真空含浸工法を応用した CFRP 接着による 鋼桁端腐食部の補修に関する実験的検討

小林 洸貴¹・近藤 諒翼²・中村 一史³・
松本 幸大⁴・松井 孝洋⁵・越智 寛⁶

¹学生会員 首都大学東京大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: kobayashi-kouki1@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都 港湾局 離島港湾部 計画課 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2丁目8-1)

E-mail: Ryosuke_Kondo@member.metro.tokyo.jp

³正会員 首都大学東京大学院准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

⁴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-matsum@ace.tut.ac.jp

⁵正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部 (〒455-8502 愛知県名古屋市中港区大江町9番の1)

E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

⁶正会員 東レ株式会社 アドバンスドコンポジットセンター

(〒455-8502 愛知県名古屋市中港区大江町9番の1)

E-mail: Yutaka_Ochi@nts.toray.co.jp

炭素繊維を強化材とするCFRPは高弾性・高強度であること、現場でのハンドリングに優れることから、鋼構造物の補修・補強に適用されている。本研究は、大型FRP構造物の製造方法の一つで、真空含浸工法 (VaRTM ; Vacuum assisted Resin Transfer Molding) と呼ばれる成形技術を用いて、CFRPと鋼構造物を一体化させる補修工法の開発を目的としたものである。ここでは、鋼桁端部の腐食部を対象に、真空含浸工法による補修効果について実験的な検討を行った。その結果、含浸工程の時間が短時間で完了すること、柱部材の耐力が腐食前の状態の耐力力まで回復することが確かめられた。

Key Words : steel member, repair and strengthening, VaRTM, CFRP, bonded joint

1. はじめに

高度経済成長期から本格的に始まった全国的な道路交通網の整備事業の実施に伴い、多くの鋼桁橋が建設された。しかし昨今、これらの構造物の中には、損傷・老朽化が進行したものも多く、その対策が大きな社会問題となっている。老朽化した鋼桁橋の劣化原因の大半が腐食であり、主に桁端部で多く発生している。これは、橋梁の耐力の低下に直接的に繋がるため、腐食した桁端部の残存耐力を実験的、解析的に検討した研究がこれまでも数多く行われている¹⁾。

一般に、腐食損傷に対する補修・補強の方法として、

当て板工法が用いられている²⁾。当て板と鋼部材との接合には、高力ボルトを用いられるが、孔明けが必要となる。しかし、孔明けによる断面欠損を考慮すると、有効断面が減少するため、補修設計が困難になる場合がある。

このように、効率的な維持管理が求められている中で、軽量で、耐久性にも優れる繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic; FRP) が社会基盤施設の再生・再構築のための革新的な構造材料として注目されている³⁾。特に、炭素繊維を強化材とするCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) は、高弾性・高強度であること、軽量で現場でのハンドリングに優れることから、CFRP接着による鋼構造物の補修、補強に適用されはじめている⁴⁾。CFRP接

着工法では、施工時に大掛かりな設備を必要としないことや、工期の短縮が可能となるなど、従来の当て板工法に比べて多くの利点がある。しかしながら、CFRP板は、帯板であるため、部材間の不陸、連結構造、溶接接合部のような平滑ではない不連続部における接合には適用できない場合がある。炭素繊維シート（以下、CFシート）は、このような不陸面にも適用できるため、前述したように腐食による損傷事例が多い、桁端部へのCFシートの適用⁷⁻⁹⁾が検討され、設計・施工マニュアル¹⁰⁾も整備されている。ただし、CFシートは薄いため、積層数が増大すると作業効率が悪くなる。したがって、補修作業の効率化と狭隘部などで制約を受けやすい現場施工に適用できる、合理的な接合方法の開発が求められている。

そこで本研究では、近年、機械分野で旅客機の多くの構造要素や、風力発電設備のブレード等、大型FRP構造物の製造方法である真空含浸工法（Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM と呼ぶ）と呼ばれる成形技術¹⁰⁾に着目し、施工現場においてFRPを成形するとともに、FRPと既設鋼構造物を接着して、一体化する補修・補強工法の開発を目的としている。ここでは、一般的な鋼鉄桁橋の桁端部を対象に、VaRTM成形されたCFRP部材による柱部材としての耐荷力の性能回復について実験的な検討を行った。

2. 真空含浸工法を用いたCFRP接着による補修・補強の概念

前述のように、機械分野では、大型FRP構造物の製造方法に、VaRTM成形が用いられている。VaRTM成形技術とは、FRPなどの強化材をプラスチックフィルム等で封入し、真空吸引した後に、液体樹脂を注入・含浸して硬化させて、成形する技術である（図-1）。特徴として、施工時に必要な設備が大掛かりではないこと、一度に大きな構造物の成形が可能であること、繊維含有率が高いため高品質なFRPを成形できることが挙げられる。

このVaRTM成形技術では、様々な形状に柔軟に対応できる強化材を、現場で成形・接合することができるため、FRPと鋼部材の接合の課題を合理的に解決できると考えられる。先行研究¹¹⁾では、VaRTM成形されたFRPの材料特性、VaRTM成形によるFRPと鋼板との接合の方法と強度について実験的に検討し、その有用性を確かめている。

しかしながら、桁端柱部材のような、ウェブ、下フランジ、垂直補剛材の3面からなる、立体的な形状への施工性、有用性については検討が十分に行われていない。このような部位は狭隘な箇所であるため、鋼部材からCFRPに力を伝達するための定着長が十分に確保できな

い。また、軸圧縮力が支配的で、柱部材としての圧縮耐力が要求される。本研究は、このような複雑な形状に柔軟に対応でき、かつ断面欠損により低下した圧縮耐力の回復を図るようにするために、VaRTM成形技術を応用した、鋼構造物の補修・補強工法の開発を目的としたも

図-1 VaRTM成形システムの概念図

図-2 桁端柱部材のモデル化

表-1 試験体の寸法

桁長 L (mm)	700
フランジ幅 b_f (mm)	270
フランジ厚 t_f (mm)	12
腹板高さ h_w (mm)	800
腹板厚さ t_w (mm)	6
垂直補剛材幅 b_s (mm)	120
垂直補剛材厚さ t_s (mm)	12

のである。

施工性については、立体的に積層したCFシートを含浸できるかどうかを確認する。また、VaRTM成形によればCFRP部材の配置の自由度が高くなることから、CFRP補剛材の設置により高い剛性を付与することが可能となる。そこで、欠損部が部分的に塑性化しても補剛材によって局部座屈が抑制されれば、性能回復を図ることができると考えた。ただし、接着接合部では、一般に、鋼材の塑性化によりCFRPがはく離するため、補剛材の設置による性能回復について実験的に検証する。

3. 桁端柱部材と腐食による断面欠損のモデル化

一般的な鋼板桁橋の桁端部を想定して、図-2 に示すように、I 形断面の小型試験体を対象とする。表-1 に、試験体の寸法を示す。

支点上の鉛直荷重に対する柱部材としての耐荷力に着目するため、載荷板を介して上下方向に荷重を載荷するものとしてモデル化した。

また、腐食については、垂直補剛材、ウェブの下端に断面欠損を考慮した。断面欠損は、垂直補剛材、ウェブの下端 100mm の範囲(図-2 のハッチング部)とし、フランジの腐食は考慮しなかった。腐食形状は、道路管理者への桁端の腐食状況のヒアリングに基づいて決定した。垂直補剛材、ウェブの厚さの欠損率を、下端で 75%、上端で 0% (健全) とした、テーパ状の直線勾配でモデル化した。図-3 に、ウェブと垂直補剛材の試験体のテーパ形状と溶接接合部を示す。断面欠損のテーパ部と下フランジとの溶接接合は、6mm のすみ肉溶接とした。

表-2 に、鋼材 (SM400) の材料特性を示す。降伏強度、引張強度、伸びはミルシートによる値である。弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s は、鋼材の一般的な値として、200GPa、0.3 をそれぞれ仮定した。

表-3 に、試験体の最大初期たわみ量を示す。表より、各部位の最大初期たわみ(面外たわみ)は、健全体モデルのウェブ、積層モデルの垂直補剛材で大きかった。ウェブ高さ 800mm に対して 1/160 程度であり、道路橋示方書の製作精度 (1/250) を超過した。これは、ウェブ厚が 6mm と薄く、溶接による変形が大きかったことが要因と考えられた。

4. CFRP 部材の接着による補修方法

(1) 補修方法の設定と CF シートの必要量

補修の方針として、最大欠損部 (75%) を、鋼の弾性係数で換算した等価なCFRPの剛性で補うモデル (以後、

積層モデル) と、鋼換算したCFRPの量を50%とし、残りの必要量を偏心した位置に配置して剛性を向上するために、CFRPによる立体的な補剛材を設置するモデル (以後、立体補剛材モデル) の2つを検討することとした。なお、立体補剛材モデルの設計・施工は、種々の方法が考えられるが、本研究では、単純に鋼換算したCFRP必要量の半分以上を欠損部に、もう半分以上を補剛材に等分して配置することとした。また、その形状も一般的な垂直補剛材とすることも考えられるが、VaRTM成形時に自立させる型枠が必要となる。そこで、軽量で加工性がよいこと、剛性が高く、安定した形状であることを考慮して、硬質発泡ウレタンによる立体的なくさび形状を採用することとした。立体補剛材は、桁端部に設置することを想定していることから、くさび形状の底面の大き

図-3 断面欠損部のテーパ状のモデル化

表-2 鋼材 (SM400) の材料特性

項目	ウェブ	垂直補剛材
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	291	288
引張強度 σ_u (N/mm ²)	431	429
伸び δ (%)	30	31

表-3 試験体の最大初期たわみ量

モデル名	ウェブ (mm)	垂直補剛材 (mm)
健全体	4.9	2.3
無補修	4.0	1.1
積層	1.5	4.6
立体補剛材	1.1	1.6

表-4 CFシート (中弾性タイプ) の材料特性

弾性係数 E_f (N/mm ²)	440,000
引張強度 σ_{cf} (N/mm ²)	24,000
シート厚さ t_{cf} (mm)	0.163
繊維重量 (g/m ²)	300

図-4 VaRTM成形による補修範囲

さは、ソールプレートに収まる範囲(100mm)とした。

図-4に、2つのモデルのVaRTM成形による補修範囲を示す。欠損高さ100mmに対して高さ方向の補修範囲は300mmとした。一般に、中桁の桁端には面外ガセットが設置されることを考慮して、その高さ程度まで接着することとした。なお、後述するようにCFRPの端部には段差を設けており、定着長も十分ではないと考えられるため、耐力の回復とはく離強度は、実験的に検討する。

表-4に、本研究で用いたCFシートの材料特性を示す。弾性係数と引張強度に優れる中弾性タイプを選定した。これらの値のうち、弾性係数は平均値、引張強度は材料メーカーによる特性値である。

a) 積層モデルの補修設計

積層モデルの補修の考え方は、「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」⁹⁾の次式によるものとした。

$$A_{sl} \leq A_{cf,f} \quad (1)$$

$$A_{cf,s} = t_{cf,f} \cdot B_{cf} \quad (2)$$

$$t_{cf,s} = \frac{E_{cf}}{E_s} \cdot t_{cf} \cdot n \quad (3)$$

$$t_{cf,svf} = \frac{t_{cf,s}}{V_f} \quad (4)$$

ここで、

A_{sl} : 鋼部材の補修・補強必要断面積 (mm²)

$A_{cf,s}$: CFシートの鋼換算断面積 (mm²)

表-5 CFシート必要量の計算結果

(a) 断面欠損を鋼の弾性係数で換算したCFシートの必要量

項目	垂直補剛材	ウェブ
鋼材の健全部の厚さ t_0 (mm)	12.0	6.0
鋼材の腐食部の残存厚さ t (mm)	3.0	1.5
鋼部材の必要厚さ t_d (mm)	9.0	4.5
断面欠損率 r (t/t_0)	0.75	0.75
鋼材の弾性係数 E_s (kN/mm ²)	200	200
CFシートの弾性係数 E_{cf} (kN/mm ²)	440	440
繊維体積含有率 V_f	0.50	0.50
CFシートの鋼換算厚さ t_{ds} (mm)	4.09	2.05
CFRPの設計厚さ t_{dsf} (mm)	8.18	4.09

(b) 積層モデルにおけるCFシートの数量

項目	垂直補剛材	ウェブ
CFシート1層あたりの設計厚さ t_f (mm)	0.163	0.163
CFシートの積層数 n	26	14
CFRPとしての厚さ t_{dsf} (mm)	8.48	4.56

(c) 立体補剛材モデルにおけるCFシートの数量

項目	垂直補剛材	ウェブ
CFシート1層あたりの設計厚さ t_f (mm)	0.163	0.163
CFシートの積層数 n	16	8
CFRPの設計厚さ t_{dsf} (mm)	5.22	2.61

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

E_{cf} : CFシートの弾性係数 (N/mm²)

B_{cf} : CFシートの幅 (mm)

t_{cf} : CFシート1枚あたりの厚さ (mm)

n : CFシートの積層数 (枚)

t_{ds} : CFシートの鋼換算厚さ (mm)

V_f : 繊維体積含有率

t_{dsf} : CFRPの設計厚さ (mm)

表-5に、CFシート必要量の計算結果を示す。まず、表-5(a)より、ウェブ、垂直補剛材の断面欠損率75%の部位に対して、硬化後のCFRPの設計厚さは、それぞれ8.18mm、4.09mmとなった。繊維含有率 V_f を考慮した鋼換算後のCFRPの設計厚さ t_{dsf} は、CFシートの弾性係数、繊維含有率が高いため、鋼部材の必要厚さ t_d と比べて、若干、薄くなる。

CFRP必要量に対して、設計厚さ0.163mm(繊維重量300g/m²)を選択すると、表-5(b)より、積層モデルでの積層数は、垂直補剛材、ウェブでそれぞれ26層、14層となる。なお、垂直補剛材、ウェブの両面に配置することを考慮して、積層数は偶数とする。

b) 立体補剛材モデルの補修設計

立体補剛材モデルでは、鋼換算厚さに対して50%とするため、表-5(c)より、垂直補剛材、ウェブの鋼材側への配置は、それぞれ16層、8層とした。なお、両面への配置と積層パターンを考慮して、積層数は偶数とし、若干、多く配置している。

図-5に、立体補剛材モデルにおけるCFシートの配置を示す。施工方法は次節で述べるが、コア材となるくさび状の硬質発泡ウレタン(10倍発泡タイプ)に2層巻き立てることとした。コア材への巻立ての層数もパラメータとなるが、コア材との一体化を確保するため、必要数量

(a) 補剛材の外形寸法 (b) 正面 (c) 側面

図-5 立体補剛材モデルにおけるCFシートの配置

表-6 補修モデルにおける炭素繊維量の比較

補修モデル	積層モデル	立体補剛材モデル
CFシート必要量 (m ²)	5.75	3.47
炭素繊維量の比率	1.00	0.60

の1/4をコア材に巻き立てる程度とした。これによりコア材に巻き立てた2層を除くと、垂直補剛材側に6層、ウェブ側に2層、また、下フランジ側には、直角方向に2層、軸方向に6層設置する。また、立体補剛材の傾斜部には、剛性を付与するために、垂直補剛材側とほぼ同じ7層の設置とした。表-6に、補修モデルにおける炭素繊維量の比較を示す。表より、立体補剛材モデルのCFシートの量は、積層モデルに比べて、40%低減されていることがわかる。

立体補剛材の形状寸法・剛性の設定については、今後の課題であるが、垂直補剛材の断面欠損部に関しては、鋼換算の積層モデルと比べて、軸剛性はくさび傾斜部のCFシートを考慮すると同程度(積層: 224, 立体補剛材: 246 ($\times 10^3 \text{kN}$))であるのに対して、立体的な配置により部分的に曲げ剛性を大幅に向上することができるようになる。

なお、CFシートの入手の関係で、以下の実験では、繊維重量 400g/m^2 、設計厚さ 0.217mm の中弾性タイプのCFシートを用いて検討を行った。ただし、積層数については、実施工における多積層での施工性を確認するため、表-4 (b), (c)に示したCFシートの積層数を用いた。繊維重量、設計厚さが異なるため、CFRPの軸剛性は、補修設計に比べて30%程度大きくなる。ただし、繊維重量、設計厚さ以外は表-3に示した材料物性値と同じ値である。

(2) 積層モデルの施工方法

図-6に、積層モデルにおける補修方法を示す。作業工程は、下地処理、プライマー塗布、不陸修正、CFシートの仮止め、副資材の設置、真空含浸の手順であり、各工程の概要を以下に示す。

a) 下地処理

試験体の表面は黒皮の状態であり、腐食範囲は切削加工のため、鋼材の素地状態となっている。現場施工を想定して、屋外暴露により腐食範囲を赤錆状態とした。下地処理には、ブラスト面形成動力工具とディスクサンダーを用いて錆や黒皮などを除去した。その後、アセトンを用いて表面を清掃し、油分や汚れのない状態とした。

また、溶接部の余盛などの突起を削り取ると溶接部に悪影響を及ぼす恐れがあるため、表面を切削しないように留意した。

b) プライマー塗布

下地処理後の鋼材表面の錆防止とCFシートとの接着性を向上させるために、プライマー(AUP40W)を塗布した。プライマーの塗布は、鋼材表面に錆の発生や汚れがないように、下地処理後、速やかに行った。プライマー塗布後、約 30°C で養生を行った。

c) 不陸修正

テーパ部の範囲はエポキシ樹脂にフィラーが添加さ

れた樹脂パテ(AUF60W)を用いて、鋼材の表面を平坦に仕上げた。また、すみ肉溶接のコーナー部(入角部)は樹脂パテで、溶接ビード部が隠れるように、円弧状(10R程度)に平滑に仕上げた。なお、その後の工程は、プライマーが指触乾燥したことを確認した後に行った。

d) CFシートの仮止め

CFシートは、野書きに従って、所定の位置に仮止めた。CFシートは1方向材であり、配向方向は、ウェブ、垂直補剛材の高さ方向である。鋼材とCFシートの接触面は接着接合となるため、樹脂を多く含む層(樹脂リッチ層)を設ける。また、炭素繊維は細く、樹脂が含浸しにくいいため、樹脂の流動を確保することとした。そこで、ガラス繊維のサーフェスマット(SM)を、初層(鋼材とCFシートの間)およびCFシート4層ごとに挿入した。層数の間隔は、樹脂の粘度、繊維重量、繊維の配向方向等によって変わるが、ここでは事前検討により決定した。また、ウェブ側、垂直補剛材のCFシートの端部には、段差を設けるために、2層目からそれぞれ 10mm 、 20mm ずらして仮止めを行った。CFRP内部のひずみを同時に計測するために、FBGセンサ(繊維方向)を1層目のCFシートを仮止めた後に設置した。FBGセンサによる検討は、将来的に健全性の長期モニタリングに利用することを目的としたものであり、真空含浸工法によるFBGセンサの設置の可否や、CFRP内部のひずみ特性の把握を含めて検証することとした。

e) 資材の設置と真空含浸

VarTM成形では、強化繊維を密封して真空状態とするために、専用の各種資材が用いられる。樹脂の硬化後に資材の取り外しを容易にするため、最外層のCFシートに、ピールプライとよばれる薄いフッ素系フィルムを設置した。次に、樹脂の流動性を確保するために、網目状のシートである樹脂拡散メディアを3枚設置した。樹脂の含浸範囲をシーラントテープとよばれる粘着性の高いゴム系シール材で囲った後、樹脂引き用パイプ1本をフランジ側に、真空引き用パイプ2本を上側のCFシート端部にそれぞれ設置して、それらをバッキングフィルム(薄いプラスチックフィルム)で封入した。

真空ポンプを用いて吸引する際、十分な真空度が確保されていることを確認した後、樹脂引き用パイプから含浸接着樹脂(AUP40W)を吸引した。真空度は、樹脂引き用パイプの先端に、真空計を設置することで容易に計測することができる。真空含浸工法での真空度は、ゲージ圧で -101.3kPa の絶対真空に近づけることが理想であるが、接続部などでリークし、絶対真空にならない場合がある。本研究では、 -90kPa 以下の条件でVarTM成形を行った。樹脂が含浸するまでの所要時間は約20分であった。真空含浸は、補修箇所4箇所のうち、2箇所を同時に行った。樹脂の含浸の完了後、パイプの端部をピンチオフプ

ライヤーで締め切り、硬化するまで養生した。養生条件は、約30℃、24時間とした。なお、含浸接着樹脂は、プライマーと同じ、低粘度タイプの2液性常温硬化型エポキシ樹脂である。

(3) 立体補剛材モデルの施工方法

図-7に、立体補剛材モデルの施工方法を示す。下地処理、プライマー塗布、副資材の設置と真空含浸の工程については、積層モデルと同様の手順であるため、省略する。立体補剛材モデルにおける真空含浸の所用時間については、約1時間であった。なお、立体補剛材モデルでは、立体補剛材の硬質発泡ウレタンの型を試験体から直接取るため、不陸修正は行っていない。

a) 立体補剛材の型取りと整形

はじめに、硬質発泡ウレタン（10倍発泡）で、立体補剛材（100mm×200mm）のコア材を作製した。桁端部に幅100mm×高さ200mm×奥行き100mmのくさび形状とな

るように厚さ2mmの鋼板を固定し、硬化前の材料を流し込んだ。硬質発泡ウレタンは常温で15分程度で硬化する。硬化後に脱型し、ディスクサンダーで形状を整えた。

b) CFシートの仮止め

積層するCFシートの仮止めは、前節と同様であるため、ここでは、立体補剛材の仮止めについて述べる。

立体補剛材を作製するために、硬質発泡ウレタンの型の周方向（ウェブ高さ方向）に、CFシートの軸方向を一致させて、2層巻き立てた。その後、CFシートと立体補剛材を一体化させるために、立体補剛材の全面をCFシートで覆った。この立体補剛材をウェブ、垂直補剛材の表面に設置するCFシートの上に設置して、一体化して巻き込むこととした。

(4) 真空含浸工法の工期

真空含浸工法は、炭素繊維シート接着工法や、CFRP板接着工法と比べて、用いる資材や工程が、若干異なる

(a) 下地処理

(b) プライマー塗布

(c) 不陸修正

(d) CFシートの仮止め

(e) 資材の設置

(f) 真空含浸

図-6 積層モデルの施工方法

(a) 立体補剛材の型取りと整形

(b) コア材と立体補剛材への巻立て

(c) CFシートの仮止め

(d) 資材の設置と真空含浸

図-7 立体補剛材モデルの施工方法

ものの、前後の下地処理、プライマー塗布、養生、仕上げは従来工法と同様である。真空含浸工法では、資材の配置に時間を要するものの、CFシートの積層数によらず、樹脂の含浸時間は、常温硬化型エポキシ樹脂を使用しているため、最大でも可使時間(約1時間)以内である。例えば、炭素繊維シート接着工法では、1回の施工で接着できる積層数は3~4層であり、片側13層とすると含浸工程で3~4日間必要となる。真空含浸工法では、13層を1回(1日)の施工で含浸が可能であることから、大幅に工期を短縮することができる。

5. 実験方法

図-8に、実験のセットアップ図、図-9に、セットアップ状況を示す。試験体の下面にソールプレート(250×250mm)を、上面に載荷板(250×250mm)を設置した。横倒れを防止するために、試験体の両端部に横倒れ防止装置を配置した。鉛直荷重の载荷には、油圧ジャッキ(最大荷重2,000kN, 最大ストローク200mm)を用いた。図-8に示したように、荷重はジャッキ下端のロードセルにより、鉛直変位は上面の載荷板の4箇所に設置した変

図-8 実験のセットアップ図

(a) 正面

(b) 側面

図-9 実験のセットアップ状況

位計により計測した。鉛直変位は4箇所の平均値とした。

図-10に、CFRP部材による補修後の状況を示す。積層モデルでは、ウェブ下端から50mm, 幅方向に50mmの位置に、FBGセンサをCFシートの1層目と2層目の間に設置し、CFRP部材内部のひずみを計測することとした。図-10(a), 図-11に、FBGセンサの設置位置を示す。

図-11に、ひずみゲージの位置を示す。ウェブの下端より15mm, 50mm, 110mmの位置に、ウェブ、垂直補剛材の各位置にひずみゲージを設置した。なお、図を略したが、裏面にも同様にひずみゲージを設置した。さらに、図-2に併記したように、高さ中心位置で両端から100mmの位置のウェブの面外変位を2箇所(HD1, HD2)で計測した。

6. 実験結果と考察

(1) 荷重-変位関係と性能回復

図-12に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係、表-7に各モデルの最大荷重を示す。図中、例えば、積層モデルの1000~1400kNの範囲で、荷重が一時的に低下する現象が見られる。これは、はく離状況などを観察するため、荷重の载荷を一時的に停止した箇所であり、塑性領域ではしばしばみられる除荷挙動である。なお、後述するように、両ケースともに最大荷重に到達するまでは、はく

(a) 積層モデル

(b) 立体補剛材モデル

図-10 CFRP 部材による補修後の状況

(a) 正面

(b) 側面

※灰色：積層モデルの補修範囲，ハッチング：立体補剛材モデルの補修範囲，破線：立体補剛材の設置範囲

図-11 ひずみゲージの設置位置

離は生じなかった。

まず、無補修モデルの耐荷力は、健全体モデルと比べ、38.4%低下した。これはウェブと垂直補剛材の断面欠損部の最小厚さが、それぞれ1.5mm, 3mmと薄いため、早い段階で降伏し、局所的に座屈したためである。また、健全体モデルの剛性は、無補修モデルに比べて低くなった。これは表-3に各試験体の最大初期たわみ量を示したように、健全体モデルの初期たわみの最大値がウェブ側で4.9mmと最も大きかったことによるものと考えられた。

一方、積層モデルでは、健全体モデルに比べて、柱部材としての最大荷重は4.0%高くなり、健全体の耐荷力レベルまで十分に回復していることがわかる。立体補剛材モデルでも、健全体モデルと比べて、柱部材としての最大荷重は2.7%高くなり、初期性能まで十分に回復していることがわかる。また、積層モデル、立体補剛材モデルともに、剛性も健全体モデルより高くなるがわかる。しかしながら、立体補剛材モデルは、積層モデルに比べ

図-12 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

表-7 各モデルの最大荷重と補修効果

試験体の種類	健全体	無補修	積層	立体補剛材
最大荷重 (kN)	1332.1	821.0	1385.5	1368.8
健全体に対する比率	1.000	0.616	1.040	1.027

図-13 積層モデルにおける荷重とひずみの関係

剛性が低い結果となった。これについては、ひずみの計測値から考察する。

(2) 各部に生じるひずみと変形挙動

図-13に、積層モデルにおける荷重とひずみの関係を示す。ひずみは、ウェブ、垂直補剛材で、同じ位置（ウェブ下端から50mm, 幅方向に50mmの位置）に設置された、ひずみゲージ、FBGセンサによるひずみの値を示している。FBGセンサは1層目と2層目のCFシートの間設置されている。図より、荷重が500kN以下では全てのセンサで、ほぼ同じひずみの値である。それ以上の荷重で

(a) ウェブ下端から 15mm の高さ

(b) ウェブ下端から 50mm の高さ

(c) ウェブ下端から 110mm の高さ

図-14 荷重と垂直補剛材の曲げひずみの関係

は、垂直補剛材では両者は同程度であるが、ウェブでは、ひずみゲージの値に比べてFBGセンサの値が大きくなった。これは、後述するように曲げひずみの影響と考えられる。これらのことから、VaRTM成形によりCFRP中に埋め込んだFBGセンサによってもひずみの評価が可能であることが確かめられた。

図-14に、荷重と垂直補剛材の曲げひずみの関係を示す。曲げひずみは、ウェブ下端からの同じ距離のひずみゲージを用いて、垂直補剛材の表裏のひずみゲージの差より算定している。積層モデルのひずみゲージはCFRPの表面に設置されている。立体補剛材モデルは、垂直補

剛材が覆われているため、比較していない。図より、無補修モデルでは、ウェブ下端から15、50mmにおいて、荷重が小さい段階から大きな曲げひずみが生じているのに対して、110mmの位置では曲げひずみが進行しないことから、局部的に座屈が生じていると考えられる。積層モデルは、健全体モデルに比べて、断面欠損が大きい位置においても最大荷重まで曲げひずみが小さく抑えられており、十分な補修効果があることがわかる。

図-15に、荷重とウェブの軸ひずみの関係を、ウェブ下端から15mm、50mm、110mmの高さごとにそれぞれ示す。軸ひずみは、同じ高さの位置のひずみゲージの値を

(a) ウェブ下端から 15mm の高さ

(b) ウェブ下端から 50mm の高さ

(c) ウェブ下端から 110mm の高さ

図-15 荷重とウェブの軸ひずみの関係

(a) ウェブ下端から 15mm の高さ

(b) ウェブ下端から 50mm の高さ

(c) ウェブ下端から 110mm の高さ

図-16 荷重と垂直補剛材の軸ひずみの関係

平均して算定している。積層モデルは、CFRP上の軸ひずみの値である。図より、積層モデルは、無補修、健全体と比べ、ウェブの軸ひずみが大幅に抑制されていることがわかる。この結果と図-14示した曲げひずみの結果から、積層モデルでは、曲げひずみと軸ひずみの抑制効果が高いことが確かめられた。なお、コバ面の15mm位置の軸ひずみは、積層モデル、立体補剛材モデルともに、荷重の増加とともに大きくなることから、塑性化の進展を抑えることは困難であるが、局部座屈は抑制できることがわかる。

図-17 荷重とウェブの面外変位の関係

図-16に、荷重と垂直補剛材の軸ひずみの関係を、ウェブの下面からの高さごとにそれぞれ示す。軸ひずみの評価方法は、ウェブと同じであるが、補修モデル（積層モデル、立体補剛材モデル）では、垂直補剛材のコバ面に設置されたひずみゲージの軸ひずみの値も併記している。積層モデルでは、図-15に示した、ウェブの軸ひずみと同様に、軸ひずみが大幅に抑制されていることがわかる。

また、積層モデルのウェブ下端側から15mm位置のコバ面の軸ひずみは、500kNまでは健全体とほぼ同じ値であったが、それ以上では塑性化が開始し、ひずみが増加することがわかる。ひずみは健全体よりも若干大きくなる程度であり、CFRPにより軸ひずみの増加が抑制されているといえた。

一方、立体補剛材モデルのウェブ下端から15mm位置のコバ面の軸ひずみは、無補修と同程度のひずみが発生するが、急激な増加は見られず、ほぼ直線的に増加することがわかる。立体補剛材モデルでは、局部座屈が発生しないことから、単純な軸圧縮により塑性化が進展する挙動を示すものと考えられた。

図-17に、荷重とウェブの面外変位の関係を示す。変位計（HD1, HD2）の設置位置は、図-2に示した通りで

(a) 積層モデルのウェブの端部

(b) 積層モデルの垂直補剛材の端部

(c) 立体補剛材モデルのウェブの端部

(d) 立体補剛材モデルの垂直補剛材の端部

図-18 荷重とCFRP端部の軸方向ひずみの関係

ある。図中、無補修、健全体では、変位計の容量が小さいため、途中までの計測であり、変位の限界値を×で表示している。無補修では、荷重の載荷開始から面外変形も大きいこと、健全体でも荷重の小さい段階から面外変位が大きいことがわかる。

これに対して、積層モデルでは、最大荷重まで面外変位を抑制していることがわかる。また、立体補剛材モデルでは、ウェブの片側の水平変位のみが、急増する現象が見られた。これは、図-5に示した通り、ウェブ下端には、ソールプレートの範囲外に、CFシートが配置されていないため、ウェブ下端の断面欠損部の変形が大きくなって、荷重が偏載され、桁全体にねじり変形が生じたためである。

(3) CFRP部材のはく離挙動

図-18に、荷重とCFRP端部の軸方向ひずみの関係を示す。ひずみゲージの設置位置は、図-11に示したように、ウェブ、垂直補剛材の端部であり、CFRPの端部から10mmの位置である。各部位の表裏(A, B)に配置している。

図-18 (a), (b)より、積層モデルでは、荷重の増加とともに圧縮ひずみが増加するが、最大荷重に達するまでは、鋼材の降伏ひずみ(約 1500×10^6)以下であり、大きなひずみは生じていない。載荷実験後に打音検査で確認したところ、ひずみゲージの設置位置付近では、はく離は生じていなかった。

(a) 積層モデルのウェブ (b) 補剛材モデルの垂直補剛材
図-19 CFRP端部のはく離の状況

(a) 無補修(下端) (b) 健全体 (c) 積層 (d) 立体補剛材
図-20 載荷後における試験体の座屈変形

図-18 (c)より、立体補剛材モデルでは、荷重の増加とともに、圧縮ひずみが増加するものの、57Aと58Bでは、引張ひずみが増加することがわかる。これは、図-17に示したように、ウェブの面外変形挙動に起因するものと考えられ、57Aの近傍では、はく離が確認された。一方、図-18 (d)では、最大荷重に達するまでひずみの値は小さいが、61B以外でははく離が確認された。なお、荷重が750~1050kNの範囲で、62Bの圧縮ひずみが急激に増加しているため、部分的にはく離した可能性もある考えられる。

図-19に、CFRP端部のはく離の状況を示す。図-19 (a)より、積層モデルでは、ウェブの面外変形が顕著であった桁端部付近のウェブで部分的なはく離が生じた。図-19 (b)より、立体補剛材モデルでは、垂直補剛材の座屈変形にともなって、CFRPの端部付近に割れが生じた。これは、図-18 (d)に示したように、最大荷重まではひずみは小さかったことから、割れは最大荷重の到達後に生じたと考えられる。

これらのことから、CFRP端部には部分的なはく離や割れが生じていたものの、CFRP全体のはく離は生じていないこと、また、はく離は最大荷重後に発生したと考えられることから、耐力に及ぼす影響は小さいものと判断された。

(4) 座屈変形

図-20に、試験体の座屈変形を示す。無補修モデルでは、垂直補剛材の下端に局部座屈が生じていることがわかる。健全体、積層モデル、立体補剛材モデルでは、垂直補剛材で全体座屈が生じているが、健全体、積層モデル、立体補剛材モデルの順に、最大の面外変形が生じる位置が、若干上側になることがわかる。これらのことから、CFRP部材の接着により、断面欠損部の局部座屈を抑制する効果があることが確かめられた。

7. まとめ

本研究では、鋼鉄桁橋の桁端腐食部を対象に、VaRTM成形を応用したCFRP部材による桁端柱部材の耐力の回復について、実験的な検討を行った。その結果、以下のようなことがいえた。

- (1) 炭素繊維シートの最大積層数13層に対して、短時間(約20分)で真空含浸が可能であること、また、複雑な立体形状に対しても炭素繊維シートの含浸接着が可能であることが確かめられた。
- (2) 最大欠損率75%の断面欠損に対して、積層モデル、立体補剛材モデルともに、健全体と同等以上の耐力力が得られたことから、性能回復の効果が十分にあ

ることが確かめられた。

- (3) 積層モデルでは、荷重の増加とともに断面欠損部で塑性化が進展するものの、断面欠損部の軸ひずみ、曲げひずみが CFRP により効果的に抑制されるため、最大荷重時には垂直補剛材の全体座屈となることがわかった。
- (4) 立体補剛材モデルでは、垂直補剛材の軸ひずみは荷重に比例して増加するが、CFRP の立体補剛材により断面欠損部の曲げひずみが十分に抑制されるため、断面欠損部での局部座屈は生じないこと、最大荷重時に垂直補剛材の全体座屈となることがわかった。
- (5) 支点近傍に中弾性タイプの炭素繊維シートを集中的に配置して、その数量を 40% 低減した立体補剛材モデルは、柱部材としての耐荷力は、積層モデルと同程度であった。

以上のことから、鋼桁橋の桁端腐食部のように、狭隘な環境下で、立体的な形状に対しても、真空含浸工法を応用した CFRP 部材の接着により、短工期で効果的な補修が可能であることが確かめられた。今後、補剛材等の最適な配置や施工性について検討を行う予定である。

謝辞：本研究は、平成27～28年度国土交通省建設技術研究開発助成制度の一部として行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋の局部腐食に関する調査研究，国土技術政策総合研究所資料，第 294 号，2006.1
- 2) 丹波寛夫，橋本国太郎，田中大介，杉浦邦征：腐食した鋼桁端部の当て板補修に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.60A，pp.94-104，2014.3
- 3) 複合構造委員会編：先進複合材料の社会基盤施設への適用，複合構造レポート 01，土木学会，2007.
- 4) 複合構造委員会編：FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端，複合構造レポート 05，土木学会，2012.
- 5) 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，土木学会，構造工学論文集，Vol.57A，pp.735-746，2011.3
- 6) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：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，pp.710-720，2012.3
- 7) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と耐力評価法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.3，pp.635-654，2012.11
- 8) 奥山雄介，宮下剛，長井正嗣，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，小林朗，堀本歴：炭素繊維を用いた支点部垂直補剛材の腐食部補修法に関する実験的研究，第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集，pp.60-63，2012.10
- 9) (株)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，2013.10
- 10) 近藤富士夫，松井孝洋：他分野における CFRP 大型構造物成形に関する最近の話題，土木学会，第 4 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム，pp.23-26，2012.
- 11) 近藤諒翼，中村一史，松井孝洋，松本幸大：VaRTM 成形法を応用した鋼部材の補修・補強工法に関する実験的検討，土木学会，第 11 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.192-201，2015.11

(2016. 12. 26 受付)

REPAIR OF SECTION LOSS IN GIRDER END BY CFRP USING VACUUM ASSISTED RESIN TRANSFER MOLDING TECHNOLOGY

Kouki KOBAYASHI, Ryosuke KONDO, Hitoshi NAKAMURA,
Yukihiro MATSUMOTO, Takahiro MATSUI and Yutaka OCHI

In this study, the repair method of existing steel members has been developed using Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) technology. As a damaged member by corrosion, webs and vertical stiffeners in girder ends were selected. In order to study repair effect experimentally, the small-sized column models were fabricated and were repaired by externally bonded CF sheets and 3D CFRP stiffeners using VaRTM. The compressive tests were conducted for 4 kinds of specimen including the specimen with/without section loss. As a result, it was found that the load carrying capacity of the repaired specimens by the proposed method was improved and equivalent to the girder without damage.