

(42) 炭素繊維強化プラスチック構造部材の性能評価に関する基礎検討

山崎 陽祐¹・内藤 祐大¹・樋口 彰悟¹・間宮 健²・片岡 篤史²・
松井 孝洋³・伊藤 潤一郎⁴・原野 泰典⁵・
瀧内 雄二⁶・中澤 祥二⁶・松本 幸大⁶

¹AIJ正会員 豊橋技術科学大学 大学院 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: {yamazaki.yosuke.cg, naito.yudai.ms, higuchi.shogo.rr}@tut.jp

²東レ・カーボンマジック (〒521-0023 滋賀県米原市三吉215-1)

E-mail: {takeshi.mamiya.b4, atsushi.kataoka.k2}@carbonmagic.toray

³正会員 東レ (〒103-8666 東京都日本橋室町2-1-1)

E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

⁴ AIJ正会員 ARUP Japan (〒102-0071 東京都千代田区富士見飯田橋Grand Bloom 8F)

E-mail: Junichiro.Ito@arup.com

⁵ AIJ正会員 坂茂建築設計 (〒156-0043 東京都世田谷区松原5-2-4)

E-mail: yharano@shigerubanarchitects.com

⁶ AIJ正会員 豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: {y-takiuchi, nakazawa, y-matsum}@ace.tut.ac.jp

現在、FRPを用いた土木構造物の設計事例は年々増えつつあるが、建築分野では前例が少なく、用途で多数見受けられているのは、安価で長寿命化や耐食性によるライフサイクルコストの削減が期待されるGFRPである。一方、CFRPは軽量で高い剛性、弾性を有し、鋼材と同等以上の強度を持つことから、大スパンの建築空間を実現することができる。主要構造材料としてCFRPを使用する場合、寸法の安定性が求められることから引抜やフィラメントワインディング成形等が採用されている。近年、建設分野で応用が進んでいるVaRTM法は、成形性に優れ、高い繊維体積含有率、成形型の表面の成形精度、および、安定した成形品の機械的性質が望めるといった利点を有する。本論文では、外型を用いたVaRTM法により成形したCFRPパイプの力学特性を把握することを目的とし、材料試験を実施した結果について報告する。

Key Words : CFRP, CHS, VaRTM, material test, member strength

1. はじめに

FRP(繊維強化プラスチック)は高強度かつ優れた耐久性・軽量性といった長所を有しており、近年、軽量・高強度なFRP材を用いた建設構造部材の補修・補強法に関する研究が進められ、部材耐力の回復や向上として数多くの実績がある¹⁾。これまでにFRPを主要構造材料とする適用用途は、土木分野で水門²⁾、床版³⁾、歩道橋⁴⁾が挙げられ、道路橋・鉄道橋等の構造物でも検討が行われている。しかし、建築分野では前例が少なく、主要構造材料として使用する場合、特別な認可が必要といった課題がある。CFRP(炭素繊維強化プラスチック)はFRPの一種であり、炭素繊維と樹脂を複合してできる素材である。

CFRPは、強化繊維の中で弾性率が圧倒的に高く、比重が小さいことから、高弾性の繊維を使うと鋼材と同等の以上の弾性率が確保でき、大スパンの建築空間を得ることができる⁵⁾。CFRP立体トラス構造による屋根等に使用され⁶⁾、建築空間の概念を革新的に変化させることができる材料として期待されている⁸⁾。主要構造材料としてCFRPを使用する場合、寸法の安定性が求められることから引抜やフィラメントワインディング成形等が採用されている。本研究では、CFRPをパイプ断面で外型を使用するVaRTM(真空樹脂含浸成形)法によって成形したCFRPパイプの構造設計のための力学特性を把握することを目的とし、材料試験、圧縮試験、4点曲げ試験を実施した結果、および、計算値との比較について報告する。

2. 対象部材

本研究では、GF-クロス材、CF-クロス材、CF-一方向材を使用し、**図-1**に示す外型 VaRTM 法にて CFRP パイプを成形する。**表-1**に使用する繊維の物性値を示す。一般的な VaRTM 法は CFRP の成形に多く用いられており、真空減圧により、成型型への密着と樹脂含浸を行う方法である。施工性に優れ、高い繊維体積含有率、成型型の表面の成形精度、および、安定した成形品の機械的性質が望める長所があるが、一般に閉断面部材の成形は困難とされている。外型 VaRTM 法はその長所に加え、外型に繊維を押し付けながら樹脂を含浸することで、閉断面の成形と外法の寸法安定性を得ることができる。なお、成形後の断面には、樹脂の流動のためのスキンパイプが通る箇所があるため、方向によって異なる形状を示している。成形した CFRP パイプは外径 100mm、平均厚さ 5.60mm、繊維体積含有率は約 52% であり、パイプの軸方向を 1 方向、周方向を 2 方向とする。

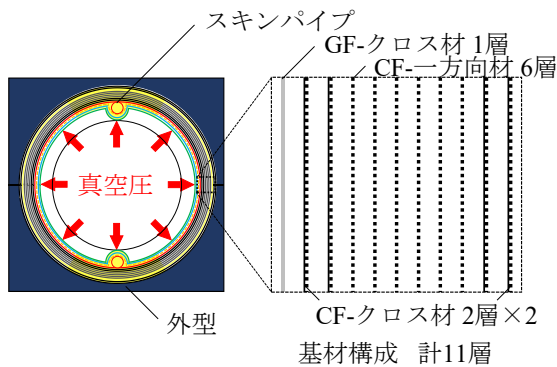


図-1 成形方法および基材構成

表-1 基材の物性値

基材の種類	E		ν	基材の厚さ (mm)	繊維方向
	(GPa)	(GPa)			
GF-クロス材 ⁹⁾	72.5	0.3	0.13	0°/90°	
CF-クロス材 ¹⁰⁾	230	0.3	0.33	0°/90°	
CF-一方向材 ¹¹⁾	242	0.3	0.18	0°	

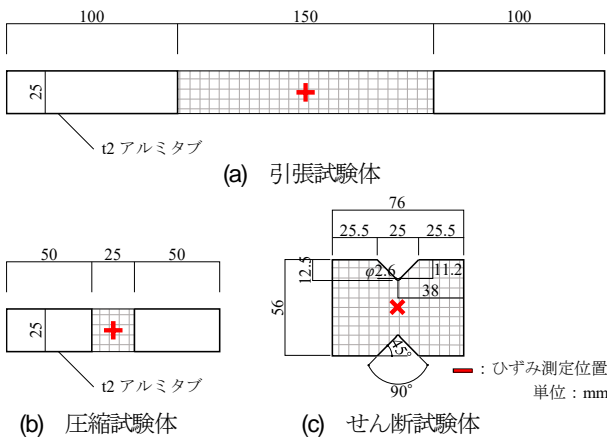


図-2 材料試験体の概要図

3. 材料試験

本研究で使用するCFRPパイプの材料特性を把握することを目的として、平板としての引張試験、圧縮試験、および、せん断試験を行う。

図-2にそれぞれの試験体の概要図を示す。試験体はCFRPパイプと同様の積層構成によりVaRTM法で成形された積層板を用いた。引張試験、および、圧縮試験はJIS¹²⁾、せん断試験はASTM¹⁴⁾に基づき、各試験で10体ずつ実施した。また、引張試験および圧縮試験では試験体の両端に厚さ2mmのアルミタブを接着し、試験機によるつかみ部とする。

表-2に各材料試験の結果一覧を、**図-3**に各試験体の破壊形態をそれぞれ示す。それぞれ示す。表中には各材料試験から得られた最大応力 σ_{max} 、および、弾性率 E_1 を示している。各弾性率についてははいずれもひずみの範囲が0.05%~0.25%において最小二乗法により算出した。また、それぞれの結果の平均値、および、変動係数(C.V.)もあわせて示している。表中の下線を引いた試験体については、引張試験のNo.9と圧縮試験のNo.1は、タブ接着位置に起因する破壊形態を示したため、最大応力 σ_{max} の平均値から除外した。引張試験のNo.7と圧縮試験のNo.9は、ひずみの測定不良に起因する弾性範囲で非線形性を示したため、弾性率 E_1 の平均値からは除外した。その他試験体は試験区間内での破断に至った。

表-2 各材料試験の結果一覧

No.	引張試験		圧縮試験		せん断試験	
	$\sigma_{T,max}$ (MPa)	$E_{1,T}$ (GPa)	$\sigma_{C,max}$ (MPa)	$E_{1,C}$ (GPa)	$\sigma_{S,max}$ (MPa)	$E_{1,S}$ (GPa)
1	1345	95.4	<u>522.9</u>	84.0	72.2	4.1
2	1459	127.2	601.6	87.2	72.8	5.4
3	1384	118.7	601.4	84.9	72.1	4.9
4	1339	108.1	639.2	86.9	71.2	4.6
5	1350	105.6	580.4	87.6	70.0	4.6
6	1430	97.4	571.5	92.9	71.2	4.4
7	1284	<u>105.7</u>	554.4	117.7	72.1	5.0
8	1459	122.8	581.2	123.0	72.8	4.8
9	<u>1363</u>	99.4	537.2	<u>123.8</u>	75.6	6.0
10	1350	97.2	642.6	95.5	74.6	4.8
平均	1378	108.0	589.9	95.5	72.5	4.9
C.V.(%)	4.1	10.6	5.7	14.4	2.1	10.4



図-3 材料試験体の破壊形態

4. 短柱部材の圧縮試験

(1) 試験方法

CFRP パイプの圧縮特性を把握することを目的として、軸方向に圧縮力を作用させる圧縮試験を行う。

図-4に試験体の概要図を示す。試験体は、試験体長100mmとし、上面に圧縮力を作用させることで試験を実施した。なお、CFRPは弾性材料であるため、材料の強度を正確に評価するためには、断面に対して均一に軸力を与える必要がある¹⁾。そこで、載荷面の平面誤差精度を得るために、ヤスリ(#600)で整え、0.03mmの隙間ゲージを用いて、平面精度の確認を行った。図中にはひずみゲージによるひずみ測定位置をあわせて示しており、試験体中央部の4ヵ所において、軸方向、および、周方向のひずみを計測した。図-5に試験体の設置状況を示す。試験は、載荷面となる上面は球座を使用し、万能試験機を用いた静的載荷とし、3体実施した。

(2) 試験結果および考察

表-3に圧縮試験の結果一覧を、図-6に各試験体の応力-平均ひずみ関係をそれぞれ示す。表中にはそれぞれ圧縮試験から得られた最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ 、圧縮弾性率 $E_{1,c}$ 、および、ポアソン比 ν_{12} を示している。圧縮弾性率 $E_{1,c}$ 、および、ポアソン比 ν_{12} についてはいずれも応力の範囲が 20MPa~200MPa において最小二乗法により算出した。また、それぞれの結果の平均値、および、変動係数(C.V.)もあわせて示している。変動係数に着目すると、最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ 、圧縮弾性率 $E_{1,c}$ 、および、ポアソン比 ν_{12} に大きなばらつきは見られず、おおむね一致していることがわかる。

図-7に各試験体の破壊形態をそれぞれ示す。破壊形態に着目すると、すべての試験体で片押しによる偏った応力集中は起きておらず、最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ に達した後、試験体の全断面に渡って、一様に周方向繊維が外側にはらみだすような破壊形態を示した。

以上より、それぞれの変動係数(C.V.)、各試験体の平均ひずみのばらつきが小さいこと、破壊形態より、力学特性が安定している理想的な圧縮試験の結果を得ることができた。これは、載荷面の平面精度を高くすることにより得られた結果であると考えられる。

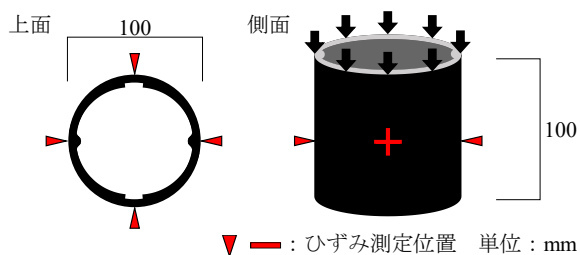


図-4 圧縮試験体の概要図

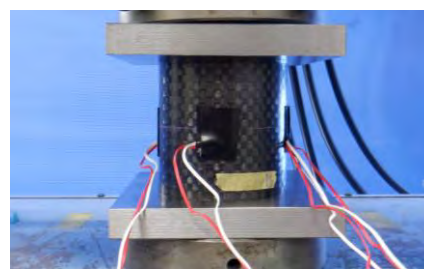


図-5 圧縮試験体の設置状況

表-3 圧縮試験の結果一覧

No.	$\sigma_{c,max}$ (MPa)	$E_{1,c}$ (GPa)	ν_{12} (-)
1	513.6	93.0	0.17
2	498.6	89.4	0.16
3	497.5	93.1	0.19
平均値	503.2	91.8	0.17
C.V.(%)	1.5	1.9	5.9

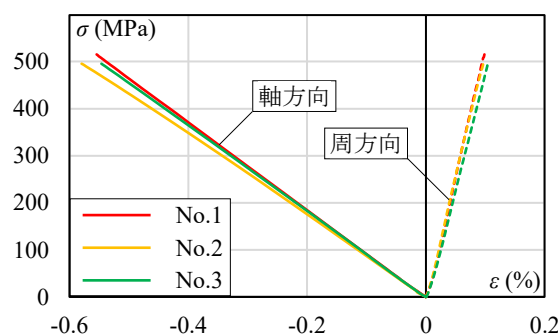


図-6 応力-平均ひずみ関係



図-7 圧縮試験の破壊形態

5. 長柱部材の圧縮試験

(1) 試験方法

CFRP パイプの座屈特性を把握することを目的として、オイラー座屈が生じる部材長の試験体に対して、軸方向に圧縮力を作用させる圧縮試験を行う。

図-8に長柱圧縮試験体の概要図を示す。試験体は、試験体長を2m(1800mm)と3m(2800mm)とし、上面に圧縮力を作用させることで試験を実施した。図中にはひずみゲージによるひずみ測定位置をあわせて示しており、試験体中央部から-50mmの4ヵ所において、軸方向、および、周方向のひずみを計測した。座屈長さLは、CFRPパイプを差し込み、エポキシ系接着剤により定着した

32mmの鋼板からの距離とする。また、試験体に初期不整として、球座を僅かに偏心させ、鋼板と直径200mmの球座を8か所ボルト接合することで、材料端部の支持条件をピン支持としている。図-9に巻き込み型変位計の設置概要図を示す。図中には巻き込み型変位計による変位測定位置を示しており、任意の座屈変形を計測できるように、試験体中央部に2本をV字に設置した。なお、本実験では $y_1=y_2$ として設置している。図-10に試験体の設置状況を示す。試験は、圧縮試験機を用いた静的荷重とし、各試験体長で2体ずつ実施した。

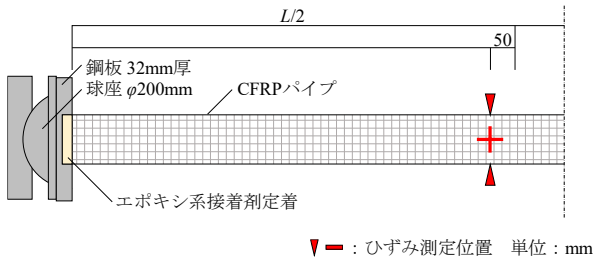


図-8 長柱圧縮試験体の概要図

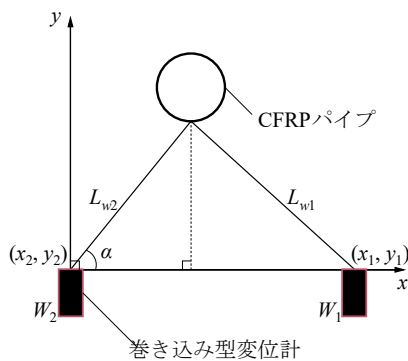


図-9 巻き込み型変位計の設置概要図



(a) 2m試験体 (b) 3m試験体

図-10 長柱圧縮試験体の設置状況

(2) 試験結果および考察

表-4に長柱圧縮試験の結果一覧をそれぞれ示す。表中にはそれぞれ長柱圧縮試験から得られた最大荷重 $P_{e,max}$ 、最大座屈応力 $\sigma_{e,max}$ 、および、最大座屈応力 $\sigma_{e,max}$ の計算値と実験値との差もあわせて示している。最大座屈応力 $\sigma_{e,max}$ は、計算値との誤差が、2m試験体の No.1 で-16%、No.2 で-24.9%、3m試験体の No.1 で+1.6%、No.2 で-10.6%となった。3m試験体の No.1 でのみ計算値との誤差が小さいが、その他については計算値より低い値を示していることがわかる。

図-11に各試験の破壊形態をそれぞれ示す。破壊は試験体の部材中央部の付近で、曲げにより圧縮側で繊維が破断し破壊に至ったと推察できる。図-12に座屈試験から得られた各試験体の初期変位 (x, y) を $(0, 0)$ とした各試験体の部材中央部の位置座標を、図-13に荷重-変位関係を示す。変位は部材中央部の水平変位であり、図-9に示す巻き込み型変位計の設置位置から三角関数、および、余弦定理を用いて算出した式(1)、式(2)に代入することにより得られる平面上の最大変位 $\delta_{x,y}$ である。

$$\delta_{x,y} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$x = x_2 + L_{w2} \cos \alpha$$

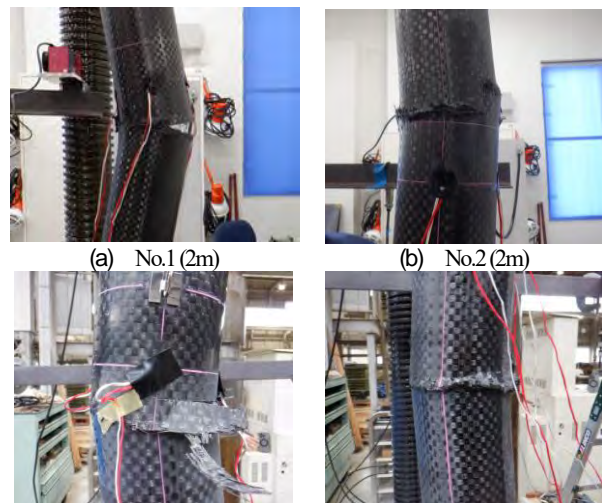
$$y = y_2 + L_{w2} \sin \alpha$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{(x_1 - x_2)^2 + L_{w2}^2 - L_{w1}^2}{2(x_1 - x_2)L_{w2}} \quad (2)$$

ここで、 W_i は巻き込み型変位計を示し、 x_i, y_i ：変位計設置位置座標、 L_{wi} ：変位計計測値である。

表-4 長柱圧縮試験の結果一覧

No.	$P_{e,max}$ (kN)	$\sigma_{e,max}$ (MPa)	計算値 (MPa)	差 (%)
1 (2m)	394.0	241.5	287.5	-16.0
2 (2m)	361.2	216.9	288.9	-24.9
1 (3m)	200.8	122.2	120.3	1.6
2 (3m)	186.1	106.1	118.7	-10.6



(a) No.1(2m) (b) No.2(2m)

(c) No.1(3m) (d) No.2(3m)

図-11 長柱圧縮試験の破壊形態

図-12 中には最大荷重 $P_{e,max}$ の 25%, 50%, 75%時点での変位座標をそれぞれプロットし、図-13 中には各変位における圧縮応力と曲げ応力による最大荷重 P の曲線、および、オイラー式に基づいた各試験体長の座屈荷重をあわせて示している。最大荷重 P は軸応力と面外曲げ変形より算出する曲げ応力の合計と、短柱試験から得られた最大応力度とを等置して式(3)より算出した。

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{P\delta_{x,y}}{Z}$$

$$P = \frac{\sigma_{max}}{\left(\frac{1}{A} + \frac{\delta_{x,y}}{Z}\right)} \quad (3)$$

ここで、 σ_{max} : 最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ の平均値(503.2MPa)、 A : 断面積の平均値、 Z : 断面係数の平均値、 δ : 荷重による変位を変数とした値である。

図-12 より、最大荷重 $P_{e,max}$ の 75%までは 1 カ所に集中してプロットされていることから、座屈荷重の付近で急激に変位が進捗し破壊に至ったことが確認できる。図-13 より、3m 試験体の変位は、初期から曲げ変形が生じている場合とそうでない場合があるが、オイラー座屈荷重近傍で耐力が一定値となり、その後、材料破壊を迎えた。2m 試験体は曲げ変形の影響により、オイラー座屈荷重に達する前に材料破壊を生じたことが推察できる。3m 試験体で異なる荷重-変位挙動を示しているが、初期不整による曲げ変形の進行度の違いが関係しているものと考えられる。図-14 に中央から-50mm の位置から得られた各試験体の応力-平均ひずみ関係をそれぞれ示す。長柱圧縮試験から得られた中央から-50mm の位置での応力-平均ひずみ関係は、2m 試験体の No.2 でのみ計算値に比べてひずみが大きい傾向にあることが確認できるが、その他については計算値とおおむね一致している。

以上より、初期不整として僅かに偏心させた球座により、オイラー座屈を生じさせる圧縮試験が実施でき、計算値と対応した実験結果を取得できることを示している。

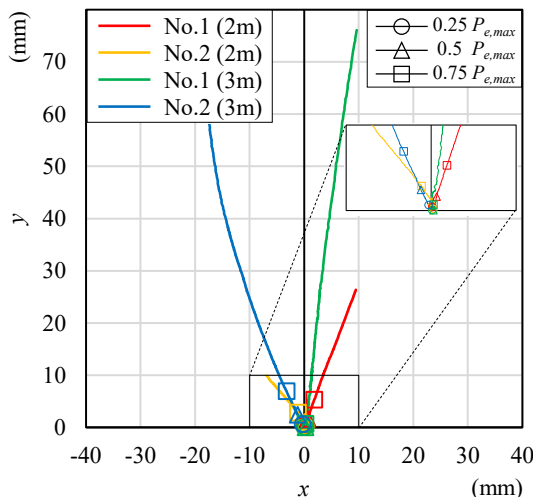


図-12 位置座標(x,y)

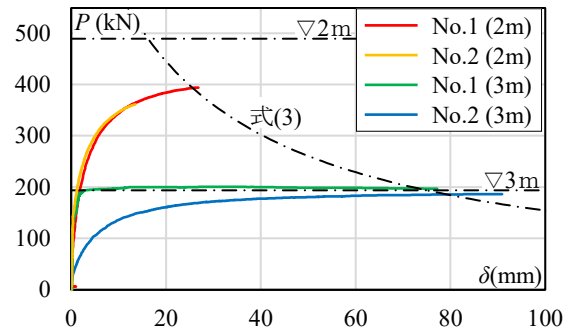


図-13 荷重-変位関係

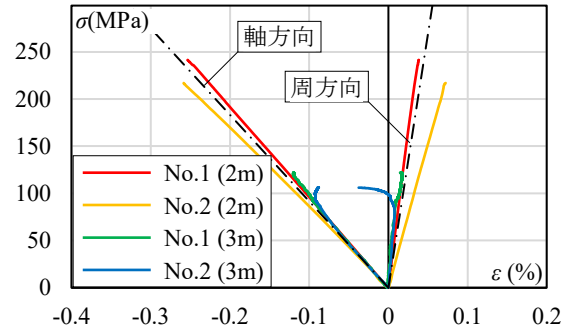


図-14 応力-平均ひずみ関係

5. 曲げ試験

(1) 試験方法

CFRP パイプの曲げ特性を把握することを目的として、4点曲げ試験を行う。

図-15 に試験体の概要図を示す。試験体は、試験体長 2300mm、支点間距離 2100mm とし、両圧子に等しく荷重させることで試験を実施した。図中にはひずみゲージによるひずみ測定位置、および、変位計による変位測定位置をを合わせて示す。変位計の測定位置については、試験体中央部から ±350mm、±850mm の位置に合計 5 カ所で測定を行い、ひずみゲージの測定位置については、中央から ±175mm、±700mm の位置で行う。図-16 に試験体の設置状況を示す。試験は、曲げ試験機を用いた静的荷重とし、2 体実施した。なお、断面の形状が方向によって異なることから、試験体を 90°回転させた際に、性能に差がないことも確認する。



図-16 4点曲げ試験体の設置状況

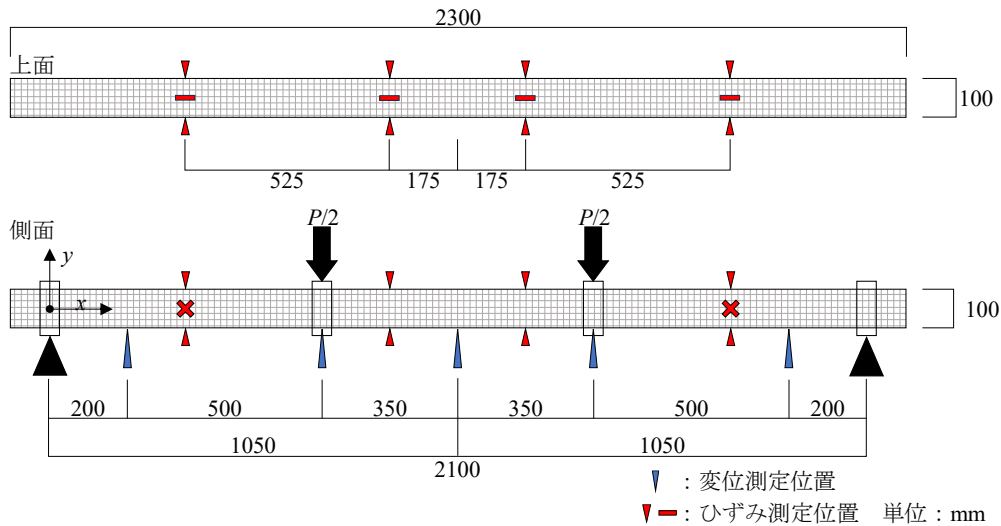


図-15 曲げ試験の概要図

(2) 試験結果および考察

表-5に4点曲げ試験の結果一覧をそれぞれ示す。表中にはそれぞれ4点曲げ試験から得られた最大荷重 $P_{b,max}$ 、最大曲げ応力 $\sigma_{b,max}$ 、曲げ弾性率 $E_{1,b}$ 、および、せん断弾性率 G_{12} を示している。曲げ弾性率 $E_{1,b}$ 、および、せん断弾性率 G_{12} についてはいずれもひずみの範囲が0.05%~0.25%において最小二乗法により算出した。なお、曲げ弾性率 $E_{1,b}$ は中央の載荷面ひずみ、せん断弾性率 G_{12} は中央から±700mmの位置でのせん断ひずみから求めた。また、それぞれの結果の平均値、および、変動係数(C.V.)もあわせて示している。表より、曲げ弾性率 $E_{1,b}$ せん断弾性率 G_{12} の変動係数(C.V.)は低く、ばらつきが小さいことがわかる。また、最大曲げ応力 $\sigma_{b,max}$ の平均値は596.6MPaとなり、前章の短柱部材の最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ の平均値である503.2MPaを上回り、積層板の最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ の平均値である589.9MPaと同等の値となった。曲げ弾性率 $E_{1,b}$ を算出するために使用した試験体中央の表面ひずみ ε_f については式(4)¹⁰から算出した。

$$\varepsilon_f = \frac{108D}{23L^2} \delta_c \quad (4)$$

ここで、 δ_c ：中央のたわみ、 L ：支点間距離、 D ：外径である。

図-17にNo.2の破壊形態を示す。破壊形態に着目すると、荷重点2点で同時に曲げ破壊が生じており、荷重点の位置で圧縮側に曲げ破壊が起きていることが確認できる。

図-18に4点曲げ試験から得られた荷重-変位関係をそれぞれ示す。また、図中にはベルヌーイ・オイラー梁理論により算出した式(5)、式(6)より、変位の計算値をそれぞれの位置で示している。なお、 x の値は概要図に示すように、試験体の左側を0とし、変位は試験体の対称性を考慮し半分のみ求めた。

表-5 4点曲げ試験の結果一覧

No.	$P_{b,max}$ (kN)	$\sigma_{b,max}$ (MPa)	$E_{1,b}$ (GPa)	G_{12} (GPa)	
				-700	+700
1	63.2	602.1	85.0	2.9	3.0
2	63.5	591.1	83.8	2.3	2.8
平均値	63.4	596.6	84.4	2.8	
C.V.(%)	0.24	0.92	0.71	9.79	



(a) 試験体全体



(b) 荷重点拡大(-350)

(c) 荷重点拡大(+350)

図-17 4点曲げ試験の破壊形態

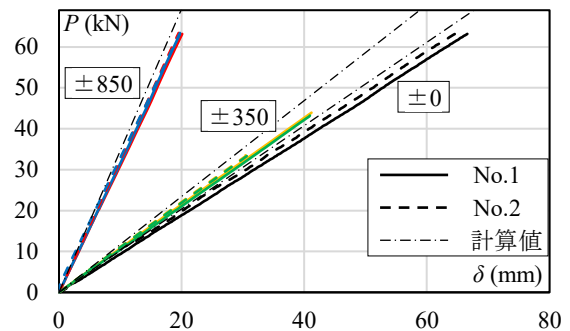


図-18 荷重-変位関係

$$\delta = \frac{P}{36EI}(-3x^3 + 2xL^2) \quad : (0 \leq x \leq 700) \quad (5)$$

$$\delta = \frac{P}{324EI}(-27x^3 + 27xL^2 - L) \quad : (700 \leq x \leq 1050) \quad (6)$$

ここで、 P ：荷重、 L ：支点間距離、 E ：弾性率、 I ：断面二次モーメントである。

弾性率 E は圧縮試験の結果から得られた圧縮弾性率 E_{1c} の平均値 91.8GPa を用いた。なお、概要図の中央から $\pm 350\text{mm}$ の位置については、途中で変位の計測を終了したため、終了時点に対応した変位を示している。No.1 と No.2 の試験のいずれもすべての変位測定位置において、4点曲げ試験から得られた荷重-変位関係は計算値とおおむね一致していることがわかる。また、どちらも荷重が小さい範囲においては、計算値と比較しても線形関係が確認できるが、荷重が増加すると4点曲げ試験から得られた変位の値は大きくなり、計算値との差は徐々に大きくなる傾向にあることがわかる。

図-19に式(5)、式(6)から算出した20kN、40kN、60kN時点での x 方向の変位分布をそれぞれ示す。また、図中には4点曲げ試験において荷重が、それぞれの時点での変位をそれぞれプロットしている。なお荷重-変位関係と同様に、中央から $\pm 350\text{mm}$ の位置については、60kNに至る前に計測を終了したためプロットしていない。No.1、No.2 のいずれもすべての変位位置において、4点曲げ試験から得られた変位は計算値とおおむね一致しており、20kN 時点での No.1、No.2 の変位も一致している。しかし、前述した荷重-変位関係と同様に、いずれも荷重が増加すると4点曲げ試験から得られた変位の値は計算値に比べて大きくなる傾向にあることがわかる。

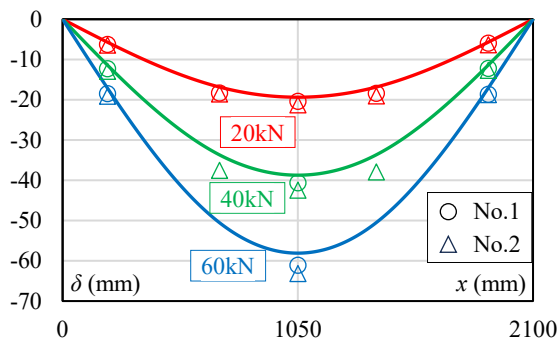


図-19 x 方向の変位分布

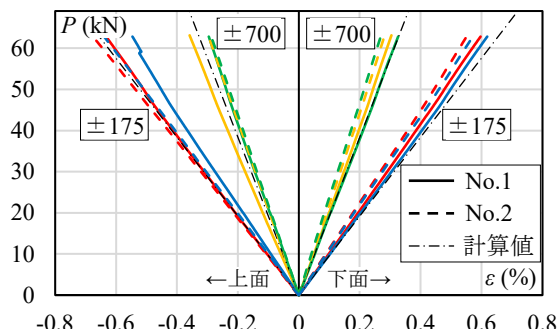


図-20 荷重-ひずみ関係

図-20 に4点曲げ試験から得られた中央から $\pm 175\text{mm}$ 、 $\pm 700\text{mm}$ の位置での上下面の荷重-ひずみ関係をそれぞれ示す。図中にはひずみの計算値を式(7)、式(8)から得られた計算値をあわせてそれぞれの位置で示している。

$$\varepsilon = \frac{P}{2EZ}x \quad : (0 \leq x \leq 700) \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{PL}{6EZ} \quad : (700 \leq x \leq 1050) \quad (8)$$

ここで、 ε ：上下面の表面ひずみ、 Z ：断面係数である。4点曲げ試験から得られた荷重-ひずみ関係は、計算値とおおむね一致しているが、計算値に比べてひずみが小さい傾向にあることがわかる。

図-21 に中央から $\pm 700\text{mm}$ の位置から得られた平均せん断応力-せん断ひずみ関係を示す。平均せん断応力、せん断ひずみはそれぞれ次の式(9)、式(10)から算出した。

$$\bar{\tau} = \frac{Q}{A} = \frac{P}{2A} \quad (9)$$

$$\gamma = |\varepsilon_{+45^\circ}| + |\varepsilon_{-45^\circ}| \quad (10)$$

ここで、 Q ：せん断力($P/2$)、 A ：断面積、 $\varepsilon_{\pm 45^\circ}$ ：それぞれの 45° 方向ひずみである。

4点曲げ試験から得られたせん断応力-せん断ひずみ関係は、No.2 の中央から -700mm の位置でのみばらついて確認できるが、試験体の材料や作用しているせん断力が同じであるため、その他についてはおおむね一致している。

図-22 に4点曲げ試験において、中央から $\pm 175\text{mm}$ の位置から得られた 20kN、40kN、60kN 時点での y 方向のひずみ分布をそれぞれ示している。

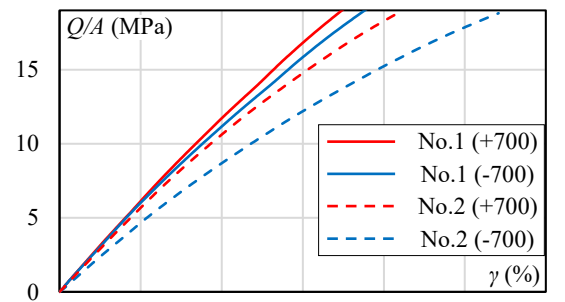


図-21 平均せん断応力-せん断ひずみ関係

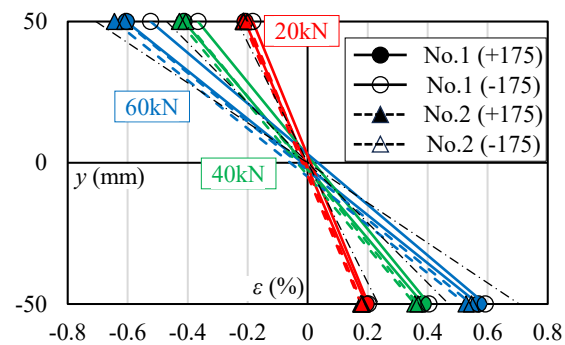


図-22 y 方向のひずみ分布

図中には式(7), 式(8)で得られたそれぞれの時点でのひずみの計算値をあわせて示している. 4点曲げ試験から得られたy方向のひずみ分布はいずれも傾向はおおむね一致しているが, 表面に近づくほどひずみは計算値に比べて小さくなることを確認できる. またこの傾向は荷重が大きくなるにつれ高まること伺える.

以上より, No.1とNo.2を比較して, 4点曲げ試験で得られた曲げ弾性率 $E_{1,b}$, せん断弾性率 G_{12} , および, その他の変位やひずみのばらつきが小さいことから, 本試験体において, 断面の形状が方向によって異なっても, 性能に大きな差がないといえる. また, 変動係数に着目すると, 最大荷重 $P_{b,max}$, 最大曲げ応力 $\sigma_{b,max}$, 曲げ弾性率 $E_{1,b}$, および, せん断弾性率 G_{12} に大きなばらつきは見られず, おおむね一致していることがわかる.

7. 各試験結果の比較

表-6に各試験から得られた力学特性の結果一覧を示す. 表中には積層板理論から得られた力学特性をあわせて示す. 積層板理論より推定したそれぞれの力学特性と実験値はおおむね一致している. しかし, 材料試験から得られた弾性率 E_1 は, 積層板理論の値と比較して, 大きくなる傾向が確認できる. また, 短柱部材の圧縮弾性率 $E_{1,c}$ と積層板理論の値に大きな差見られない. このことから, 短柱部材の圧縮試験から得られた最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$, および, 圧縮弾性率 $E_{1,c}$ の値を用いて評価することで, 長柱部材の圧縮試験, および, 曲げ試験の適切な力学特性を評価することができると考えられる. CFRPパイプの強度について, 各試験の最大応力を比較すると, 長柱部材の圧縮試験から得られた最大座屈応力 $\sigma_{e,max}$ が最小であり, 曲げ試験から得られた最大曲げ応力 $\sigma_{b,max}$ の平均値が596.6MPaで最大である. この値は, 短柱部材の最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ の平均値である503.2MPaを上回り, 積層板の最大圧縮応力 $\sigma_{c,max}$ の平均値である589.9MPaと同等の値となった. 長柱部材の圧縮試験から得られた最大応力が最小となったことは, 軸力と曲げの両方の応力が加わっていることが考えられるため, 座屈による曲げ変形量を曲げ応力として考慮すると, オイラー座屈を生じる部材の最大強度を評価することができると考えられる. また, 強度が各試験より最小となることから, 全断面材料破壊を生じるよう配慮した短柱部材の圧縮試験から得られた値を用いることで安全側の評価に繋がると考えられる.

8. おわりに

本研究では外型VaRTM法によりCFRPパイプを成形し, 積層板の材料試験, パイプの圧縮試験, 4点曲げ試験を実施し, 試験結果の分析と力学特性の評価を行った. 本研究で得られた知見を以下に示す.

- 1) 圧縮試験において, 載荷面の平面を得ることで, 力学特性, および, 平均ひずみのばらつきが小さいことより, 理想的な圧縮試験の結果を得たといえる.
- 2) 長柱圧縮試験において, 初期不整として, 僅かに偏心させた球座によってオイラー座屈を生じさせることができ, 計算値との比較が可能な実験結果を取得できることを示した. 一方で, 耐力は座屈による曲げ応力度も加味する必要があることを示した.
- 3) 4点曲げ試験において, 曲げ強度は, 積層板やCFRPパイプから評価した圧縮強度以上の応力度を発揮し, 変形は, ベルヌーイ・オイラー梁理論と1割以下程度の誤差となった.
- 4) 積層板理論より推定した弾性率と各試験の結果を比較することで, 適切な力学特性を評価することができた. 強度については, 曲げ試験で最大となった.

表-6 力学特性の結果一覧

		E_1 (GPa)	ν_{12} (-)	G_{12} (GPa)
積層板理論		80.3	0.07	2.7
実験値	積層板			
	引張	108.0		
	圧縮	95.5		
	せん断			4.9
パイプ	圧縮(短)	91.8	0.17	
	曲げ	84.4		2.7

謝辞

本研究の実施には, 元豊橋技術科学大学工学部 建築・都市システム学課程 大霜葉瑞樹氏, 小川達也氏, 日本工業大学 建築学部 建築学科 箕輪健一准教授, 大西郷助手, 箕輪研究室 学生一同の協力を得た. ここに記して謝意を示す.

参考文献

- 1) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造レポート 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案), 2018.
- 2) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造シリーズ 06 FRP 水門設計・施工指針(案), 2014.
- 3) 久保圭吾: FRP 合成床版, コンクリート工学, 第52巻 第1号, pp.108-114, 2014.
- 4) 土木学会・複合構造委員会: 複合構造シリーズ 04 FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 2011.
- 5) 米丸啓介, 藤崎忠志, 杉崎健一, 中辻照幸, 鈴木弘之: CFRP パイプを構造材料に適用するための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.66, No.542, pp.195-202, 2001.

- 6) Hiroshi Fukuyama : "FRP Composites in Japan", Concrete International, 1999.
- 7) 強化プラスチック協会 : FRP50年の歩み, 2005.
- 8) 米丸啓介, 松本幸大 : CFRPの長期耐久性試験, 日本建築学会技術論文集, Vol.20, No.46, pp.997-1000, 2014.10
- 9) 日東紡HP
https://www.nittobo.co.jp/business/glassfiber/sp_material/t-glass.htm ,
(2023年8月25日閲覧)
- 10) 東レ株式会社HP製品カタログ
https://www.cf-composites.toray/ja/resources/data_sheets/,
(2023年8月25日閲覧)
- 11) CHOMARATHP製品カタログ
<https://composites.chomarat.com/en/selector-guide/>,
(2023年8月25日閲覧)
- 12) JIS K 7164 : プラスチック-引張特性の試験方法-第4部 : 等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件, 日本工業規格, 2005.
- 13) JIS K 7018 : 繊維強化プラスチック-積層板の面内圧縮特性の求め方, 日本工業規格, 2019.
- 14) ASTM D 7078/D 7078M-05. Standard test method for shear properties of composite materials by V-notched rail shear method.
- 15) 土木学会・複合構造委員会 : 複合構造レポート 11 土木構造用FRP部材の設計基礎データ, 2014.
- 16) JIS K 7017 : 繊維強化プラスチック-曲げ特性の求め方, 日本工業規格, 1999.

(Received August 25, 2023)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PERFORMANCE EVALUATION OF CFRP STRUCTURAL MEMBERS

Yosuke YAMAZAKI, Yudai NAITO, Shogo HIGUCHI, Takeshi MAMIYA, Atsushi KATAOKA, Takahiro MATSUI, Junichiro ITO, Yasunori HARANO, Yuji TAKIUCHI, Shoji NAKAZAWA and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, although the number of design cases for civil structures using FRP is increasing, there are few applications in architecture. GFRPs are commonly used in various applications due to their cost-effectiveness and possibility to reduce lifecycle costs through excellent durability and corrosion resistance. On the other hand, CFRP offers lightweight, high rigidity, and reasonable elasticity, with a strength comparable to structural steel. Thus, CFRP makes it possible to construct lightweight spatial structures. To utilize CFRP as a structural material, geometrical stability becomes one of the requirements, leading to the adoption of techniques such as pultrusion and filament winding. Nowadays, the VaRTM method, which is researched for the repair and strengthening method of the construction field, has advantages such as excellent moldability, high fiber volume content, geometrical accuracy, and stable mechanical properties. This paper aims to clarify the mechanical characteristics of CFRP pipes manufactured by VaRTM method using the outer mold. The material performance using the coupon specimens and pipe specimens is evaluated and compared for the structural design.