CFRPシートを多積層した鋼部材の 補強効果に関する実験研究

秀熊 佑哉¹・櫻井 俊太¹・大崎 真由² PHAM NGOC VINH³・大垣 賀津雄⁴・宮下 剛⁵

1 正会員 日鉄ケミカル&マテリアル㈱ 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

E-mail: sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

2学生会員 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

E-mail: b01912027@iot.ac.jp

3 正会員 ものつくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科(〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

E-mail: pnvinh@iot.ac.jp

4 正会員 ものつくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷 333 番地)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

5 正会員 長岡技術科学大学准教授 環境社会基盤工学系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

近年,耐震補強や B 活荷重対応が必要な鋼製橋梁に対して,炭素繊維強化ポリマー(以下, CFRP と呼ぶ)の接着補強工法の適用事例が見られる.しかし,鋼部材に適用できる CFRP シートの最大積層補強量は,これまでの研究や施工実績では,繊維目付量 300g/cm²の高弾性型 CFRP シートで 35 層までとなっている.そこで本研究では,さらなる CFRP シートの積層量増加の可能性を確認するため,繊維目付量 900g/cm²の高弾性型 CFRP シートで 24 層および 35 層を接着積層した鋼板供試体を用いて,圧縮載荷実験および引張載荷実験を実施した.実験結果から,このように CFRP シートを多積層した場合でも,最大荷重の増加や理論計算どおりの初期剛性の増加といった補強効果が得られることがわかった.

Key Words: Strengthening method, Multilayered CFRP, Steel plate, Compressive loading tests, Tensile loading tests

1. はじめに

我が国の道路橋の多くは高度経済成長期に建設され, 供用年数の経過に伴い,腐食損傷に起因する板厚減少に よる耐荷性能の低下や繰返し荷重載荷による疲労き裂損 傷等が生じている.そのため,鋼構造物の補修・補強対 策が重視されており,対策工法の一つとして炭素繊維シ ート(以下,CFRPシート)を用いた接着補修工法が開 発されてきた^{1,5}).これまで,鋼構造物に対する炭素繊 維シート補修に関する研究は,断面の軸方向応力や垂直 応力に対する補修に始まり,腹板のせん断座屈変形に対 する補強効果を検証する実験も行われてきた.これらの 研究成果を基に,設計・施工に関するマニュアル %が整備され,その後,耐震補強やB活荷重補強等の適用ニーズの増大に伴い,CFRP シートの最大接着積層量の研究がなされ⁷,現行のマニュアルでは300g/m²目付けの高弾性型 CFRP シートで35 層までが適用可能と規定されている⁹⁹⁹.

近年,大規模更新等における床版取替え事業に伴う鋼橋部材の補強需要の増大により,現行マニュアルの最大 積層数 35 層では対応できない場面が見られるようになってきた.そこで本研究では,さらなる積層量増大の可能性を確認するため,繊維目付量 900g/cm²の高弾性型 CFRP シートで 24 層および 35 層を接着積層した鋼板供 試体を用いて,圧縮載荷実験および引張載荷実験を実施 した.

本工法では、鋼材と CFRP シートの間に低弾性かつ伸 び率の高い高伸度弾性パテ材(以下,パテ材と呼ぶ)を 挿入し,はく離の防止を図ることを標準としている⁶⁸. この時,パテ材の弾性係数が非常に小さいことから、鋼 材から CFRP シートへの応力伝達率が低くなる.現行の マニュアルでは、これを考慮する応力低減係数が導入さ れており、本研究においても文献 9)を参照して与条件か ら改めて応力低減係数を算出した(24層では 0.74,35層 では 0.69).

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実験供試体は一般図を図-1 に示す通り,長さ4050mm, 厚さ16mmの平鋼の両端に厚さ19mmのエンドプレート を溶接することで作製した.本実験では,CFRPストラ ンドシートによる補強の有無,CFRP積層数(24層と35 層),および引張軸力と圧縮軸力の載荷方法を実験パラ メータとしており,表-1に示すように合計6体の供試体 の載荷実験を実施した.

(2) 材料諸元

本研究で使用した材料諸元を表-2 に示す.鋼材の鋼種

は SS400 であり、CFRP シートには高弾性型炭素繊維ス トランドシート(目付 900g/m²,設計厚さ 0.429mm/層) を使用した. 表-2 では、鋼材の機械的性質はミルシー トの値を、CFRP シートとエポキシ樹脂は実験により求 めた値を示している.また、CFRP シートをエポキシ樹 脂で鋼部材に接着する場合、座屈等の大変形が起きると CFRP シートがはく離し、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をパテ材として挿入した.

(3) 施工手順

施工は、鋼材表面をディスクサンダーにて2種ケレン 相当の表面処理を行った後、補強有りの供試体では、ウ レタンプライマーを塗布後、表-2 に示したパテ材を平 均塗布厚が0.8mmになる様に塗布し、その後、所定の層 数の CFRP シートを接着用のエポキシ樹脂にて接着した. 積層作業を必要積層分繰りし、最後に上塗りによって表 面を仕上げた.

(4) 載荷方法

載荷方法は図-2 に示すように,3000kN 万能試験機に 供試体の両端のエンドプレートをボルト固定し,単調引 張載荷と単調圧縮載荷実験を行い,終局破壊状態に至る まで載荷した.



図-1 実験供試体

(5) ひずみ・変位の計測位置

図-1 に示すように、鋼板の両端と中央の表面ならび にコバ面に一軸ひずみゲージを貼付した. さらに, CFRP シートのはく離破壊発生の検出に向け、最下層の シート端部の表面にも一軸ひずみゲージを貼付した.

実験結果と考察

(1) 圧縮載荷実験

(a) 荷重と変位の関係

実験結果の一覧を表-3 に示し、圧縮実験から得られ た荷重と鉛直変位の関係を図-3に示す.無補強の CASE1 では、載荷初期段階から全体座屈が発生し、 3.5kN で最大荷重を迎えた. 一方, CFRP シートを 24 層 積層した CASE3 の最大荷重は 162kN であり、無補強に 対して最大荷重は4630%増加した. また, 35 層積層した CASE5 の最大荷重は 244kN であり、無補強に対しては 6970%, CASE3 に対しては 1.51 倍の増加となり, CFRP 補強量と補強率はほぼ比例関係にある.

図-4 には、供試体中央位置での荷重とひずみの関係 を示す. 図-4 から、実験値と理論値とほぼ一致してい ることが確認できる.ただし、CASE5の鋼材コバ面に おけるひずみは100kN以降で理論値より若干大きくなっ ている. これは載荷装置の制約から、本来必要なずらし 量が 75mm であるのに対して、50.7mm として、CFRP シ ートの積層を行った影響と考えられる.

CASE	CFRP シート (900g/m ² 目付)層数	載荷					
1		圧縮					
2	なし(無補知)	引張					
3	24 層	圧縮					
4	(300g/m ² 目付×72層相当)	引張					
5	35 層	圧縮					
6	(300g/m ² 目付×105層相当)	引張					

表-1 宝驗供試休パラメータ

表─2 使用材料諸元									
材料	鋼材 (SS400)	高弾性ス トランド シート	エポキシ 樹脂	パテ材					
弾性係数 (MPa)	2.0×10 ⁵	6.95×10 ⁵	2690	73					
降伏点 (MPa)	245	Ι	Ι	-					
引張強度 (MPa)	415	2850	104*	9					
設計厚さ (mm)	-	0.429	2.1	0.8					
ポアソン比**	0.3	0.3	0.38	0.49					
伸び (%)	31	_	_	423					

/+- III +- 101 =+/

* 圧縮強度

** 実測値ではなく、計算上使用した値



表-3 実験結果一覧

載荷 状態	供試体	CFRP スト ランドシー ト積層数	降伏荷重 (kN)	シートはく離 荷重(k N)	最大 荷重 (kN)	無補強と 最大荷重 の比
圧縮	CASE1	無し	-	-	3.5	-
	CASE3	24層	-	はく離なし	162	46.3
	CASE5	35層	-	最大荷重後に 端部はく離が 発生	244	69.7
引張	CASE2	無し	408	-	408	-
	CASE4	24層	426	535	565	1.39
	CASE6	35層	402	509	544	1.33







図-4 供試体中央鋼材のひずみ (圧縮載荷実験)

図-5は道路橋示方書¹⁰の圧縮耐荷力曲線やオイラーの 耐荷力曲線に,本実験結果をプロットしたものである. 同図の縦軸は鋼材降伏点で無次元化した応力比 𝚓/𝔈,で あり,横軸は細長比パラメータ *2* である.ここで,補強 後の供試体の曲げ剛性は CFRP シートの積層数だけ表-2 に示した鋼材換算設計厚さ分が増加していると考えて, 供試体中央部の断面が全長で一定であるとして計算して おり,部材端部に向かって積層数が少なくなる変断面の 影響は考慮していない.

同図から、実験から得られた供試体の耐荷力が道路橋 示方書の耐荷力曲線に近いことがわかる.ここで、実験 値が耐荷力曲線より若干低くなっている理由は、試体中 央部の断面が全長で一定であるとして計算しているため と推察される.実際には、CFRP シートが供試体全長で 一定ではないことから、断面2次モーメントは小さくな り、細長比パラメータは大きくなることで、道路橋示方 書の耐荷力曲線を上回るものと思われるが、この部分の 詳細な評価については、有限要素解析等による今後の課 題としたい.

(b) 破壊状況

供試体の破壊状況の写真を図-6 に示す. CASE1 は両 端固定の座屈モードであり,供試体中央部の面外変位が 大きくなっている.一方,CFRPシートを24層積層した CASE3 では,CFRP シートのはく離は発生せず,シート を貼付していない鋼材部の局所変形が生じている. CFRP シートを35層積層した CASE5 では,図-6 に示す ようにシート間で層間はく離が生じており,その部分で の変形が卓越している.これは本来必要なずらし量が 75mm であるのに対して,50.7mm として,CFRP シート の積層を行った影響と考えられる.

(2) 引張載荷実験

(a) 荷重と変位の関係

図-7 に、引張実験から得られた荷重と鉛直変位の関係を示す. 同図から、各ケースについて、初期剛性の理論値は実験値と載荷初期段階でよく一致している. また、 図-8 には供試体中央位置での鋼材における荷重とひずみの関係を示す. 同図から、各ケースについて、供試体中央の鋼材ひずみも、理論値とよく一致していることがわかる.

また, 図-7 からはすべての供試体の変位増加点がほぼ同じであることがわかる.これは供試体端部の鋼材が 初期降伏 ($P_y = 392$ kN) に達するため,鉛直変位が増加 し始める荷重が一致することによる.

最大荷重については、無補強の CASE2 と比較すると 24 層積層した CASE4 で 39%増加, 35 層積層した CASE6 で 33%増加している. CASE4 と CASE6 の最大荷重がほ ぼ等しくなる理由としては、CFRP シート端部付近の無 補強部の鋼材が降伏した後に、はく離防止機能のあるパ テ材の機械的性質に限界を迎え、端部ではく離が生じた ためと推察される. 実構造物への適用では、CFRP シー トを貼付する端部を板厚が増加した応力余裕のある箇所 に設けることができれば、このような問題は生じないと 考えられる.

また,表-3 に示したように,すべての補強ケースでは,鋼板の降伏点の到達後の最大荷重に近づいた段階で CFRP シートにはく離が発生することが確認できた.





b)CASE3 (はく離発生せず)



c)CASE5 (シート層間はく離発生)





図-8 供試体中央鋼材のひずみ (引張載荷実験)

(b) 破壊状況

供試体の破壊状況の写真を図-9 に示す.鋼材の降伏 後に大きな伸びを示す CASE2 に対し(除荷中に座屈), CFRP シートを 24 層積層した CASE4 や 35 層積層した CASE6 では,鋼材降伏後に固定部に近い第1層目の接着 層のはく離による破壊となった.これは,接着端部の無 補強部の鋼材が先行して降伏し,第1層接着部に大きな 水平せん断力が生じたため,パテ材の機械的性質が限界 に至ったためと推察される.

4. まとめ

本研究は、繊維目付量 900g/cm²の高弾性型 CFRP シートを 24 層ならびに 35 層として接着積層した鋼板供試体

に対し、両端固定の圧縮載荷実験および引張載荷実験を 実施した.本研究で得られた知見は以下のとおりである.

- 圧縮載荷実験において、CFRP シートを 24 層積層した CASE3 の最大荷重は 162kN であり、無補強の最大荷重に対して 4630%に増大した.また、35 層積層した CASE5 の最大荷重は 244kN(6970%に増大)となった.
- 2) 弾性域において、CASE3の荷重とひずみの関係の実験値と理論値とはほぼ一致した.一方、CASE5の鋼材コバ面におけるひずみが理論値より若干大きくなっており、これは載荷装置の制約から、本来 75mm必要なずらし量を 50.7mm として、供試体の積層を行った影響と考えられる.
- 供試体中央部の断面が一定であるとして計算した耐 荷力は、道路示方書の耐荷力曲線に近くなることが



a)CASE2



b) CASE4 (シート端部はく離)



c) CASE6 (シート端部はく離)図-9 引張実験後の破壊状況

わかった.

- CASE3 では CFRP シートのはく離は発生せず、シートを貼付けていない鋼材部に局所変形が生じた.
 CASE5 では CFRP シート積層間部におけるはく離が生じており、その部分での変形が卓越した.これは、ずらし貼り既定値 75mm が確保できず、50.7mmのずらし貼りで施工した影響であると考えられる.
- 5) 引張載荷実験において, CASE2,4,6 すべての供試体 の中央鋼材ひずみは, 理論計算値とよく一致してい ることがわかった.
- 引張最大荷重については、無補強ケースと比較する と 24 層積層した CASE4 で 39%増加, 35 層積層した CASE6 で 33%増加することが確認でき、最大荷重は ほぼ等しくなった。
- 7) CASE4,6 いずれのケースも降伏後の最大荷重に近い 段階で最下層の CFRP シート接着部にはく離が生じ た.これは、接着端部の鋼材が降伏しており、接着 部に大きな水平せん断力が生じたため、パテ材の機 械的性質が限界に至ったことが原因と考えられる.

謝辞:本研究に際し,高速道路総合技術研究所道路研 究部の服部雅史氏に指導いただきました.また,ものつ くり大学橋梁・構造研究室各位に実験等の協力を頂き ました.ここに感謝いたします.

参考文献

- 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.
- 宮下剛,石川敏之:多層のCFRP板が積層された曲げ を受ける鋼部材の応力解析,土木学会論文集,Vol.69, No.1, 26-39, 2013.
- 3) 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, 44-63, 2015.
- 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.
- 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.
- 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.
- 7) 奥山雄介,宮下剛,大垣賀津雄,広瀬剛,秀熊佑哉:炭 素繊維シート接着工法における最大積層数に関する一考 察,日本鋼構造協会鋼構造年次論文集,2017.11
- 8) 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, 2018.7

- 9) 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.II 23-II 38, 2015
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編,平 成27年12月

(Received August 26, 2022)

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTHENING METHOD WITH MULTILAYERED-CFRP FOR STEEL PLATE

Yuya HIDEKUMA, Shunta SAKURAI, Mayu OHSAKI, Ngoc Vinh PHAM, Kazuo OHGAKI, and Takeshi MIYASHITA

In recent years, there have been examples of the application of carbon fiber reinforced polymer (hereafter referred to as CFRP) adhesion lamination method for seismic reinforcement of steel bridges and B live load. However, the maximum lamination reinforcement amount of CFRP sheet to steel members is up to 35 layers of highly elastic CFRP sheet with a fiber basis weight of 300g/cm². Therefore, to confirm a more significant amount of lamination in this study, we prepared a steel plate specimen in which 24 layers and 35 layers of high-elasticity CFRP strand sheets with a fiber basis weight of 900 g/cm² were laminated. Then, compression and tensile loading tests were performed. Experimental results revealed that the calculated reinforcement effect was obtained even when such CFRP sheets were laminated in multiple layers.