。
- ・ 強い異方性を有する CFRP においては、積層構造に関わらず、部材軸方向の炭素繊維を有する層のみによる有効断面積を用いることで、等しい引張弾性係数が得られた。
- ・ 一方で、部材軸直角方向に炭素繊維を有する層の有無によって引張ポアソン比は異なる。ただし、積層数の影響は受けなかった。
- ・ 引張強度は、積層数が大きくなると減少する傾向にあった。

②圧縮試験

- ・ 圧縮弾性係数、圧縮ポアソン比に関しては、引張荷重下での特性と一致した。ただし、弾性係数は、約 90%に低減し、それにともないポアソン比は、微増した。
- ・ 圧縮強度は、最大で 0.7~0.8(kN/mm²)となり、引張強度に対して約 50%と強度の異方性が認められた。
- ・ 部材軸直角方向の炭素繊維を有する層が断面隅角部の補強につながると同時に、強度の向上に貢献することが確認された。
- ・ 薄肉鋼構造と同様に集中荷重等に対しては、局部的な応力集中を緩和するためにもダイアフラムを設置するなど、適切な補剛構造を検討する必要がある。
- ・ 座屈強度評価においても、断面を構成する板要素を直交異方性を有する板としてとらえることで、座屈崩壊時の圧縮強度の実測値は、理論値に近づくことが分かった。

③曲げ試験

- ・ 曲げによる軸方向ひずみ分布から平面保持の仮定が成立つことがわかった。中立軸は、断面図心

表-6 曲げ試験結果

供試体名	最大曲げ応力 (kN/mm ²)	圧縮強度 σ_{cr} (kN/mm ²)	引張強度 σ_{ts} (kN/mm ²)	
A-08	1-1	*0.131/**0.124	0.113	2.290
	1-2	*0.109/**0.107		
C-08	2-1	*0.446/**0.238	0.310	1.790
	2-2	*0.459/**0.249		
C-16	3-1	*0.393/**0.329	0.766	1.560
	3-2	*0.132/**0.180		
A-24	4-1	*0.167/**0.136	0.590	1.670
	4-2	*0.176/**0.174		
C-24	5-1	*0.319/**0.241	0.763	1.320
	5-2	*0.425/**0.378		

* 圧縮曲げ応力/**引張曲げ応力 (応力集中ゲージの値からフランジ表面のひずみを外挿し、それぞれの弾性係数をかけて応力に変換)

- 位置より下方にあり、曲げモーメントが大きくなるにしたがい下方に移動した。これは、圧縮弾性係数が、引張弾性係数より小さいことによる。
- ・ 曲げ強度は、最大でも 0.7~0.8(kN/mm²)となり、圧縮フランジの強度特性および断面角部、ウェブの破壊性状に依存する結果となった。
- ・ 引張試験、圧縮試験の両方から得られた弾性係数を基に算定した等価曲げ剛性を用いると、初期たわみ剛性の理論値と実測値が非常に良く一致することが分かった。

したがって、これらの基礎的実験から共通して言えることは、下記の通りである。

- ・ 部材軸直角方向の炭素繊維を有する層により部材断面形状が維持されることで断面隅角部の応力集中に対する抵抗力を向上させ、圧縮強度や曲げ強度を引張強度相当に改善する必要がある。
- ・ 優れた引張強度に反して、圧縮強度の低下は避けられないため、圧縮応力下における構造詳細は、座屈防止等に対する十分な補剛対策への配慮が必要である。

一方、今後の課題として以下の事項が挙げられる。

- ・ 圧縮試験、および曲げ試験は、その載荷方法や、支持条件によって局部的な破壊が生じる可能性があり、評価の信頼性を確保するためにも構造体としての標準的な試験方法を確立する必要がある。
- ・ CFRP を構成する様々の要素の物性値を用いて有限要素解析することで、実験で得られた最大荷重や破壊性状と、どの程度一致するのかより詳細な検討が望まれる。

- これらのデータ蓄積を積極的に進め、材料特性、断面形状、寸法等の規格化を早急に整備する必要がある。

参考文献

- 1) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和男: 沖縄ロードパーク歩道橋の設計, 第1回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.103-106, 2000.1.
- 2) 建設省土木研究所: 繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書(1), pp.5-7, 1998.10.
- 3) 土木学会: 鋼構造シリーズ2・座屈設計ガイドライン, pp.161-191, 1987.
- 4) 日本規格協会: JIS ハンドブックープラスチック試験ーK7073, pp.1040-1043, 2002.
- 5) 座古勝, 松本金矢: 複合材料の挙動解析, 朝倉書店, pp.13-15, 1998.3.
- 6) 強化プラスチック協会: FRP 構造設計便覧, pp.119-120, 技報堂出版, 1994.9.
- 7) Column Research Committee of Japan: *Handbook of Structural Stability*, pp.3-66, Corona Publishing Company, Ltd., 1971.3.

(2002. 1. 15 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF FIBER REINFORCED POLYMER HOLLOW RECTANGULAR STRUCTURAL MEMBERS

Koichi ONO, Kunitomo SUGIURA, Yoshinobu OHSHIMA,
Ryoji MIKI and Hideyuki KOMAKI

The objective of this study is to assess the applicability of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) to a structural member. Three basic tests to assess tensile, compressive, and bending strength are carried out on the hollow rectangular CFRP structural members. In this series of experiments, 5 types of specimens, which had different thickness and direction of carbon fibers are tested. As a result, it is found that the elastic modulus and the strength in compression were less than those in tension, so that the proper stiffening may be necessary for thin CFRP elements in compression. Furthermore, it is also obtained that the tensile strength has tendency to decrease as the number of lamina increases. For the further research, the development of the production process with cost efficiency, quality evaluation method, and design method must be made in order to promote CFRP materials in structural engineering.