# (8) 既存鋼管トラス屋根構造部材のCFRPによる圧縮補剛

藤井 裕也1・松本 幸大2・藤本 信介3・小原 優明4

 AIJ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:y143542@edu.tut.ac.jp

 <sup>2</sup> AIJ正会員 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 准教授 博士 (工学) (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
 E-mail:y-matsum@ace.tut.ac.jp

> <sup>3</sup> AIJ正会員 東レ建設 技術部 (〒530-8222 大阪府大阪市北区中之島3-3-3中之島三井ビル19階) E-mail:shinsuke fujimoto@tcc.toray.co.jp

4 太陽工業 TM事業部 マーケティング室(〒153-0043 東京都目黒区東山3-16-19)
 E-mail:om002663@mb.taiyokogyo.co.jp

近年発生した大地震により、空間屋根構造等に多く使用されている鋼管トラス構造部材の座屈損傷が問題となっている.これを受け、筆者らは、軽量なCFRPを用いて既存建築立体トラス構造の圧縮耐力を向上させる手法の検討を行った.まず、鋼管トラス構造に圧縮力が作用することで生じる面外変形を拘束するために必要なCFRPの材料・断面性能を整理した.次に、CFRP補強を施した鋼管トラス部材の圧縮試験を行い、耐力上昇効果を確認した.更に、既往の日本建築学会座屈耐力設計式に、CFRP補強を行うことでの座屈長さ低減効果を加味し、圧縮耐力が算定でき実験結果と良い対応を示すことを明らかにした.

Key Words : CFRP, steel pipe, truss, axial compression, strength

## 1. はじめに

鋼部材を三次元的に組み立てて構成する立体トラス構造は、広い無柱空間を必要とする体育館やホール等の大空間構造物に多く用いられている<sup>1)</sup>. 学校体育館は、大地震時の避難所や救援のための施設として用いられることが多く<sup>2</sup>, 地震後の継続使用に関する期待も大きい.しかしながら、近年の地震被害例では、立体トラス構造部材が座屈や破断・落下する場合が見られており<sup>3)</sup>, 発災後の継続使用や発災時の人的被害が懸念される.また、高所に位置する空間構造の構造部材は損傷後の補強や部材交換も容易ではないため、地震時であっても弾性範囲に留まることが望ましい<sup>4</sup>.

圧縮を受ける部材の耐力上昇の観点では、座屈拘束ブ レースに代表されるような、部材の座屈変形を拘束し材 料の圧縮強度を発揮させる方法が提案され、デバイスの 開発および採用事例も多く報告されている<sup>9</sup>. また、部 材の一部を補強した場合の座屈耐力は座屈設計指針%に 示されており、そのメカニズム・設計例も多数公表され ている.しかしながら、既存構造物を補強する際、構造 物の重量増加を最小限にすることで基礎への負担を減ら し、同時に施工の合理化にも繋がることから、軽量な材 料を用いる提案が必要である<sup>79</sup>.中でも、近年、航空分 野・自動車分野での応用が目覚しい炭素繊維強化樹脂

(Carbon Fiber Reinforced Polymer,以下CFRP)は、高剛 性・高強度材料として建築・土木分野への補強材料とし て注目されている.

以上の背景から,本研究では立体トラス構造部材を対象として,圧縮荷重作用下で生じる座屈耐力を上昇させる補強法の提案と実験による効果の検証を行う.まず, 圧縮耐力上昇に要求される機械的性質を明らかとした上

で、CFRPの材料設計(基材構成決定)および合理的な 成形法を選択する.耐力上昇の力学モデルでは、対象部 材の表面状態に左右されないよう、非接着を前提とした 補強力学モデルの構築を行っている.次に、設計した CFRPを立体トラス部材に施工し、圧縮試験を行うこと で、力学モデルの妥当性や補強効果の検証を行う.

## 2. 力学モデル

本章では、補剛法の座屈拘束モデルを用いて検討する. 力学モデルを図-1に示す.

変数一覧

As ACF:断面積 *E*s*E*CF: 弹性係数 Li:トラス部材長さ L2:補剛長さ ω:トラス部材と補剛材とのクリアランス δι:座屈によって生じる被補剛部の面外変形量 δ: 座屈によって生じる補剛部の面外変形量 δ<sub>2,CF,ul</sub>:補剛材が破壊するときの面外変形量 Mi: 非補剛部内の鋼材の最大曲げモーメント M2:非補剛部の最大曲げモーメント P:載荷荷重 Q: 補剛材と鋼材が接触して生じる反力 tcF: CFRPの板厚 GCF: 剪断弹性係数 *I*GF: 断面二次モーメント *O*<sub>CF,ul,T</sub>: CFRP補強材が剪断破壊する時の剪断力 OCF,ullT: CFRP補強材が剪断破壊する時の剪断力 ZCF:断面係数 fac: 鋼材の長期許容圧縮応力度 fcF.ul.L:補剛材の軸方向強度 fcF,ul,T:補剛材の周方向強度 D: CFRP補剛材の外径

添え字については, s: 鋼材, CF: CFRP, ul: 破断耐 力, L: 部材軸方向, T: 部材軸直交方向, LT: 剪断方 向を示している.

## (1) 必要剛性の算定

図-1(a)のように鋼材と補剛材間でのクリアランスが存 在するモデルを考える. 圧縮力を作用することによって 補剛材間でふが生じる. 鋼材が変形すると補剛材間のク リアランスが無くなり接触すると,補剛材中央部で変形 量&及び反力Qが生じる. やがて,変形が進行し,補剛 材端部に変形した鋼材が接触することで,補剛材と鋼材 の境界部分で鋼材が曲げ降伏をして耐力低下に至ること を想定する.





補剛材と鋼材に生じる最大曲げモーメントは式(1)のように表され、CFRPによる補強部よりも先に非補強部で 鋼材を曲げ降伏させるため、式(1)よりMi>Maとして導出 したものが式(2)である. CFRPは図-1(d)のような両端接 触位置を支持点とした3点曲げ状態での変形となるため、 力と変形の関係式は式(3)のようになり、補強材の必要 剛性は式(4)より評価する.

$$\begin{cases} M_2 = P(\delta_0 + \delta_1 + \delta_2) - \frac{Q}{2} \frac{L_2}{2} \\ M_1 = P\delta_1 \end{cases}$$
(1)

$$P(\delta_0 + \delta_2) < \frac{1}{4}QL_2 \tag{2}$$

$$Q = \delta_2 \left( \frac{L_2^3}{48E_{\rm CF}I_{\rm CF}} + \frac{L_2}{2G_{\rm CF}A_{\rm CF}} \right)^{-1}$$
(3)

$$P\left(1+\frac{\delta_0}{\delta_2}\right) = 1.5 f_{sc} A_s \left(1+\frac{\delta_0}{\delta_2}\right)$$

$$< \left(\frac{L_2^2}{12E_{CF}I_{CF}} + \frac{2}{G_{CF}A_{CF}}\right)^{-1}$$
(4)

## (2) 必要強度の算定

CFRPが曲げ破壊及び剪断破壊する際の反力Qは式(5), (6)のように考えられる.そして,式(4)を用いることに より,式(7)のように補剛材に必要な強度を算出する.

$$Q_{\rm CF, ul, L} = \frac{4f_{\rm CF, ul, L}Z_{\rm CF}}{L_2}$$
(5)

$$Q_{\mathrm{CF},ul} = \min\left(Q_{\mathrm{CF},ul,L}, Q_{\mathrm{CF},ul,LT}\right) \tag{6}$$

$$1.5 f_{sc} A_s \left( \delta_0 + \delta_{2, \mathrm{CF}, ul} \right) < \min \left( \frac{1}{4} \mathcal{Q}_{\mathrm{CF}, ul} L_2, \mathcal{Q}_{\mathrm{CF}, ul} A_{\mathrm{CF}} \right)$$
(7)

式(7)において,非補強部の長さ( $L_1-L_2$ )を部材長として許容圧縮応力度を算出する.これにより,最大耐力が決定される.

# (3) 支圧力の評価

補剛材には反力Qに抵抗できる支圧力を有する必要が ある. 図-2に示すように幅は補剛材の1/4 (90deg)の範 囲,長さは1/2D (45deg)の範囲で抵抗すると仮定した とき,内圧に抵抗する周方向応力は式(8)のように表さ れる.



図-2 補剛材端部における支圧力の検討範囲

## 3. 補剛材の構成

## (1) フィラメントワインディング成形法

図-3に示すように、本研究ではフィラメントワインデ ィング成形法<sup>10</sup> (Filament Winding method,以下,FW)を 採用している.円筒状のマンドレルと呼ばれる芯金に繊 維を巻き付けて樹脂を含浸させ、炉で硬化させる方法で ある.繊維配向は、芯金の回転速度と繊維を送り出すガ イドの移動速度の組み合わせで任意の角度を決定する. FW成形法は次のような特徴が挙げられる.(1)CFRP成形 法の中では、繊維含有率が高いため比強度が高い.(2) 強化材には連続繊維を使用する為、材料費が安価である. (3)繊維を一定の張力を保ちながら成形でき、力学的バ ラつきが少なく安定した品質での大量生産が可能である.

#### (2) 基材構成

補剛材として使用するCFRPは,複合則及び積層板理 論を用いて表-1のように機械的性質を設定した.炭素繊 維の配向は,軸方向をパイプの軸に対して±10°,周方向 に±80°,さらに剪断弾性率を確保するために±45°とし, 疑似的に弾性等方体となるよう一方向繊維材を交互に積 層してパイプ状に成形している.単位体積当たりでの繊 維及び樹脂の含有率はともに50%とした.なお,積層構 成は一方向の繊維配向を一層として考えている.基材構 成を踏まえ,本試験では図-4に示すようなFW成形CFRP パイプ(半割品)を内管と外管で用意した.補剛材の実 測値を表-2に示す.



図-3 フィラメントワインディング (FW) 成形法



図-4 FW成形CFRP (半割品)

#### 表-1 FW成形CFRP 機械的性質 (計算值)

繊維配向角 0	[ °]	±10, ±45, ±80
繊維体積含有率 V <sub>f</sub>	[%]	50
部材軸方向:弹性係数 EL	[GPa]	48.06
周方向:弹性係数 ET	[GPa]	48.06
剪断弹性係数 GLT	[GPa]	12.65
ポアソン比 VLT		0.193

#### 表-2 FW成形CFRP(半割品)実測値

CFRP	軸方向	内菅 [mm]			
補剛範囲	[mm]	内径	半径側	板厚	
1.0	1001	103.7	50.5	6.2	
1.0m 1001		外菅 [mm]			
1.5	1501	内径	半径側	板厚	
1.5m 1501	1501	115.9	56.8	6.1	

## (3) 補剛方法

鋼材とCFRPを非接着とする為に、表面にフッ素スプレーを吹き付けた. CFRPは成形時に用いた芯金の都合により、内管と鋼材との間でクリアランスが生じた. その間隔を減少させるためにハンドレイアップ成形法(以下,HLU)によりCFRPを成形した. そして、図-4に示すCFRPを,それぞれ軸方向に対して90°回転させて重ね合わせた状態で接着した. 最後に、図-5のように補剛範囲の中央部と端部で鋼材の変形を拘束する為に、さらにCFRPをHLUより成形して部分補強とした. 試験体の積層構成を図-6に示す.



図-5 HLU成形による部分補強(成形後)



#### 図-6 FW試験体の積層構成

表-3	トラス部材	諸量
-----	-------	----

外径 D	[mm]	101.6
板厚 t	[mm]	4.2
0.2%オフセット耐力	[MPa]	363

## 表-4 短期許容圧縮応力度

断面二次半径 i	[mm]	34.47
細長比 λ		95.74
限界細長比 Л		96.38
短期許容圧縮応力度 fc	[kN]	196.30





図-7 試験体の概要

## 5. 試験方法と結果

## (1) 試験方法

トラス部材の寸法値を表-3, 短期許容圧縮応力度を表 -4, 試験の概要を図-7に示す.支持条件はトラス部材端 部にナイフエッジを取付けて単純ピン支持とした.載荷 方法は,油圧ポンプによる準静的載荷で試験体下部より 圧縮力を与えた.パラメータは,無補強試験体(以下, NS), CFRPによる補剛範囲を中央の1.0m, 1.5m(以下, FW(1.0m), FW(1.5m)とし,計3体について試験を行った.

## (2) 最大荷重及び座屈モードについて

表-5に圧縮試験結果,図-8に各試験体の座屈状態を示 す.座屈長さは,ナイフエッジの先端間での距離で 3300mmとしている.NS試験体にCFRPを使って座屈補剛 (補剛間隔:1.0m, 1.5m)することにより,NS試験体に 比べ,FW(1.0m)は+20%,FW(1.5m)は+26%となり,それ ぞれで座屈耐力の向上を確認できた.補剛の効果は見ら れたが,部材長の約半分を補剛したFW(1.5m)と1/3程度 のFW(1.0m)との2体では補剛範囲の違いによる耐力の変 化はあまり見られない結果となった.NS試験体は中央 部での塑性ヒンジ化,座屈補剛をした試験体はFW(1.0m), FW(1.5m)のいずれも,上側のCFRPと鋼材の境界部分で 塑性ヒンジが発生して変形していることが分かる.

#### 表-5 圧縮試験結果

試験体名	NS	FW(1.0m)	FW(1.5m)
座屈長さ	3300 mm		
最大荷重	250 kN	300 kN	314 kN
補剛効果	-	+20%	+26%







(c) FW(1.5m)

図-8 各試験体の座屈状態

NS 試験体やFW(1.0m) は載荷初期においては、弓な りに変形が進んでいた.しかし、FW(1.5m)の場合は上側 の鋼材部で局所的に変形が進んでおり、やや偏った座屈 モードとなっていた.図-9に示しているようにFW(1.5m) では、圧縮側での鋼材表面が膨らむように変形しており、 局部座屈を生じていることを確認した.補剛範囲が長く なることによって鋼材の非補剛部が短くなり回転角が増 加したものと考えられる.



図-9 FW(1.5m)試験体 局部座屈



(d) FW(1.0m): CFRP端部

#### (3) 面外変形量について

図-10に中央位置での面外変形量を示す. NS及び FW(1.0m)は弾性域では変形はほぼ生じず, 200kNを境に 変形が進行し始めている.対して,FW(1.5m)の場合は, 載荷の初期段階から,部材中央での変形が進行していた. FW(1.0m)と最大荷重が大きく変化しなかったのはこれが 原因と考えられる.また,全ての試験体において,変形 量約5mmを超えたあたりから最大荷重を迎えて塑性化 していることを確認した.

#### (4)荷重-歪関係について

図-11(a)にNS試験体のP-ε関係(軸方向歪値),(b)と(c) にFW(1.0m),FW(1.5m)のCFRP中央部,同様に,(d)と(e) にCFRP端部でのP-ε関係(周方向歪値)を示す.CFRP端 部での歪値については,変形が進行していた試験体上側 でのCFRP端部のみ示している.NS試験体の塑性域での 歪値は,引張側と圧縮側で共に同様な挙動を示しており



#### 図-11 NS及びFW試験体 *P-*ε関係

理論値とも概ね一致した. CFRP補剛後の試験体では, 鋼材部とCFRPとの接着を考慮しない設計だったが、載 荷初期から補剛部での歪が発生していることから鋼材 表面とほぼ接着された状態となっていたと考えられる. 補剛材と被補剛材が接着した状態での合成断面を想定 し、理論値を図中に示しているが、軸方向及び周方向 の歪値ともに概ね対応していることを確認できた.従 って、補剛材の中央部における歪値に着目すると、NS 試験体と比較して、FW成形試験体の歪値は減少してい る. 圧縮力の載荷に伴ってCFRPの歪値は中央部では FW(1.0m), FW(1.5m)試験体ともに, 圧縮・引張側で500µ 以下に収まった. CFRP端部では、最大耐力を迎えた後 に歪値が増加していることから、被補剛材の変形が進 行し、補剛材に接触して発生した反力に対して抵抗し ていることが分かる.これより、1節で示したFW試験 体の座屈モードは,補剛材が耐力低下する前に,鋼材 部で塑性ヒンジを生じたことによると考えられる. FW(1.0m)とFW(1.5m)でのP-ε関係の挙動は、ほぼ同一で あり、補剛範囲が1.0mと1.5mでもCFRPの損傷などは見 られず、鋼材部での歪値増加を確認できたため、前章 による材料設計の妥当性と座屈補剛の 効果を確認でき

# 6. 耐力評価法に関する考察

たといえる.



図-12 対称断面圧縮部材の材形

I <sub>max</sub> / I <sub>min</sub>	a/l			
	0.2	0.4	0.6	0.8
0.50	(1.274)	(1.146)	(1.051)	(1.007)
	1.274	1.146	1.051	1.007
0.60	(1.189)	(1.098)	(1.034)	(1.005)
	1.189	1.098	1.033	1.004
0.70	(1.125)	(1.063)	(1.021)	(1.003)
	1.125	1.063	1.021	1.003
0.80 (1.074 1.074	(1.074	(1.037)	(1.012)	(1.002)
	1.074	1.037	1.012	1.002
0.90	(1.032	(1.016)	(1.005)	(1.001)
	1.034	1.017	1.005	1.001

表-6 文献6の座屈長さ係数と本手法との比較

※上段括弧に文献 6), 下段に本手法を示す.

本研究ではトラス部材の一部を CFRP 補剛すること で座屈耐力の向上を図るものであり、この力学特性は 変断面圧縮材と同等であることから、補剛後の等価な 座屈長さを適切に評価することで耐力評価が可能であ ると考えられる. 文献 6 では図-12 に示すように、 変 断面圧縮材の座屈荷重評価は、座屈長さ係数を用いて 補正し、通常の等断面部材と同様の座屈耐力評価が可 能であることが示されている.本研究でも、等価な座 屈長さを用いて耐力評価を行い、実験結果との対応を 考察する.

まず, CFRP 補剛を加味した部材の座屈固有値解析を 行い,線形座屈応力度  $\sigma_{cr, cf}$  を算出する.なお,線形座 屈応力度は初等梁要素を用いて部材を約 50 分割して求 めている.次に補剛前のトラス部材の線形座屈応力度  $\sigma_{cr}$ が,補剛後の線形座屈強度  $\sigma_{cr, cf}$ と等しくなる座屈長 さ  $\lambda_{eq}$  を求める.求めた  $\lambda_{eq}$  に対応する許容圧縮応力度  $f_c$ を鋼構造設計規準<sup>11)</sup>より算出する.本手法は,補剛に よって部分的に曲げ剛性が上昇する効果と,対応する 等価な座屈長さに対応した設計安全率を加味した耐力 評価法であると言える.表-6 に算出した座屈長さ係数 と,文献 6) 表 2.3.3 に示されている座屈長さ係数を比 較したものを示しているが,極めてよく一致している. なお,前述の手法は最大断面 2 次モーメントの部位を 基準としており,座屈長さ係数は座屈長さを大きくす る係数であるが,本手法は補剛前を基準としている.

以上の手法により評価した座屈強度と,基準強度 F を表-3 に示した 0.2%オフセット耐力とした場合の座屈 強度曲線を図-13 に示す.座屈長さは無補強時が 95.7, FW(1.0m)で 79.8, FW(1.5m)で 72.7 となった.何れの実験 結果も理論上最大値と短期許容応力度の間にプロット されており,限られた試験体数ではあるが,設計耐力 が算出可能であることが明らかとなった.



図-13 補剛トラス部材の圧縮耐力算出

# 7. おわりに

本研究で、トラス部材をCFRPによって座屈補剛し、 圧縮試験を行った.得られた知見を以下に示す.

- (1) トラス部材に対してCFRPを補剛する上で,力学的 に座屈拘束モデルを仮定し,補剛材の剛性及び強 度の評価式を提案した.
- (2) CFRPを座屈補剛材とすることによって座屈耐力は 向上し,部材中央位置での歪値はNS試験体に比べ て大幅に減少していたことから補剛効果を確認で きた.また,載荷に伴う被補剛材の変形よって発 生した補剛材端部での歪増加を確認した.
- (3) 本試験体の座屈モードは、初期の曲げ変形を経て 鋼が補剛材より変形を拘束され、補剛材端部で鋼 材部が降伏に至っているものと考えられる.
- (4) 本補剛法の座屈耐力は、既往の変断面部材の座屈 長さ係数を評価する手法を援用することで評価可 能であることを明らかとした。

## 参考文献

1)日本建築学会:ドーム構造技術レビュー, 2004

- 日本建築学会:東日本大震災合同調査報告 建築編3 鉄 骨造建築物/シェル・空間構造,2014
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所,国立研究開発法人 建築研究所:平成28年 熊本地震建築被害報告書(速報), 国総研資料 No.929 号/建築研究資料 No.173 号,2016.9
- 4)日本建築学会:ラチスシェル屋根構造設計指針,2016
- 5) 竹内徹,内山智晴:座屈拘束ブレースによるトラス鉄塔の 耐震補強-実大繰返し実験-,日本建築学会構造系論文集, 第589号,pp129-136,2005.4
- 6)日本建築学会:鋼構造座屈設計指針, 2009
- 7) 立石寧俊,杉崎健一:CFRP サンドイッチ版屋根の開発,日本建築学会構造系論文集,第14号,pp133-138,2001.12
- 8) 増田安彦, 萩尾浩也:低騒音・低振動を達成した耐震補強 工法「3Q-wall<sup>®</sup>」の開発, 大林組技術研究所, No.68, 2004
- 9) 奥山雄介,宮下剛:鋼橋桁端部腹板の腐食に対する CFRP を 用いた補修工法の実験的研究,土木学会,構造工学論文集, Vol.58A, pp710-720, 2012.3
- 10) 強化プラスチック協会, コロナ社:基礎からわかる FRP 繊維強化プラスチックの基礎から実用まで-,pp.67-70

11) 日本建築学会:鋼構造設計規準 一許容応力度設計法一, 2005

# STUDY ON COMPRESSIVE STRENGTHENING BY CFRP FOR TRUSS MEMBER OF EXISTING ROOF STRUCTURES

## Yuya FUJII, Yukihiro MATSUMOTO, Shinsuke FUJIMOTO, and Masaaki OBARA

Recent years, serious buckling damages of steel tubular truss member by large earthquake were reported. The authors make a study on strengthening of steel pipe under axial compression using CFRP. CFRP strengthening is partially applied to steel pipe, and it can decrease the slenderness ratio by its flexural rigidity. In this paper, mechanical models of the strengthening method and material design method of the CFRP are made clear. Then, the effects of CFRP strengthening are investigated by experiments. Finally, it is confirmed that the present method can effectively increase the compressive strength of steel pipe and the compressive strength can be evaluated by AIJ design recommendation using equivalent slenderness ratio.