

ブレーディング成形法によるH形断面CFRP部材の 圧縮・曲げ強度特性に関する実験的研究

Experimental Study on Compressive and Bending Strength of H-section of Carbon Fiber Reinforced Polymer
Structural Members Fabricated by Braiding Method

小野 紘一* 杉浦 邦征** 北川 淳一*** 小牧 秀之**** 林 誠*****

Koichi ONO, Kunitomo SUGIURA, Jun-ichi KITAGAWA, Hideyuki KOMAKI, and Makoto HAYASHI

*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)

**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)

***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)

**** Msc., 新日本石油(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)

*****村田機械(株) 繊維機械事業部ブレイダー企画部 (〒612-8686 京都市伏見区竹田向代町 136)

The objective of this study is to assess the applicability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) fabricated by Braiding method as a structural member. Two basic tests to assess compressive and bending strength are carried out on H-section CFRP structural members, where 4 types of specimens varying fibers and fabrication methods are tested. As a result, it is found that the CFRP members fabricated by Braiding method have attractive strength characteristics as good as those fabricated by sheet winding method have, if special care and condition are given. Moreover, the hybrid use of carbon fibers with glass fibers only in the direction of 45° does not affect the overall stiffness and strength, but can contribute the cost reduction. Therefore, the optimization of fiber direction and its volume ratio may be necessary to be further studied in order to promote CFRP materials in structural engineering.

Key Words: Carbon fiber reinforced polymer, compression, bending, buckling, Braiding method

1. 概要¹⁾

約60年前、ガラス繊維を用いた繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Polymer, 以下 GFRP と略す) が開発され、その強さ、軽さ、耐久性に優れていることから夢のような材料として脚光を浴びた。その後、1960年代の宇宙開発競争の激化とともに高強度軽量材料に対する要求が高まり、炭素繊維を用いた繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下 CFRP と略す) が実用化された。

これまで GFRP 及び CFRP などの繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Polymer: 以下 FRP と略す) は、航空機用材料としての実用が主であった。しかし、今日では、複合材料及び複合材料を用いた構造体の挙動解析法^{2), 3)}が開発され、広く普及したことにより、航空・宇宙関係をはじめ、舟艇・船舶、自動車・車両、タンク・容器、住宅資材など様々な分野でその需要が増大している。

このような状況下、土木・建築構造物においても FRP

が構造材料等として使われるようになってきたが、これまでの補修・補強材としての利用から主構造材料としての活用へと徐々に展開している。特に FRP の特性を十分に活かすことができれば既存の構造部材の材料の代替として利用できるだけでなく、新たな構造形態を模索することも可能になると考えられる。さらに、大型の社会基盤構造物において、大幅な重量軽減により架設時に大型の重機を必要とせず、しかも工期の短縮が可能であり、架設費用を大幅に削減することが出来ると考えられる。近い将来、世界一の高齢化社会になると予想されるわが国において、建設業界においても建設労働者の高齢化、熟練労働者の不足という問題を抱えており、現有の構造材料である鋼、コンクリートにかわり FRP を構造材料として利用することは、今後の建設工事における施工の合理化や、省力化の観点から期待される技術開発と考えられる。

GFRP は欧米を中心として既に数十の土木構造物、特に人道橋の建設に使用されている⁴⁾。しかし、近年著しく

研究・開発が進み、先端複合材料として注目されているのがCFRPである。CFRPは、GFRPより高強度かつ高剛性でありながら、高価な材料であるため、現在のところ補強・補修材としての限定的な利用しかなされておらずその特性を十分活かしてきていないと考えられる。

著者ら⁵⁾は、シートワインディング法(以下SW法と略す)により成形されたCFRP中空角柱部材の強度特性に関する実験的評価を行った。ここでは、圧縮力下における層間剥離、樹脂内での繊維の座屈等の発生により材料本来の強度に達する前に終局状態に達するため、十分な強度が得られなかったと報告している。しかし、SW法によるFRPの積層構造からすれば当然で、層と層はおもに樹脂の接着力のみで一体化され、層間破壊等には高強度繊維がほとんど貢献しないためである。

そこで、本研究では、FRP部材の接合部における孔の影響、切欠きの影響および早期の層間剥離等に対する抵抗力を改善する方策として、3次元的に繊維を編み込むブレイディング法(以下BR法と略す)と呼ばれる組物作製法によるH形断面CFRP部材の成形法の実用性について検討した。また、FRP系の材料の特徴として引張には強いが、圧縮に弱いことが挙げられる。特に、CFRPでは繊維の素材自身の圧縮強度が、引張強度を大幅に下回るので、CFRPとしての圧縮強度もできる限りその低減を抑えることが必要と考えられている。このようなCFRPを社会基盤構造物に適用するために、成形法の検討に加えて、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り、圧縮試験、曲げ試験により実用化に際して不可欠な基本的な物性値の把握、破壊形態の解明を本研究の目的とした。

2. 実験概要

2.1 供試体

(1) 供試体の成形法

FRPは他の工業材料と異なり、素材から製品までを一つの流れの中で造ることのできる材料である。したがって、成形に際しては、ただ素材から製品にするだけでなく、その工程に必ず製品設計といったデザインの問題が介入する。そのためFRP成形法も製品の形状や要求性能に応じて様々な成形方法が開発され、実用化されている。FRPの主な成形法¹⁾とその特徴を表-1に示す。一般に、適切な材料設計がなされても、作り方が適切でなければ、必要とする材料性能や製品機能、経済性を獲得することは難しいと考えられる。

本研究で着目したBR法とは日本古来の組物技術を利用した成形法である。組物は斜めの繊維と長手方向(軸方向)の繊維により構成される。組物の斜めの繊維を「組糸」と呼び、長手方向に対して $\pm\theta$ の角度で配向している。この角度は組角度と呼ばれる。一方、長手方向の繊維は「中央糸」と呼ばれる。組物ではあらゆる糸を互いに交錯

しながら斜めに走って組物を構成していく。このため負荷に対して全ての糸が荷重を負担することになる。FRPは一般に異方性を有するが、配向角の異なる層の積層構成によっては近似的に等方性化することが可能であるが、本研究で用いた供試体では、組角度 $0^\circ/\pm 45^\circ$ に繊維を編みこむことで、一般的な組形態を対象に検討を行った。

なおBR法では、あらかじめ樹脂を含浸させた繊維の束を円柱形状の心材に巻きつけながら3次元的に編みこんでいくが、この編みこみ工程は機械化が可能であり、特に、組み方を少し変更するだけで、その形状を大きく変更することができるなど成形性に富んでいる。こうして出来上がった筒状のシートをプレフォームと呼ぶが、このプレフォームの模式図を図-1(a)に示す。このプレフォームを所定の断面形状に成形し金型中にて 130°C で加熱し樹脂を硬化させ、供試体を作製した(図-2を参照)。比較のため、図-1(b)にはハンドレイアップ法による積層構造を示すが、各層の繊維は互いに交差していない点がブレイディングと異なる。

表-1 代表的な成形法とその特徴

特徴 成形法	賦形		生産形態		成形性
	人力	機械	バッチ式	連続式	
HL/SW法	○		単品～少量	(不可)	◎
引抜き法		○		中量～多量	○
FW法		◎	単品～中量	多量	○
BR法		◎		多量	◎

注) HL法(ハンドレイアップ法)

FW法(フィラメントワインディング法)

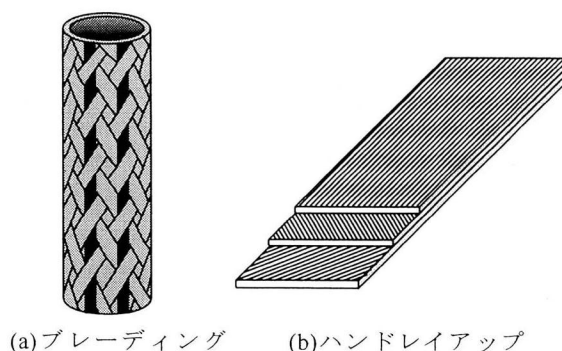


図-1 プレフォーム模式図

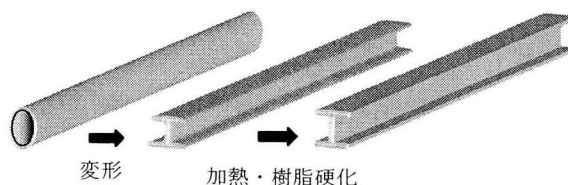


図-2 H形供試体作成過程

(2) 供試体の諸元

本研究で対象とした供試体の一覧を表-2にまとめて示す。230CFは、弾性率230(kN/mm²)の炭素繊維を用いて、BR法により成形された供試体である。CF+GFは、0°方向に弾性率230(kN/mm²)の炭素繊維を、±45°方向には弾性率73(kN/mm²)のガラス繊維を配置してBR法により製作した供試体である。590CFは、弾性率590(kN/mm²)の炭素繊維を用いてBR法により成形された供試体である。そして、比較検討のためSW法によって製作した供試体230SWを用意した。なお、230SWは、炭素繊維の弾性率230(kN/mm²)、繊維含有率、繊維配向角等、成形法以外は全て230CF供試体の製作条件と同じとした。

これら全てのタイプにおいて繊維は0°，±45°の方向に同量ずつ入っており、全繊維の体積含有率は約60%である。また、層数は全てのタイプにおいて6層とした。

表-2 供試体一覧

供試体名	成形法	繊維配向角(°)	繊維含有率(%)	繊維種類	繊維弾性率(kN/mm ²)	弾性係数比E _x /E _y (理論値)
230CF	BR	0	30	CF	230*	3.46
		±45	30			
CF+GF	BR	0	30	CF	230*	5.83
		±45	30	GF	73**	
590CF	BR	0	30	CF	590***	4.38
		±45	30			
230SW	SW	0	30	CF	230*	3.46
		±45	30			

*1方向繊維FRP(繊維含有率60%)の引張強度 $\sigma_{tf}=2550(\text{kN/mm}^2)$

**1方向繊維FRP(繊維含有率60%)の引張強度 $\sigma_{tf}=1960(\text{kN/mm}^2)$

***1方向繊維FRP(繊維含有率60%)の引張強度 $\sigma_{tf}=1080(\text{kN/mm}^2)$

2.2 各試験項目

(1) 圧縮試験

1辺50mm、長さ150mmのH形断面短柱供試体(フランジ・ウェブの隅角部の曲率半径 $r=4\text{mm}$)を用いて、各タイプに対し3体ずつ圧縮試験を行った。図-3に供試体の形状を示す。なお、供試体端部での局部破壊を防ぐため、深さ3mmのH形の溝を彫った鉄板を両端に被せ、接着剤で一体化した後、载荷を行った。

ひずみゲージの貼付け位置は、ウェブの中央に2軸ゲージを、フランジの4隅には1軸ゲージを貼り付けた。また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、载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、圧縮弾性率、圧縮強度を求めると同時に、座屈などによる破壊性状に関する検討を行うため実施した。

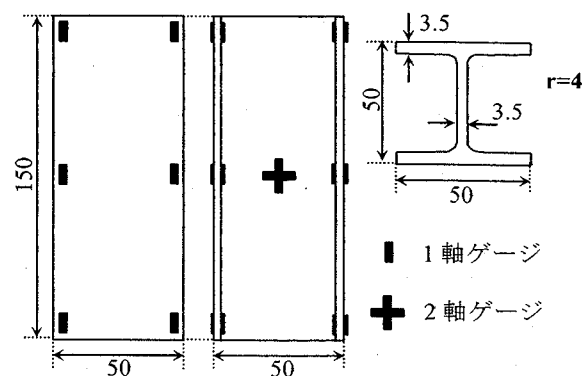


図-3 圧縮供試体の形状 (単位:mm)

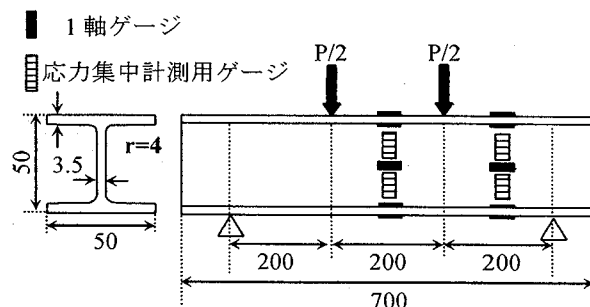


図-4 曲げ供試体の形状 (単位:mm)

(2) 曲げ試験

曲げ試験においても、圧縮試験と同様に、1辺50mm、長さ700mmのH形断面供試体(曲率半径 $r=4\text{mm}$)に対し、各ケースについて3体ずつ試験を行った。曲げ载荷は、4点曲げを行い、支点間は600mm、载荷点は支点間の3等分点上にあり、等曲げモーメント区間は中央の200mmである。左右の载荷部のたわみと中央部のたわみを測定するため、その下側に変位計を設置した。供試体の形状および载荷条件を図-4に示す。

载荷点近傍での応力集中を低減するため、载荷治具の加圧部の曲率半径を大きくし、さらに载荷点および支点でのフランジの局部破壊を防止するために、上下フランジおよびウェブを支持する鉄板(板厚5mm)をはめ込み、接着した。この試験は、平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、曲げひずみ計測に関しては、ウェブに微小なゲージを連ね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

3.1 圧縮試験結果

(1) 圧縮弾性率および圧縮強度

各タイプにおける圧縮弾性率、圧縮強度をそれぞれ図-5、図-6に示す。ただし、棒グラフ及びその数値は各タイプの平均値を表す。なお、圧縮強度は、破壊荷重を単

純に断面積で除したものである。まず、230CF と CF+GF の圧縮弾性率を比較すると、 $\pm 45^\circ$ 方向の繊維の弾性率は部材の軸剛性に大きく影響せず、230CF と 590CF の比較からわかるように、 0° 方向の繊維の弾性率にほぼ比例した軸剛性が得られているのがわかる。

一方、圧縮強度に関して、SW 法により作製された供試体が最も高い圧縮強度を有する結果となった。この理由として、組物構造では繊維が編まれているため、軸方向の繊維が真っ直ぐではなく若干曲がっており、応力伝達効率が低下することが考えられる。すなわち SW 法では繊維が均一に真っ直ぐ成形されているのに対し、BR 法では繊維の束を編むことで隙間や繊維・樹脂の偏りが生じやすく、繊維本来の強度が発揮できない場合もあると考えられる。一方、230CF と CF+GF とでは圧縮強度に大きな差は見られなかった。このことより、 $\pm 45^\circ$ 方向の繊維の強度は、軸方向耐荷力にほとんど寄与しておらず、 $\pm 45^\circ$ にガラス繊維を用いても十分な強度が得られることが分かった。しかし、高弾性率の繊維を用いた場合、圧縮耐荷力が、大幅に低下することがわかった。また図-7 に破壊性状を示す。BR 法による供試体では座屈が発生した部位にのみ亀裂が生じているのに対し、SW 法による供試体では座屈が発生した部位において、周辺部も含めて層間剥離が広い範囲に生じていた。

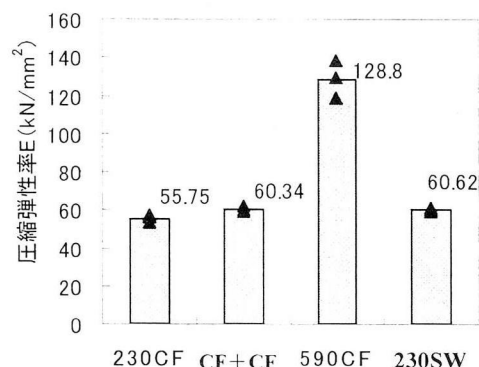


図-5 圧縮弾性率の比較結果

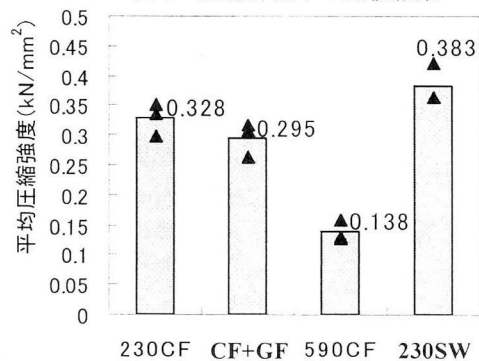
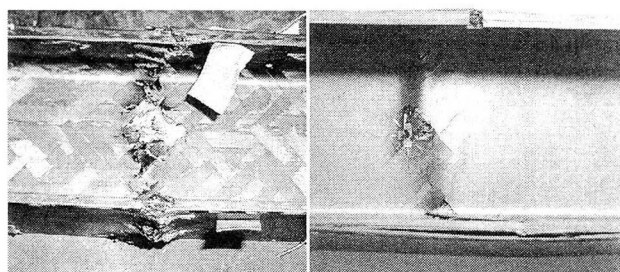


図-6 圧縮強度の比較結果

(2) 応力 - ひずみ関係

各タイプにおける平均圧縮応力 - 平均ひずみ曲線を図-8 に示す。図からわかるように、230CF, CF+GF, 230SW



(a)BR 法による供試体 (b)SW 法による供試体

図-7 圧縮試験における破壊性状

の各供試体では载荷初期から破壊に至るまでほぼ線形の応力 - ひずみ関係を保っていることがわかる。これは、局部的に繊維等の損傷が発生してから、断面全体が破壊に至るまでが極めて短いことを意味している。一方、590CF に関しては载荷初期の線形な応力 - ひずみがある応力レベルに達すると、非線形な応力 - ひずみ関係に移行し破壊に至っていることがわかる。

図-8(a)および図-8(d)より、BR 法による組物構造と SW 法による積層構造とでは、破壊に至るまでの挙動に違いが見られないことが分かる。また図-8(a)および図-8(b)より、破壊に至るまでの挙動に大きな違いも見られず、圧縮強度もほぼ変わらないことから、 $\pm 45^\circ$ 方向の繊維は軸方向耐荷力にはほとんど寄与しておらず、軸方向の繊維の種類（強度）に依存していると結論付けることが妥当である。

(3) 圧縮耐荷力の評価

今回の供試体は異方性を抑制するため 0° 方向及び $\pm 45^\circ$ 方向に繊維を組込んで作製しており、圧縮供試体の座屈強度を検討するにあたり、擬似等方性板として仮定して座屈強度の評価を行った。まず H 形供試体のフランジ部分を、3 辺単純支持 1 辺自由の板として挙動すると仮定し、その時の弾性座屈強度を求め、実験結果と比較した。用いた式と値を以下に示す。 σ_{cu} は圧縮強度、 σ_{tu} は引張強度とした。なお、弾性率の異方性は $E_x/E_y=3.5 \sim 5.8$ であるが、幅厚比パラメータ R (等方性板と仮定) として以下の式を用いた⁷⁾。

$$\frac{\sigma_{cu}}{\sigma_{tu}} = \frac{1}{R^2} \quad (1)$$

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu_c^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_{tu}}{E_c}}$$

b : 供試体の幅 (mm)

t : 板の厚さ (mm)

ν_c : ポアソン比

k : 座屈係数 ($k=0.425$)

E_c : 圧縮弾性率(kN/mm²)

σ_{tu} : 引張強度(kN/mm²)

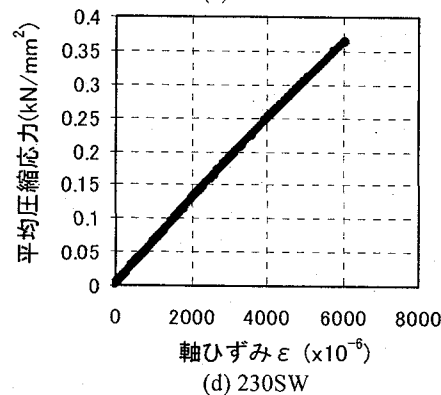
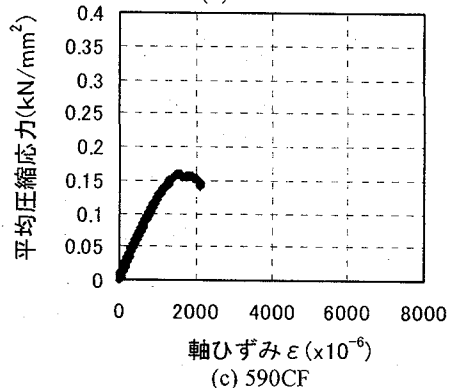
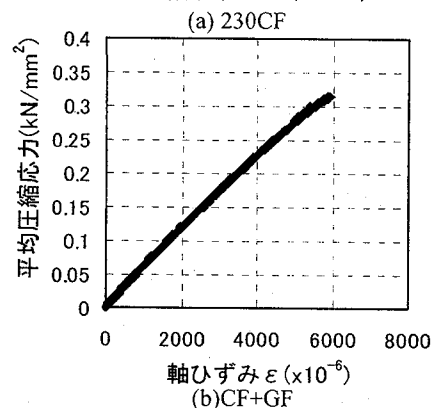
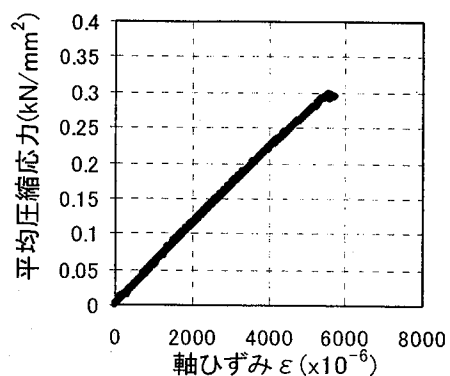


図-8 応力-ひずみ関係

また、H 形断面部材のウェブ部分を、4 辺単純支持の板として挙動すると仮定し、その時の弾性座屈強度を求めた。幅厚比パラメータ R としては式(1)と同じだが、座屈係数として $k=4$ を用いた。図-9、図-10 にそれぞれの場合における弾性座屈強度曲線（式(1)）と実験値の比較結果を示す。これらの図を見ても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、

表-3 式(1)で対象となる物性値

供試体名		E_c (kN/mm ²)	ν_c	σ_{tu} (kN/mm ²)
230CF	(a)	56.26	0.57	0.605
	(b)	57.50	0.57	
	(c)	53.50	0.67	
CF+GF	(a)	61.48	0.51	0.584
	(b)	59.15	0.55	
	(c)	60.02	0.40	
590CF	(a)	129.2	0.78	1.167
	(b)	138.4	0.47	
	(c)	118.8	0.55	
230SW	(a)	59.66	0.67	0.313
	(b)	60.56	0.73	
	(c)	61.64	0.647	

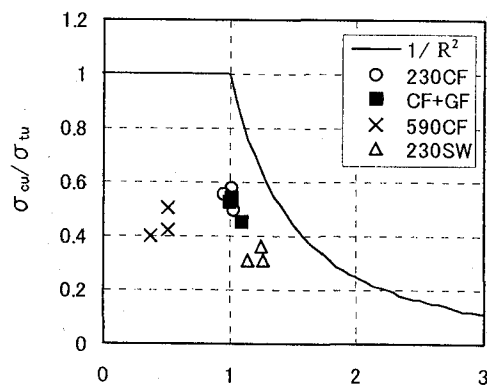


図-9 H 形断面供試体のフランジ突出部を等方性板と仮定した場合の座屈強度評価

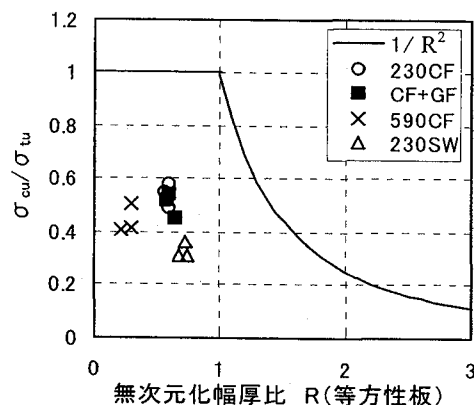


図-10 H 形断面供試体のウェブ部を等方性板と仮定した場合の座屈強度評価

直交 2 方向の弾性率比が 3 程度であっても、等方性の板として扱う仮定が矛盾していることを意味し、すなわち、CFRP 板の座屈評価を行なうときは、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ことが不可欠であると結論付けられる。さらに、すべての実験結果において、幅厚比パラメータ R が小さい場合でも σ_{wl}/σ_{wt} は 1.0 を大きく下回っているのがわかる。これは CFRP 材の圧縮強度が引張強度に対して相対的に低いことを意味し、過去の実験結果とも整合している⁷⁾

3.2 曲げ試験結果

(1) 曲げひずみ分布

供試体ウェブに貼った応力集中計測用ゲージとフランジの一軸ゲージから、断面におけるひずみ分布を求めた。曲げひずみ分布の適用範囲を明確にするため、破壊荷重時、破壊荷重の75%の時、そして50%の時の3段階での分布を評価した。例として、図-11に230CF、230SWにおけるひずみ分布図を示す。

230SWにおいては、破壊荷重の50%及び、75%の時はどのタイプにおいても、ほぼ直線状になっており、平面保持の仮定は成立していることが認められた。しかし、BR法を用いた供試体では上下のフランジで曲げひずみの分布が大きく変動し、平面保持の仮定に基づく線形分布から逸脱する傾向にある。ウェブにおいても若干の変動が見られる。BR法によるH形断面部材では、繊維が板厚方向に若干のうねりがあるため、断面内の軸方向ひずみにおいても局所的な変動が発生しやすいと考えられる。ここで、圧縮側と引張側の弾性率の違いを考慮して、初等梁理論を適用し、H形断面梁の曲げ剛性を算定すると、表-4のようになる。また、表中には、実験で得られた $M-\phi$ 曲線の傾きより、曲げ剛性を評価した結果も比較のために示す。この比較結果から、BR法による供試体の曲げ剛性は、初等梁理論による曲げ剛性によりある程度評価できるが、繊維の弾性率が大きいほど、その精度が低下することがわかる。同様に、SW法による供試体の曲げ剛性に対しても、BR法による供試体のそれに比べて、若干精度が落ちる。これらは、圧縮弾性率と引張弾性率の違いに依存している。

一方、断面の図心は、断面上縁から25mmの位置であるが、実験結果から得られた中立軸は、この図心位置より若干下方に存在する。また、荷重の増加に伴い中立軸が断面下方にさらに移動しているが、これらの結果は、圧縮応力下および引張応力下での弾性率が互いに異なることによるもので、過去の成果とも整合性している⁷⁾。

(2) 曲げ曲率

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ウェブおよびフランジ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。各タイプにおいて、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-11に示す。これらの図によると、230CF、CF+GF、230SWの各供試体においては破壊に至るまで $M-\phi$ 曲線の線形関係がおおむね維持されていることがわかる。しかし、高弾性率を有する炭素

繊維を用いた590CFにおいてのみ、 $M-\phi$ 曲線の傾きが若干ではあるが、載荷初期から少しずつ小さくなっているのがわかる。

表-4 H形断面梁の曲げ剛性 (単位: $\text{kN}\cdot\text{mm}^2$)

	曲げ剛性 (実験値)	曲げ剛性 (初等理論)
230CF*	1.40×10^7	1.22×10^7
CF+GF**	1.38×10^7	1.21×10^7
590GF***	3.31×10^7	2.72×10^7
230SW****	1.65×10^7	1.39×10^7

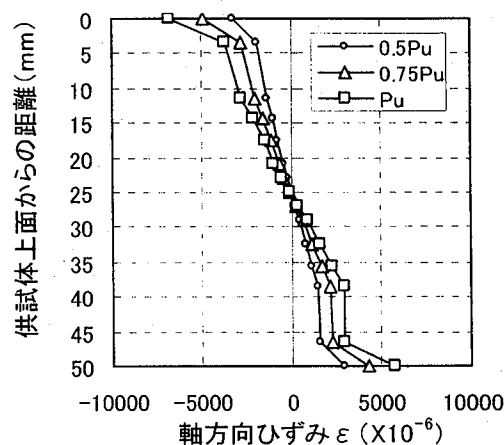
(注) 引張及び圧縮弾性率は実験より測定された以下の値を用いた。なお引張弾性率はH形断面部材のウェブ、フランジ板から幅12.5mmの板を切り出し引張試験を行い評価した。

* $E_t=58.8(\text{kN}/\text{mm}^2)$, $E_c=55.8(\text{kN}/\text{mm}^2)$

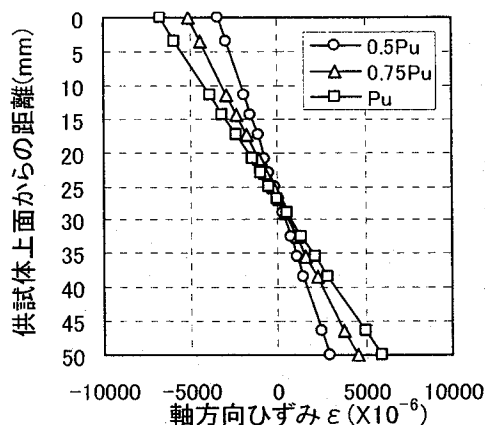
** $E_t=53.9(\text{kN}/\text{mm}^2)$, $E_c=60.2(\text{kN}/\text{mm}^2)$

*** $E_t=127(\text{kN}/\text{mm}^2)$, $E_c=129(\text{kN}/\text{mm}^2)$

**** $E_t=69.8(\text{kN}/\text{mm}^2)$, $E_c=60.7(\text{kN}/\text{mm}^2)$

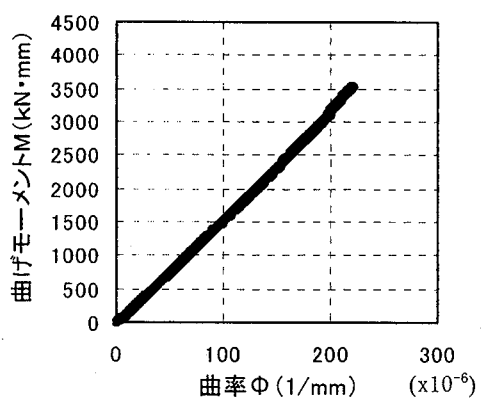


(a) 230CF

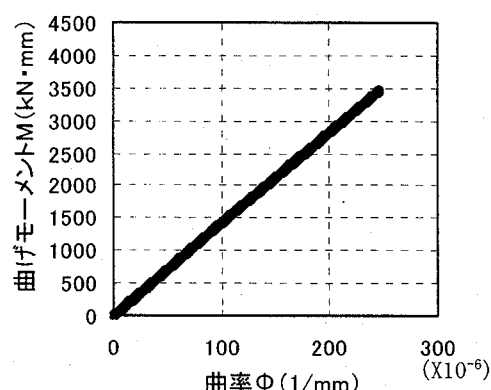


(b) 230SW

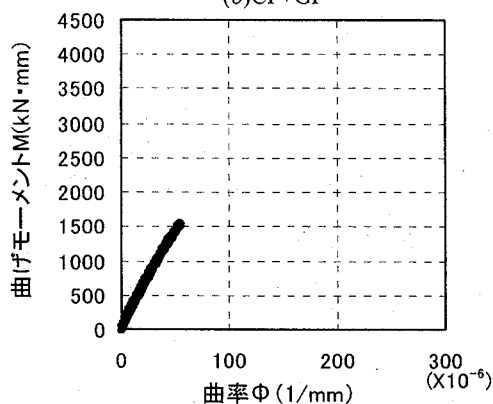
図-11 曲げひずみ分布性状



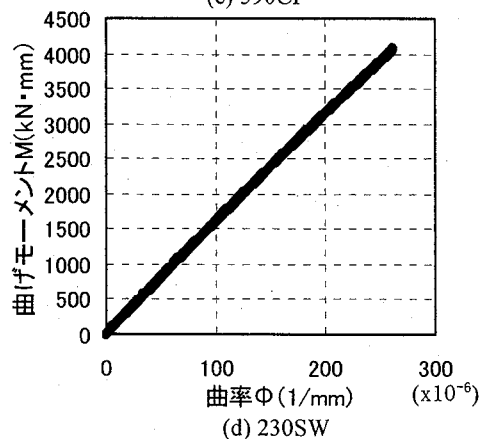
(a) 230CF



(b) CF+GF



(c) 590CF



(d) 230SW

図-12 曲げモーメントー曲率関係

(3) 荷点および中央部のたわみに関する検討

各タイプにおける荷点での荷重－変位曲線をそれぞれ図-12に示す。図中の理論値には、微小変形理論による式(2)の荷点たわみを用いた。ただし、H形断面梁の等価曲げ剛性 K に関しては、圧縮弾性率と引張弾性率の違いを考慮して(表-4を参照)、平面保持の仮定に基づく初等梁理論により求めた K を用いた。

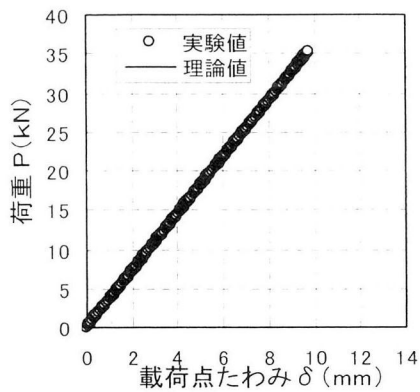
$$\delta = \frac{5Pl^3}{324K} \quad (2)$$

δ : 荷点でのたわみ量(mm)
 P : 荷重(kN)
 K : 等価曲げ剛性(初等梁理論)
 l : 部材長(300mm)

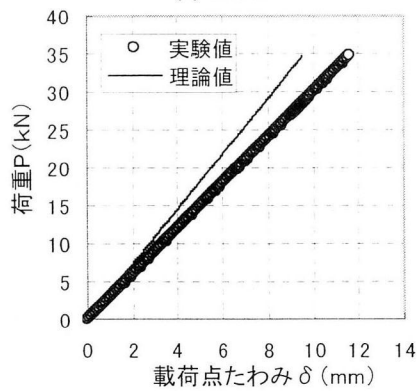
これらの図から、CF+GFを除いて、理論値と実測値が高い精度で一致していることが分かる。しかし、弾性率の低いガラス繊維を±45°に配置したCF+GFに関しては理論値と実測値の差が大きくなっている。微小変形理論の式(2)では、せん断力による変形を無視しているが、せん断変形による付加たわみが無視できない程大きくなったと考えられ、せん断剛性に寄与する±45°方向繊維にガラス繊維を用いたハイブリッドFRPにおいては、せん断変形によるたわみにも配慮して材料設計を検討する必要があると考えられる。

(4) 曲げ破壊性状

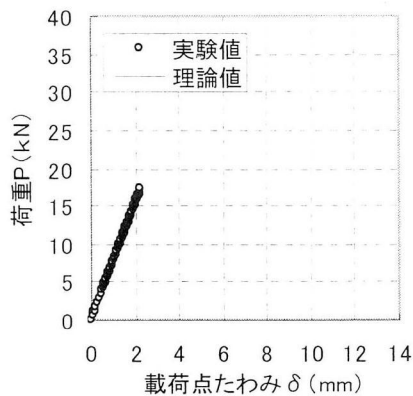
曲げ試験における軸方向応力の比較結果を表-5にまとめて示す。曲げ強度の算定には、ひずみゲージより測定されたひずみに弾性率をかけて応力に変換したものである。この表からわかるようにすべてのタイプにおいて、圧縮側の応力が圧縮強度を越えたところで破壊に至っていることがわかる。実際の曲げ破壊性状は、全てのタイプにおいて、上フランジで圧壊し、高弾性率の炭素繊維を用いた590CFにおいては、ほぼスパン中央部で圧壊し、その他のタイプでは、荷点近傍で圧壊した。その破壊の一例を図-13に示す。図からわかるようにBR法による供試体では圧壊した部分で層間剥離は見られないが、SW法による供試体では圧壊部分から層が剥離しているのが確認された。荷点治具および支持治具は鋼製であり、また鉛直荷重を受ける断面での局所的な破壊を防ぐために取り付けた補強材(垂直補剛材)も鋼製である。このような局所的に剛性が急に大きくなる点では、FRP部材の変形が拘束され応力集中を起こす可能性がある。このような部分は一般にハードスポットと呼ばれるが、ハードスポット点における補剛に関しては、使用材料の弾性率、補剛材としての剛度を考慮して、部材剛性とのバランスに十分な配慮が必要であると言える。



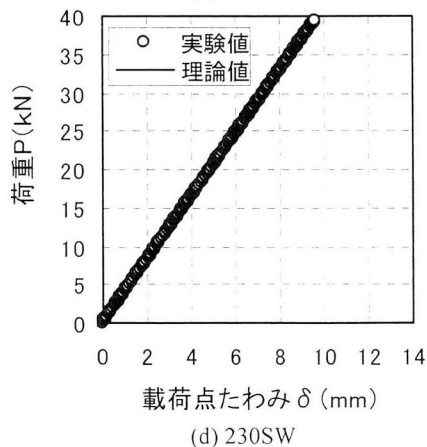
(a) 230CF



(b) CF+GF



(c) 590CF



(d) 230SW

図-13 載荷点における荷重－たわみ関係

表-5 曲げ試験結果

試験体名	最大曲げ応力 (kN/mm^2)	圧縮強度 σ_{cu} (kN/mm^2)	引張強度*** σ_{tu} (kN/mm^2)
○	(a) *0.376/**0.423	0.328	0.605
	(b) *0.362/**0.215		
	(c) *0.380/**0.343		
+	(a) *0.469/**0.331	0.295	0.584
	(b) *0.558/**0.329		
	(c) *0.381/**0.405		
○	(a) *0.442/**0.467	0.138	0.313
	(b) *0.421/**0.419		
	(c) *0.331/**0.351		
○	(a) *0.211/**0.193	0.383	1.167
	(b) *0.196/**0.194		
	(c) *0.237/**0.130		

*圧縮曲げ応力/**引張曲げ応力(ひずみゲージの値にそれぞれの弾性率をかけて応力に変換)

***H断面から幅12.5mmの板材を切り出し引張試験に基づく

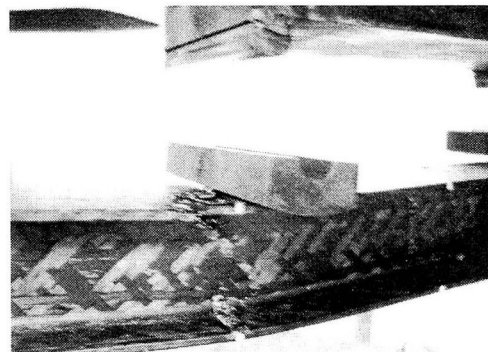


図-14 載荷点での圧壊(230CF)

4. 結論

ブレードニング成形法によるH形断面CFRP部材に対して、圧縮試験、曲げ試験を行った結果、以下の結論が得られた。

①圧縮試験

- 1) 圧縮強度は、230CFでは $0.328(\text{kN/mm}^2)$ 、CF+GFでは $0.295(\text{kN/mm}^2)$ 、230SWでは $0.383(\text{kN/mm}^2)$ となり、成形法及び $\pm 45^\circ$ 方向の繊維の種類による顕著な違いは見られなかった。しかし、繊維の弾性率が大きい590CFの圧縮強度は $0.138(\text{kN/mm}^2)$ と非常に小さく、繊維の基本強度比を参照しても他の3タイプに比べ相対的に非常に小さい値となった。
- 2) 弾性座屈強度を求めたところ、幅厚比パラメータRが小さい場合においても σ_{cu}/σ_m は1.0を大きく下回っており、CFRP材の圧縮強度が相対的に低いことが伺える。

②曲げ試験

- 1) 全タイプの曲げ試験において、上フランジ部での応力が圧縮強度を越えたところで破壊に至り、曲げ耐力は圧縮フランジの強度特性に依存する結果となった。
- 2) 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。しかし、BR 法による供試体では、曲げひずみに若干の変動が発生する。
- 3) 荷重-変位曲線は、引張試験、圧縮試験の両試験から得られた弾性率を考慮して求めた値を用いると、理論値と実測値の初期直線部分が非常に良く一致することが分かった。ただし、 $\pm 45^\circ$ 方向に弾性率の小さいガラス繊維を用いると、梁のせん断変形による付加たわみが過大となるので注意が必要である。

本研究では、BR 法による CFRP 部材の強度特性を評価することを目的としたが、これら圧縮試験および曲げ試験から共通して言えることは、以下の通りである。

- 1) BR 法により成形された CFRP 部材と SW 法により成形された CFRP 部材とでは圧縮耐力、曲げ耐力に関して、それほどの差は見られず、大量生産の可能な BR 法は今後有用な製造方法となり得ると考えられる。
- 2) $\pm 45^\circ$ 方向にガラス繊維を用いた場合の圧縮耐力および曲げ耐力と、すべて炭素繊維を用いた場合の耐力との差は小さい。よって、安価なガラス繊維をバイアス方向に使用し、BR 法により成形された CF+GF のハイブリッド FRP は、さらに実用的な材料であると考えられる。今後は、組系の角度、その配合割合等、一層の研究開発が必要である。ただし、せん断変形に対する配慮が必要である。
- 3) 圧縮試験、曲げ試験ともに局所的な破壊を起こすものが多かったが、局所的に荷重がかかる際には補剛するなど対策が必要である。しかし、補剛する際にもハードスポットをつくらないような工夫が必要である。

今後の課題として以下の事項が挙げられる。

- 1) 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所的な破壊が生じる可能性があり、ばら

つきが少なく、また強度を精度よく評価できる標準的な試験方法を確立する必要がある。

- 2) CFRP を構成する様々の要素の物性値を用いて解析しても、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検討する必要がある。
- 3) どの程度の構造寸法によって一番有効に CFRP を使うことができるのかを、複合材料の挙動解析手法を適用し、検討する必要がある。
- 4) 炭素繊維およびガラス繊維を用いたハイブリッド FRP に関して、ガラス繊維の配向角度、ガラス繊維の含有率をパラメトリックに変化させて、強度的にも価格的にも最適なものを材料設計する必要がある。
- 5) BR 法による FRP の品質向上のために、軸方向にプレストレスを与えた状態で樹脂を硬化させるなどの生産工程の可能性を検討する。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP 入門＜新版＞，pp.126-127，1999.4.
- 2) 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.
- 3) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，pp.119-120，1994.9.
- 4) 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（I），pp.5-7，1998.10.
- 5) 小野紘一，杉浦邦征，大島義信，三木亮二，小牧秀之：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，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.449-459，2002.7.
- 6) 山田聖志，中澤博之：連続引抜成形繊維補強ポリマー接合部の母材破壊性状，構造工学論文集，Vol.43A，土木学会，pp.11-18，2002.3.
- 7) 日本長柱研究委員会：HANDBOOK OF STRUCTURAL STABILITY，pp.3-66，1971.3.

(2002年9月13日受付)