

(56) 炭素繊維シートを用いた鋼部材補修法 に関する一検討

杉浦 江¹・大垣 賀津雄²・稲葉 尚文³・富田 芳男³・長井 正嗣⁴・小林 朗⁵

¹正会員 川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1-1)
E-mail: sugiura_hiro@khi.co.jp

²正会員 川崎重工業株式会社 営業推進本部 事業開発部 (〒105-6116 東京都港区浜松町2-4-1)
E-mail: ohgaki_kazuo@khi.co.jp

³正会員 株式会社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: n.inaba.aa@c-nexco.co.jp

⁴正会員 長岡技術科学大学 工学部 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail: nagai@nagaokaut.ac.jp

⁵正会員 日鉄コンポジット株式会社 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)
E-mail: a-kobayashi@nick.co.jp

鋼構造物はさまざまなメカニズムにより劣化し、構造物としての性能が低下する。この劣化の主な原因の1つは鋼材の腐食であり、合理的な補修工法の開発が求められている。本稿は、鋼部材の腐食損傷部に対する効率的な補修方法として、炭素繊維シートを用いた補修工法について検討を行ったものである。また、実橋梁を対象とした載荷試験および応力頻度測定を実施し、炭素繊維シートを貼付することによる腐食損傷部の応力改善効果を明らかにした。

Key Words : corrosion, repair, carbon fiber reinforced polymer(CFRP), CF sheet, steel structures

1. はじめに

近年、鋼構造物の補修・補強を目的として、炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと記す）に着目した技術開発が盛んに行われている¹⁾²⁾。そのような中、筆者らは、鋼部材の腐食損傷部をCFRPによって部分的に補修する工法を提案している³⁾。本工法は、腐食損傷した部位に対して、炭素繊維シートに接着樹脂を含浸させながら積層し、現場でCFRPを形成して一体化させることで、設計時の初期性能を回復、もしくは現状維持を目的とするものである。

CFRPは、高弾性・高強度といった特性を有し、樹脂で接着するため施工が簡易であり、補修材料としての有効性は高い。鋼板をボルトや溶接で添接する従来工法の代替案として以下の利点が挙げられる。

- 炭素繊維シートの材料特性（高弾性：鋼の約3倍）を生かすことで、効率的な補修が可能である。
- 構造物本体の鋼部材への溶接による熱影響やボルト孔による欠損といった弱点が生じない。
- 薄く軽量の炭素繊維シートのため、鋼部材表面厚の増加や重量増加を生じさせない。

- CFRPが鋼部材の外的劣化要因を遮断し、耐久性と耐食性に高い効果が得られる。
- 大がかりな架設機材は不要で、特殊技能も必要としない手作業が中心となる。そのため、施工スペースの制約がある供用中の補修や、塗装塗替え工事の前補修工事に適する。

本稿では、炭素繊維シートを用いた鋼部材の補修方法および、実橋梁に適用した事例を紹介する。

2. 炭素繊維シートを用いた鋼部材腐食損傷部の補修方法

(1) 補修量の決定

トラス橋の弦材やアーチ橋のアーチリブ部材への適用例を図-1に示す。炭素繊維シートによる鋼部材の腐食損傷部の補修は、設計時の初期性能を回復させることを目的に行うため、母材の欠損量に応じて、CFRPによる補修量を決定する。図-2に示すように、炭素繊維シートを鋼材に貼付することで、積層数に応じた応力改善効果が得られる⁴⁾。よって、炭素繊維シートの鋼換算断面積が、

断面欠損量と同等以上になるように、シート枚数を決定する。

なお、炭素繊維シートは、材料特性の違い（高強度型、中強度型、高弾性型）により数種類が製品化されている。複合材としての弾性挙動範囲では、高弾性型のシートを用いることで、高強度型のシートよりも積層数を少なくできるため、現場での積層作業を軽減できる。

(2) CFRPの剥離に対する照査

炭素繊維シートの引張強度は、鋼材に比べて十分大きく、炭素繊維シート自体の許容応力度が問題となることはほとんどない。しかしながら、実験の結果では、鋼材降伏点の50%程度でCFRPが剥離するケースもあるため⁴⁾、供用下での作用荷重に対して、CFRPの剥離が生じないことを確認する必要がある。

また、接着端部の応力集中を緩和するために、積層毎にずらして接着することが望ましい。図-3は、接着界面での水平せん断応力の分布を調べた解析結果である。CFRPの層数が増すと、端部の水平せん断応力は大きくなるが、端部のずらし量を増すことで、水平せん断応力を緩和することができる。

3. 施工手順

以下の手順で施工する。

a) 下地処理

炭素繊維の有する弾性率を発揮して補強効果を得るためには、母材との接着性が十分に確保されている必要がある。所要の補強効果を得るためには、鋼材素地に直接接着する必要がある⁵⁾、表面の塗料や錆をディスクサンダーなどにより除去する。

b) プライマーの塗布

鋼材表面の発錆を防止するため、下地処理後、すみやかに鋼材表面にプライマーを塗布する。水分を介して炭素繊維と鋼材が接触すると、電食を起こすことがあるため、炭素繊維と鋼材が直接接触しないように、プライマーをむらなく塗布する必要がある。

c) 不陸調整

損傷による減肉が大きい箇所や孔食部、溶接線などの不陸は、炭素繊維シートの浮き、膨れ、たるみ、しわなどの施工不良の原因となる。そのため、貼付け箇所を樹脂パテにより、平坦に処理するものとする。

d) 炭素繊維シート貼付け

施工面積に合わせて所定の寸法に切断した炭素繊維シートを含浸接着剤により積層する。プライマーが乾燥した後、含浸接着剤を塗布し炭素繊維シートを部材軸方向に貼り付け、さらに含浸接着剤を上塗りし、炭素繊維シ

ート内に十分エポキシ樹脂を含浸させる。これを繰り返して、必要層数の炭素繊維シートを貼り付ける。

e) 仕上げ塗装

最上面には、樹脂の経年劣化を防止するため、耐候性塗料を塗布する。基本的には、鋼部材に適用している塗装系と同一とする。

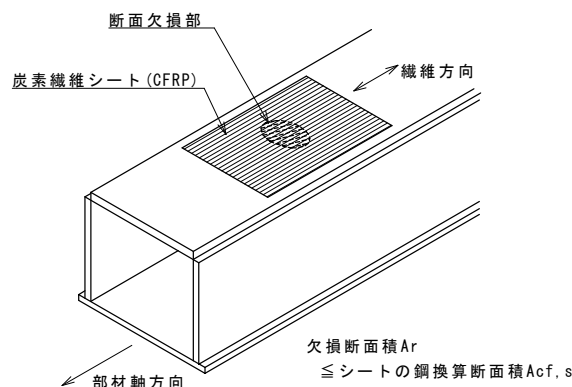


図-1 炭素繊維シートによる補修方法

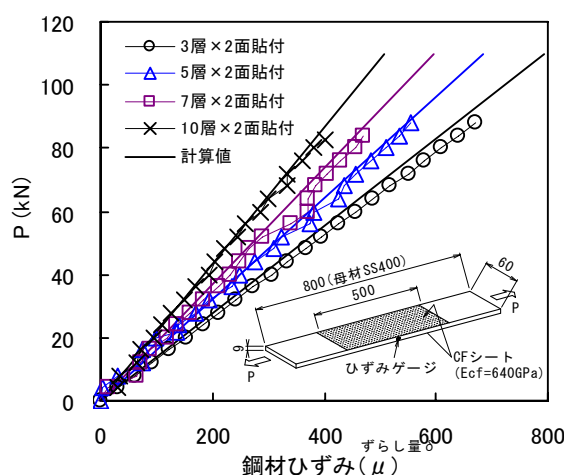


図-2 CFシート積層数の影響（荷重－ひずみ関係）

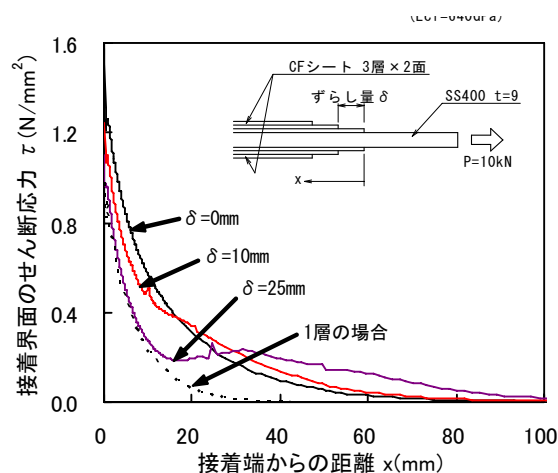


図-3 接着界面の水平せん断応力分布

4. 実橋での補修効果計測

(1) CFRPによる補修および計測位置

対象橋梁は鋼3径間連続ワーレントラス橋2連で構成される。計測対象部材は、図-4に示す下弦材とし、欠損部の補修には高弾性タイプ（ヤング率 640kN/mm^2 ）の炭素繊維シートを使用した。シートの積層数は、鋼換算断面積が欠損断面積と同等以上になるよう決定した（表-1）。ひずみゲージは、図-5に示すように欠損断面（Pt.1～Pt.4）と健全断面（Pt.1'～Pt.4'）に貼付した。

(2) 試験車両の載荷方法

車両重量 22ton の散水車を走行させて、補修前後に動的ひずみ測定を実施した。試験車両は、 80km/h の一定速度で走行し、一般車両の無いタイミングを見計って計測を行った。載荷車線は、追越車線および走行車線の2ケースとした。図-6には、追越車線載荷時に得られたひずみの生波形の例を示す。

(3) 補修効果

試験車両載荷時に得られた最大ひずみを図-7に示す。図は、走行車線載荷時と追越車線載荷時の平均値であり、欠損部（Pt.1～Pt.4）での最大ひずみを、対応する健全部（Pt.1'～Pt.4'）に対する比率で表している。この結果より、以下のことがわかる。

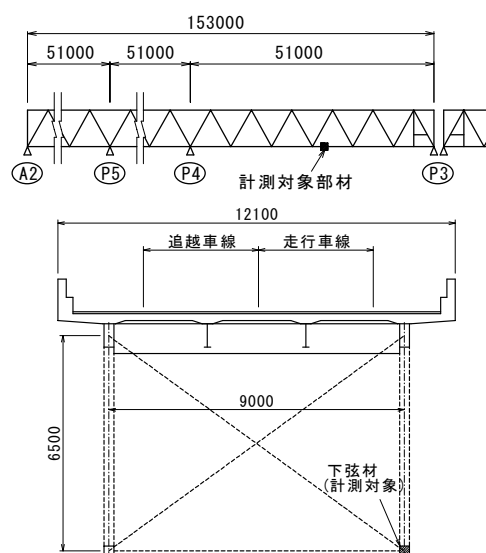


図-4 計測対象部材

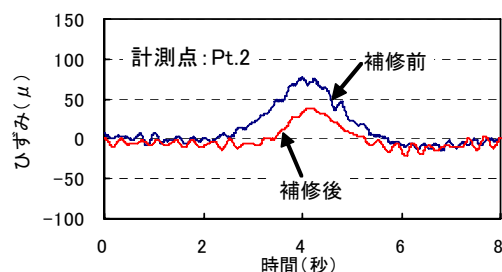


図-6 試験車両載荷時のひずみ波形

表-1 炭素繊維シートによる補修量

設計断面	欠損断面積 (mm^2)	補修断面積 (mm^2)	炭素シート層数※
上フランジ PL300×19	$50 \times 6.2 = 310$, $100 \times 6.9 = 690$	> 1030	3層
ウェブ PL300×10	—		3層×2面
下フランジ PL360×14	—	—	—

※1層あたりの鋼換算厚：シート厚 $0.143\text{mm} \times 640/200$

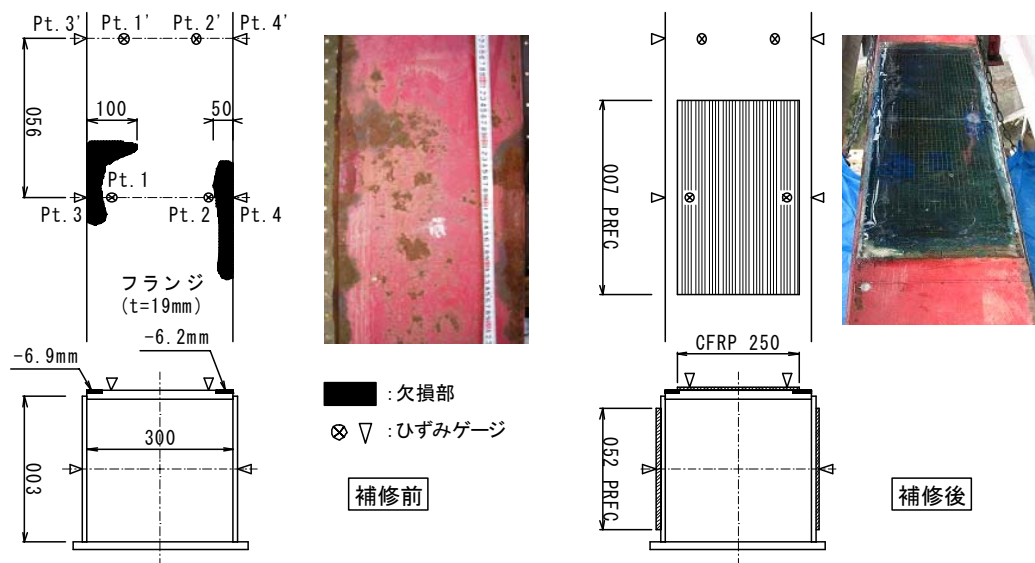


図-5 ひずみゲージ貼付位置

- ・ 断面欠損のある上フランジでは、健全部に比べて発生ひずみ大きい。
- ・ CFRP貼付により発生ひずみが低下し、補修効果が確認できる。また、断面欠損がある上フランジ部 (Pt.1, Pt.2) で特にひずみの低減効果が大きい。
- ・ 補修後は、健全部と同等以下のひずみレベルまで改善されることから、設計時の初期性能を回復、もしくは現状維持を目的とすれば、十分効果的である。

(4) 応力頻度計測

補修前後に実交通下での応力頻度測定 (24時間) を実施した。計測は、交通条件の異なる土、日曜を避けた平日に行った。図-8には、最も発生応力が高いPt.2について、補修前後の応力頻度分布を示す。この結果より、頻度分布の形状は、補修によって応力が下がる方向にシフトする傾向にあり、補修によって応力が改善されていることがわかる。また、母材に生じるピーク応力は 40N/mm^2 程度であり、常時荷重作用下において、CFRPの剥離が問題となることは、ほとんどないと考えられる。

5. まとめ

腐食により断面欠損した鋼部材に対して、炭素繊維シートを貼り付けることによる補修方法を示した。実橋梁を対象としたひずみ計測の結果より、設計時の初期性能を回復、もしくは現状維持を目的とすれば、十分効果的であることがわかった。

参考文献

- 1) 小野紘一, 杉浦邦征, 三木亮二, 小牧秀之, 若原直樹: 炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討, 鋼構造年次論文報告集第10巻, pp.225-230, 2002.11
- 2) 渡邊憲市, 板垣一也, 鈴木博之: 炭素繊維強化樹脂板による鋼橋の補強, 鋼構造年次論文報告集第8巻, pp.679-682, 2000.11

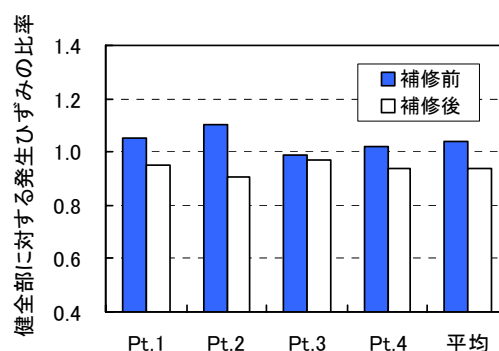


図-7 補修前後の最大ひずみ

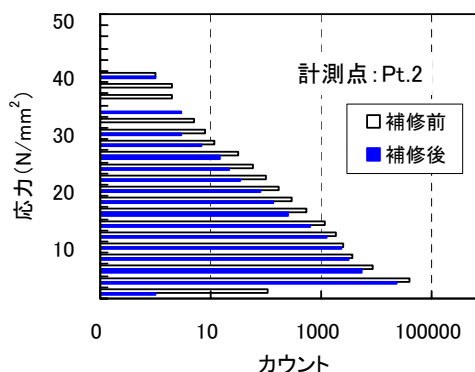


図-8 応力頻度計測結果

- 3) 杉浦江, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 稲葉尚文, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼橋の補修・補強に関する一検討, 第2回 FRP 橋梁に関するシンポジウム論文集, pp.93-98, 2006.1
- 4) 杉浦江, 大垣賀津雄, 富田芳男, 稲葉尚文, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) による鋼構造物の補修に関する基礎実験, 第61回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, I-658, 2006.9
- 5) 杉浦江, 大垣賀津雄, 長井正嗣, 小林朗: 炭素繊維シート (CFRP) を用いた鋼部材部分補修に関する実験研究, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.48-1-48-6, 2005.11

A STUDY ON REPAIR METHOD FOR STEEL MEMBERS BY CARBON FIBER SHEETS

Hiroshi SUGIURA, Kazuo OHGAKI, Naofumi INABA, Yoshio TOMITA,
Masatsugu NAGAI and Akira KOBAYASHI

The deterioration of performance of steel structures comes from various reasons. One of main reasons of such deterioration is the corrosion of steel, and the development of a reasonable repair method is demanded. This paper presents the applicability of carbon fiber (CF) sheets adhesion for the repair of corroded steel members. In order to clarify the effect of stress reduction by CF sheets, we carried out loading tests and stress frequency measurement in the actual bridge. As a result, it was confirmed that the stress of corroded steel was improved by patching CF sheets.