# GFRP溝形材の圧縮特性に関する基礎的研究

飯田 卓弥<sup>1</sup>·中村 一史<sup>2</sup>

1学生会員 首都大学東京大学院博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>2</sup>正会員 首都大学東京大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1) E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

FRP は、鋼材などに比べ、優れた耐食性をもち、軽量であるため、その性能を活用して、近年、歩道橋 や水門扉などの土木構造物へ適用されている.しかしながら、FRP の適用実績が少ないことから、構造用 FRP の材料特性は評価方法を含めて十分な知見が得られていない.また、FRP 部材の成形法は様々な種類 があり、積層構成が同じでも成形法の違いにより、物性値が異なる場合もある.本研究では、引抜成形法 および金型を使用した圧縮ハンドレイアップ成形法により製作された GFRP 溝形材の圧縮特性に着目した. まず、クーポン試験片による圧縮試験を行って、試験片の寸法や採取位置が圧縮特性に及ぼす影響を検討 した.次に、座屈を生じない短い部材を対象に、全断面圧縮試験を行い、両試験結果から溝形材の圧縮特 性の評価方法について論じた.

Key Words : GFRP, coupon test, compressive strength, compressive elastic modulus

# 1. はじめに

FRPは、鋼材などに比べて、耐食性をもち、軽量であ ることから、その性能を活用して、近年、歩道橋<sup>11</sup>や水 門扉<sup>21</sup>などのインフラ構造物へ適用がすすめられている. しかしながら、FRPの適用実績が少ないことなどもあり、 構造用FRPの材料特性は、その評価方法を含めて十分な 知見が得られているとはいえない.また、FRP部材の成 形法は様々な種類があり、積層構成が同じでも成形法の 違いにより、物性値が異なる場合もある.FRPは、強化 繊維、樹脂からなる複合材料であり、使用する材料によ ってもその機械的性質は大きく異なる.

FRPの機械的性質の評価方法については、種々の工業 規格により、標準的な試験方法が定められている.構造 用FRPについてもそれらに準拠して、機械的性質が評価 されている.ただし、材料あるいは用途によっては、そ れらの評価方法が適切でない場合があり、別途、試験方 法を開発して、評価が行われることもある<sup>3,4</sup>.また、 同一の材料に対しても、試験方法が異なる場合には、機 械的性質が同じに評価されるとは限らないことも指摘さ れている<sup>9</sup>.さらに、評価対象の機械的性質(例えば、 圧縮強度、圧縮弾性係数等)を得るための試験を行って も、積層間の破壊である層間破壊や、つかみ部からの破 壊が生じる場合がある.特に、厚板からなる構造用FRP については、標準的な試験方法では、評価が困難な場合 も予想される.

そこで本研究は、成形方法の異なる2種類のGFRP製の 溝形材を対象に、その圧縮特性と評価方法を実験的に検 討して、構造用FRPを適切に設計するための基礎資料を 得ることを目的としたものである.まず、クーポン試験 片による標準的な圧縮試験を行って、試験片の寸法や採 取位置が圧縮特性に及ぼす影響を検討した.次に、座屈 を生じない短い部材を対象に、全断面圧縮試験を行って、 部材としての圧縮耐力を検討した.さらに、両試験結果 を比較することで、GFRP製溝形材の圧縮特性の評価方 法について論じた.

# 引抜成形法により製作されたGFRP溝形材の圧 縮特性

## (1) クーポン試験による圧縮特性の検討

# a) 試験方法

FRP の圧縮特性を評価するための標準的な試験方法に は、代表的なものとして、ASTM D 6641<sup>9</sup>、JIS K 7018<sup>7</sup>が ある. 圧縮試験では、前述したように、試験方法により 圧縮特性が異なることが指摘されている<sup>5</sup>. 本検討では、 一般的に用いられている、ASTM D 6641 に準拠した試験 方法を採用した.また、試験片の寸法、タブの有無につ いては、パラメトリックに検討することとした.表-1 に、ASTMD 6641、JIS K 7018の規格値と本試験で採用し た値を示す.本検討では、ASTM D 6641 に準拠した試験 片を用いた試験を試験 A とし、JIS K 7018 に準拠した試 験片を用いた試験を試験 B とした.表より、試験 A と 試験 B では、試験片の幅、評定長さは、およそ 2 倍違う ことがわかる.また、載荷治具は、ASTM D 6641 に準拠 して製作しているため、試験 B のつかみ部長さは、JIS K 7018の規格値とは異なる.

評価対象は、部材軸(0°)方向の圧縮弾性係数と圧縮

表-1 ASTMD 6641, JISK 7018の規格値と本試験で採用した値



強度であり、本試験では、荷重とひずみをデータロガー (静ひずみ測定器)を用いて計測した.ひずみの計測に あたっては、試験片の中央部の表裏に1軸ゲージ(ゲー ジ長 3mm)をそれぞれ設置した.試験装置には、島津 製作所製オートグラフ(容量:100kN)を使用した.載 荷方法は変位制御とし、載荷速度は0.5 mm/minとした. なお、90°方向については部材の断面寸法が小さく、つ かみ部を確保することが困難であるため検討していない.

#### b) 試験片の採取と製作方法

対象とする溝形材は C100S であり, 強化材のガラス 繊維は、0°方向(一方向)に配向されたロービング材で ある. 溝形材は、フランジとウェブで構成されており、 各部位や採取位置による圧縮特性を把握するため、試験 Aおよび試験Bにおいて、各部位から採取可能な断面寸 法とした. 図-1 に、試験片の採取位置を示す. 試験 A では、断面あたりフランジから2箇所(計4箇所),ウ ェブから 5 箇所, コーナー部から 2 箇所の計 11 体を採 取し,7 断面で合計 77 体の圧縮試験を行った.一方, 試験 B では、断面あたりフランジから1箇所(計2箇 所), ウェブから3箇所の計5体を採取し,7断面で合 計 35 体の圧縮試験を行った. 図-2 に, 各試験の試験片 図を示す. 試験方法は ASTM D 6641 に準じているため, つかみ部長さは両試験で同一(片側あたり 64mm)とし ている. また, 試験 B では, アルミタブ(板厚: 1mm)をエポキシ樹脂接着剤で接着している.

# c) セットアップ

図-3に、ASTM D 6641 に準拠した圧縮試験治具のセットアップの状況を示す.上部の鋼製ブロックの中心には、 鉛直方向にスライドでき、ガイドとなる円柱軸が組み込まれている.また、試験片は両側の鋼製ブロックをボルトで固定するが、ボルトの締結には、トルクレンチを用いて、締付けトルク(13N・m)を管理した.



図-3 ASTMD6641 に準拠した圧縮試験のセットアップの状況

## d) 圧縮弾性係数, 圧縮強度の評価方法

圧縮弾性係数  $E_c$  (N/mm<sup>2</sup>), 圧縮強度 $\sigma_{ai}$  (N/mm<sup>2</sup>) は, JISK 7018 に基づいて以下の式より算定した.

$$\sigma_{cu} = P_{\max} / A_0 \tag{1}$$

$$\sigma = P_e / A_0 \tag{2}$$

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_{x2} - \varepsilon_{x1}} \tag{3}$$

ここに、 $P_{\text{max}}$ :最大荷重(N)  $P_e$ : 圧縮弾性域(荷重-変位量曲線で直線関 係が明らかな部分)の荷重(N)  $A_0$ :試験片の初めの断面積(mm<sup>2</sup>)  $\sigma$ :荷重 $P_e$ における圧縮応力(N/mm<sup>2</sup>)  $\varepsilon_{\text{rl}}$ :軸方向ひずみ0.0005  $\varepsilon_{22}$ :軸方向ひずみ0.0025

 $\sigma_i: \epsilon_{xi}=0.0005$ における圧縮応力(N/mm<sup>2</sup>)

σ<sub>2</sub>: ε<sub>2</sub>=0.0025における圧縮応力 (N/mm<sup>2</sup>)

### e) 試験結果と考察

図-4 に、試験 A, Bから得られた応力とひずみの関係 の一例を、図-5 に、代表的な破壊形態をそれぞれ示す. 図-4 より、全ての試験において破壊までほぼ線形挙動 であり、破壊時のひずみは、-17,500×10<sup>6</sup>~-25,000×10<sup>6</sup> (-1.75~-2.5%)の範囲であることがわかる.また、図-5 より、両試験ともに、つかみ部での破壊はなく、試験 片中心の評定長さの範囲で圧壊していることがわかる.

図-6,表-2 に、各採取位置における圧縮弾性係数 (C100S,0°方向)をそれぞれ示す.これらの図表より, 試験 A では、平均値で比較すると、フランジより、ウ ェブの方が大きな値となった.また、コーナーにおいて は、ほかの採取位置に比べて、やや小さな値となった. 一方、試験 B においては、フランジ、ウェブで平均値 は同じ値となった.最大値は、フランジの方が大きく、 変動係数もウェブに比べて大きかった.試験 A,Bを比 較すると、試験 B の方が変動係数が小さく、全体の平 均値は、若干ではあるが、高く評価された.









図-5 各圧縮試験における代表的な破壊形態の例

表-2 各部位の圧縮弾性係数(C100S, 0°方向)

立7/士	試験A		試験B	
中国心	平均值	変動係数	平均值	変動係数
フランジ	31.9	0.051	32.3	0.055
ウェブ	32.7	0.045	32.3	0.020
コーナー	29.6	0.044	-	_
全体	31.6	0.058	32.3	0.037

#### 表-3 各部位の圧縮強度(C100S, 0°方向)

立7/士	試験 A		試験B	
可利亚	平均值	変動係数	平均值	変動係数
フランジ	716.9	0.108	700.4	0.078
ウェブ	790.7	0.119	742.7	0.061
コーナー	537.0	0.133	_	_
全体	717.7	0.172	725.8	0.072



図-6 各採取位置における圧縮弾性係数(C100S, 0°方向)



図-7 各採取位置における圧縮強度(C100S, 0°方向)

図-7,表-3 に、各採取位置における圧縮強度(C100S, 0°方向)をそれぞれ示す.これらの図表より、試験Aで は、圧縮強度の平均値は、ウェブが最も高く、コーナー では小さいことがわかる.また、コーナーでは変動係数 も大きく、ばらつくことがわかる.これは、コーナーで は強化繊維が曲がっており、その不規則な配置が、圧縮 弾性係数や圧縮強度に影響を及ぼしていると考えられる. 試験 B においても、圧縮強度の平均値は、ウェブが最 も高くなり、試験 A と同様の傾向であったが、各部位 の平均値を比較すると、試験 B の値は、試験 A の値よ り小さく、変動係数も小さかった.これは、試験片の寸 法の相違によるものと考えられ、試験 A では評価範囲 の寸法が小さく、両端部の拘束が高いことが、圧縮強度 が高く評価されたものと考えられた.

以上のことから、本検討の範囲においては、試験方 法としては、試験片の採取によるばらつきが小さい試験 Bが望ましいといえた.

# (2) 部材の全断面圧縮試験による検討

### a) 試験方法

前述したGFRP溝形材(C100S)を対象に,部材の全断 面に均一に軸方向圧縮力を載荷して,圧縮特性を検討す る.本論文では、このような載荷方法を全断面圧縮試験 とよぶ.図-8に、全断面圧縮試験の試験体図を示す. FRP部材の圧縮特性を評価するための標準的な方法はな いため、評定長さは、クーポン試験を参考に25mmとし、 比較のために50mmを加えて、合計2種類とした.想定さ れる圧縮耐力は、前述の同溝形材のクーポン試験結果

(試験B)から算出すると587.9kNとなる. 圧縮試験には, 前川試験機製作所製全自動耐圧試験機(容量:2000 kN)を使用した. 上耐圧盤の上面には, 球座が設置さ れている. 載荷方法は変位制御とし, 載荷速度は1.0 mm/minとした.



図-8 全断面圧縮試験の試験体図(C100S, 評定部長さ25mm)



(a) 製作状況
 (b) セットアップ状況
 図-9 全断面圧縮試験の試験体(C100S)

### b) 試験体の製作とセットアップ

試験体は、評定部(25mmあるいは50mm)の両端 50mmを固定部として、溝形材から切り出した部材を試 験片とした.本検討では、各評定長さに対して、3つの 試験体を作製した.両端部の固定方法については、部材 端面が面圧荷重によって破壊しないように、補強を行う こととした.図-8に示したように、溝形材の端部50mm の範囲を、鋼管(STK400,厚さ9.5mm)で補強するもの とし、鋼管と溝形材の間には、定着用膨張材を充填する. 本研究では、定着用膨張材には、コンクリートや石材の 破砕に使用されている静的破砕剤<sup>®</sup>を適用した.溝形材 の図心位置は、鋼管の中心と一致するように、固定用ボ ルトで調整した.なお、定着用膨張材は、硬化時に発熱 するため、養生時の温度管理に留意した.本検討の範囲 では、充填および養生時の室温を約15℃とした. 試験体の高さ調整には、図-9 (a)に示すように、上下耐圧盤の4箇所にスペーサを用いた.

評価対象は、クーポン試験と同様、部材軸(0°)方向 の圧縮弾性係数、圧縮耐力、圧縮強度であり、載荷中に、 荷重とひずみをデータロガー(静ひずみ測定器)を用い て計測した.図-10に、試験体断面とひずみゲージの設 置位置を示す.試験体の中央断面の8箇所に、1軸ゲージ (ゲージ長3mm)を設置した.

図-9 (b)に、C100S全断面圧縮試験のセットアップ状況 を示す. なお、試験体製作後に計測した試験体高さの高 低差は、表-4に示すように、評定長さ25mmの試験体で 0.4~1.0mm、50mmの試験体で0.65~2.0mmであり、50mm の試験体では、試験体が長くなるため、誤差が大きくな った. なお、全ての試験体で、断面の弱軸方向に対して 高低差が生じており、ウェブ側が大きかった.

### c) 圧縮耐力, 圧縮弾性係数, 圧縮強度の評価方法

ここでは、載荷時の最大荷重を、部材の圧縮耐力とし、 圧縮強度は、圧縮耐力を部材の断面積で除した値とした. また、圧縮弾性係数は、クーポン試験と同様に、8箇所 のひずみの平均値が500×10<sup>6</sup>~2,500×10<sup>6</sup>の範囲で評価 した. さらに、計測されたひずみの値が急激に変化する 点から破壊箇所を推定した.

### d) 試験結果と考察

表-4に、C100S全断面圧縮試験の結果(圧縮耐力,圧 縮強度,圧縮弾性係数)を、図-11に、応力と8箇所の平 均ひずみの関係を示す.応力は、圧縮荷重を溝形材の断 面積で除した値である.全ての試験で、クーポン試験と 同様に、破断までほぼ線形挙動を示すこと、また、評定 長さ50mmの試験体の一部(No.50-1)以外では、図中に 併記したクーポン試験(試験B)の圧縮弾性係数に基づ く応力とひずみの関係とほぼ一致することがわかる.な お、No.50-1では、図を略したが、前述したように、試



図-10 C100Sの試験体断面とゲージの設置位置

表-4 全断面圧縮試験の結果(C100S, 0°方向)(a) 評定長さ 25mm

試験体 No.	試験体高低	圧縮耐力	圧縮強度	弹性係数
	差 (mm)	$P_{\rm max}(\rm kN)$	o <sub>max</sub> (MPa)	Eane (GPa)
25-1	1.0	437.2	524.9	31.0
25-2	0.65	412.4	496.4	31.1
25-3	0.40	433.6	522.4	30.8
平均	_	417.9	502.4	31.0

(b)評定長さ 50mm

封 除 the	試験体高低	圧縮耐力	圧縮強度	弹性係数	
武)映14-1NO.	差(mm)	$P_{\rm max}({\rm kN})$	o <sub>max</sub> (MPa)	Eave (GPa)	
50-1	2.0	245.2	294.3	30.5	
50-2	1.0	348.0	419.0	30.5	
50-3	0.65	319.6	384.2	30.7	
平均	_	304.3	365.8	30.6	

験体の高低差が最も大きく,弱軸まわりに偏心曲げが生 じていたため,圧縮耐力も低下したと判断された.

さらに、図-12に、応力と各部位のひずみの関係を示 す.これは、試験体No.25-3の一例であり、各部位のひ ずみは、中立軸から同じ距離にあるひずみゲージのひず みの平均値である.図より、ウェブ側のひずみが応力の 増加とともに、小さくなり、圧縮応力が約100MPaで、 挙動が乱れることがわかる.この時、定着用膨張材から 破壊音が発生したことから、固定部側の一部が破損した と考えられる.その後、定着用膨張材の破壊はなくなり、 乱れも生じなくなるものの、フランジとウェブのひずみ





図-12 応力と各部位におけるひずみの関係(試験体 No.25-3)



(a) 評定長さ 25mm (25-2)
 (b) 評定長さ 50mm (50-3)
 図-14 全断面圧縮試験の破壊の状況 (C100S)

の差は大きくなることがわかる.図-13に、中央断面に おけるひずみ分布を示す.この図からも応力の増加とと もに、フランジとウェブのひずみの差が徐々に大きくな ることがわかる.

図-14 に、全断面圧縮試験後の破壊の状況を示す.図 より、破壊は評定長さの範囲で生じているが、評定長さ 25mm では、全断面が圧壊して、繊維が完全に破断して いること、また、評定長さ 50mm では、フランジ部での 破壊が顕著であるが、繊維が完全には破断していないこ とがわかる.これらの傾向は全ての試験片で同様であっ た.したがって、評定長さ 25mm では、クーポン試験と 同様の圧壊であるといえた.なお、圧縮耐力時において、 各部位のひずみゲージの値が急変した箇所は、全ての試 験体で、フランジ先端部であり、破壊の起点は、フラン ジ先端部であると考えられた.

最後に、部材の全断面圧縮試験およびクーポン試験片 による圧縮試験による圧縮弾性係数、圧縮強度を比較し て、考察する. 表4 に示したように、評定長さ 25mm で は、部材の圧縮弾性係数の平均値は 31.0GPa で、クーポ ン試験片(試験 B: 32.3GPa)とほぼ同じであり、クー ポン試験片の圧縮弾性係数を用いて、部材を評価できる. 一方、評定長さ 25mm では、部材の圧縮強度は、502.4 MPa であり、クーポン試験片(試験 B: 725.8MPa)より 小さく、その比は 1.44 であった. FRP 歩道橋設計・施工 指針(案)<sup>2)</sup>では、設計圧縮耐力の算定において、圧縮 による破壊は急激に進展することから、部材係数%を 1.30と規定している.本検討では、部材係数はやや高め





の値となった.これは、全断面圧縮載荷実験において、 完全に一様な圧縮力とはならないことから、偏心曲げが 生じたものと考えられた.

# 3. 圧縮ハンドレイアップ成形法により製作され たGFRP溝形材の圧縮特性

## (1) クーポン試験による圧縮特性の検討

### a) 試験方法

対象としたGFRP溝形材は、その断面形状と試験片の 切出し方法を図-15に示すように、圧縮ハンドレイアッ プ成形法で製作されたFCH-180である.フランジには 2.9°のテーパーが施されている. また, 0/90° 方向の二 方向にガラス繊維が配向され、ロービング材がフランジ 先端部とコーナー部に含まれている.本検討では、0°方 向,90°方向から切り出した試験片を対象に,圧縮試験 によって評価を行うが、フランジのテーパー部からの採 取方法によって表-5のような3つの試験区分に分類した. 一般には、クーポン試験片の形状は矩形であり、試験A の0°方向では、図-16に示すような形状を基本とした. しかしながら、切削により有効な繊維が失われることや 簡易な評価のためには、切削せずに試験が可能であるこ とが望ましい. そこで, 試験Cの0°方向では, フランジ にテーパーを有する溝形材の圧縮特性として、図-17に 示すように、この形状に合わせた圧縮試験の治具を作製 して、圧縮特性を評価する.一方、90°方向では、試験 片の採取が困難であることから、扁平な断面を切り出し て、検討することとした. 試験A, Bの90°方向では、矩 形に切削して整形する場合(直方体)およびテーパー状 の場合(四角錐台)の2ケースについて比較検討する.

評価対象は、圧縮弾性率と圧縮強度であり、圧縮試験 では、荷重とひずみをデータロガーを用いて計測した. ひずみの計測にあたっては、試験片の中央部の表裏に1 軸ゲージ(ゲージ長3mm)をそれぞれ設置した.

圧縮試験には、島津製作所製オートグラフ(容量

100kN)を使用した.載荷方法は変位制御とし,載荷速 度は1.0 mm/minとした.





(a) 試験 A(b) 試験 B図-18圧縮試験のセットアップ (FCH-180)

### b) 試験片の採取, 製作方法, セットアップ

図-15 に, 表-5 に示した試験区分における試験片の採 取位置を示す.0°方向の試験片は, コーナーを含むフラ ンジの6箇所, また, ウェブの5箇所から採取する. 90°方向の試験片は, コーナー部を含むフランジの6箇 所, また, ウェブの1箇所から採取する.

図-18 に、各試験区分における圧縮試験のセットアップを示す.

### c) 圧縮弾性率, 圧縮強度の評価方法

第2章で検討した,Cl00Sのクーポン試験による圧縮 試験と同じ方法によった.

# d) 試験結果と考察

図-19 に、各採取位置における応力とひずみの関係を 示す.全ての部位において、破断まで線形挙動を示すこ とがわかる.また、各採取位置によって圧縮弾性係数が 異なることもわかる.









図-20 各採取位置における圧縮弾性係数 (FCH-180, 0°方向)

表-6 各採取位置における圧縮弾性係数(FCH-180, 0°方向)

採取位置	平均值(GPa)	標準偏差(GPa)	変動係数
FCL1, FCL4	11.9	0.8	0.070
FCL2, FCL5	20.7	2.5	0.123
FCL3, FCL6	17.8	0.8	0.046
WAL1~WAL5	33.3	1.0	0.030
フランジ	17.0	_	_
複合断面	24.7	_	



	採取位置	平均值(MPa)	標準偏差(MPa)	发動係数
	FCL1, FCL4	158.4	29.3	0.185
	FCL2, FCL5	286.8	36.0	0.126
	FCL3, FCL6	188.9	17.8	0.094
1	WAL1~WAL5	279.4	27.7	0.099

<b>表-8</b> ウェブ	における圧縮弾	性係数(FCH-18	0, 90°方向)
採取位置	平均值(GPa)	標準偏差(GPa)	変動係数
WAT1	33.8	1.1	0.034

弾性係数を、図-21、表-7 に、その圧縮強度をそれぞれ 示す.フランジ、ウェブともに積層構成は同一であるが、 圧縮弾性係数、圧縮強度ともに、フランジよりもウェブ の方が値が大きいことがわかる.ばらつきは、フランジ の方が大きくなり、採取位置でも異なる傾向を示した. 特に、フランジ先端部の圧縮強度の変動係数は 18.5%と なり、最も大きかった.これは、フランジ先端部には、 ロービング材が含まれおり、その位置が成形時にばらつ くためと考えられる.

表-8 に、ウェブおける 90°方向の圧縮弾性係数を、また、図-22、表-9 に、各採取位置の 90°方向の圧縮強度を それぞれ示す.対象とする溝形材 (FCH-180) は、0/90° ロービングクロス材の積層構成であるため、90°方向の 圧縮特性は、0°方向と理論的には同じであるが、表-8、 表-9 における 90°方向のウェブ (WAT)の値は、前述の 0°方向 (WAL) とほぼ同じであることが確かめられる.

また、フランジ90°方向の圧縮試験では、JIS等で示される、標準的な寸法の試験片が採取できないため、簡易的な試験(試験A,B)として圧縮特性の評価を試みたものである.FAT は切削して厚さを一定に調整したもの、FBT はテーパー断面のままとしたものであるが、切削の有無にかかわらず、フランジの一般部から採取した試験片(FAT2,FAT5,FBT2,FBT5)では、ウェブの0°あるいは90°方向(WAL,WAT)とほぼ同じ圧縮強度が得られ、変動係数は、切削したFATの方が小さくなる傾向を示した.また、表-9 に示される、フランジ90°方向の先端部、コーナー部の圧縮強度は、かなり小さく評価さ



表-9	各採取位置における圧縮強度	(FCH-180.	90°方向)
10 0		(1 OII 100)	20 22 11:17

			/
採取位置	平均值(MPa)	標準偏差(MPa)	変動係数
WAT1	33.8	1.1	0.034
FAT1, FAT4	159.6	99.3	0.622
FBT1, FBT4	128.2	36.8	0.287
FAT2, FAT5	315.6	20.3	0.064
FBT2, FBT5	321.3	33.3	0.104
FAT3, FAT6	44.4	8.1	0.182
FBT3, FBT6	64.1	15.1	0.235



 (g) FAT2
 (h) FAT3
 (i) FBT1
 (j) FBT5
 (k) FBT6

 図-23
 各部位における破壊形態の一例

れ,変動係数も大きくなった.

図-23 に、各部位における破壊形態の一例を示す.これらの図より、先端部、コーナー部では、繊維が不均一であること、また、試験片の採取あるいは切削加工により、試験片内の繊維のばらつきが、圧縮強度の低下や、変動係数の増加の要因と考えられた.

構造部材として評価する場合,これらの部位は,弱部 となるため,断面性能として有効断面から除くこと,あ るいは,部位ごとに物性値が異なるものとして評価する ことなどが考えられる.例えば,0°方向の圧縮弾性率は, 採取位置よって異なることから,断面積比に応じて,フ ランジ,断面全体の複合断面として,平均的な圧縮弾性 係数を算定した.**表**-6 に,その結果を併記している. その結果,フランジ全体では 17.0GPa,フランジ・ウェ ブを合わせた複合断面としては、24.7GPa となった. こ のような複合断面による評価の妥当性については、後述 する、全断面圧縮試験によって検討する.

# (2) 部材の全断面圧縮試験による検討

### a) 実験条件とセットアップ

圧縮ハンドレイアップ成形されたGFRP溝形材(FCH-180)を対象に、全断面圧縮試験を行って、部材の圧縮 特性を検討した.図-25に、試験体のセットアップを示 す.本検討では、つかみ部長さを50mm、評定長さを 50mmとした.想定される圧縮耐力は、前述の同溝形材 のクーポン試験の圧縮強度(ウェブ、0°方向:279.4 MPa)に全断面積を乗じて算定すると717.5kNとなる.

図-26に、試験体断面とひずみゲージの設置位置を示す.1軸ゲージ(ゲージ長3mm)を16箇所に設置した.

試験体は3体であり、製作後に計測した試験体高さの 高低差は、表-10に示すように、1.05~1.90mmであった. 全ての試験体で、断面の弱軸方向に対して高低差が生じ、 C100Sと同様に、ウェブ側が大きかった.

その他の実験条件は、前述した、C100Sの全断面圧縮 試験と同じである.



図-25 全断面圧縮試験のセットアップ図(評定長さ50mm)



図-26 FCH-180の試験体断面とゲージの設置位置

表-10	全断面圧縮試験の結果	(FCH-180,	0°方向)

試験体 No.	試験体高低	圧縮耐力	圧縮強度	弹性係数
	差 (mm)	$P_{\rm max}(\rm kN)$	o <sub>max</sub> (MPa)	Eave (GPa)
1	1.10	642.0	258.4	26.2
2	1.05	621.2	252.3	23.6
3	1.90	664.8	262.9	26.5
平均	_	642.7	257.8	25.4

### b) 試験結果と考察

表-10に,FCH-180における全断面圧縮試験の結果を, 図-26に,応力と16箇所の平均ひずみの関係をそれぞれ 示す.応力は,圧縮荷重を溝形材の断面積で除した値で ある.全ての試験では,クーポン試験と同様に,破断ま でほぼ線形挙動を示すことがわかる.応力が50~75MPa の範囲で挙動が大きく乱れ,試験体No.2ではひずみが増 加した.この時,定着用膨張材から破壊音が発生したこ とから,固定部側の一部が破損したと考えられた.弾性 係数の評価範囲では,応力とひずみの関係は,クーポン 試験の複合断面による評価とよく一致する.

図-27に、応力と各部位のひずみの関係(試験体 No.1)を示す.各部位のひずみの関係(試験体 No.1)を示す.各部位のひずみの平均値である.各部位で で、初期の段階から傾きがことなることから、曲げが生 じていることがわかる.これは、上耐圧盤の上面が球座 となっており、試験体高低差にり曲げが生じていること、 また、フランジの部位ごとに弾性率が異なることも要因 の一つと考えられる.なお、16箇所の平均ひずみ(図中 のTotal)で評価すれば、曲げの影響を除去できることが わかる.曲げの影響は、図-28に示すように、中央断面 におけるひずみ分布からも確かめられる.

図-29に、全断面圧縮試験の破壊の状況(FCH-180,





図-28 中央断面におけるひずみ分布 (試験体 No.1)



図-29 全断面圧縮試験の破壊の状況 (FCH-180, No.3)

No.3)を示す.全断面で破壊が見られるものの,フランジ先端部で破壊が著しいことがわかる.図-28で,応力249MPa時には,フランジ先端部でひずみが急減しており,この時点でフランジ先端部が破壊している判断された.表-10に示したように,部材の圧縮強度は,クーポン試験のフランジ,ウェブの一般部の圧縮強度をやや下回ったものの,クーポン試験による値で概ね評価できる.

# 4. まとめ

本研究では、製作方法の異なる2種類のGFRP製溝形材 の圧縮特性に着目して、クーポン試験片および座屈を生 じない短い部材を対象に、実験的な検討を行った.

まず、一方向材で、引抜成形法により製作された GFRP溝形材では、クーポン試験で算定される圧縮弾性 係数を用いて部材を評価できることがわかった.また、 圧縮強度については、クーポン試験片による値と部材の 試験体による値の比は1.44となり,FRP構造物の設計指 針で適用されている部材係数よりも高くなった.

次に、0/90°直交積層構成で、圧縮ハンドレイアップ成 形法により製作されたGFRP溝形材では、圧縮弾性係数、 圧縮強度は、部位ごとに異なるものの、部材としての圧 縮弾性係数は、クーポン試験による各部位の値を用いて 複合断面として算定して評価することができる.また、 圧縮強度については、強度が最も小さかったフランジ先 端部が破壊の起点となったが、クーポン試験によるフラ ンジまたはウェブの一般部の強度を用いて概ね評価でき ることが確かめられた.

謝辞:本研究は、土木学会複合構造委員会 FRP複合構造 研究小委員会(H208)の調査研究の一環として行われ たものであり、委員各位より、試験材料を提供いただく とともに、貴重な意見をいただいた.ここに記して謝意 を表します.

### 参考文献

- 複合構造委員会: FRP 歩道橋設計・施工指針(案), 複合構造シリーズ04, 土木学会, 2011.
- 複合構造委員会: FRP 水門設計・施工指針(案), 複合構造シリーズ06, 土木学会, 2014.
- 3) 小笠原俊夫,石川隆司:炭素繊維複合材料に対する 無孔圧縮試験方法の相互比較と簡便な試験法(NAL-Ⅱ法)の提案,宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-08-010, 2009.
- ACI: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures, ACI 440.3R-04, 2004.
- Ellen Lackey, James Vaughan, Swasti Gupta, Stephen Rawls, and Winter Wimbrow: Comparison of Compression Test Methods for Pultruded Composites, COMPOSITES & POLYCON 2007, October 17-19, Tampa, FL, USA., 2007.
- ASTM D6641 / D6641M 09:Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture, 2001.
- 7) JIS K 7018: 繊維強化プラスチック-積層面内圧縮特 性の求め方, 1999.
- 原田哲夫,出光隆,渡辺明:静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究,土木学会論 文集,第360号, V-3, pp.61-70, 1985.

# FUNDAMENTAL STUDY ON COMPRESSIVE PROPERTIES OF GFRP CHANNEL MEMBER

## Takuya IIDA and Hitoshi NAKAMURA

The compressive properties were experimentally studied for the pultruded and hand lay-up GFRP channel members. The compressive tests were conducted using the coupon and the stub column test specimens. The influence of the location of members and the specimen size on the compressive properties were investigated and the ultimate compressive strength as a member were discussed as compared to the compressive strength by the coupon test specimens.