

ハイブリッドFRP引抜成形山形材の 圧縮耐荷力に関する研究

北根 安雄¹・鈴木 森晶²・寺口 大輝³・松井 孝洋⁴・舘石 和雄⁵

¹正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp

²正会員 愛知工業大学教授 工学部土木工学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247)
E-mail: suzuki-moriaki@aitech.ac.jp

³正会員 株式会社横河ブリッジ 大阪工事本部大阪工事第一部 (〒952-8331 大阪府堺市西区築港新町 2-3)
E-mail: d.teraguchi@yokogawa-bridge.co.jp
(研究当時 名古屋大学大学院 工学研究科博士前期課程)

⁴正会員 東レ株式会社 ACM 技術部 産業・スポーツ技術室 (〒103-8666 東京都中央区日本橋室町 2-1-1)
E-mail: takahiro.matsui.f3@mail.toray

⁵正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail: tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

本研究では、腐食した鋼橋における取替または補強部材として開発したハイブリッドFRP引抜成形山形材の圧縮耐荷力特性を明らかにすることを目的として、ハイブリッドFRP山形材の圧縮耐荷力実験および圧縮耐荷力解析を実施し、弱軸回りの回転自由または強軸回りの回転自由の境界条件のもと、対象山形材の局部座屈および全体座屈性状を把握し、圧縮耐荷力の基礎データを取得した。その結果、強軸回り回転自由の条件では、全体座屈が支配する長柱領域において、ねじれの発生により純粋な橋軸回りの座屈モードとならず、弱軸回り全体座屈に近い圧縮強度となった。短柱領域では、どちらの境界条件でも局部座屈が圧縮強度を支配するため、対象山形材の耐荷力曲線は、局部座屈強度と弱軸回りの全体座屈強度をもとに作成できる可能性が明らかとなった。

Key Words: hybrid FRP, angle section, compressive strength, compression test, finite element analysis

1. はじめに

(1) 背景

FRP (Fiber Reinforced Polymer) は、軽量性や耐食性に非常に優れた材料であり、その軽量性から比強度・比剛性も高く、さらに施工性にも優れている構造材料である¹⁾。1940年代に軍事的な研究が進められ、その後、船舶、航空、住宅水回り製品など、さまざまな分野で適用が進められてきた。土木構造物への適用は、少し遅れて、1960年代に水門扉への適用が確認され、1980年ごろにコンクリートの補強筋への利用が始まり、1990年代に橋梁の主部材への適用が見られる。日本では、国内の全FRP出荷量のうち約16%が建設資材の用途となっている²⁾。

土木構造物の適用例で多く見られるコンクリート構造物・鋼構造物の補修補強³⁾では、部材の引張側にFRPを接着する事例が多いが、歩道橋⁴⁾や水門扉⁵⁾などの構造

部材としてFRPを適用する場合は、FRP部材が引張だけでなく曲げ、せん断、圧縮、ねじりなどの荷重に抵抗する必要がある。本論文では、FRP部材の圧縮強度に着目する。

鋼材の標準断面である形鋼では、鋼材の降伏までに局部座屈が生じないような断面となっており、短柱領域では降伏が、長柱領域では全体座屈が圧縮耐荷力の支配的要因となる。しかし、FRPは材料の圧縮強度までほぼ線形弾性挙動を示すため、引抜成形材など市場で入手できるFRP形材の場合、短柱領域において局部座屈が支配的となり⁶⁾、設計において鋼材の耐荷力曲線を流用することはできず、FRP部材の耐荷力曲線が必要となる。

FRP部材の局部座屈については、文献8)~10)などの研究があり、文献6)では、それらの研究成果をふまえ、局部座屈と全体座屈の連成を考慮した耐荷力曲線も提案されている。しかし、耐荷力曲線の基礎データとなる実験

データは、鋼材の実験データと比較して、未だ少ないのが現状である。

(2) 研究目的および方法

著者らは、腐食した鋼橋の補修補強における取替部材または補強部材として、ハイブリッドFRP引抜成形材の開発を2015年より行ってきた^{11)~13)}。本論文では、開発したハイブリッドFRP引抜成形山形材を対象とし、その圧縮耐力特性を明らかにすることを目的とする。FRP山形材の圧縮耐力実験および有限要素法による圧縮耐力解析を実施し、部材設計で利用可能な耐力曲線を規定するための基礎データを取得する。

2. 対象とするFRP山形材

本研究で対象とするFRP山形材の断面寸法を図-1に示す。対象部材は、同一断面の製品の量産に適した成形法である引抜成形法により成形されている。また、本材料はハイブリッドFRPであり、部材軸方向を0°方向、部材軸直角方向を90°方向と定義した場合に、0°方向には炭素繊維が、90°および±45°方向にはガラス繊維を使用している。炭素繊維は400g/m²の一方方向シートを、ガラス繊維は150g/m²の一方方向シートを用いており、使用する

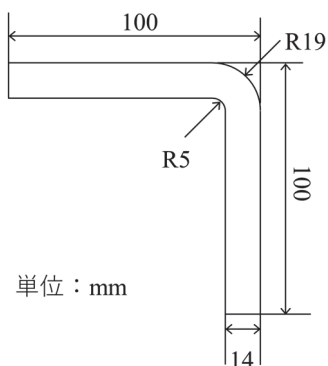


図-1 山形材断面寸法

表-1 材料試験結果

試験方向	弾性率		強度		試験法
	平均 (GPa)	変動 係数	平均 (MPa)	変動 係数	
軸方向 引張	181.9	0.0357	1326	0.0392	土木学会基準 JSCE-E531-2007
軸方向 圧縮	160.0	0.0447	467.0	0.0186	JIS K 7018
曲げ	180.2	0.0069	740.2	0.0200	JIS K 7017
面内 せん断	6.299	0.0184	112.7	0.0716	ASTMD 7078
層間 せん断	4.453	0.0609	33.86	0.0256	JIS K 7057

樹脂はビニルエステルである。また、本ハイブリッドFRPの繊維含有率は56.6%であった。材料の比重は1.70で、鋼材の約22%である。

本ハイブリッドFRPの引張、圧縮、曲げ、面内せん断、層間せん断に関する材料試験結果¹³⁾を表-1に示す。

3. 圧縮耐力実験

(1) 実験方法

2で記載したハイブリッドFRP山形材を実験供試体として、圧縮耐力実験を実施した。圧縮耐力実験には、愛知工業大学の長柱試験機（最大荷重3000kN）を用いた。図-2に示すように、実験供試体の両端には一軸ヒンジを設けており、強軸または弱軸回りのみ回転を許容す

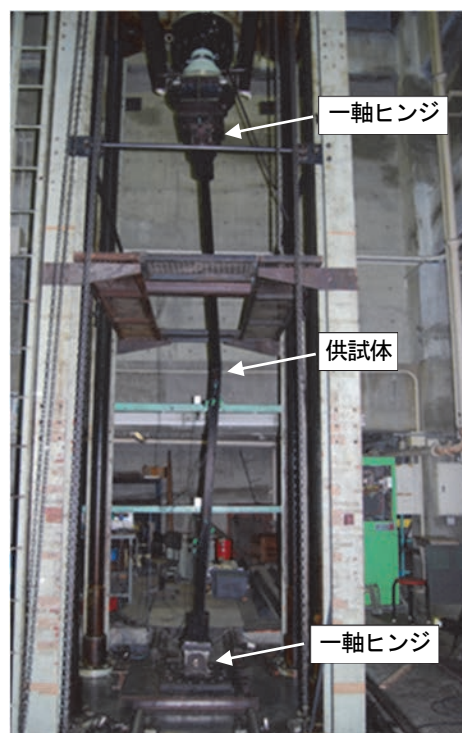


図-2 圧縮耐力実験の様子

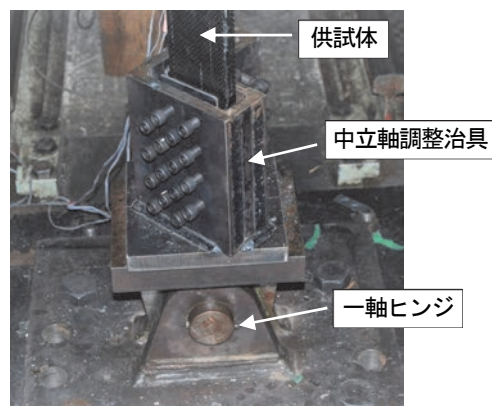


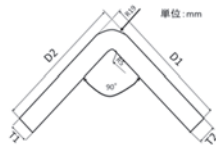
図-3 供試体の支持方法

表-2 供試体の実測寸法

	L' (mm)	供試 体名	D1 (mm)	D2 (mm)	T1 (mm)	T2 (mm)	L (mm)
弱軸	1,000	A-1	100.02	98.45	14.70	14.50	1,270
		A-2	99.45	100.28	14.68	14.62	1,270
	2,000	B-1	97.40	98.27	14.13	14.38	2,270
		B-2	100.32	99.10	14.17	14.38	2,270
	4,000	C-1	99.55	100.48	14.58	14.52	4,270
		C-2	99.53	99.70	14.60	14.32	4,270
強軸	2,000	D-1	98.98	99.80	14.05	14.25	2,270
		D-2	100.05	98.52	14.60	14.35	2,270
	3,000	E-1	99.52	100.62	14.63	14.57	3,270
		E-2	99.38	99.50	14.28	14.27	3,270
	4,000	F-1	97.87	99.22	14.55	14.55	4,270
		F-2	100.27	99.05	14.62	14.40	4,270

注1) D1, D2, T1, T2は右図の通り

注2) L' : 供試体長, L : 有効座屈長



る境界条件を設けた。中立軸と回転軸を合わせるため、一軸ヒンジに中立軸を調整する治具を取り付け、供試体は治具に固定し、一軸ヒンジを床と固定した（図-3 参照）。この治具は側面のボルトの長さを調整することにより、供試体の中立軸と一軸ヒンジの回転軸を一致させることができる。実験は、変位制御にて行い、座屈後、終局に至るまで载荷を行った。

計測は、軸方向の変位と荷重、試験体の有効座屈長 L （ヒンジ間長さ）の $1/2$ 点と $1/4$ 点（以後 $L/2$ と $L/4$ とする）におけるひずみの値、さらに面外変形を計測するために $L/2$ 点と $L/4$ 点における水平変位を計測した。本論文では、荷重と軸方向変位のみ報告する。また、各供試体の初期変形については計測を行っていない。

(2) 実験供試体

圧縮耐荷力実験で使用する供試体の長さ（ L' ）は、弱軸回りの回転を許容した境界条件用の供試体として 1m, 2m, 4m, 強軸回りの回転を許容した境界条件用の供試体として 2m, 3m, 4m であり、供試体数は、各条件につき 2 体ずつで、計 12 体である。なお、供試体を試験機に設置した際の有効座屈長 L は、表-2 に示すように一軸ヒンジを有する治具を含めるため、 L' より 270mm 長くなる。表-2 には、供試体名および各供試体の断面寸法の計測結果（3 回計測の平均）も示す。

(3) 実験結果および考察

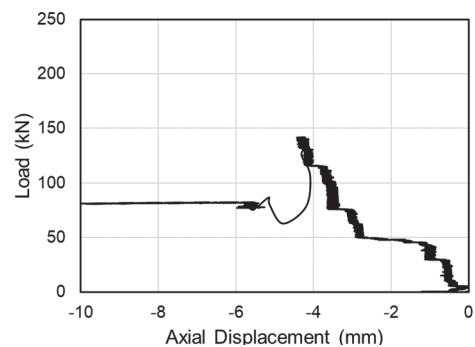
図-4 に実験終了時の供試体の様子の例（C-1 および F-1）、図-5 に荷重－軸方向変位関係の例（C-1 および F-1）、表-3 に実験で得られた最大荷重 P_{max} 、最大荷重を



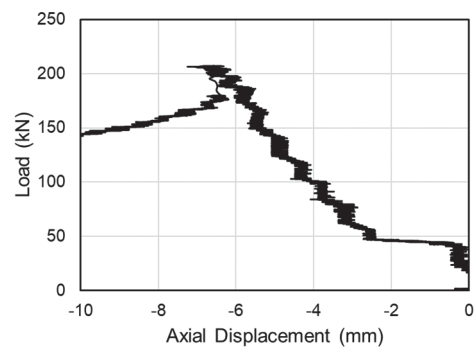
(a) C-1

(b) F-1

図-4 実験終了時の供試体



(a) C-1



(b) F-1

図-5 荷重－軸方向変位関係の例

表-3 実験結果のまとめ

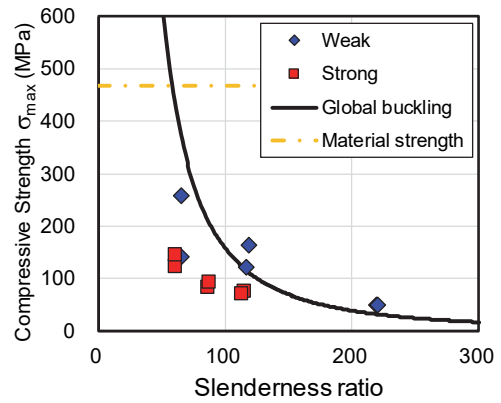
	供試体名	L (mm)	細長比	P_{max} (kN)	σ_{max} (MPa)	破壊位置
弱軸	A-1	1,270	65.6	695	259	治具の中
	A-2	1,270	65.2	386	143	なし
	B-1	2,270	119	425	164	3L/4
	B-2	2,270	117	324	123	L/2
	C-1	4,270	219	142	52.6	L/2
	C-2	4,270	220	137	51.1	L/2
強軸	D-1	2,270	60.1	331	127	L/4
	D-2	2,270	60.2	396	148	L/3
	E-1	3,270	86.1	232	85.5	なし
	E-2	3,270	86.5	253	96.0	L/2
	F-1	4,270	114	207	78.1	L/2
	F-2	4,270	113	200	74.6	L/2

断面積で除した最大荷重時の平均応力 σ_{max} （以降、圧縮強度と記す），実験後に確認された破壊断面のおおよその高さ方向位置を示す。

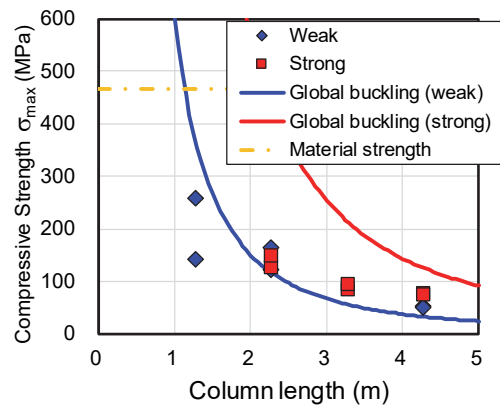
破壊断面の位置を見ると，有効座屈長が長いものはL/2点で破壊しているのに対し，有効座屈長が短くなると，必ずしもL/2点とはならず，実験後に破壊断面が目視では確認できないものもある．また，A-1は中立軸調整治具の中で破壊しており，圧縮破壊に近い破壊形態であったと推定できる。

図-6に実験で得られた圧縮強度 σ_{max} のまとめを示しており，図-6(a)は，圧縮強度と細長比の関係を，図-6(b)は，圧縮強度と有効座屈長Lとの関係を示している．各供試体の断面2次モーメントは，表-2で示したD1とD2の平均値 D_{ave} とT1とT2の平均値 T_{ave} を用いて，等辺山形材として計算した．図-6中には，全体座屈強度を示すオイラーの座屈曲線を示しているが，計算に必要な弾性率は表-1の圧縮実験の弾性率を，断面2次モーメントには図-1に示した公称断面寸法から求めたものを用いた．公称断面寸法から求めた断面2次モーメントと，各供試体の D_{ave} と T_{ave} から求めた断面2次モーメントの全供試体での平均値との差は1%以下であった．また，材料の圧縮強度467MPaも図に示しているが，全体座屈強度と材料の圧縮強度が等しくなる細長比は58であった．

実験供試体の細長比は，表-3より，60から220の範囲である．図-6(a)の圧縮強度と細長比の関係をみると，弱軸回り回転自由の供試体では，細長比が100以上の供試体B-1，B-2，C-1，C-2で全体座屈曲線より強度が大きく出ており，Bの供試体では27%，Cの供試体では58%大きくなっている．A-1とA-2では，全体座屈曲線より強度が小さくなっており，平均で45%小さかった．全体座屈曲線より強度が大きくなっている原因については，特定はできていないが，回転軸と弱軸がずれていた可能性が考えられる．強軸回り回転自由の供試体では，全ての



(a) 圧縮強度と細長比の関



(b) 圧縮強度と有効座屈長との関

図-6 実験で得られた圧縮強度のまとめ

ケースで，全体座屈曲線より強度は小さくなっており，D，E，Fの供試体で，それぞれ68%，57%，48%小さくなっていた．

弱軸回り回転自由の供試体と強軸回り回転自由の供試体を比較すると，同じ細長比では，強軸回り回転自由の供試体の方が強度が低く出る傾向である．そこで，図-6(b)に示すように有効座屈長を横軸に取り圧縮強度を整理すると，同じ有効座屈長では，強軸回り回転自由の供試体は，弱軸回り回転自由の供試体と同程度の圧縮強度となっていることが明らかとなった．また，実験中の観察から，強軸回り回転自由の供試体で全体座屈が生じた場合，部材のねじれが確認された．強軸回り回転自由の供試体では，ねじれの発生により，純粋な強軸回りの座屈モードとならず，強軸回りの曲げ剛性を考慮した全体座屈強度より小さくなり，弱軸回り回転自由の供試体に近い圧縮強度となったことが推定される．ねじれ発生の原因は，低いせん断弾性率に起因する低いねじり剛性および初期変形が考えられる．

初期変形の影響および材料特性のばらつきを考慮し，強軸回り回転自由および弱軸回り回転自由の供試体の座屈モード，局部座屈の性状，局部座屈と全体座屈の連成

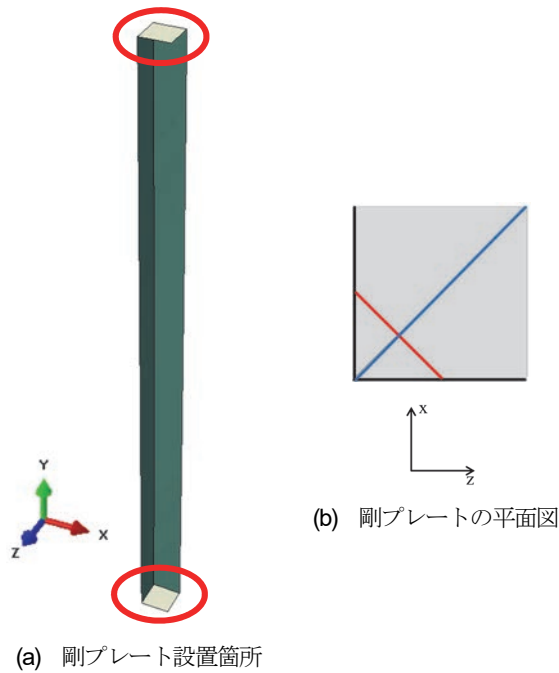


図-7 上下端の剛プレート

などを詳細に把握するために、次章では、ハイブリッド FRP 山形材の圧縮強度を数値解析的に検討する。

4. 圧縮耐力解析

(1) 解析条件

a) 解析モデル

本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェア Abaqus 6.14¹⁴⁾を用いて、ハイブリッド FRP 山形材のモデル化を行い、有限要素解析を行うことにより、圧縮耐力性状を明らかにする。解析モデルでは、4 節点低減積分シェル要素 S4R を使用し、メッシュサイズは 10mm×10mm とした。

部材端部では 3. の圧縮耐力実験と同様に、弱軸および強軸回転のみ可能な境界条件を設定した。この境界条件を再現するために FRP 引抜成形材の両端に、シェル要素を用いて作成した 93mm 四方厚さ 10mm の剛なプレートを取り付け、プレートの材料特性は線形弾性とし、弾性率には 20,000GPa を使用した。剛プレートおよびその設置位置を図-7 に示す。図-7(b) の黒線上の節点と FRP 山形材の端部の節点を共有し、図-7(b) の赤線（弱軸回り回転可能）または青線（強軸回り回転可能）上の節点に境界条件を与える。それらの節点では、下端のプレートにおいて、x 軸、y 軸、z 軸の方向への変位を拘束し、上端のプレートにおいては x 軸、z 軸方向の変位を拘束し、さらに y 軸方向（鉛直方向）の強制変位を与えた。解析

表-4 解析に使用した材料定数

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)
160.0	17.60	0.35	6.299	4.453	4.453

※1 1: 部材軸方向, 2: 部材軸直角方向, 3: 板厚方向

※2 E : 弾性率, ν : ポアソン比, G : せん断弾性率

では、幾何学的非線形を考慮した。

b) 材料特性

2 で記載した材料試験では、引張または圧縮試験において、応力が引張または圧縮強度に達するまで、応力-ひずみ関係はほぼ線形性を保っており、その後急激に荷重が低下する挙動を示した。したがって、本研究の解析では、線形弾性材料を仮定する。表-4 に解析に使用した材料定数を示す。部材軸方向の弾性率は、材料圧縮試験により得られた弾性率を採用した。後述するが、 E_1 と G_{12} はばらつきを考慮するため、表-4 に示す E_1 と G_{12} は平均値である。

本解析は、線形弾性解析であるため、圧縮応力が材料の圧縮強度に達したのちでも解析は継続する。したがって、解析終了後、要素の応力を確認し、最大荷重に達するまでに、軸方向応力が圧縮強度に達していれば、その点の荷重を圧縮耐力と定義した。

表-1 から明らかなように、材料定数はばらつきを有しており、部材の耐力曲線を設定する場合には、このばらつきを考慮する必要がある。そこで、本研究では、圧縮耐力特性に大きく影響を与える軸方向弾性率 E_1 、面内せん断弾性率 G_{12} 、および軸方向圧縮強度 σ_c のみ、解析においてばらつきを考慮する。具体的には、軸方向弾性率、面内せん断弾性率と軸方向圧縮強度は、表-1 に示す平均値と変動係数を有する正規分布に従う独立な確率変数と仮定し、解析モデル作成の際に、ランダムにそれらの値を設定し、解析入力条件を決定する。

c) 初期変形

柱の圧縮耐力に影響を与える初期不整の一つに初期変形が挙げられる。本解析においては、初期たわみ（部材の曲がり）と初期ねじれ（断面の部材軸周りの回転）を考慮し、解析モデルに導入する。

モデルの座標軸は図-7 に示すように設定しており、部材軸方向が y 軸で、部材断面は xz 平面上に存在する。部材の曲がり、部材中央 ($y=L/2$) で最大値 δ_{max} をとる正弦波の半波と仮定し、式(1)に示される関数 $\delta(y)$ で表されるものとする。ここで、 L は部材長である。

$$\delta(y) = \delta_{max} \sin \frac{\pi y}{L} \quad (1)$$

この $\delta(y)$ を高さ y の断面における節点の移動量とし、弱軸回りの回転が許容されているモデルは弱軸と直交方向、強軸回りの回転が許容されているモデルは強軸と直交方

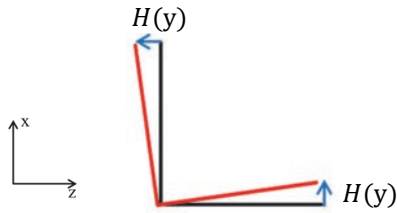


図-8 高さ y 断面の初期ねじれによる節点移動

向に節点を移動することで、部材の曲がりを考慮した。

初期ねじれについても、ねじれにより節点移動量が正弦波の半波と仮定し、部材中央 ($y=L/2$) で最大値 H_{max} を取る式(2)に示される関数 $H(y)$ を導入する。

$$H(y) = H_{max} \sin \frac{\pi y}{L} \quad (2)$$

この $H(y)$ を、図-8 に示すように高さ y の断面における断面の端部の節点の移動量とする。この際、 x 軸に平行な面は z 方向にのみ、 z 軸に平行な面は x 軸方向にのみ移動するものとしている。このように節点を移動させた場合、正確には辺の長さが増加するが、今回はねじれ角が十分小さく、辺長が増加する影響は小さい。

初期たわみによる部材中央でのたわみ量である δ_{max} と、初期ねじれによる部材中央の端部の節点の移動量である H_{max} は、ばらつきを有する独立な確率変数ととらえ、解析モデル作成の際に、ランダムにそれらの値を設定し、解析モデルの節点位置を決定した。 δ_{max} と H_{max} は、正規分布に従う確率変数と仮定し、その平均値は、本材料の製造メーカーで計測されたデータに基づき、 $\delta_{max,ave} = H_{max,ave} = L/1000$ とした。しかし、ばらつきについてはデータが得られなかったため、 δ_{max} と H_{max} の変動係数は共に 0.1 と仮定した。

d) 解析ケース

弱軸回り回転自由および強軸回り回転自由の境界条件のそれぞれで、部材長は 1m, 1.5m, 2m, 2.5m, 3m, 3.5m, 4m とし、上述したように、 E_1 , G_{12} , σ_c , δ_{max} , H_{max} は確率変数と仮定しているの、境界条件と部材長の組合せの解析ケースごとに、それらの確率変数をランダムに設定した 20 モデルを作成した。各解析ケースにおいて使用したそれぞれの確率変数の最大値、最小値を表-5に示す。また、解析では、部材長とヒンジからヒンジまでの有効座屈長は同じとなる。

(2) 解析結果および考察

図-9 にすべての解析から得られた圧縮強度を示す。圧縮強度は、解析で得られた最大荷重、または最大荷重までにある要素が材料の圧縮強度に達した場合は、その時点の荷重を、断面積で除したものである。また、表-6 に各解析ケース 20 モデルから得られた圧縮強度の平均値と変動係数を示す。

表-5 各確率変数の解析モデルでの最大値・最小値

	L (m)	Max/ Min	E_1 (GPa)	G_{12} (GPa)	σ_c (MPa)	δ_{max} (mm)	H_{max} (mm)
弱軸	1	Max	172.0	6.471	505.5	1.18	1.26
		Min	143.2	6.057	445.6	0.85	0.90
	1.5	Max	172.2	6.512	491.7	1.76	1.72
		Min	149.9	6.062	434.2	0.99	1.09
	2	Max	168.4	6.574	487.9	2.36	2.17
		Min	138.9	6.014	436.7	1.59	1.69
	2.5	Max	176.2	6.626	492.7	2.82	2.96
		Min	142.1	6.065	442.0	1.99	2.15
	3	Max	172.0	6.483	499.0	3.54	3.92
		Min	150.4	6.145	437.6	2.48	2.46
	3.5	Max	173.3	6.460	521.8	3.99	4.38
		Min	148.0	6.046	440.1	2.79	2.65
強軸	1	Max	169.9	6.601	520.9	1.13	1.18
		Min	147.6	6.102	429.6	0.84	0.85
	1.5	Max	175.0	6.612	493.5	1.71	1.79
		Min	151.0	6.073	429.8	1.17	1.15
	2	Max	171.7	6.424	510.3	2.44	2.49
		Min	147.4	5.981	441.4	1.71	1.48
	2.5	Max	170.7	6.551	505.1	2.96	3.17
		Min	148.4	6.055	438.3	1.87	2.11
	3	Max	174.0	6.495	497.4	3.42	3.80
		Min	149.9	6.085	433.0	2.58	2.62
	3.5	Max	170.0	6.537	493.4	3.99	4.23
		Min	144.8	6.128	430.7	2.90	2.47
4	4	Max	167.0	6.481	485.3	4.38	4.69
		Min	145.6	5.988	437.0	3.42	3.42

全体座屈と局部座屈の座屈曲線の両方を示すため図-9の横軸は、細長比ではなく、部材長としている。3 辺が単純支持、1 辺が自由端の板の局部座屈に対する座屈応力を式(3)⁹⁾に示す。

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2}{tb^2} \left\{ D_{11} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{12}{\pi^2} D_{66} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$D_{11} = \frac{E_1 t^3}{12(1 - \nu_{12}\nu_{21})}$$

$$D_{66} = \frac{G_{12} t^3}{12}$$

t : 板厚

a : 板の長さ

b : 板の幅 (=100mm-14mm=86mm)

式(3)より、アスペクト比 (a/b) が十分に大きい領域、つまり幅 b に対して長さ a が大きい領域については第 2 項の影響が支配的となることがわかる。また、第 2 項は面内せん断弾性率 G_{12} に比例する。

図-9 には、全体座屈強度の理論値を実線で、3 辺単純

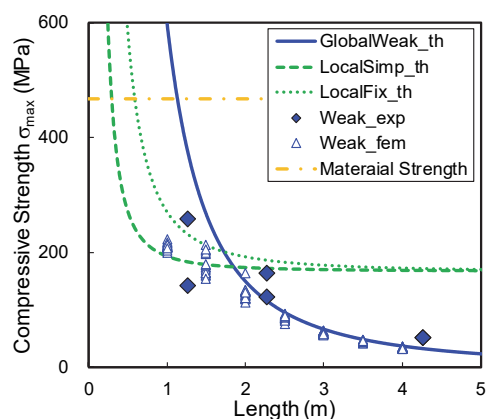
支持，1 辺自由の板の局部座屈強度の理論値（式(3)）を破線で，載荷辺の2辺固定，1辺単純支持，1辺自由の板の局部座屈強度の理論値を点線で示している．載荷辺の2辺固定，1辺単純支持，1辺自由の板の局部座屈強度は，式(3)において，長さ a を半分にしたものとなる．

図-9(a)に弱軸回り回転自由の境界条件を用いた解析結果（各長さにつき 20 モデル）を△で示し，合わせて実験結果を◆で示す．図-9(b)には，強軸回り回転自由の境界条件を用いた解析結果（各長さにつき 20 モデル）を○で示し，実験結果を■で示す．図-9(c)には，各長さ 20 モデルの解析結果の平均値を弱軸回り回転自由の場合△で，強軸回り回転自由の場合○で表しており，±標準偏差をエラーバーで示している．

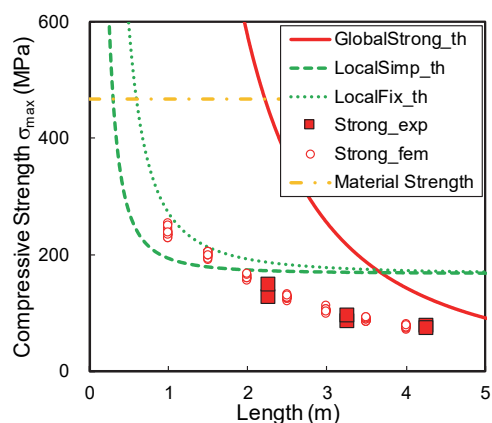
弱軸回り回転自由の結果では，全体座屈が支配的な領域（部材長 2.5m 以上）では，弱軸回りの全体座屈曲線から約 10%程度低い圧縮強度となっているが，全体座屈曲線に沿った解析結果となっており，20 モデルの間のばらつきも小さい．全体座屈と局部座屈の遷移領域では 20 モデルの間のばらつきが大きくなっており，これは，破壊モードが常に一致しておらず，そのモデルの材料定数および初期変形の値によって，全体座屈か局部座屈のどちらかになっていることに原因がある．図-9(a)で，部材長 1.5m の場合には，解析結果に2つのグループが見られるが，上側のグループは，最終的に弱軸回りの全体座屈モードとなったもの，下側のグループは，局部座屈モードとなったものである．部材長 1m の場合は，局部座屈が支配的であり，平均値で見ると，3 辺単純支持，1 辺自由の局部座屈強度より約 10%高い結果であった．また，弱軸回り回転自由のすべてのケースで，最大荷重より前に，要素の一部が材料の圧縮強度に到るモデルはなかった．

強軸回り回転自由の結果では，全体座屈が支配的な領域において，実験結果と同様，強軸回りの全体座屈曲線ではなく，弱軸回りの全体座屈曲線に近い結果となっている．これは，実験結果の考察でも述べた通り，部材がねじれることにより，全体座屈の座屈モードが純粋な強軸回りの座屈モードとなっていないことが理由である．

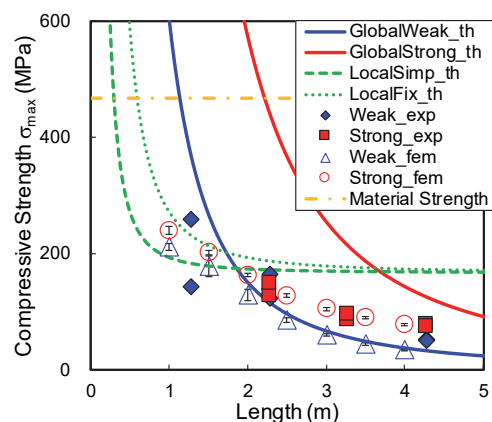
図-10に部材長 4m の場合の，弱軸回り回転自由と強軸回り回転自由の解析ケースで 20 モデルのうち 1 例について，最大荷重が得られた時点での変形モードを示す．弱軸回り回転自由の場合は強軸方向への曲げ変形を，強軸回り回転自由の場合は弱軸方向への曲げ変形を示しているが，強軸回り回転自由の場合は，さらに断面がねじれていることがわかる．全体座屈におけるねじれの状況を明らかにするために，図-11に部材長 4m の場合の中央断面（高さ 2m）における面内変位（20 モデルのうちの 1 モデル）を示す．弱軸回り回転自由の場合では，断面は回転せず，強軸方向にたわみが増加していく傾向が見ら



(a) 弱軸回り回転自由境界条件



(b) 強軸回り回転自由境界条件



(c) 解析結果のまとめ

図-9 解析で得られた FRP 山形材の圧縮強度のまとめ

表-6 解析で得られた FRP 山形材の圧縮強度のまとめ

L (m)	弱軸回り回転自由		強軸回り回転自由	
	平均 (MPa)	変動係数	平均 (MPa)	変動係数
1	211.3	0.025	239.6	0.030
1.5	178.8	0.100	200.9	0.020
2	128.8	0.079	162.6	0.018
2.5	86.6	0.045	127.9	0.018
3	60.1	0.037	105.0	0.027
3.5	45.1	0.038	89.5	0.028
4	34.1	0.037	77.8	0.024

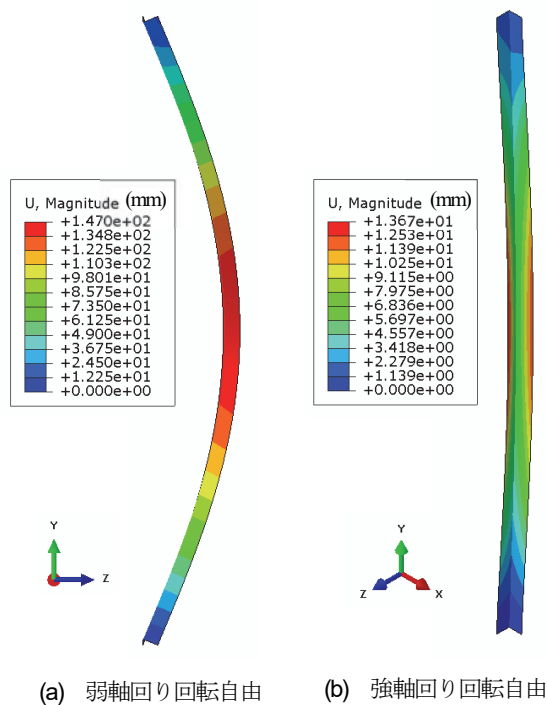
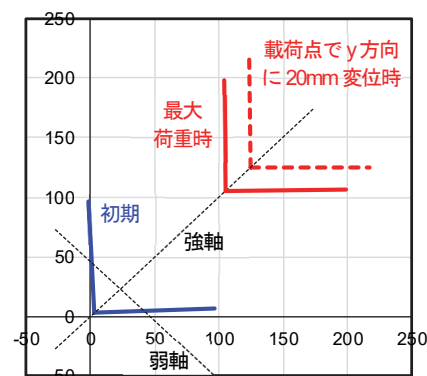


図-10 部材長 4m の最大荷重時の変形モード例
(コンター図は変位の絶対値, 変形倍率 5 倍)

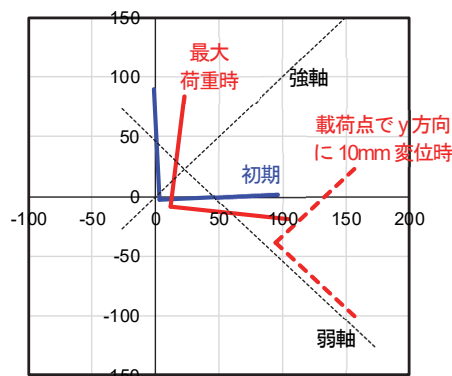
れるが、強軸回り回転自由の場合では、弱軸方向にたわみが増加していくが、同時に断面も回転し、部材がねじれている様子が明らかである。座屈モードとしては、部材長 1m と 1.5m のケースはすべて局部座屈を示し、2m 以上のケースでは、上記のようなねじれ変形を含む全体座屈であった。

強軸回り回転自由の場合の圧縮強度は、同じ長さの弱軸回り回転自由の場合の圧縮強度に比べて、平均値で 50～130%大きい結果であった。全体座屈と局部座屈の遷移領域と、局部座屈が支配的な領域では、弱軸回り回転自由の圧縮強度との差が小さくなり、平均値で見ると弱軸回り回転自由の圧縮強度より 12%～26%大きい結果となった。1m および 1.5m のケースでは、3 辺単純支持、1 辺自由の局部座屈強度よりも荷重辺の 2 辺固定、1 辺単純支持、1 辺自由の板の局部座屈強度の理論値に近い結果となった。また、部材長 1m、1.5m、2m のすべてのモデルで、最大荷重が得られる少し手前で、部材端部において一部の要素が材料の圧縮強度に達していたため、その時点の荷重で圧縮強度を計算している。2.5m 以上のモデルでは、最大荷重までに材料の圧縮強度に達するモデルはなかった。

今後、初期変形のばらつきについて、正確なデータを収集して、初期変形の影響を精度よく評価する必要がある。また、強軸回り回転自由の全体座屈挙動に対するねじれ座屈の影響を定量的に明らかにする必要がある。現



(a) 弱軸回り回転自由



(b) 強軸回り回転自由

図-11 部材長 4m の中央断面の面内変位の例

時点では、対象とするハイブリッド FRP 山形材が圧縮荷重を受ける場合、弱軸回りの全体座屈曲線と 3 辺単純支持、1 辺自由の局部座屈強度をもとに、設計で利用できる耐荷力曲線を作成できる可能性が明らかとなった。

5. 結論

本研究では、腐食した鋼橋の補修補強における取替部材または補強部材として開発したハイブリッド FRP 引拔成形山形材の圧縮耐荷力特性を明らかにすることを目的として、ハイブリッド FRP 山形材の圧縮耐荷力実験および有限要素法による圧縮耐荷力解析を実施し、弱軸回りの回転自由または強軸回りの回転自由の境界条件のもと、局部座屈および全体座屈性状を把握し、短柱領域から長柱領域までの圧縮耐荷力の基礎データを取得した。以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) 圧縮耐荷力実験から、同じ有効座屈長であれば、強軸回り回転自由の条件でも弱軸回り回転自由の条件と同程度の圧縮耐荷力となった。これは、強軸回り回転自由の条件では、断面がねじれることで純粋な強軸回りの座屈モードとならず、強軸回

りの曲げ剛性を考慮した全体座屈強度より小さくなったことが推定される。

- (2) 圧縮耐荷力解析結果から、弱軸回り回転自由のケースでは、長柱領域で全体座屈強度より平均値で約 10%低い圧縮強度を示した。局部座屈が支配する短柱領域では、3 辺単純支持、1 辺自由の理論局部座屈強度より、平均値で約 10%高い圧縮強度となった。
- (3) 圧縮耐荷力解析において、強軸回り回転自由のケースで得られた圧縮強度は、全体座屈が支配する長柱領域では強軸回りの全体座屈強度より弱軸回りの全体座屈強度に近かったが、弱軸回り回転自由の同じ長さのケースより、平均値でみると 50～130%大きい結果であった。局部座屈が支配する短柱領域では、弱軸回り回転自由の圧縮強度より 12%～26%大きい結果となり、載荷辺の 2 辺固定、1 辺単純支持、1 辺自由の板の理論局部座屈強度に近い結果であった。
- (4) 実験および解析の結果から、対象としたハイブリッド FRP 山形材が圧縮荷重を受ける場合、弱軸回りの全体座屈曲線と 3 辺単純支持、1 辺自由の局部座屈強度をもとに、初期変形の影響を考慮すれば、設計で利用できる耐荷力曲線を作成できる可能性が明らかとなった。

謝辞：本研究は、H29 年度～H30 年度国土交通省建設技術研究開発助成を受け実施した「低ライフサイクルコストを実現するインフラ向け CFRP 引抜部材の設計・成形・施工法の開発および光ファイバを用いたモニタリング技術の開発」研究の一部である。また、部材の成形はフクビ化学工業(株)で実施し、研究の推進には福井県の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) R. M. Jones: *Mechanics of Composite Materials*, Second Edition, Taylor & Francis, 1999.
- 2) 一般社団法人強化プラスチック協会：FRP 用途別・成形法別統計, <http://jrps.or.jp/market-data> .
- 3) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09, 2018.
- 4) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 04, 2011.
- 5) 土木学会：FRP 水門設計・施工指針（案），複合構造シリーズ 06, 2014.
- 6) L. C. Bank: *Composites for Construction – Structural Design with FRP Materials* -, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- 7) 土木学会：土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ，複合構造レポート 11, 2014.
- 8) Barbero, E. J. and Raftoyiannis, I.: Local buckling of FRP beams and columns, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 339-355, 1993.
- 9) Tomblin, J. and Barbero, E. J.: Local buckling experiments on FRP columns, *Thin-Walled Structures*, Vol. 18, No. 2, pp. 97-116, 1994.
- 10) Kollár, L.P.: Local buckling of fiber reinforced plastic composite structural members with open and closed cross sections, *Jouranal of Structural Engineering*, Vol. 129. No. 11, pp. 1503-1513, 2003.
- 11) 上山裕太, 北根安雄, 松井孝洋, 近藤富士夫, 舘石和雄：ハイブリッド FRP 積層体の支圧強度評価法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 5, 複合構造論文集, 第 4 巻, pp. II_74-II_83, 2017.
- 12) 北根安雄, 上山裕太, 寺口大輝, 松井孝洋, 舘石和雄, 後藤基浩：腐食した鋼桁端部に対する引抜成形 FRP アンクル部材による補修方法の検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 75, No. 5, 複合構造論文集, 第 6 巻, pp. II_27-II_35, 2019.
- 13) 寺口大輝, 北根安雄, 松井孝洋, 舘石和雄：ハイブリッド FRP 引抜成形材と鋼材の支圧ボルト接合部に関する耐力実験, 土木学会論文集 A1, Vol. 76, No. 5, 複合構造論文集, 第 7 巻, pp. II-95-II-104, 2020.
- 14) Dassault Systèmes: Abaqus 6.14 Documentation, 2014.

(Received August 28, 2020)

STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTH OF PULTRUDED HYBRID FRP ANGLE SECTION

Yasuo KITANE, Moriaki SUZUKI, Daiki TERAGUCHI, Takahiro MATSUI and Kazuo TATEISHI

This study conducted compression tests and numerical analyses of pultruded hybrid FRP angle section which has been developed to be used for replacement member and reinforcement member for corroded steel bridges, in order to understand global and local buckling characteristics and to obtain compressive strength data. As a result, the angle section with a large slenderness ratio when the rotation around the strong axis is free shows a buckling mode with a twisting of section and compressive strength similar to that of the case when the rotation around the weak axis is free. Since the angle section with a small slenderness ratio is controlled by the local buckling, the compressive strength of the angle section may be determined based on the local buckling strength and the global buckling strength around the weak axis.