

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

Study on reinforcement and repair method for steel bridges by carbon fiber sheets

杉浦 江*, 大垣 賀津雄**, 長井 正嗣***, 稲葉 尚文****, 小林 朗*****

Hiroshi Sugiura, Kazuo Ohgaki, Masatsugu Nagai, Naofumi Inaba, Akira Kobayashi

*工修 川崎重工業株式会社 大型構造物ビジネスセンター（〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8）

**工博 川崎重工業株式会社 大型構造物ビジネスセンター（〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8）

***工博 長岡技術科学大学教授 工学部 環境・建設系（〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

****工修 中日本高速道路株式会社 中央研究所（〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1）

*****工修 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）

Recently, an effective reinforcement and repair method to deteriorated steel bridge is demanded. It is paid attention to use carbon fiber (CF) sheets as a reinforcement and repair material for steel bridge, and technological development is advanced in many fields. CF sheets can be expected as a substitute for conventional steel reinforcement because of its good characteristics: high elasticity, high strength. This paper proposed the repair method that uses the CF sheets for the corrosion part of the steel bridge.

Key Words : carbon fiber reinforced polymer (CFRP), steel bridges, reinforcement, repair

: 炭素繊維シート, 鋼橋, 補強, 補修

1. まえがき

我が国の道路橋のうち約 40%は、1950 年代後半～1970 年代前半に建設されており、近い将来には、建設後 50 年を過ぎる高齢化橋梁が多数発生する。このため、今後は適切な補修・補強による橋梁の機能回復または機能付加を行いつつ延命化を図っていくことが必要とされている。

このような中、供用中の制約条件の下で効果的な工法が強く求められており、目的に合わせた適材適所の補修・補強材料として炭素繊維シートを利用することが注目を浴びている。炭素繊維シートは、軽量、高強度、高弾性、高耐食性などの優れた特性を持ち、鋼板を溶接やボルトで添接する従来工法の代替案として、その有効性は高いと考えられる。コンクリート構造物の補修・補強には、炭素繊維シートを用いることが一般的になっており、鋼部材への適用についても多方面において技術開発が進められている状況である¹⁾²⁾。

筆者らは、鋼橋の腐食部に対する補修としても、炭素繊維シートを用いた工法が有効であると考え、この技術確立を行っている。現段階では、鋼構造物の経年劣化、損傷等に対して、設計時の初期性能を回復させること、もしくは現状維持を目的としている。

本稿は、今までに得られた知見を整理し、鋼橋における補修・補強材料として、炭素繊維シートを用いる工法を提案するものである。

2. CFRP の特性

2.1 炭素繊維シートの特性

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) とは、炭素繊維に樹脂を含浸させ完全硬化させたものである。炭素繊維は軽量、高強度、高弾性、高耐食性などの優れた特性を持つ高性能無機材料である。繊維の直径は $7\sim 10\mu\text{m}$ で、これを 3,000～24,000 本程度収束させたストランドとして工業用に使用されている。このストランドを 50cm など単位幅に数百本並べた炭素繊維シート (Fig.1) は、繊維目付け量の違い ($200\sim 600\text{g/m}^2$) と、材料特性の違い (高強度型～高弾性型) がある (Table.1)。また、炭素繊維にあらかじめ樹脂を含浸させ工場で板状に成型硬化させた炭素繊維プレートもあり、1 枚のプレートで炭素繊維シート数層分の耐力、剛性を有する。

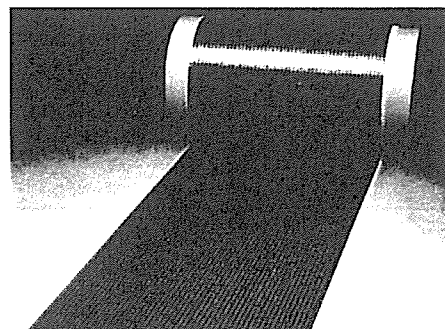


Fig.1 Carbon fiber sheet

Table.1 Characteristics of carbon fiber

Items	Tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)
High strength type	3400	245
Middle elasticity type	2900 - 2400	390 - 450
High elasticity type	1900	540 - 640
Steel	400 - 570	200

2.2 鋼材と CFRP の合成効果

炭素繊維シートを鋼板表面に接着した試験片 (Fig.2) の引張試験では、鋼材が降伏するまで炭素繊維シートの剥離は生じない。この荷重-ひずみ関係は、炭素繊維シートと鋼材の完全合成断面を仮定した複合板としての計算値とほぼ一致する (Fig.3)。

ただし、積層数を増やしても補強効果が必ずしも高くないとの報告や、接着条件 (積層数、接着長さ等) によっては、炭素繊維シートの剥離が生じるケースも報告されており^{3) 4)}、接着条件による合成効果の関係、および剥離強度を明確にする必要がある。

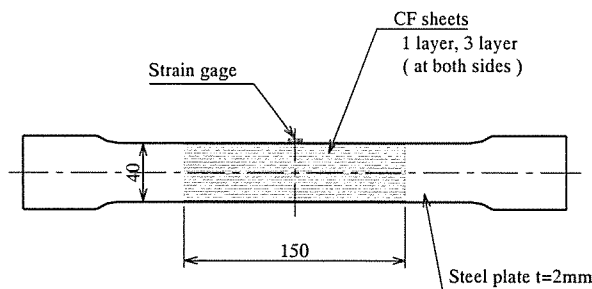


Fig.2 Tensile test specimen

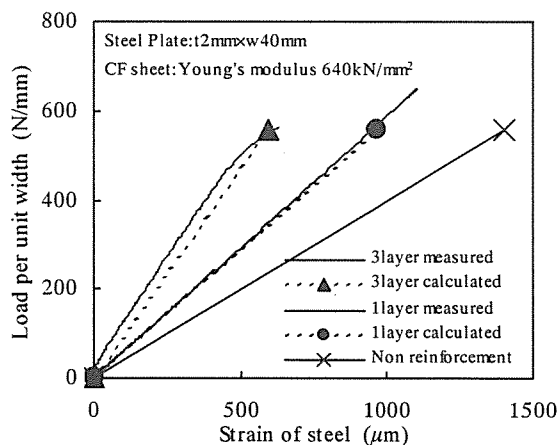


Fig.3 Load-strain relationships of steel reinforced by CF sheet

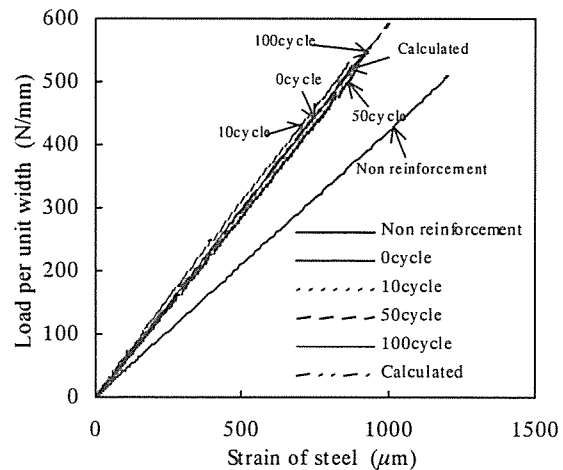


Fig.4 Results of temperature cycle test

2.3 CFRP の温度変化に対する耐久性

炭素繊維シートは、樹脂との複合材である CFRP の状態で線膨張係数が $0 \sim 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、鋼材の線膨張係数に比べてほぼ 1 桁小さい。鋼材に炭素繊維シートを接着した後、温度サイクル ($20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$) を 100 回負荷した確認試験によると、温度サイクル終了時点まで炭素繊維シートの剥離や破断は発生せず、温度サイクル負荷後の引張試験結果は温度サイクル負荷前の結果と変わらないことが確認されている (Fig.4)。

2.4 紫外線による CFRP の劣化度

サンシャインウェザーメーターによる 10,000 時間 (約 50 年相当) の促進暴露試験の結果では、ほとんど強度低下が生じない。これは、炭素繊維自身は紫外線劣化することなく、また、紫外線の遮蔽効果が高いので紫外線による劣化が CFRP のごく表層の樹脂層のみで生じるからである。一方、アラミド繊維は繊維そのものが紫外線劣化し、ガラス繊維は紫外線を透過するために樹脂が内部まで劣化する。このような場合、紫外線遮蔽のためには十分な保護塗装が必要となる。

3. CFRP による鋼橋の補修・補強工法の分類

CFRP による鋼橋 (鋼部材) の補修・補強工法については、多方面において技術開発が進められており、要求される補強レベルや対象部位に応じて、いくつかの工法が提案されている (Table.2)。

断面補強⁵⁾や疲労き裂の補修^{6) 7)}のように、必要補強量が比較的大きくなる場合には、炭素繊維シート数層分を工場で板状に成型硬化させた炭素繊維プレートを用いることで、現場での含浸・接着作業を簡略化することができる。また、溶接ビード部などの狭隙部へは、柔軟性に優れた GFRP シートの適用も検討されている⁸⁾。

鋼製橋脚の耐震補強⁹⁾では、橋脚周方向に繊維シートを巻き立てて接着することで、所定の変形性能を確保するこ

Table.2 Division of reinforcement and repair method for steel bridges by CFRP

Purpose	Targeted part	Type of fiber
Reinforcement of load-carrying capacity	• I-Girder flange • Stiffened plate • Concrete slab	CFRP plate, CFRP sheet (AFRP sheet, GFRP sheet)
Repair of fatigue cracking	• Out-of-Plane welded gusset joint • Cruciform welded joint	CFRP plate, CFRP sheet (GFRP sheet)
Seismic reinforcement	• Concrete pier • Steel pier	CFRP sheet (AFRP sheet, GFRP sheet)
Repair of corroded steel member	• Girder flange • Truss member etc...	CFRP sheet

Table.3 Comparison of repairing method for corroded steel members

Repair material	CF sheet (High strength type)	CF sheet (High elasticity type)	Steel plate
Young's modulus (kN/mm ²)	230	640	200
Number of layers (Thickness converted into steel)	12 (t=2.3mm)	5 (t=2.3mm)	1 (t=2.3mm)
Weight per unit area (kg/m ²)	3.6	1.5	18.1
Corrosion resistance	○	○	△ (Painting necessary)
Installation method	Bonding with resin	Bonding with resin	Doubling by bolt or welding

とが一般的に行われている。

なお、筆者らが提案するのは、炭素繊維シートを用いて鋼部材の部分的な補修を行うものであり、腐食部への適用を想定している。その詳細については、次節以降にて述べる。

4. 炭素繊維シートを用いた鋼橋の部分補修工法の提案

4.1 腐食損傷部の補修工法

鋼橋の経年劣化、腐食損傷の部分的な補修において、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、炭素繊維シートを用いた工法を提案する。本工法は、腐食損傷した部位を部分的に補修するものであり、炭素繊維シートに接着樹脂を含浸させながら積層し、現場にて 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。

4.2 設計上の留意点

(1) 補強量および炭素繊維シートの選定

補修対象となる部位の腐食損傷の程度に応じて、炭素繊維シートの種類、補強量を決定する。例えば、腐食減肉した部位に対して、鋼換算厚で 2mm 程度の断面欠損分を補う補強を想定した場合の適用性比較を Table.3 に示す。

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。シート 1 枚あたりの単価は、高弾性型の方が高くなるが、現場での積層作業の軽減なども考慮したコスト比較が必要である。

また、シート 1 枚あたりの繊維目付け量を大きくとれば、積層数を減らすことができるが、接着樹脂の含浸が困難になる。そのため、繊維目付け量の多いシートを用いる際には、接着樹脂の選定も含めて、事前の十分な検証が必要となる。

なお、本工法は部分的かつ軽微な補修を対象とするため、現場でのハンドリングにより優れ、任意の形状にカットすることが容易な炭素繊維シートの使用を前提としているが、補修の規模によって積層数が多くなる場合は、必要に応じて炭素繊維プレートの使用も検討する方がよい。

(2) 炭素繊維シートの接着範囲

補修対象とする部位をカバーし、なおかつ必要な補強効果を得ることのできる定着長（余長）を設ける。必要な定着長については、4.3 にて述べる下地処理の必要範囲とともに今後の検討課題と考える。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（Fig5）。

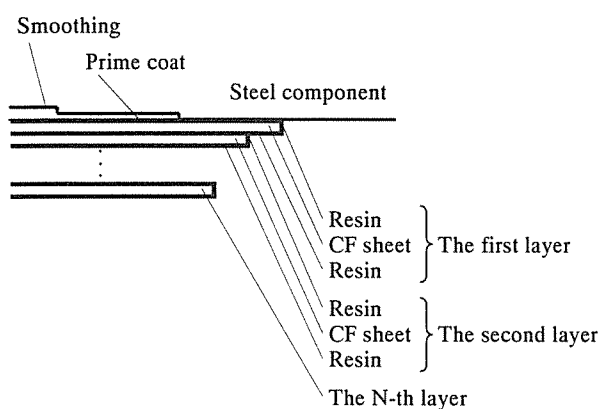


Fig.5 Detail at edge of bonding

(3) 許容応力度の設定

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。ただし、炭素繊維シートの剥離荷重については、積層数や接着長さ、下地処理の状態により異なるため、接着条件との関係を明確にし、許容応力度の設定を行う必要がある。下地処理が不十分であると、降伏点の 50% 程度で炭素繊維シートが剥離するケースがあることを実験で確認した¹⁰⁾。現在、積層数や接着長さ、下地処理の状態をパラメータに確認実験を行っている。

4.3 施工手順および留意点

トラス橋の弦材やアーチ橋のアーチリブ部材を例に、補修工法を検討した。施工は、次の手順で行う（Fig.6）。

(1) 下地処理

炭素繊維の有する引張強度、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¹⁰⁾、表面の塗料、錆などをディスクサンダーなどにより除去し、その後、有機溶剤を用いて表面の清掃を行う。

(2) 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¹¹⁾、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。

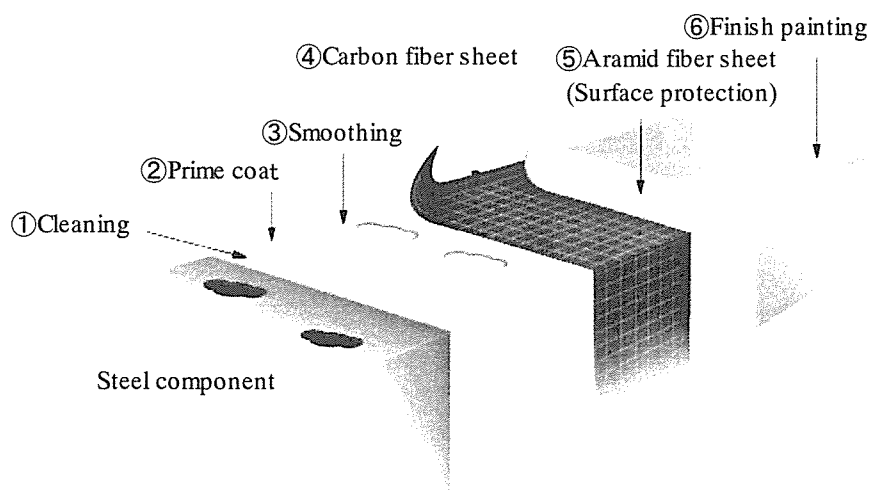


Fig.6 Work procedure for CFRP repair of steel component

(3) 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や、炭素繊維シートの応力集中の原因となる。そのため、貼付け箇所を樹脂系パテにより、平坦に処理するものとする。また、炭素繊維が急激に角折れした場合、その性能を十分に発揮できないため、樹脂系パテ材により面取りを行う必要がある。

(4) 炭素繊維シート貼り付け・積層

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ていることを確認した後、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、設計で求める必要層数の炭素繊維シートを部材軸方向に貼り付ける。

含浸接着剤は、炭素繊維シートと鋼部材との接着性を確保すると同時に、炭素繊維同士を結合材として CFRP の強度発現に重要な役割を果たす。含浸接着剤には次の 2 種類がある。

- ・ エポキシ樹脂は取り扱いが容易で接着強度も高いが、低温では硬化反応が遅く初期硬化に半日から 1 日程度要する。
- ・ MMA（メチルメタクリレート）樹脂は、鋼材との接着に特殊プライマーを用いることで、低温でも短時間の硬化が可能である。

(5) アラミド繊維シート巻き立て

アラミド繊維シートを 1 層巻きつけて接着する。アラミド繊維は耐衝撃性・耐摩耗性に優れており、柔軟性があることから、部材角部に巻き付けることが可能である。このシート層は、構造計算上必要性はないが、将来の塗装塗替えケレン時等における炭素繊維シート保護の機能を果たすことを想定している。

(6) 仕上げ塗装

最上面に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。この塗装により、アラミド繊維や炭素繊維上面の樹脂層の紫外線劣化保護を兼ねる。

4.4 工法の特長と今後の課題

(1) 本工法の特長

従来の鋼板あて板による補修に比べて、CFRP を用いることにより期待できる効果を以下に示す。

① 軽量で重量増加がほとんどない

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。

② 施工が容易

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として適している。

③ 耐久性・耐食性に優れる

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。

④ 既設構造物を傷めない

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。

(2) 今後の検討課題

実構造物へ適用するにあたっての課題として以下の項目が挙げられる。

① 接着条件と補強効果の関係

積層数および接着長さによる補強効果（鋼板応力の低下、剥離強度）への影響を明確にする。

② 各種繊維の用途に応じた適用区分

補修箇所（平坦部、狹隘部）や、補修規模（面積、必要補強量）に応じて、各種繊維の選定基準、適用範囲を検討する必要がある。炭素繊維シート、炭素繊維プレートおよびアラミド繊維、ガラス繊維、鋼材まで含めた選定基準を、コスト・施工性の面から明確にする必要がある。

③ 接着箇所の下地状態が補強効果に及ぼす影響

所要の補強効果を得るためには、接着面の下地処理を適切に行い、鋼材素地に直接接着する必要があるが、現場での塗膜の除去には限界がある。今後、実構造物への適用に向けては、補修箇所において所要の性能を発揮し得る必要最低限の塗膜除去面積の算出などが必要と考えられる。

5. まとめ

鋼橋の補修・補強への CFRP の適用に関して、その適用性、工法の特長を紹介した。なかでも、鋼板を添接する従来工法の代替案として、腐食部の補修に炭素繊維シートを用いることを提案し、その有効性、施工方法、検討課題を示した。

(last page)

参考文献

- 1) 土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），2002。
- 2) 小野，杉浦，三木，小牧，若原：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.

- 3) 大倉, 福井, 中村, 松上: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断力, 土木学会論文集 No.689, pp.239-249, 2001.
- 4) 吉川, 鈴川, 西出, 金子, 野阪: CFRP 板接着を用いた補強鋼板の被着体厚さが補強効果に与える影響, 第 59 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2004.
- 5) 渡邊, 板垣, 鈴木: 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, 2000.
- 6) 鈴木, 岡本: 鋼部材に発生した疲労き裂の炭素繊維強化プラスチック板による補修, 第 58 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2003.
- 7) 石井, 小林, 吉川, 北城: 炭素繊維プレートを用いた既設鋼桁橋の補強に関する検討, 第 58 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2003.
- 8) 鈴木, 岡本, 鈴木: 面外ガセット溶接継手の GFRP による補強, 第 59 回年次学術講演会講演概要集, CD-ROM, 2004.
- 9) 徳林, 池田, 吉元, 長谷川, 藤津, 岡田: 円形鋼製柱の炭素繊維シートによる耐震補強, 橋梁と基礎, pp.37-42, 2003.12
- 10) 杉浦, 大垣, 長井, 小林: 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) 中井, 北田, 松村: 炭素繊維接着による鋼板の電食に関する一考察, 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.46-1-46-4, 2005