

CFRP部材による鋼桁端腐食部の補修方法と性能回復に関する基礎的検討

近藤 諒翼¹・小林 洸貴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)

²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)

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 愛知県名古屋市中区大江町9番の1)

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

本研究は、VaRTM成形技術を応用して、鋼構造物とCFRP部材を短工期で一体化させる工法の開発を目的としたものである。鋼桁端部の腐食部を対象に、CFRP部材による耐荷力の性能回復について解析的な検討を行った。今後、載荷実験により補修効果を検討するため、アスペクト比を1.0とし、桁高、ウェブ厚等を縮小して部分的にモデル化することとし、支間長1,700mmの3点曲げ載荷を想定している。本研究では、FEM解析モデルを作成して、追加するCFRPの配置や剛性をパラメトリックに検討した。その結果、断面欠損部の鋼換算によるCFRP補修、CFRP補剛材の設置により、耐荷力が十分に回復することが解析的に確かめられ、従来工法に比べて、CFRPの数量を低減することが可能であることが示された。

Key Words : steel girder ends, corrosion damage, repair, VaRTM, carbon fiber sheet

1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な鋼橋の高齢化が急速に進む中で、これらの老朽化が大きな社会問題となっている。老朽化した鋼橋における劣化要因の大半は腐食である。鋼橋の腐食は、主桁の桁端部で多く発生しており、これは、鋼橋の耐荷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荷力の実験的、解析的な検討がこれまでも数多く行われている¹⁾。

腐食損傷が発見された場合、腐食により減厚した鋼部材に鋼板当て板工法を行うのが一般的である。しかしながら、接合方法は高力ボルト接合がほとんどであり、孔明けによる断面欠損の観点から施工が困難な場合があり、効率的な補修方法が求められている。

このように、社会基盤構造物の効率的な維持管理が求められている中で、軽量で、耐久性に優れる繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, 以下、FRP) が、都市インフラの再生あるいは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²⁾。特に、炭素繊維 (Carbon Fiber) を強化材とするCFRP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、炭素繊維シート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³⁾。炭素繊維シート接着工法では、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。炭素繊維シートは、このような不陸面にも適用できるが、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、作業に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）と呼ばれる成形技術⁴⁾を用いて、鋼構造物とFRP部材を短工期で一体化させる工法の開発を目的としたものである。ここでは、鋼鈑桁橋の桁端腐食部を対象に、CFRP部材による耐荷力の性能回復について解析的な検討を行った。解析対象は、桁端部を部分的にモデル化した縮小モデルであり、今後、実験的な検討を行う桁試験体である。

2. CFRP部材を用いた鋼鈑桁端部の補修の概要

(1) 腐食した鋼桁端部の補修・補強方法の現状と課題

桁端部の腐食の発生は、桁端部が桁中央部よりも閉鎖的かつ狭隘であるため、風通しが悪く湿気がこもりやすいことに起因している。長期的に鋼橋を維持管理していくためには、腐食環境の改善や、腐食により断面欠損した部位に対する適切な補修・補強が必要である。鋼部材に対する既存の補修・補強工法の例として、部分的な部材交換⁵⁾や鋼板を添接する当て板工法⁶⁾が検討されている。当て板工法の接合方法には、高力ボルト接合と溶接接合がある。その他、桁端部に腐食を模擬した断面欠損を有する鋼桁試験体に、鋼板を高力ボルトと接着剤を用いて添接し、静的曲げ載荷試験、疲労試験および水平交番載荷試験を実施して、それらの結果から腐食による局所的な断面欠損に対する当て板補強工法をマニュアル化した研究開発もある⁷⁾。

しかしながら、当て板工法は、ボルト孔による断面欠損や溶接時の入熱により、母材を傷めることがある。また、支点上のウェブと垂直補剛材の交差部付近の断面欠損に当て板補修する場合、部材交換と同様に、主桁のジャッキアップ等、大掛かりな架設機材が必要となり、供用中の制約条件下では施工性に優れないことがある。さらに、対策後の腐食等により、再劣化する可能性もある。そのため、限られた制約条件下で、効果的な補修・補強工法が求められている。

このような状況の中、FRPは、鋼に比べ比重が約1/5と軽量で、環境作用に対する耐久性にも優れている。特に、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、補強に適用されており³⁾、鋼鈑桁橋の桁端部腐食を対象として、CFRPを用いた補修・補強工法の

開発も行われている⁶⁾。

一般に、CFRP接着工法で使用される材料は、シート状または帯板のCFRPであり、帯板を積層した場合でも最大板厚は約10mmである。鋼構造物の補修・補強では、主に、剛性を向上させて、発生応力を低減することが要求されることから、高剛性のCFRPを平面的に接着する方法は、必ずしも効率的とはいえない。さらに、前述したように、FRPと鋼部材の部材同士の接合では、その接合方法が極めて重要である。例えば、部材間の不陸、連結構造、溶接接合部など、平滑ではない箇所における接合は、一般的な当て板による機械接合や接着接合では十分に対応できない。したがって、このような制約を受ける現場施工でも、十分に対応可能な接合方法の開発が求められる。

(2) VaRTM成形によるCFRP部材を用いた補修

既設鋼構造物の補修・補強は、構造物の性能回復や機能の向上を目的として実施されるが、現場作業の効率化も求められている。CFRP接着工法はそれらの要求にも貢献しているが、本研究では、VaRTM成形法を応用することで、さらに、効率化、合理化を図ることを提案する⁸⁾。近年、機械分野では、大型FRP構造物の製造方法に、VaRTM成形⁴⁾が採用されている。これは、強化材をプラスチックフィルム等で封入して、真空吸引した後に、液状樹脂を注入・含浸して硬化させて、FRPを成形する技術である（図-1）。その特徴は、大掛かりな設備が不要で、大型構造物の一体成形が容易であること、繊維含有率が高く、高品質なFRPを成形できることである。

鋼構造物の補修・補強に、この成形技術を応用し、形状を柔軟に変えられる強化材を、現場で鋼部材にVaRTM成形・接合することができれば、FRPと鋼部材の接合の課題を合理的に解決することができる。著者らは先行研究として、VaRTM成形されたFRPの材料特性、FRPと鋼材の接着接合の強度について、実験的な検討を行っている⁹⁾。この工法の特徴は、平面的な広がりを持つFRPだけでなく、立体的なFRPの構築が可能である。そこで本研究では、桁端腐食部に必要かつ最適な剛性を持つCFRP部材を付与することを目的としている。これにより、鋼部材の初期性能の回復と使用する炭素繊維量の削減ができ、効率的かつ合理的な補修工法として、様々な部位への適用が可能になると考えられる。

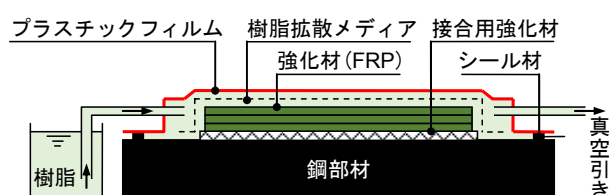


図-1 VaRTM成形による補修の概念図

3. 桁端部と腐食による断面欠損のモデル化

(1) 鋼鈑桁橋の桁端部のモデル化

一般的な鋼鈑桁の端部を対象とするため、対象構造のアスペクト比を1.0とした。また、将来的に、実験により補修効果を検討するため、支間長1,700mmの3点曲げ載荷試験を想定している。そのため、鋼鈑桁の桁高、ウェブ厚等を縮小して、部分的にモデル化した。表-1と図-2に対象とした鋼桁と腐食を考慮する範囲、検討モデルの諸元をそれぞれ示す。

(2) 腐食による断面欠損のモデル化

3点曲げ載荷試験の事前検討として、桁端腐食部の断面欠損量が耐力に及ぼす影響を把握するために、腐食

表-1 解析モデルの諸元

桁長 L (mm)	1900
フランジ幅 b_f (mm)	270
フランジ厚 t_f (mm)	12
アスペクト比 h_w/L	1.0
ウェブ高さ h_w (mm)	800
ウェブ厚さ 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

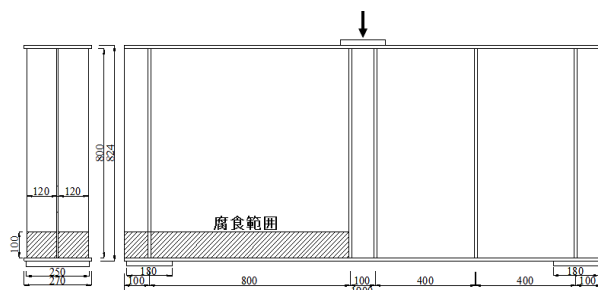
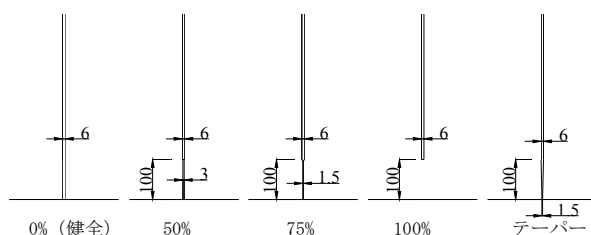
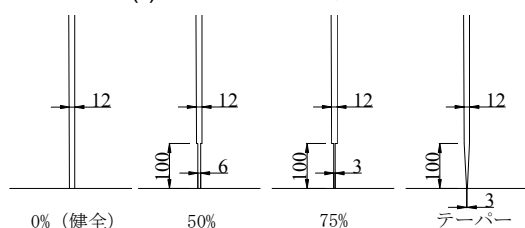


図-2 鋼桁の寸法と腐食を考慮する範囲



(a) ウェブの断面欠損モデル



(b) 垂直補剛材の断面欠損モデル

図-3 腐食形状と断面欠損量のモデル化

により断面欠損した鋼桁のモデルを作成し、垂直補剛材、ウェブの下端の断面欠損量をパラメータとして、数値解析を行った。

図-3に、腐食形状と断面欠損量のモデル化を、表-2に、断面欠損のパラメータを示す。腐食は、垂直補剛材、ウェブの下端100mmの範囲とし、垂直補剛材、ウェブ厚さの欠損率を0, 50, 75, 100%として検討した。ここではフランジの腐食は考慮していない。テーパ部では、下端の厚さを75%, 上端を0%減厚とした。

鋼材の材料特性については、弾性係数を200GPaとし、降伏強度は最大荷重（荷重容量）を検討するため、SM400材の中でも高い値の350MPaを採用した。降伏後は $E_s/100$ のバイリニア型とした。

解析モデルについては、ソリッド要素を用いて、垂直補剛材、上下フランジ、ウェブは厚さ方向に4分割、ウェブパネルの高さ方向に対して、1/1000の初期たわみ（1波の正弦波、最大0.8mm）を考慮した。図-4に、荷重条件と境界条件を示す。支持条件は単純支持であり、ソールプレート（250×249mm）に相当する節点を鉛直方向に拘束した。載荷板（250×249mm）に、分布荷重の合計3,000kNを基本荷重として載荷し、耐力力の低下を検討した。数値解析には、汎用有限要素解析プログラムMarc2013による弧長増分法を適用して、弾塑性有限変位解析を行った。表-3に、解析モデル名を示す。「W000-V000」は、ウェブ、垂直補剛材厚さの断面欠損率が0%（健全体）を意味し、「W075T-V075T」は、テーパモデルを意味する。

表-2 断面欠損のパラメータ

		垂直補剛材の下端				
		V000 (12mm)	V050 (6mm)	V075 (3mm)	V100 (0mm)	V075T (3-12mm)
モデル名	W000 (6mm)	○	○	○	○	—
	W050 (3mm)	○	○	○	○	
	W100 (0mm)	○	○	○	—	
	W075T (1.5-6mm)	—				○

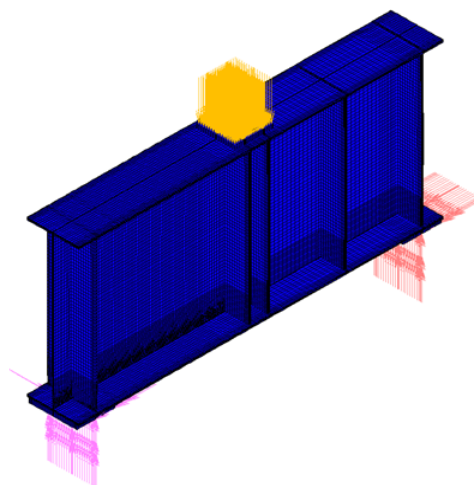


図-4 解析モデルの境界条件と荷重条件

(3) 断面欠損量が耐荷力に及ぼす影響と断面欠損モデルの選定

表-3に、健全体と腐食モデルの解析結果を、図-5に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係（プロット点は最大荷重を示す）、図-6に、最大荷重の比率と垂直補剛材の断面欠損率の関係をそれぞれ示す。垂直補剛材の断面欠損率が100%の場合、鋼材が降伏する前にウェブの下端で局部座屈が発生し、荷重が大幅に低下した。また、全てのウェブ厚の断面欠損率において、垂直補剛材の断面欠損率が50%までは、最大荷重比率は緩やかに低下した。

表-3 健全体と腐食モデルの解析結果

モデル名	最大荷重 P_{max} (kN)	P_{max}/P_{max} P_{max} : 健全体	初期降伏荷重 (kN)
W000-V000	1938.7	—	760.5
W000-V050	1938.6	1.000	760.4
W000-V075	1770.8	0.913	608.9
W000-V100	235.4	0.121	228.4
W050-V000	1773.7	0.915	457.1
W050-V050	1730.8	0.893	457.1
W050-V075	1237.9	0.638	381.3
W050-V100	186.3	0.096	183.2
W100-V000	1398.5	0.721	378.9
W100-V050	1110.6	0.573	303.8
W100-V075	599.8	0.309	228.5
W075T-V075T	1624.9	0.838	305.4

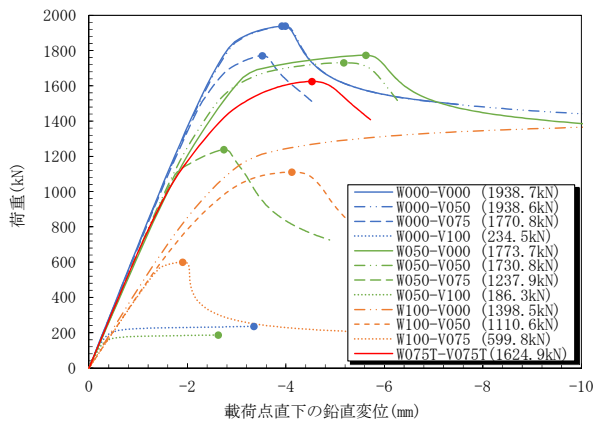


図-5 荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係

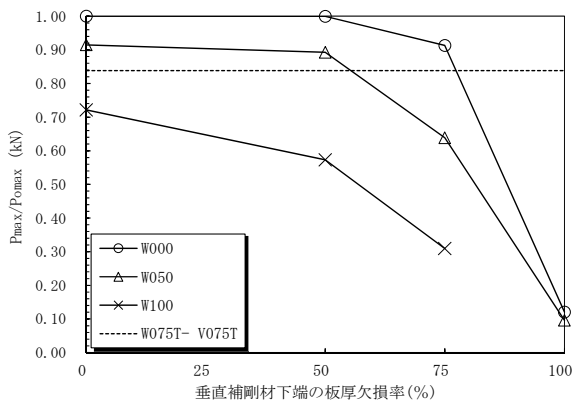


図-6 最大荷重の比率と垂直補剛材の断面欠損率の関係

その後、垂直補剛材の断面欠損率が75%になると、大幅に減少した。最終的には、垂直補剛材の断面欠損率が100%になると、前述したように、ウェブ下端の局部座屈のため、耐荷力が健全体に対して約90%低下した。

次に、荷重変位関係から、ウェブの断面欠損率が大きくなるにしたがって剛性が低下すること、断面欠損率が100%になると、大幅に低下することがわかる。このように、垂直補剛材の断面欠損が耐荷力に支配的であるといえた。

腐食形状については、文献6)では、高速道路の点検データから、支点上補剛材下端では、なめらかな断面変化を伴って減肉している例や、ウェブ下端で貫通した腐食の例が多いことが指摘されている。そこで、断面欠損モデルとして、耐荷力が約16%低下し、剛性も低下したW075T-V075T（以下、無補修とする）を選定した。

4. CFRPによる補修方法とモデル化

本研究では、CFRPによる補修効果を明らかにするため、補修モデルは、(1) 炭素繊維シート（以下、CFシート）積層（鋼換算モデル）、(2) CFRP補剛材（補剛材モデル）による2ケースを検討することとした。表-4に、鋼材の材料試験から得られた物性値を、また、表-5、表-6に、CFシートとエポキシ樹脂の材料物性値をそれぞれ示す。炭素繊維シートは、中弾性タイプ（繊維重量300g/m²、設計厚さ0.163mm）であり、直交異方性を考慮している。鋼材の構成則については、降伏後は $E_s/100$ のバイリニア型とした。

(1) 鋼換算モデル

この検討モデルでは、最大断面欠損部（75%）を、鋼材の弾性係数で換算した等価なCFRPの剛性で補うこととし、「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⁾より算出した。以下に算出式を示す。

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

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

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

ここで、

A_{sl} : 鋼部材の補修・補強必要断面積 (mm²)

$A_{cf,s}$: 炭素繊維シートの鋼換算断面積 (mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (N/mm²)

E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性係数 (N/mm²)

B_f : 炭素繊維シートの幅 (mm)
 t_f : 炭素繊維シート1枚あたりの厚さ (mm)
 n : 炭素繊維シートの積層数 (枚)
 t_{fs} : 炭素繊維シートの鋼換算厚さ (mm)

繊維体積含有率は、既往の研究⁸⁾から50%とし、繊維の配向は鉛直方向とした。

計算の結果、表-7より、両側のCFRPの厚さの合計は、ウェブで4.09mm、垂直補剛材で8.18mmとなった。CFRPのモデル化を簡略化するため、ウェブの欠損部には、厚さ2mm (CFRP成形後) のCFRPを、垂直補剛材の欠損部には、厚さ4mm (CFRP成形後) のCFRPを両側からVaRTM成形することを想定した。また、CFシートの積層数は対称積層とするため、偶数の値を設定している。補修範囲は欠損高さ100mmに対して十分な定着長を確保するため、高さ方向に300mmとした。図-7に、断面欠損した垂直補剛材の補修状況を示す。モデル化の際、欠損部にエポキシ樹脂を充填し、鋼板とCFRP部材の接合部には接着層がないため、考慮していない。

CFシートをウェブと垂直補剛材に接着して補修するモデルを鋼換算モデルとした。また、ウェブの腐食部全域を補修するモデル(CA)に加え、ウェブに使用するCFシート量を低減させた、支点部の長手方向(188mm)の範囲のみを補修するモデル(CB)の2ケースを作成した。

(2) CFRP補剛材モデル

無補修モデルの性能回復と、鋼換算モデルに対するCFシート量の低減を目的として、CFRP補剛材をVaRTM成形することを考えた。CAモデルにおいて、鋼換算したCFRPの軸剛性(厚さ)を50%で補修することに加え、CFシートで成形される垂直補剛材をウェブと下フランジに設置する補剛材(CS)モデルである。図-8に、CFRP補剛材の設置状況を示す。ここでは、ウェブの中

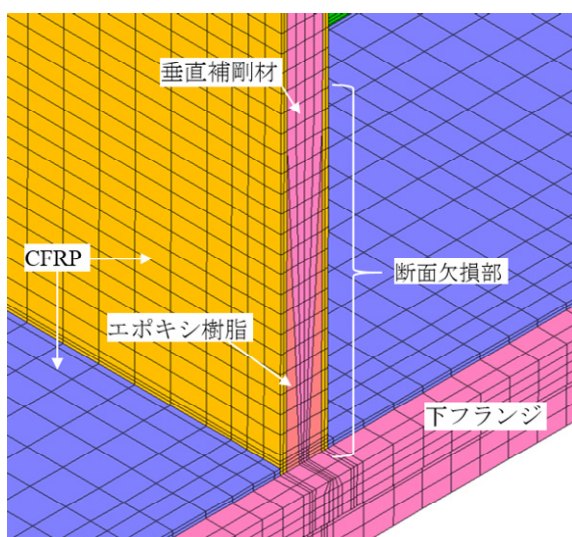


図-7 垂直補剛材の補修状況図

表-4 鋼材 (SM400) の材料物性値

	ウェブ	垂直補剛材・フランジ
弾性係数 E_s (kN/mm ²)	208.0	206.3
引張強度 σ_u (N/mm ²)	448.4	462.5
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	303.6	297.1

表-5 炭素繊維シートの材料特性

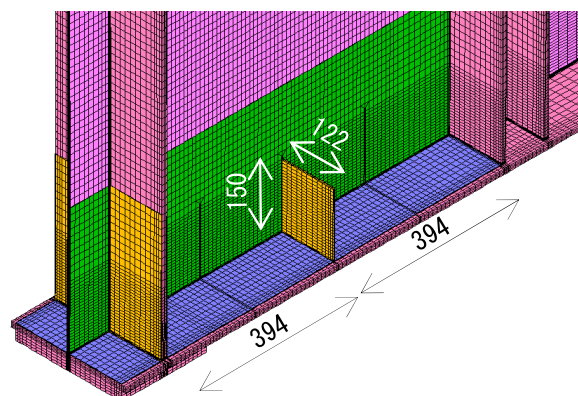
設計厚さ t_f (mm)	0.163
弾性係数 E_f (kN/mm ²)	440
引張強度 σ_u (N/mm ²)	24

表-6 エポキシ樹脂の材料特性

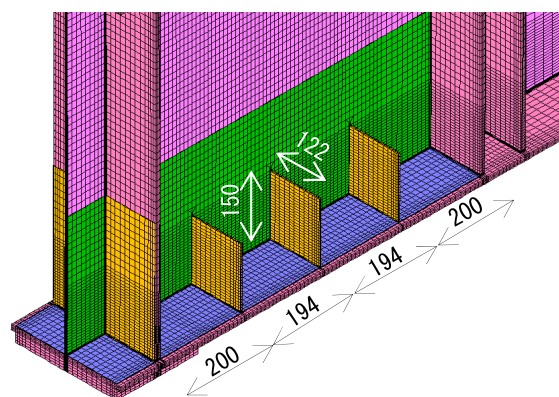
弾性係数 E_a (N/mm ²)	2,000
ポアソン比 ν_a	0.3

表-7 鋼換算モデルにおける炭素繊維の量

	鋼換算		CFRP 補剛材	
	垂直補剛材	ウェブ	垂直補剛材	ウェブ
鋼材健全部の厚さ (mm)	12.0	6.0	12.0	6.0
鋼材腐食部の残存厚さ (mm)	3.0	1.5	3.0	1.5
鋼部材の必要厚さ (mm)	9.0	4.5	9.0	4.5
CFシートの積層数 (ply)	26	14	14	6
繊維体積含有率	0.50	0.50	0.50	0.50
CFRP の実際の厚さ (mm)	8.18	4.09	4.09	1.96
解析時のCFRPの厚さ (mm)	8.0	4.0	4.0	2.0



(a) CFRP補剛材（片面1箇所設置）



(b) CFRP補剛材（片面3箇所設置）

図-8 CFRP補剛材の設置状況

心に片面1箇所（計2箇所）とするモデル（CS2）と、ウェブを4分割するように片面3箇所（計6箇所）とするモデル（CS6）の2ケースを作成した。

(3) 解析モデルと解析方法

表-8に、解析ケースと補修パラメータ、図-9に、補修の解析モデルを示す。CAモデルとCSモデルについては、CFシート量の低減が可能かどうかを検討するため、ウェブと垂直補剛材に接着するCFRPの軸剛性（厚さ）を25%と50%に低減させたモデルを合わせて、計13ケースとした。

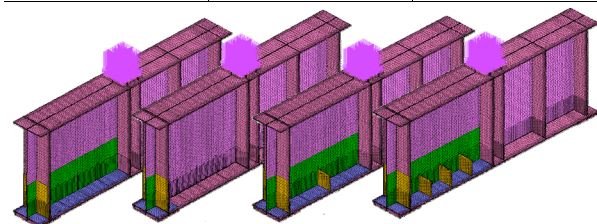
5. 解析結果と考察

図-10に、荷重と載荷点直下の鉛直変位の関係を、また、表-9に、最大荷重とCFシート面積をそれぞれ示す。

まず、最大荷重については、3章に示したW075T-V075T（無補修）では、健全体モデルに比べて約16%低下したのに対して、ここでは、約23%低下した。これは、3章では、やや強度が高めの鋼材の材料物性値を仮定し

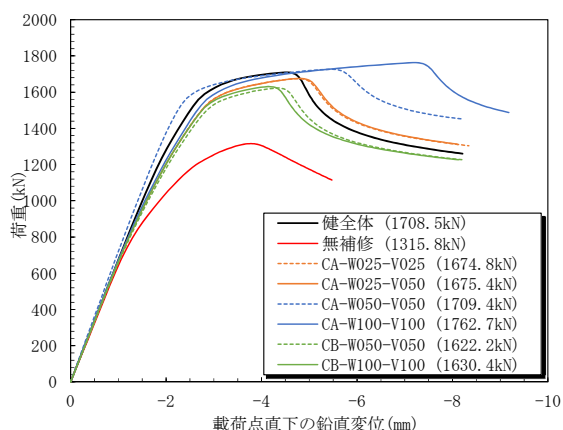
表-8 解析ケースと補修パラメータ

補修方法	モデル名	鋼換算したCFRPの割合（Web-V.S.）
—	健全体	—
—	無補修	—
鋼換算 （腐食部全域）	CA-W025-V025	25-25
	CA-W025-V050	25-50
	CA-W050-V050	50-50
	CA-W100-V100	100-100
鋼換算 （支点部のみ）	CB-W050-V050	50-50
	CB-W100-V100	100-100
CFRP補剛材 CS2：2箇所設置 CS6：6箇所設置	CS2-W025-V025	25-25
	CS6-W025-V025	25-25
	CS2-W025-V050	25-50
	CS6-W025-V050	25-50
	CS6-W050-V050	50-50

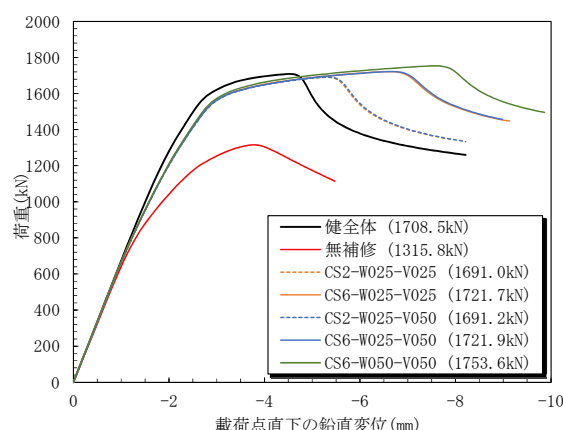


(a) CAモデル (b) CBモデル (c) CS2モデル (d) CS6モデル

図-9 補修の解析モデル

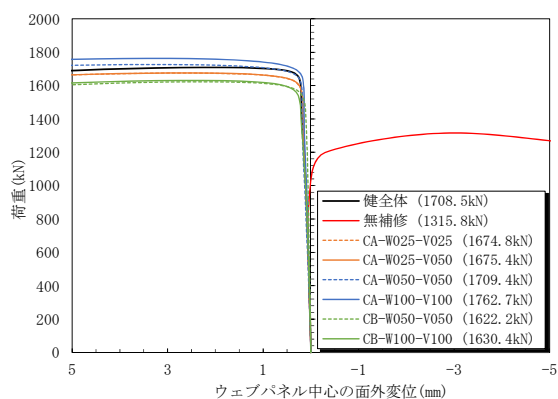


(a) 鋼換算モデル

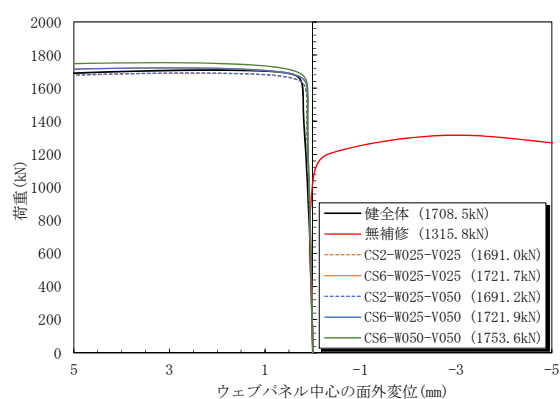


(b) CFRP補剛材モデル

図-10 荷重と荷点直下の鉛直変位の関係



(a) 鋼換算モデル



(b) CFRP補剛材モデル

図-11 荷重とウェブパネル中心の面外変位の関係

ていたが、無補修モデルでは、ウェブとフランジの材料物性値を材料試験により算出し、それを考慮したためである。

CAモデルについて、CFRPの軸剛性（厚さ）が100%であれば、健全体と比べて、最大荷重が約3%高くなり、ウェブと垂直補剛材に接着するCFRPの軸剛性（厚さ）を50%に低減させた場合、健全体とほぼ同等の数値となり、性能が回復することがわかる。一方で、ウェブに接着するCFRPの軸剛性（厚さ）を25%に低減させた場合、健全体モデルの最大荷重の約98%まで向上し、無補修モデルに比べ回復したものの、健全体の最大荷重を上回らなかった。また、健全体には達しないが、CFRPの軸剛性（厚さ）を25%とした、CAモデルに対し、CFRP補剛材を片面3箇所（計6箇所）設置することで、健全体の最大荷重を約1%上回ることがわかる。

CBモデルでは、健全体モデルの最大荷重を上回らなかったが、健全体モデルの最大荷重の96%まで回復していることから、支点近傍での補修効果が大きいことがわかる。

CSモデルについては、CFRP補剛材を片面1箇所から片面3箇所に増加させると、健全体と比べて、最大荷重が約1%高くなった。

図-11に、荷重とウェブパネル中心の面外変位の関係を、図-12に、最大荷重時の変形モードおよびミゼス応

力のコンタ図を示す。図-11より、無補修モデルの面外変位のみ、健全体と補修モデルとは異なる挙動となった。これは、図-12に、示したように、無補修モデルは、支点付近の局部座屈となるが、それ以外では局部座屈は生じず、健全体と同じモードとなるためである。

次に、表-9に、最大荷重とCFシート面積を、図-13に、CFシート面積と最大荷重の比率の関係をそれぞれ示す。これらの図表より、炭素繊維量と最大荷重の関係は概ね比例関係にあるが、CFシートの量や配置により若干異なることもわかる。本研究で提案した補修モデルでは、CFシート量が約4m²あれば、健全体と同程度の最大荷重

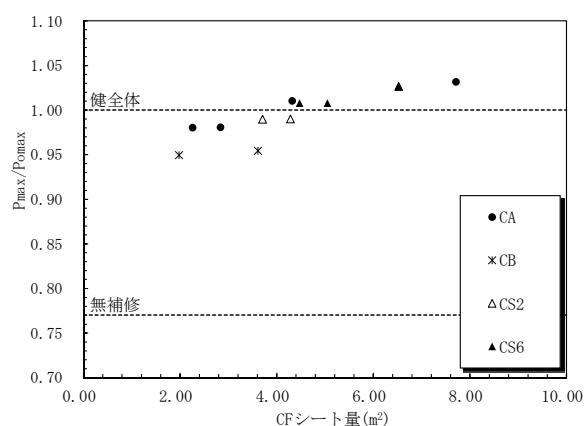
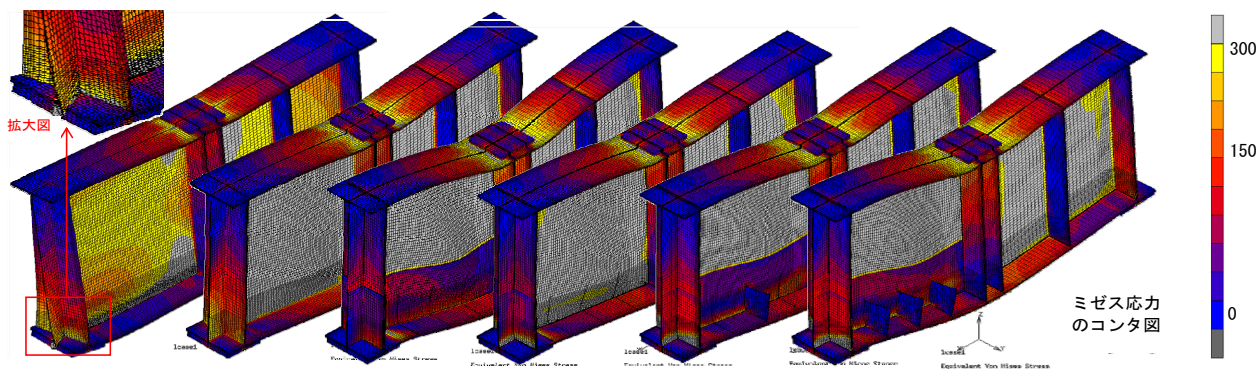


図-13 最大荷重の比率とCFシート量の関係

表-9 最大荷重とCFシート面積

補修方法	モデル名	最大荷重 P_{max} (kN)	P_{max}/P_{omax} (P_{omax} : 健全体)	CFシート面積 (m ²)
—	健全体	1708.5	1.000	—
—	無補修	1315.8	0.770	—
鋼換算 (腐食部全域)	CA-W025-V025	1674.8	0.980	2.26
	CA-W025-V050	1675.4	0.981	2.83
	CA-W050-V050	1709.4	1.001	4.32
	CA-W100-V100	1762.7	1.032	7.71
鋼換算 (支点部のみ)	CB-W050-V050	1622.2	0.949	1.98
	CB-W100-V100	1630.4	0.954	3.61
CFRP補剛材 CS2:2箇所設置 CS6:6箇所設置	CS2-W025-V025	1691.0	0.990	3.71
	CS6-W025-V025	1721.7	1.008	4.47
	CS2-W025-V050	1691.2	0.990	4.28
	CS6-W025-V050	1721.9	1.008	5.05
	CS6-W050-V050	1753.6	1.026	6.52



(a)無補修 (b)健全体 (c)CA-W100-V100 (d) CB-W050-V050 (e)CS2-W025-V025 (f)CS6-W025-V025

図-12 最大荷重時の変形モード（変形倍率：20倍）

に達することがわかる。

CAモデルにおいて、CFRPの軸剛性（厚さ）を100%から50%に低減させても、最大荷重が健全体を上回るため、合理化できることがわかった。

CAモデルとCSモデルについて、ウェブのCFシート量が25%の場合、垂直補剛材のCFシート量を25%から50%に増加させても、最大荷重が増加しないことがわかる。また、CFシート量を50%に低減したCA-W050-V050モデルと、CFシート量を25%に低減したCS6-W025-V025モデルを比較すると、両モデルとも健全体と同程度の最大荷重に達するが、CFシート量はCS2モデルの方が若干大きかった。

6. まとめ

本研究では、鋼桁橋の桁端腐食部を対象に、CFRP部材による耐荷力の性能回復について解析的な検討を行った。その結果、次のことがいえた。

- (1) ウェブ、垂直補剛材の欠損部へのCFRPの鋼換算量を50%まで低減し、支点部近傍のみに接着して補修したモデルでは、最大荷重は健全時の約95%まで回復することがわかった。
- (2) CFRPを腐食部全体に接着して補修したモデルでは、CFRPの鋼換算量を50%以上にすることで、耐荷力が健全時まで回復すること、また、CFRPの数量を最大で50%低減することができることから、合理的であることが確かめられた。
- (3) CFRPの鋼換算量を25%に低減し、CFRP補剛材を片面3箇所（計6箇所）に設置することで、耐荷力が健全時まで回復することから、CFRPの数量を低減できることがわかった。

謝辞：本研究は、平成 27 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) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 日本鋼構造協会：土木構造物の点検・診断・対策技術（2013 年度改訂版），2013
- 6) 丹波寛緒夫，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，Vol60A，pp94-104，2014.3
- 7) 村越潤，田中良樹：鋼橋桁端部の腐食に対する補強法に関する研究，平成 20 年度土木研究所成果報告書，No.73，2008.
- 8) 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 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.192-201，2015.1
- 9) (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究所：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

A STUDY ON REPAIR AND REHABILITATION OF SECTION LOSS IN GIRDER END BY CFRP MEMBERS

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

The objective in this study is to develop a repair and rehabilitation method of existing steel members by Vacuum assisted Resin Transfer Molding (VaRTM) technology. Most of the corrosion in steel bridges is detected at webs and vertical stiffeners in girder ends. In order to study repair effect in the test, the corroded girder end models by externally bonded CF sheets or CFRP members varied arrangement and stiffness were examined by elastic-plastic FEA. It was found that the load carrying capacity of the corroded models repaired by CFRP are rehabilitated and equivalent to the girder without damage. In addition, it was found CF sheets can reduce by half as compared with the conventional design method.