

(19) CFRPシートで補強した鋼トラス橋の H形断面斜材に対する長柱座屈実験

服部 雅史¹・大垣 賀津雄²・宮下 剛³・後藤 源太⁴
秀熊 佑哉⁵・櫻井 俊太⁶・PHAM NGOC VINH⁷

¹正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: m.hattorit.ab@ri-nexco.co.jp

²正会員 ものつくり大学教授 建設学科（〒361-0038 埼玉県行田市大字前谷333）
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学准教授 環境社会基盤系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

⁴正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）
E-mail: g.goto.aa@ri-nexco.co.jp

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部（〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1）
E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁶正会員 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部（〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1）
E-mail: sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

⁷非会員 The University of Danang-University of Science and Technology, Vietnam, Faculty of Civil Engineering
Email: pnvinh@dut.udn.vn

鋼トラス橋の耐荷性能に対する補強には高力ボルトによる当て板補強が一般的に用いられている。一方で、この工法はボルト孔による母材の断面欠損を伴うこと、狭隘な部位の形状に合わせて鋼板を加工し、運搬した上でボルト締結するといった施工が必要となることといった課題がある。それら課題を解決できる可能性がある工法として、鋼材に比べて高強度、高弾性、軽量、腐食しないという利点を有した炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP）を用いた補強工法が提案されている。CFRPを用いた補強工法を適用できれば、鋼板当て板による補強よりも合理的な対策となると考えられる。

本検討では主に耐震補強を想定し、鋼トラス橋のH形断面の斜材を模した長柱供試体にCFRPシートを貼付ける補強を行い、圧縮載荷実験により全体座屈と局部座屈の連成座屈に対する補強効果を調査した。

Key Words : *Steel truss bridges, Reinforcement, CFRP sheets, H-section diagonal members, Long column buckling tests*

1. はじめに

兵庫県南部地震以降の道路橋示方書改定により、修正震度法¹⁾の代わり新たな耐震設計法が規定化された²⁾。高速道路橋の多くは兵庫県南部地震以前に建設されていることから、場合によってはトラス橋斜材など部材の一部が大規模地震時に全体座屈や局部座屈する可能性がある。従来、これらの部材補強には高力ボルトによる当て板補強が一般的に用いら

れてきた。この工法はボルト孔による母材の断面欠損を伴うため、トラス部材のような断面が比較的小さい部材においては耐荷性能上の支障となることがある。また、狭隘な部位の形状に合わせてあらかじめ工場では鋼板を加工しなければならぬことや、運搬やボルト締結に機材や特殊技能を必要とするなど、施工上の課題がある。それら課題を解決できる可能性がある工法として、鋼材に比べて高強度、高弾性、軽量、腐食しないという利点を有した炭素繊維強化

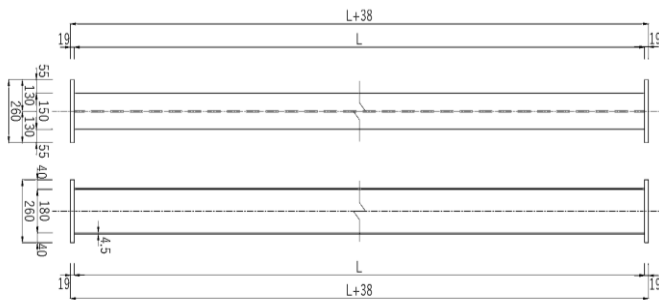


図-1 実験供試体

ポリマー（以下、CFRP）を用いた補強工法が提案されている³⁾。CFRPシートによる補強工法を用いることで、母材のボルト孔による断面欠損が発生せず、施工に伴う機材や特殊技能を必要としないなどのメリットがある。

CFRPによる鋼構造物の補修・補強マニュアル³⁾の発刊や、FRP接着による構造物の補修・補強指針⁴⁾の整備に伴い、適用箇所が拡大してきている⁵⁾⁹⁾。このCFRPを用いた補強工法をトラス橋斜材など大規模地震時に全体座屈や局部座屈する可能性がある部材に適用できれば、鋼板当て板による補強よりも合理的な耐震対策となると考えられる。

筆者らはこれまで、CFRPシートによるトラス橋の合理的な耐震対策方法を構築することを目的として、H形断面斜材を想定した短柱供試体を用いて、局部座屈に関するCFRPによる各種補強効果確認実験を実施している^{10),11)}。本検討では、トラス橋のH形断面斜材を想定した長柱供試体を対象に、CFRPシートをフランジと腹板の全面に貼付けを行い、単調圧縮載荷実験により全体座屈と局部座屈の連成座屈強度を確認する実験を行った。この結果より、CFRPシートによる補強の耐荷性能や連成座屈変形挙動等を確認した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実橋の約1/3程度の寸法であるH形断面を有する長柱供試体を用いて、単調圧縮実験を行った。高速道路橋に多く用いられる上路ワーレントラス橋において耐震補強が必要となるケースが多い引張斜材（支間中央部で常時の引張力に対して抵抗するよう設計された部材）の幅厚比パラメータ R と細長比パラメータを参考に、実験供試体の寸法を図-1とした。実験供試体は、フランジ厚4.5mm、幅150mm、腹板

表-1 使用材料諸元

材料	鋼材 (SS400)	中弾性 CFRPシート	エポキシ 樹脂	パテ材
弾性係数 (MPa)	2.0×10^5	4.27×10^5	2860	74
降伏点 (MPa)	346	-	-	-
引張強度 (MPa)	347	3925	72	11
設計厚さ (mm)	-	0.165	0.5	0.8
ポアソン比	0.3	0.3	0.38	0.49
伸び (%)	28	-	-	431

厚4.5mm、幅180mm、長さ2800、3400、3900mmとなっている。

(2) 材料特性

使用した材料特性を表-1に示す。本検討では、CFRPシートには中弾性タイプを使用している。補修施工によく使用されている高弾性シートタイプと比較すると、中弾性シートの方が弾性係数は低いものの、引張強度が高いため、繰返し荷重下で発生する弾塑性座屈に対する補強効果が期待できる。さらに、文献8)では、高い引張強度により繰返し荷重下で中弾性シートの方が高弾性シートより耐荷力の改善と塑性座屈の制御効果が高いことが報告されている。また、CFRPシートをエポキシ樹脂のみで鋼材に貼付けた場合、座屈等の大変形が起きるとCFRPシートと鋼材の層間剥離が発生し、CFRPシートによる補強効果を十分に発揮できない。そのため、補強を行ったすべての実験供試体に対して、鋼部材とCFRPシートの間にはく離抑制効果のあるポリウレアパテ（以下、パテ材）を挿入した¹²⁾⁻¹⁵⁾。

(3) CFRPシート接着工法

CFRPシート接着工法の施工手順³⁾としては、まず鋼材表面の錆や汚れをグラインダーで除去後、表面にアセトン塗布した布で清掃して脱脂を行い、ウレタンプライマーを塗布する。次にパテ材の塗布を行うが、塗布量を均一にするために、使用重量を計測して施工厚さを平均0.8mmに管理する。CFRPシートを貼付ける際には、含浸させるエポキシ樹脂を塗布した後、CFRPシートを供試体軸方向（以下、鉛直方向）に貼付け、さらに含浸樹脂の上塗りを行い、ローラーで含浸を行う。この作業をCFRPの積層分繰返して施工した。なお、供試体ケースによっては鉛直方向と鉛直方向の積層の間に部材軸直角方向（以下、水平方向）シートを施工したものもある。

表-2 実験供試体パラメータ

供試体	供試体長さ L (mm)	細長比パラメータ λ_c	幅厚比パラメータ R		CFRP 補強方法 (鉛直/水平)	
			腹板	フランジ	腹板	フランジ
CASE1	2,800	1.08	0.81	1.04	無補強	
CASE2		1.04	0.66	0.66	4/2	10/5
CASE3					4/4	10/10
CASE4	3,400	1.31	0.81	1.04	無補強	
CASE5		1.26	0.66	0.66	4/2	10/5
CASE6					4/4	10/10
CASE7	3,900	1.51	0.81	1.04	無補強	
CASE8		1.44	0.66	0.66	4/2	10/5
CASE9					4/4	10/10

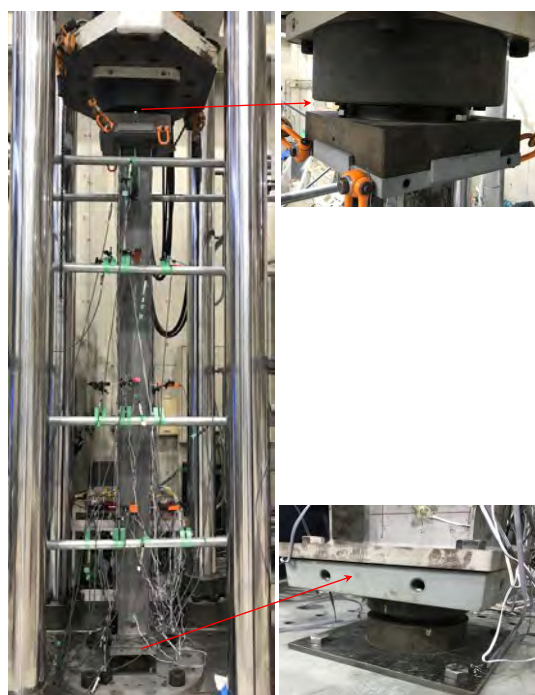


図-2 荷重状況

(4) 供試体パラメータ

作成した供試体を表-2に一覧で示す。実橋において耐震補強が必要となるケースが多い引張斜材の実績から長さ L を変化させ、表-2に示すように無補強における細長比パラメータ λ_c を 1.0, 1.2, 1.4 程度にしている。また、各細長比の供試体に対して、CFRP シートによる補強を行い、連成座屈に対する補強効果の検証を行うこととした。

H 形断面長柱部材の補強方法としては、鉛直方向シートに対する水平方向シートの積層数を同じにした供試体と、鉛直に対して水平方向を 1/2 とした供試体をパラメータとして、フランジと腹板の両面に貼付けるものとした。水平方向の層数を変化させた

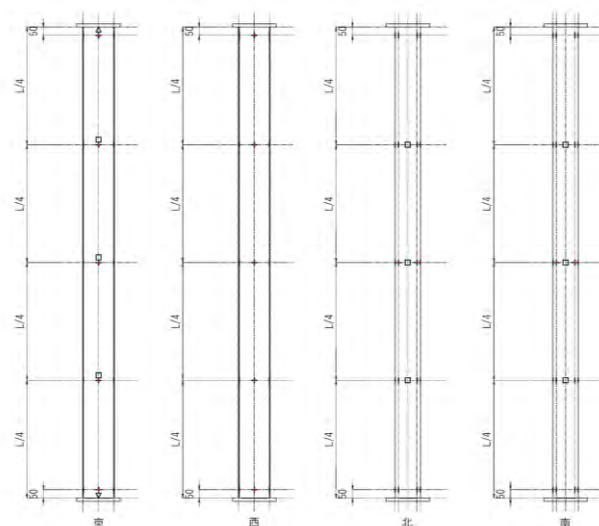


図-3 計測位置

理由は、水平方向シートが耐荷性能に与える効果を考察するためである。

補強量は CFRP シートの伸び剛性を用いて鋼換算を行い、フランジの幅厚比パラメータ R_f が 0.7 以下、腹板の幅厚比パラメータ R_w が 0.7 以下となるように決定している。つまり、局部座屈強度が材料強度と同じとみなせるように CFRP シートで補強した。

(5) 荷重方法

荷重方法は図-2に示すように、3000kN 万能試験機を使用し、長柱の単調圧縮荷重試験を行った。境界条件としては、上部端部は万能試験機にユニバーサル支承を取り付け、下部端部は半球形のフリー台座を使用した。このため、ほぼ両端ピン支持での圧縮荷重実験となる。

(6) ひずみ・変位の計測方法

荷重中のひずみは、図-3に示すように実験供試体の鉛直方向長さ L に対し、 $L/4$ 間隔となるフランジと腹板の表面および裏面の各点に貼付けた1軸塑性ひずみゲージと2軸塑性ひずみゲージにより行うことで局部座屈が生じた瞬間を確認できるように計測した。また、フランジの主要点における面外変位と腹板の中央における面外変位を計測し、局部座屈が発生する様子を確認した。

実験供試体の全体変形は、上下端供試体のエンドプレート間の相対変位（以下、鉛直変位）を計測することで把握した。

表-3 実験結果一覧

CASE	供試体長さ L (mm)	細長比 パラメータ λ_c	CFRP 補強方法 (鉛直/水平)		最大荷重 P_u (kN)	全塑性軸力との比 P_u/P_{y0}	無補強の 最大荷重 との比 P_u/P_{u0}	破壊モード
			腹板	フランジ				
CASE1	2,800	1.08	無補強		525	0.70	1.00	局部座屈先行後に 全体座屈が発生
CASE2		1.04	4/2	10/5	968	1.30	1.84	
CASE3			4/4	10/10	986	1.32	1.88	
CASE4	3,400	1.31	無補強		498	0.67	1.00	局部座屈先行後に 全体座屈が発生
CASE5		1.26	4/2	10/5	934	1.25	1.88	
CASE6			4/4	10/10	886	1.19	1.78	
CASE7	3,900	1.51	無補強		404	0.54	1.00	全体座屈
CASE8		1.44	4/2	10/5	756	1.01	1.87	
CASE9			4/4	10/10	824	1.10	2.04	

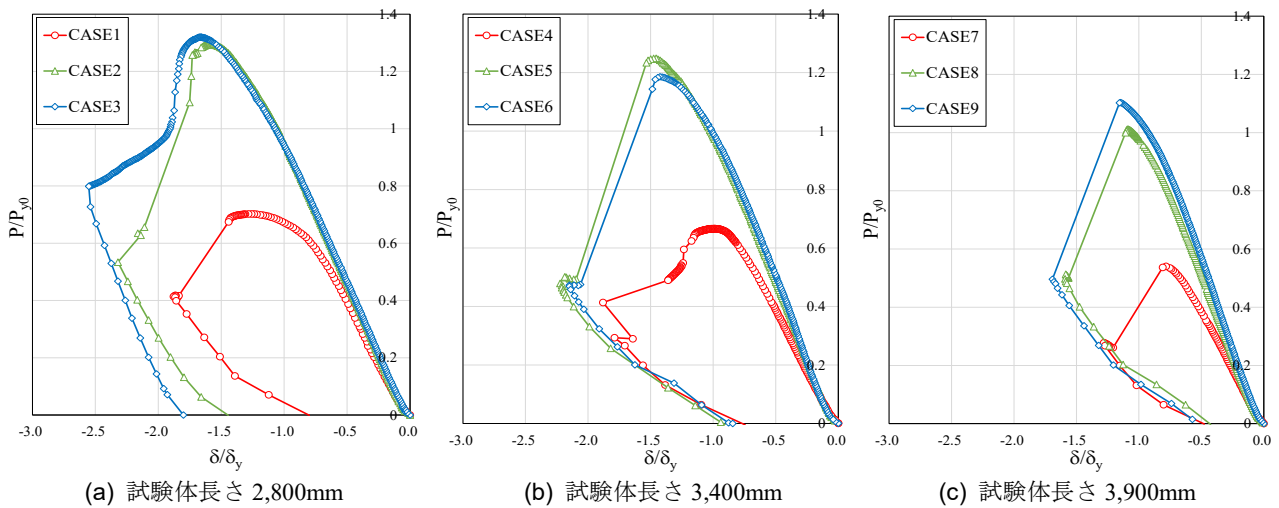


図-4 荷重—鉛直変位の関係

3. 実験結果と考察

(1) 最大荷重

実験結果の一覧を表-3に示す。表より、CFRPシートを施工したケースの最大荷重は無補強の場合と比べて1.78~2.04倍に増加する結果となった。供試体の鋼材断面全てに降伏応力が生じると仮定して計算された軸力を全塑性軸力 P_{y0} と定義する。表より、無補強の供試体(CASE1, 4, 7)の全塑性軸力との比は0.54~0.70であるのに対して、補強した供試体では1.00~1.32に増加していることがわかる。このことから、無補強に対してどのケースも最大荷重の向上がみられ、全塑性軸力との比の向上からも補強効果が確認できた。

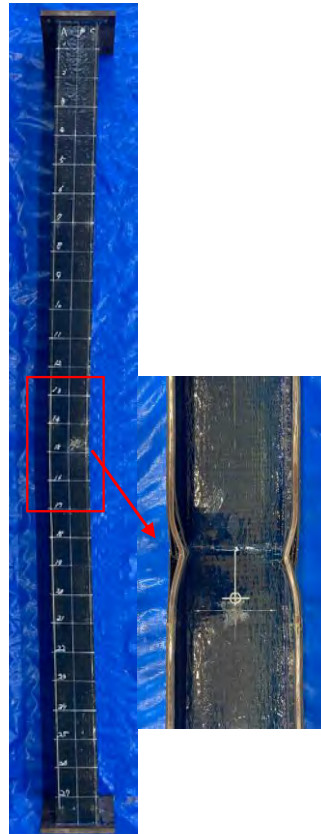
また表より、水平方向CFRPシートを鉛直方向と同数とした場合および1/2とした場合を比較すると、耐荷力の増加率に大きな差が無いことが確認できる。既往の研究¹¹⁾で水平方向CFRPシートの局部座屈に対する補強効果があることはわかっているが、その積層数と補強効果との関係の把握や、水平方向の積層数の設計法構築に向けては、解析などでパラメトリックに検討する必要がある。

(2) 変形挙動

荷重と鉛直変位の関係を図-4に示す。図中、縦軸は載荷荷重 P を全塑性軸力 P_{y0} で無次元化したものであり、横軸は鉛直変位 δ を鋼材断面全てが降伏すると仮定して計算された鉛直変位 δ_y で無次元化している。



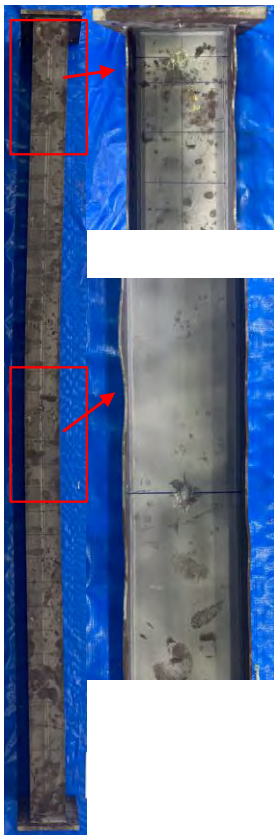
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4



(e) CASE5



(f) CASE6

図-5 供試体の破壊状況 (その 1)

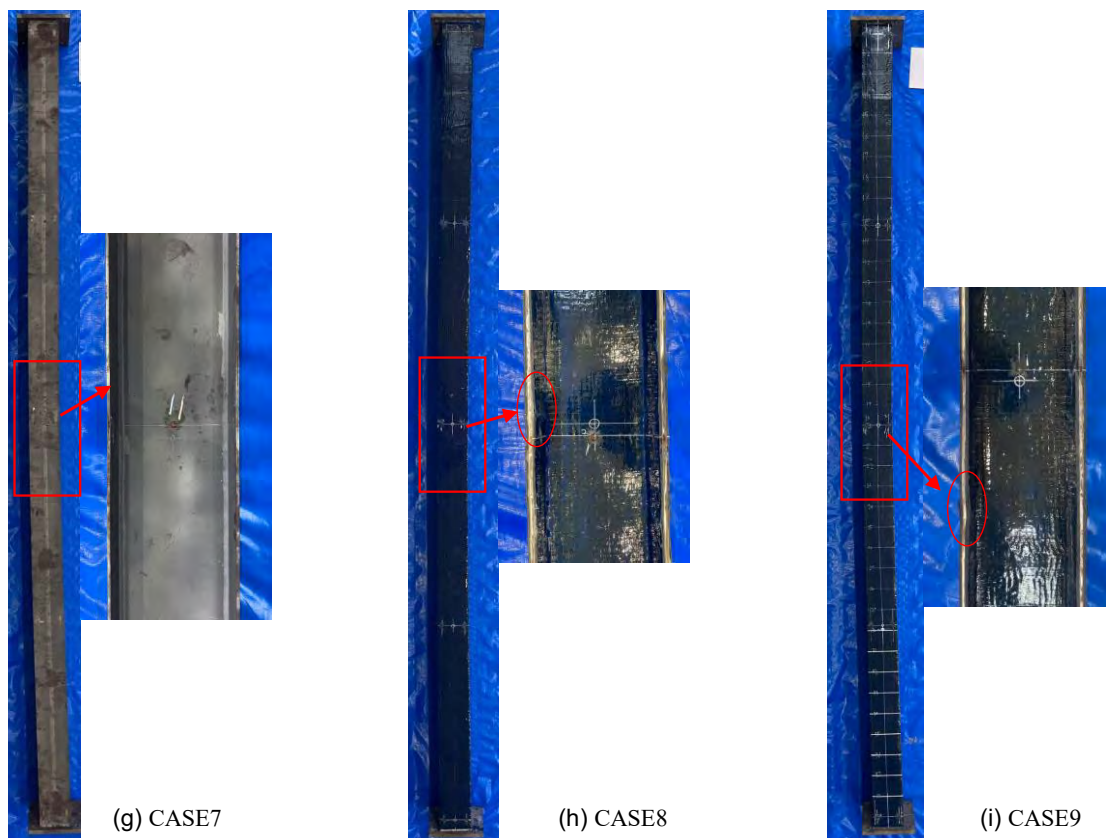


図-5 供試体の破壊状況（その2）

補強したケース（CASE1, 2, 5, 6, 8, 9）の荷重-鉛直変位関係の初期剛性は、無補強のケース（CASE1, 4, 7）と比較すると増加していることがわかる。よって、鋼材断面に加え、CFRPシートも抵抗断面として機能していると考えられる。

水平方向CFRPシートを鉛直方向と同数とした場合（CASE3, 6, 9）と1/2とした場合（CASE2, 5, 8）を比較すると、両者の変形挙動はほぼ同じである。水平方向シートの局部座屈に対する補強効果への寄与については、前項の通り今後の課題としたい。いずれにせよ、すべての補強したケースにおいて最大荷重までの変形性能が無補強のケースより向上している。また、補強したケースについてみると、最大荷重を迎えた後に、軟化しながら鉛直変位が急増している。急増に移行する変化点ではCFRPシートに目視で確認できる変状としてはく離が観察された。図より、最大荷重から軟化しながら変位急増に移行するまでのポストピークの変形挙動は細長比パラメータの大小と関係するように思われ、細長比パラメータが大きい程、変形性能が小さい傾向がみられた。

(3) 破壊状況

単調圧縮載荷試験後の供試体破壊状況の写真を図

-5に示す。実験のひずみゲージの計測結果から破壊モードを表-3に示したように推定した。CASE1~6では、局部座屈が先に発生しており、最終的には全体座屈に至ることが確認できる。一方、CASE7~9では顕著な局部座屈が生じておらず、全体座屈のみが発生している。水平方向CFRPシートを鉛直方向と同数とした場合（CASE3, 6, 9）と1/2とした場合（CASE2, 5, 8）の差は特にみられない。

前項でポストピークの変形挙動と細長比パラメータの関係について述べたが、ポストピークの変形挙動と破壊モードにも関係性があるように思われる。すなわち、局部座屈が先行する場合はポストピークの変形性能が高く、一方で全体座屈が先行すればポストピークの変形性能は低い傾向が見受けられる。全体座屈と局部座屈の連成座屈が生じる場合のCFRPシートによる補強の適用範囲の設定や設計法の構築に際して、この力学挙動の解明が必要と思われる。

(4) 耐力曲線

図-6には、道路橋示方書²⁾および鋼・合成構造標準示方書¹⁶⁾の耐力曲線に各供試体の最大耐力をプロットした。ここで、細長比パラメータの計算では、

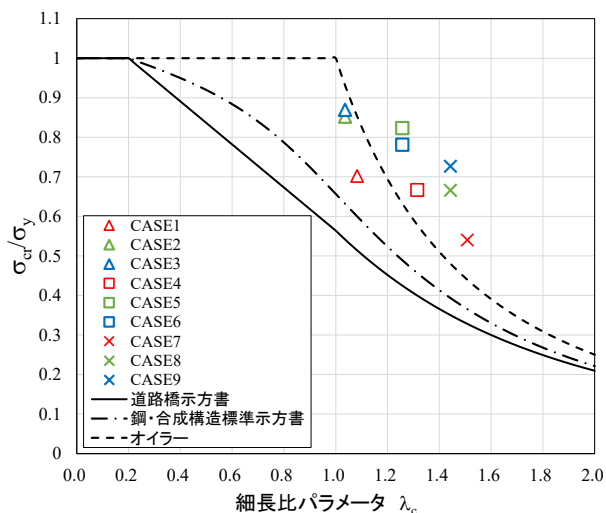


図-6 耐荷力曲線

有効長さ係数を両端ピン支持の 1.0 として、部材の長さをエンドプレートの板厚を含まない有効座屈長さとしている。さらに、補強したケースの全塑性軸力 P_y 、細長比パラメータ、および幅厚比パラメータは CFRP 補強量を鋼換算して計算している。

図より、すべての供試体の耐荷力は道路橋示方書および鋼・合成構造標準示方書の両方の曲線より安全側になることが確認できる。また、補強したケースが無補強のケースに比べ上側にプロットされている。耐荷力曲線の形状は補強したケースも無補強のケースと同じような傾向となっている。

このことから、鋼部材単体の耐荷力曲線を基本とし、CFRP シートを鋼換算して断面緒元の計算上見込むことによる補強設計法を構築できる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本検討は、CFRPシートによるトラス橋の合理的な耐震対策方法を構築することを目的として、トラス橋のH形断面斜材を想定した長柱供試体を対象に、CFRPシートをフランジと腹板の全面に貼付けを行い、単調圧縮載荷実験により全体座屈と局部座屈の連成座屈強度を確認する実験を行ったものである。この結果、得られた知見は以下のとおりである。

- (1) CFRP シートで補強したケースの最大荷重は、無補強のケースと比べて 1.78~2.04 倍程に増加することがわかった。また、無補強の供試体の全塑性軸力との比は 0.54~0.70 であるのに対して、補強した供試体では 1.00~1.32 に増加している

ことがわかった。このことから CFRP シートによる耐荷力向上の効果が確認できた。

- (2) 水平方向 CFRP シートを鉛直方向と同数とした場合および 1/2 とした場合を比較すると、耐荷力の増加率に大きな差が無いことが確認できた。
- (3) 荷重と鉛直変位の関係より、最大荷重から軟化しながら変位急増に移行するまでのポストピークの変形挙動は、細長比パラメータが大きい程、変形性能が小さい傾向がみられた。
- (4) 破壊モードとして、局部座屈が先行する場合はポストピークの変形性能が高く、一方で全体座屈が先行すればポストピークの変形性能は低い傾向がみられた。
- (5) すべての供試体の耐荷力は道路橋示方書および鋼・合成構造標準示方書の両方の曲線より安全側になることが確認できた。また、補強したケースが無補強のケースに比べ耐荷力曲線の上側にプロットされた。耐荷力曲線の形状は補強したケースも無補強のケースと同じような傾向となっている。

今後の課題として、

- 局部座屈に対する水平方向 CFRP シートの積層数と補強効果との関係の把握や、水平方向の積層数の設計法の構築
- 全体座屈と局部座屈の連成座屈が生じる場合の CFRP シートによる補強の適用範囲の設定や設計法の構築

が挙げられる。本検討で報告した単調圧縮載荷実験の結果に加え、正負交番載荷試験や、有限要素解析を行いながら、上記課題に関して検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究の実験は、ものづくり大学建設学科（研究当時）の杉本陸氏および研究室学生諸氏のご協力のもと実施されたものである。ここに記して関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1980.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1996.
- 3) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法 設計・施工マニュアル，2013.
- 4) 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.
- 5) Pham, N. V., and T. Miyashita. Nonlinear stress analysis for CFRP-sheet-bonded steel plates under uniaxial tensile loading, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.8(1), pp.127-143, 2020.
 - 6) Pham, N. V., T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Hidekuma, and T. Harada. Repair method and finite element analysis for corroded gusset plate connections bonded to CFRP sheets, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol.147(1), 04020310, 2021.
 - 7) Pham, N. V., T. Miyashita, K. Ohgaki, Y. Okuyama, Y. Hidekuma, and T. Harada. Load-Carrying Capacity of Corroded Gusset Plate Connection and Its Repair Using CFRP Sheets, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol.147(6), 04021068, 2021.
 - 8) Pham, N. V., K. Ohgaki, T. Miki, Y. Hidekuma, and S. Sakurai. Seismic retrofitting method using CFRP sheets for H-section steel beam with variable cross section, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol.148(4), 04022004, 2022.
 - 9) 下前照, 大垣賀津雄, Ngoc Vinh PHAM, 酒造敏廣, 秀熊佑哉: 鋼構造板厚変化部の CFRP 補強に関する基礎的実験と解析, 土木学会, 第 8 回 FRP 複合構造・橋梁シンポジウム論文集, 2020.
 - 10) 大垣賀津雄, PHAM NGOC VINH, 服部雅史, 宮下剛, 秀熊佑哉, 櫻井俊太: CFRP シートによるトラス橋 H 形断面斜材の耐震補強に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.79, No.14, 22-14005, 2023.
 - 11) 秀熊佑哉, 宮下剛, 大垣賀津雄, 服部雅史, 櫻井俊太, 高原良太: CFRP 補強した H 形および矩形断面短柱の圧縮耐荷力に関する実験研究鋼構造論文集, 第30巻第117号, pp.27-41, 2023
 - 12) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.735-746, 2011.
 - 13) 宮下剛, 若林大, 秀熊佑哉, 小林 朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.5, pp.23-38, 2015.
 - 14) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 秀熊佑哉, 小林朗, 小出宜央, 堀本歴, 長井正嗣: 高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.1, pp.44-63, 2015.
 - 15) 西野晶弘, 秀熊佑哉, 宮下剛, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 小森篤也: ポリウレアパテの弾性係数の違いが CFRP 接着鋼板の応力伝達に与える影響, 土木学会第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2018.
 - 16) 土木学会: 鋼・合成標準示方書, 設計編, 2022 年制定, 2022.

(Received August 25, 2023)

LONG COLUMN BUCKLING TESTS ON REINFORCEMENT OF STEEL TRUSS BRIDGE H-SECTION DIAGONAL MEMBERS WITH CFRP SHEETS

Masafumi HATTORI, Kazuo OHGAKI, Takeshi MIYASHITA, Genta GOTO, Yuya HIDEKUMA, and Shunta SAKURAI and Ngoc Vinh PHAM

Adding stiffening steel plates with high strength bolts is generally used to reinforce the load-bearing capacity of steel truss bridges. In contrast, this method has the following problems: the bolt holes cause cross-sectional defects in the base member, and the steel plates must be pre-fabricated and carried to narrow areas before being bolted. A reinforcement method using carbon fiber reinforced polymer (CFRP), which is stronger, more elastic, lighter, and less corrosive than steel, has been proposed as a potential solution to these problems. If a reinforcement method using CFRP could be applied, it would be a more rational method than reinforcement using steel plates.

In this study, mainly for seismic reinforcement, CFRP sheets were attached to long column specimens that imitated the H-section diagonal members of steel truss bridges to examine the reinforcement effect on the coupled buckling of whole buckling and local buckling through compression loading tests.