

円形鋼管部材に対する非接着CFRP半割管 による座屈耐力向上効果に関する解析的研究

丸田 遼太郎¹・三枝 玄希¹・藤本 信介²・小原 優明³・松本 幸大⁴

¹AJ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:r153546@edu.tut.ac.jp, g155503@edu.tut.ac.jp

² AJ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

³ 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

⁴ AJ正会員 豊橋技術科学大学准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)
E-mail:y-matsu@ace.tut.ac.jp

近年の大規模地震により、円形鋼管で構成された鋼構造部材の座屈・損傷が見られた。こうした構造物を供用中に補強する場合、施工時間を可能な限り短縮できる方法が望ましいと考えられる。この観点から筆者らは、半円形状のCFRP部材を既存円形鋼管部材の外側に被せ、座屈変形を拘束することで耐力上昇が期待できることに注目し、基礎実験研究を実施してきた。本工法は、既存部材との接着強度を期待しないため、下地処理などを必要とせず、成形品を組み立てるだけの極めて容易な施工を実現できるものである。本論では、既往の基礎実験研究で得られた効果を踏まえ、CFRPの繊維配向角や補強量を変数として、有限要素法により効果を分析し、座屈拘束力学モデルにより算出される強度との比較を行うとともに、耐力評価式の適用性に関する検討を行った。

Key Words : steel pipe, buckling restraining, CFRP, reinforcement

1. 序論

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¹⁾。中でも学校体育館は、自然災害発生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²⁾、常時のみならず非常時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³⁾、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、発災後の継続使用が困難となること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対策や部材交換も容易でないため、地震時の変形は弾性範囲内に留まることが望ましい⁴⁾。

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⁵⁾。また、部材の一部を補強した場合の座屈耐力は文献6, 7)等に表示されており、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、下部や基礎構造への負担を減らすことができ、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ことが望ましい⁸⁻¹⁰⁾。軽量な材料の中でも、近年、航空分野・自動車分野での応用が目覚ま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。

こうした背景を受け、筆者らは鋼管トラス部材に対してCFRPを座屈補剛材として応用し、鋼材との界面に接着を行うことなく、座屈変形を拘束することで耐力が上昇することを実験により明らかとしてきた¹¹⁾。本研究では、既往の基礎実験研究により得られた効果を踏まえ、CFRPのより合理的な材料設計に繋げることを目的に、

繊維配向角や補強量をパラメータとして、有限要素解析により補強効果を分析し、座屈拘束力学モデルにより算出される強度との比較を行う。

2. 補強方法と既往の試験結果概要

(1) 補強方法

本研究で提案する補強法の力学モデルを図-1に示す。既存のトラス部材に対して、部材中央に部分的にCFRPで補剛を行うことで圧縮力によって生じる曲げ変形を抑制し、結果として圧縮耐力を上昇させることができる。その際、トラス部材と補剛材とは非接着の状態を想定しており、これにより補強の際は既存部材に対する下地処理や接着強度確保は不要となる。図-1に示すようにCFRP補剛材を施したトラス部材曲げ変形が生じたとき、トラス材の補剛部端部の曲げモーメントを M_1 、中央部を M_2 とすると、 $M_1 > M_2$ を満たすCFRP補剛材の曲げ剛性となるように設計する。同時にCFRP補剛材は中央部に集中荷重 Q が作用する3点曲げの状態となることから、それに対して十分な強度を有するよう設計する。CFRP

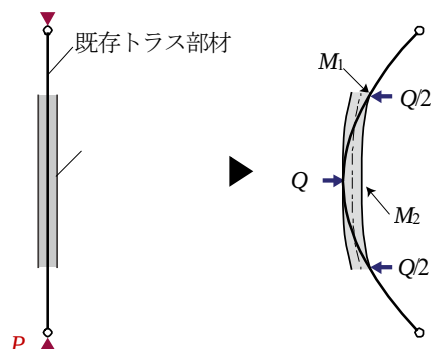


図-1 補強方法の力学モデル

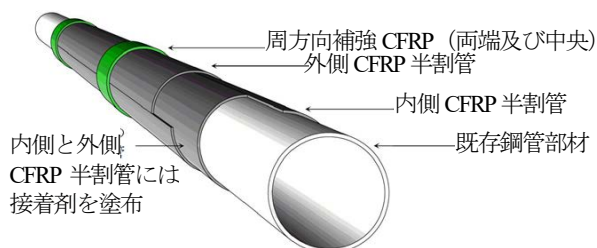


図-2 補強方法の概要

表-1 CFRP 機械的性質

繊維配向角 θ [deg]	$[\pm 10 / \pm 45 / \pm 80]$
繊維体積含有率 V_f [%]	50
部材軸方向：弾性係数 E_L [MPa]	48060
周方向：弾性係数 E_T [MPa]	48060
剪断弾性係数 G_{LT} [MPa]	12650
ポアソン比 ν_{LT}	0.257

補剛材は、フィラメントワインディング成形法¹⁾ (Filament Winding method, 以下, FW) を採用した。FW 成形CFRPは、図-2に示すように円筒半割形状のものを内管・外管分用意し、外管は内管に対して部材軸方向に 90° 回転させた状態で接着作業を行い、二重管の状態で補強し、円筒断面としての連続性を確保する。なお、必要に応じて、補強範囲の中央部、及び端部の最外層にはCFRPの周方向強度を考慮してハンドレイアップ成形 (以下, HLU) による部分補強を行う。

(2) 既往の試験結果¹⁾

文献1)では、一般的な立体トラス構造部材を選定し、CFRP半割管による補強効果の検証を行った。被補強材は外形101.6mm、肉厚4.2mmの円形鋼管であり、鋼管の長さを3000mm、ノーズコーン・両端ナイフエッジ等を含めた座屈長さを3300mm (細長比95.74) として実施した。補強材であるCFRPの繊維配向と複合則・積層理論によって算出した機械的性質を表-1に示す。また、実験変数を表-2に示す。軸圧縮試験の結果、図-3・表-3に示すように、最大耐力の上昇や最大耐力到達後の荷重低減性状の改善が得られた。

表-2 補強パラメータ

試験体名	NS	FW(1.0)	FW(1.5)	FW(2.5)
補強範囲 [m]	-	1.0	1.5	2.5
CFRP厚さ [mm]	-	12.2		5.4

表-3 各試験体のNSに対する補強効果 (既往試験)

試験体名	NS	FW(1.0)	FW(1.5)	FW(2.5)
σ_{max} [MPa]	195	233	244	249
補強効果	-	+19%	+25%	+28%

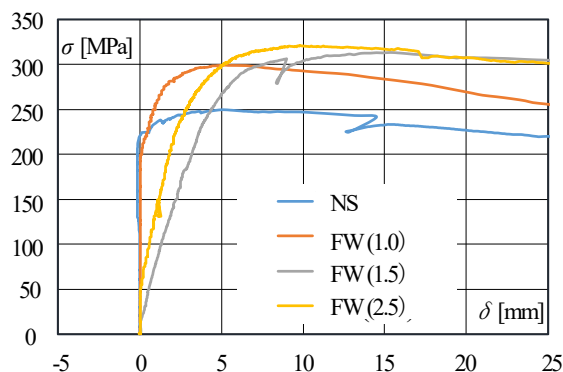


図-3 平均軸応力-面外変位関係 (既往試験)

3. 解析モデル

本研究における解析対象は、文献11)を参考に図-4に示すトラス部材とする。このモデルを断面の対称性を利用して、図-5に示す1/4非線形3次元モデルとし、表-4に示すように、CFRPの繊維配向角と補強範囲をパラメータとして解析を行う。メッシュサイズは、圧縮载荷部となる治具部分は三角形とし、その他の部分は四角形として設定している。荷重の载荷位置は、鋼材の断面二次半径の5%をx方向に移動して与えている。被補強材は、表-5に示す一般構造用炭素鋼鋼管(JIS G 3444 STK400)を使用し、鋼材の応力-歪関係は、図-6に示すバイリニア型とする。

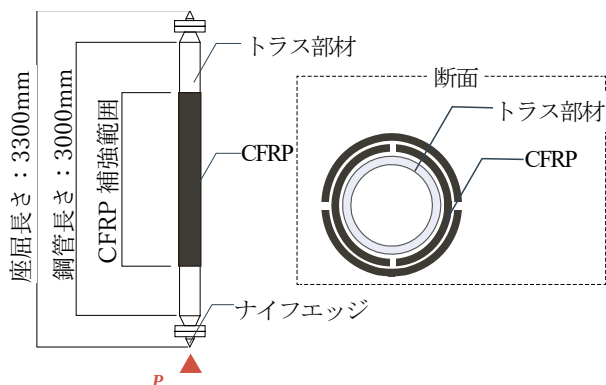


図-4 実験モデル概要

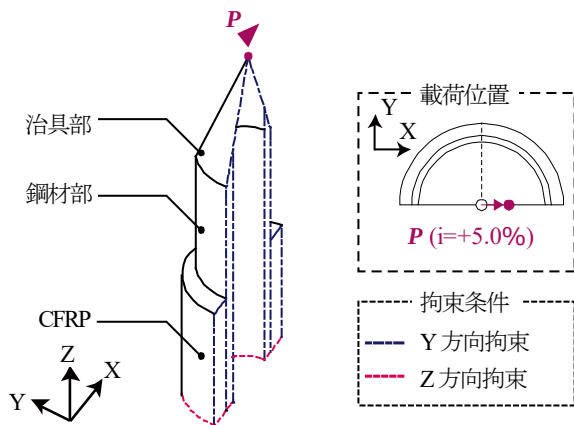


図-5 解析モデル概要

する。補強材には表-6に示す機械的性質のCFRPを用いた。2章に示した既往の試験においては竹割れ防止のため繊維配向角を、 $[\pm 10 / \pm 45 / \pm 80]$ とし、周方向強度も軸方向と同様の強度を得られるように設計した。本研究では、 $[\pm 10 / \pm 45]$ を設定し、よりCFRP厚さを減らした場合の補強効果を検証する。境界条件はトラス部材端部を単純ピン支持とする。非接着の状態を再現するために、鋼材とCFRP間に1/1000mmのクリアランスを設けており、表面には摩擦係数を無しとした接触条件を与えた。

表-4 解析モデルパラメータ

モデル名	NS	A1-1.5	A1-2.0	B-1.5	B-2.0	A2-1.5	A2-2.0
繊維配向角	-	$[\pm 10 / \pm 45]$		$[\pm 10 / \pm 45 / \pm 80]$		$[\pm 10 / \pm 45]_2$	
CFRP厚さ [mm]	-	3.552		5.328		7.104	
補強範囲 [m]	-	1.5	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0

表-5 トラス部材諸量

外径 D [mm]	101.6
厚さ [mm]	3.2
降伏応力度 [MPa]	235
断面二次半径 i	34.81
細長比 λ_s	94.81
短期許容圧縮応力度 f_c [MPa]	137.76

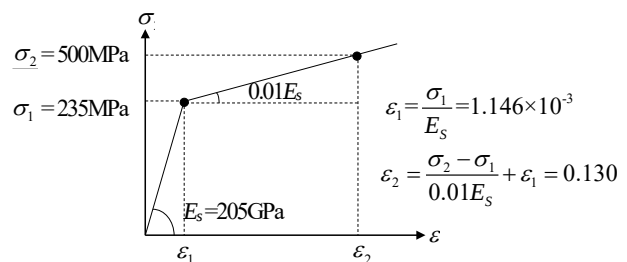


図-6 鋼材の応力-歪関係

表-6 CFRP 機械的性質

繊維配向角 θ [deg]	$[\pm 10 / \pm 45]$	$[\pm 10 / \pm 45 / \pm 80]$
繊維体積含有率 V_f [%]	50	50
部材軸方向：弾性係数 E_L [MPa]	59470	48060
周方向：弾性係数 E_T [MPa]	17620	48060
剪断弾性係数 G_{LT} [MPa]	18292	12650
ポアソン比 ν_{LT}	0.795	0.257
ポアソン比 ν_{TL}	0.236	0.257

4. 解析結果

(1) 解析結果

表-7に最大耐力、図-7に各モデルの平均軸応力-面外変位関係、図-8に各モデルの最大荷重時及び中央面外変形量が50mm付近の時の応力分布、図-9に主要な部位の応力-歪関係、図-10に中央面外変形量が50mm付近の時の歪分布を示す。平均軸応力とは、軸圧縮荷重を鋼管の断面積で除した値である。最大応力を比較すると全てのモデルでNSを上回ることが確認できた。しかし、NSと比較したときの最大応力の上昇割合は、A1-1.5とA1-2.0で3%程度、A1-1.5とA2-1.5でも3%程度しか変化がなく、CFRP板厚の増加や補強範囲拡大による応力の上昇割合にはあまり大きな差は見られなかった。平均軸応力-変

位関係については、NSと補強を行ったモデルの同応力レベルでの変位を比較すると、補強を行ったモデルの方が変形量が少ないことから補強材が曲げ変形を拘束していることが確認できる。応力分布及び応力-歪関係については、2章で述べた力学モデルの仮定の通り、補強材と鋼材の境界の部分で、鋼材の応力が大きくなっていることや、曲げ変形を受ける補強材端部周方向で歪が増加していることが確認できる。面外変形量がおおよそ50mmに達し、鋼材が降伏に達した後も補強材と鋼材の境界付近で圧縮歪が集中して増加しており、その際も補強材端部の歪は最大で6000 μ 程度であることから、補強材を損傷させることなく、鋼材部で塑性化が進行しており、座屈補剛の効果が確認できた。

表-7 最大耐力

試験体名	NS	A1-1.5	A1-2.0	B-1.5	B-2.0	A2-1.5	A2-2.0
$\sigma_{\max}$ [MPa]	174	200	206	202	210	206	213
NSに対する補強効果	-	+15%	+18%	+16%	+21%	+18%	+22%

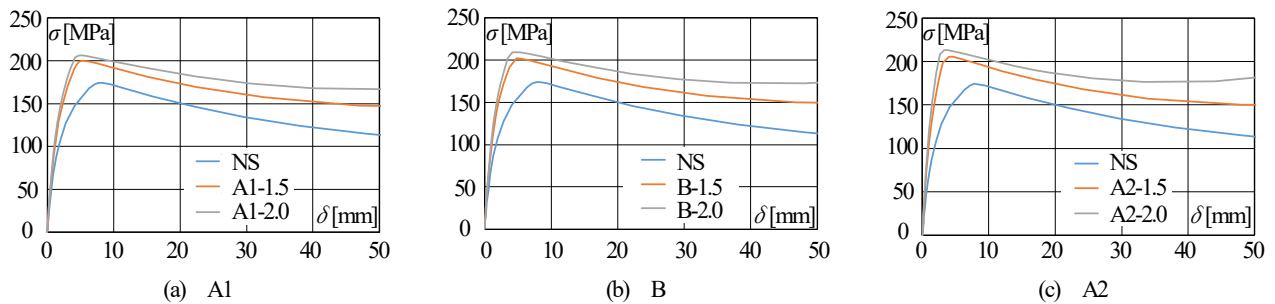


図-7 各モデルの平均軸応力-面外変位関係

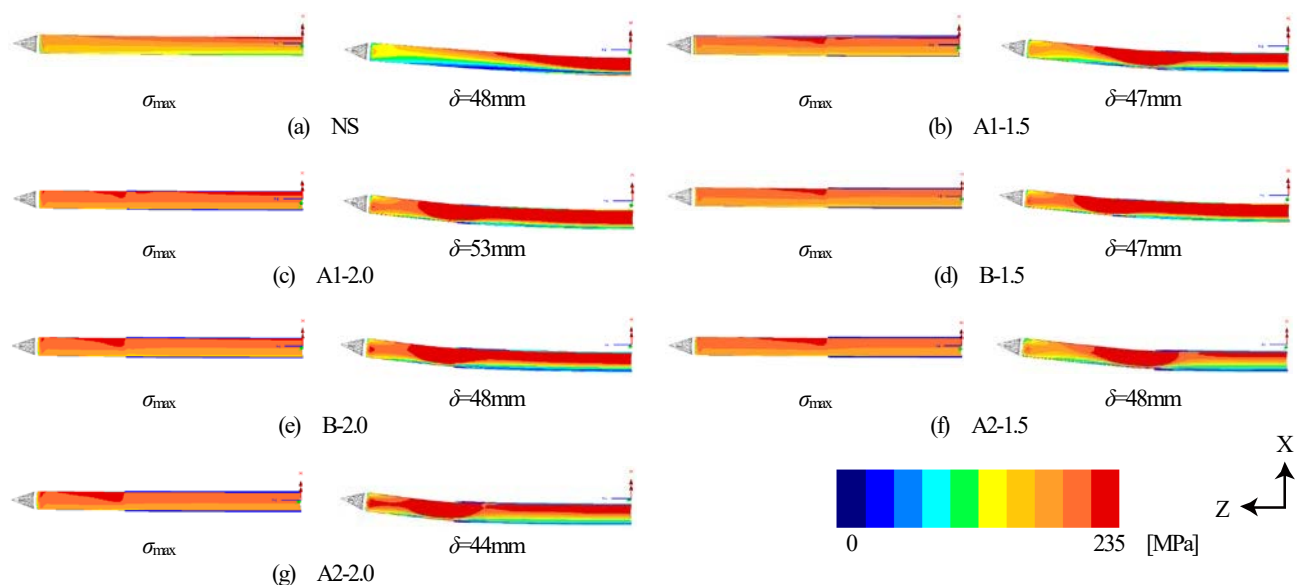


図-8 応力分布

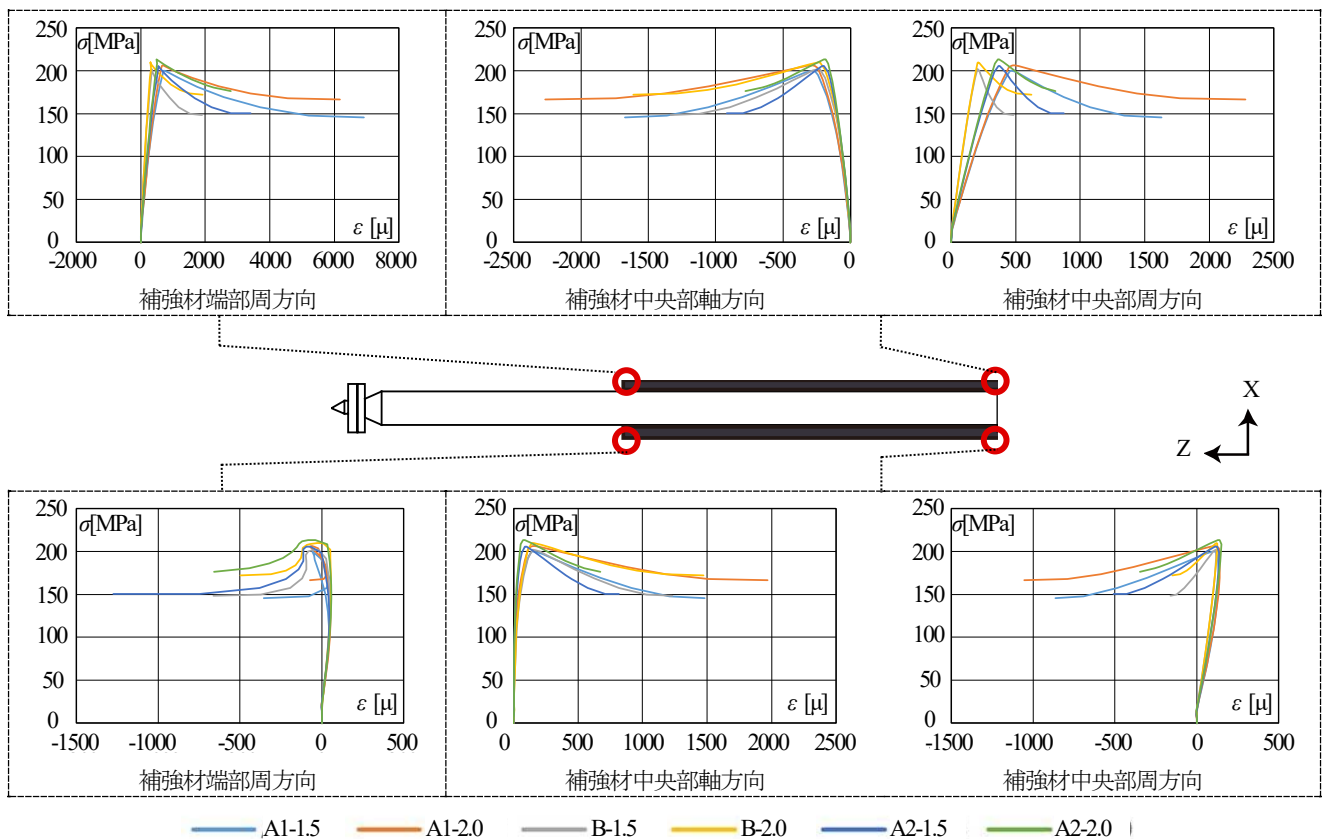


図-9 応力-歪関係

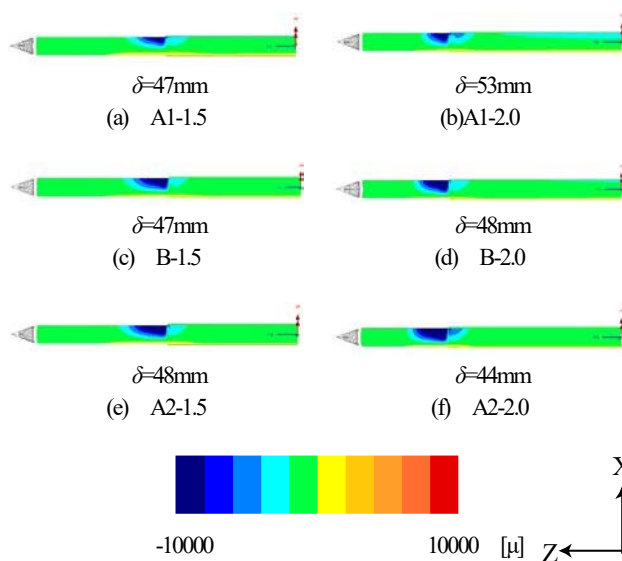


図-10 軸方向歪分布

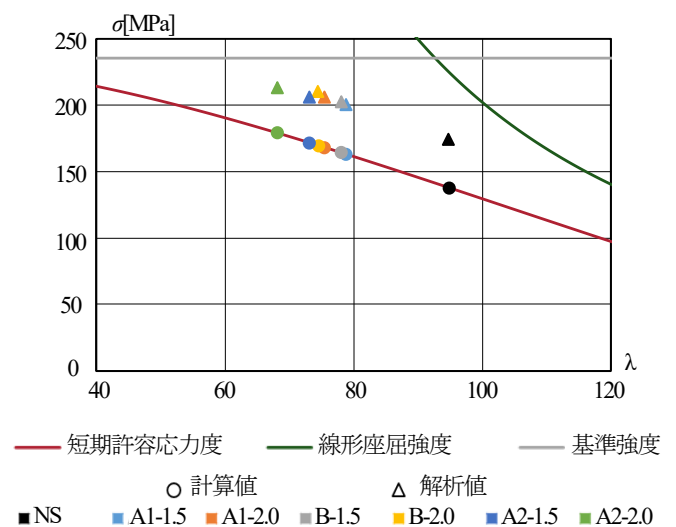


図-11 座屈応力度曲線

(2) 耐力評価

本モデルは、鋼材にCFRPを被せて補強しているが、このCFRPを鋼換算した均質部材を考慮することにより、鋼材の変断面圧縮部材として耐力を算出することが可能である。均質断面としたときの補強部材から、等価な細長比を算出し、各モデルの圧縮耐力に対応させ、座屈強度曲線にプロットして評価を行う。変断面圧縮部材とし

ての耐力の算出手順は、まず、無補強時のトラス部材について、圧縮耐力と細長比 λ を応力度曲線にプロットする。次に、補強後の変断面部材に対して座屈固有値解析を行い耐力を算出し、それを無補強時の線形座屈応力度曲線と対応させることで等価細長比 λ_{eq} を算出する。この時の等価細長比に対応する鋼構造設計規準¹³⁾の許容圧縮応力度を補強後の圧縮強度とする。図-11の許容圧縮応力度曲線は、本研究で使

(基準強度) 235MPaに対して描いたものである。それに変断面圧縮部材として求めた耐力を●で、解析で求めた耐力を▲でプロットしたものである。等価細長比に解析値を対応させると、線形座屈応力度と鋼構造設計規準の間にプロットされていることが分かる。また、これを変断面圧縮部材として求めた耐力と比較すると、全てのモデルにおいて、解析値の方が35MPaほど耐力が高くなっているが、各値の無補強に対して、同様の補強効果が得られていることが確認できる。このことより、等価細長比を用いて求めた変断面部材としての耐力を算定することで、補強後の短期許容応力度を評価することが可能であると考えられる。

5. 結論

本研究では、鋼管トラス部材を対象に、CFRPによる圧縮耐力向上法の解析的検討として、補強材であるCFRPの繊維配向角や補強量をパラメータとした有限要素解析を行い、補強効果を分析するとともに、変断面部材として扱った座屈耐力推定法との比較を行った。そこで得られた知見を以下に示す。

- 1) 本提案の補強により、トラス部材が補強材によって変形を拘束され、補強材端部のトラス部材非補強部で塑性化が進行することが確認でき、結果として圧縮耐力が上昇することを示した。
- 2) CFRPの周方向強度を減らしてもCFRPの材料破壊は発生しないと考えられ、周方向繊維を省略した繊維配向[±10 / ±45]での補強が可能であることを確認した。
- 3) 変断面圧縮部材として圧縮耐力を算定することで、補強後の短期許容応力度を評価することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：ドーム構造技術レビュー，2004
- 2) 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) 日本学術会議長柱研究委員会：弾性安定要覧，1960
- 8) 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
- 9) 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®」の開発，大林組技術研究所，No.68，2004
- 10) 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
- 11) 松本幸大，藤本信介，実石明：CFRP による鋼管トラス部材の圧縮耐力向上法，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），Vol.B1，pp.1043-1044，2018.9
- 12) 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.67-70，2005
- 13) 日本建築学会：鋼構造設計規準－許容応力度設計法－，2005

ANALYTICAL STUDY OF THE EFFECTS OF UNBONDED SEMICIRCULAR CFRP JACKETS FOR CHS STEEL MEMBER UNDER AXIAL COMPRESSION

Ryotaro MARUTA, Genki MIEDA, Shinsuke FUJIMOTO,
Masaaki OBARA and Yukihiro MATSUMOTO

In recent years, seismic damages by severe earthquakes of spatial truss roof structure were reported. The typical seismic damage type of spatial structure was buckling of truss members because of its slender member geometry. It is required that construction term should be shorter when we retrofit the existing structures. So, the authors research and develop the strengthening method for truss member by using semicircular CFRP members without surface treatment of steel and adhesively bonding to steel. The semicircular CFRP can be wrap the existing steel pipe easily, and it can restrain the buckling deformation by its flexural stiffness. Then, axial strength of truss member strengthened by the CFRP is increased efficiently. Based on these, we investigate the effects of fiber orientation of CFRP and the strengthening effects to provide reasonable material design by FEA in this paper. Then, it is confirmed that the simplified design method of the present strengthening method can estimate the axial strength obtained by FEA.