

(48) 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

杉浦 江¹・大垣 賀津雄¹・長井 正嗣²・小林 朗³

¹正会員 川崎重工業株式会社 大型構造物BC (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8)
E-mail: sugiura_hiro @khi.co.jp

²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

³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。この劣化した構造物への対策として、供用中の制約条件の下で合理的な補修・補強工法の開発が求められている。このような中、鋼構造物における適材適所の補修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おり、多方面において適用化への技術開発が進められている。炭素繊維シートを用いた鋼部材の補修工法は、炭素繊維の高弾性・高強度といった特性を活かすことで、鋼板を溶接やボルトで添接する従来補修法の代替案として、その有効性は高いと考えられる。本稿では鋼構造物の腐食部へ炭素繊維シートを用いる工法を提案する。また、既設構造物への部分補修に着目し、その適用性について実験的に検討を行った。

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

1. まえがき

鋼構造物はさまざまなメカニズムにより劣化し性能が低下する。この劣化した構造物への対策としての補修・補強において、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いる。このような中、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おり、多方面において適用化への技術開発が進められている状況である¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

筆者らは、鋼構造物の腐食部に対する補修としても、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、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、鋼構造物の腐食部へ炭素繊維シート(CFRP)を用いる工法を提案するものである。さらに、鋼部材への部分補修を想定した既設構造物の塗膜の影響に着目し、その適用性能について実験的に検討した。

2. CFRPの特性

(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繊維である。炭素繊維は直径7~10 μ 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(図-1)は、繊維目付け量の違い(200~600g/m²)と、材料特性の違い(高強度型~高弾性型)がある(表-1)。



図-1 炭素繊維シート

表-1 炭素繊維シート種別と材料特性

種類	引張強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)
高強度型	3400	245
中弾性型	2900~2400	390~450
高弾性型	1900	540~640
鋼	400~570	200

(2) 鋼材とCFRPの合成効果

必要補強量に対する設計パラメータの1つは、炭素繊維シートの積層数となる。炭素繊維シートを鋼板表面に接着した試験片(図-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計算値とほぼ一致する(図-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⁵⁾⁶⁾もある。また、接着条件(積層数、接着長さ等)によっては、鋼材の降伏前に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、接着条件と鋼材との合成効果の関係、および剥離強度を明確にする必要がある。

(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°C⇔60°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(図-4)。

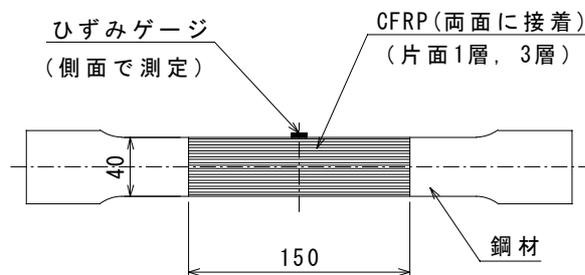


図-2 引張試験片

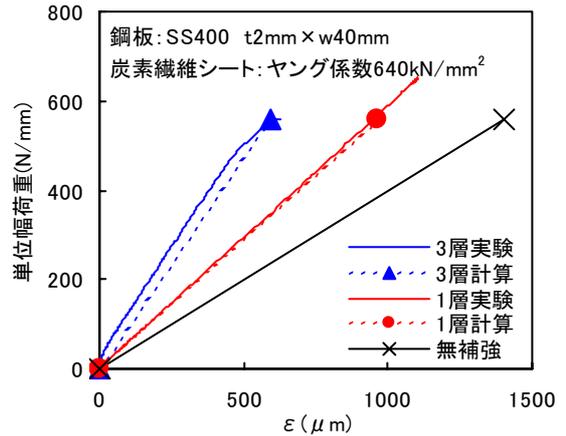


図-3 炭素繊維シート補剛鋼板の荷重-ひずみ関係

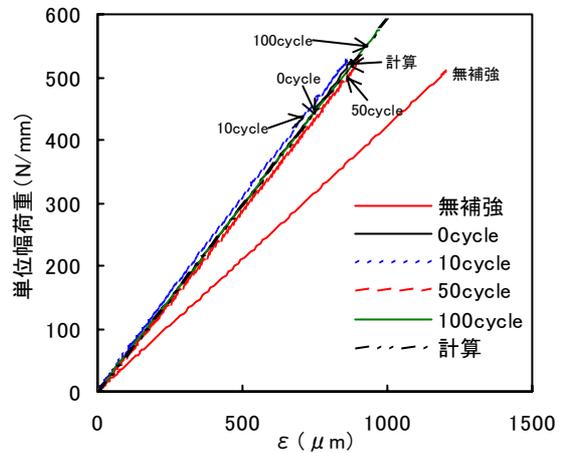


図-4 温度サイクル試験結果

(4) 紫外線によるCFRPの劣化度、塗装の効果

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、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。この紫外線遮蔽のためには保護塗装が必要となる。

3. CFRPを用いた鋼橋腐食損傷部の補修工法

(1) 施工手順

鋼橋の部材腐食への対策として、従来の鋼板の当て板工法に変わるものとして、炭素繊維シートによる補修が

考えられる。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①～⑥の手順で行う（図-5）。

① 下地処理

接着面をケレンし塗膜除去を行う。

② プライマー塗布

鋼部材表面にプライマー塗布する。

③ 不陸調整

腐食による減肉が大きい箇所や孔食部はエポキシ樹脂パテ材で不陸調整を行い平坦にする。

④ 炭素繊維シート貼付け・積層

含浸接着剤を塗布し炭素繊維シートを部材軸方向に貼付け、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、炭素繊維同士の結合材として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（メチルメタアクリレート）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、せん断強度も高いことから、部材角部に巻き付けること

が可能である。将来の塗装塗り替えケレン時における炭素繊維シート保護の機能も果たす。

⑥ 仕上げ塗装

最上面に耐候性塗料を塗布する。これはアラミド繊維の紫外線劣化保護を兼ねる。

(2) 工法の特長と課題

本工法の特長を以下に示す。

- ・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。
- ・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。
- ・大がかりな架設機材は不要で手作業中心であり、塗装塗替え工事の前補修工事として適している。
- ・施工スペースの制約がある供用中の補修に適する。
- ・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。

以上のような特長により、鋼板を溶接やボルトで添接する従来補修法の代替案として、炭素繊維シートを用いた工法が有効であると考えられる。

一方、実構造物へ適用するにあたっての課題として、以下の点が挙げられる。

- ・既設構造物塗膜の完全除去の限界も考えられる。既存の炭素繊維シートを鋼材へ適用した確認実験では、塗膜の影響についてほとんど検討されておらず、鋼材素地への接着が前提となっている。
- ・圧縮荷重作用下での炭素繊維シートの補強効果については、引張荷重作用下に比べて、実験データが少なく明確にはなっていない。

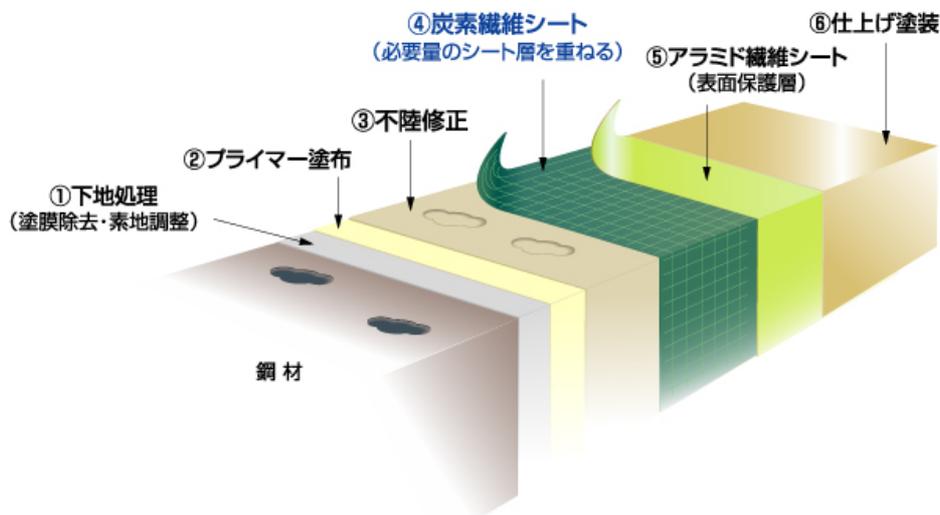


図-5 炭素繊維シート補修の施工手順

4. 塗膜の影響に着目した確認実験

(1) 実験目的

実構造物への適用に向けて、3章にて述べた課題に対する確認実験を行った。本実験では、上フランジおよび下フランジに炭素繊維シートを接着補強した鋼製梁に荷重を載荷し、鋼製梁の荷重-ひずみ関係を測定すると同時に、炭素繊維シートの剥離状況を観察した。なお、炭素繊維シートの接着部の素地状態を実験パラメータとし、素地状態の違いが補強効果へ及ぼす影響を確認した。

(2) 実験供試体

供試体の概略図および、その実験パラメータを図-6、表-2に示す。また、材料特性および、下地の塗装仕様を表-3、表-4に示す。

(3) 実験方法

載荷は、載荷フレームを介して2台の油圧ジャッキにより供試体に荷重を与えるものとする。実験実施状況を図-7に示す。また、ひずみゲージをCFRPおよび鋼材に貼り付け、載荷荷重に対する各々のひずみ値を計測した(図-8)。

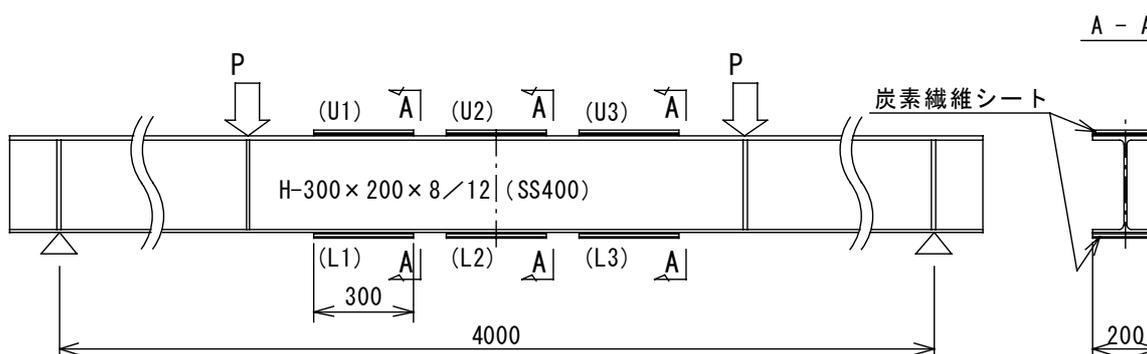


図-6 実験供試体

表-2 実験パラメータ

シート接着箇所	シート層数	接着部の下地状態
U1およびL1	3枚	塗膜(A-1系塗装)上に直接接着
U2およびL2	3枚	塗膜(A-1系塗装)を3種ケレン後に接着
U3およびL3	3枚	鋼材素地(黒皮除去, 有機溶剤により清浄・脱脂処理)

表-3 材料特性

鋼材(SS400)	降伏応力(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング率(kN/mm ²)
	286	434	207
炭素繊維シート	繊維目付け(g/m ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング率(kN/mm ²)
	314	2516	682
エポキシ樹脂	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	引張せん断強度(kN/mm ²)
	73.5	51.0	15.0

表-4 塗装仕様

工程	塗料	塗回数	目標膜厚(μm/回)	
A-1系塗装	下塗り	鉛系さび止めペイント	2	35
	中塗り	長油性フタル酸樹脂塗料	1	30
	上塗り	長油性フタル酸樹脂塗料	1	25

※3種ケレンは、動力工具により、上塗り・中塗り塗料を除去



図-7 実験実施状況

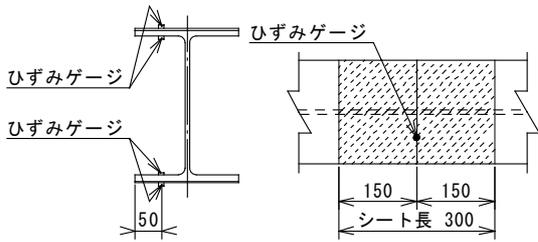


図-8 ひずみゲージ貼り付け位置

(4) 実験結果

a) 引張側（下フランジ）の補強効果

供試体引張側の炭素繊維シート接着部における鋼材の応力-ひずみ関係を図-9 に、CFRP 上の応力-ひずみ関係を図-10 に示す。なお、図-9 における補強計算値は完全合成断面とした場合の下フランジ上面のものである。

- 炭素繊維シートが剥離するまでは、炭素繊維シートと鋼材の完全合成断面を仮定した計算値とほぼ一致する。
- 塗膜上に接着した L1 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かったが、L2, L3 に比べて、補強効果（鋼板応力の低下）が若干少ない。
- 塗膜をケレン後に接着した L2 では、鋼材素地に接着した L3 よりも剥離発生荷重が高くなった。

b) 圧縮側（上フランジ）の補強効果

供試体圧縮側の炭素繊維シート接着部における鋼材の応力-ひずみ関係を図-11 に、CFRP 上の応力-ひずみ関係を図-12 に示す。

- 素地状態にかかわらず鋼材が降伏するまで、炭素繊維シートの剥離は生じない。
- 炭素繊維シートと鋼材の完全合成断面を仮定した計算値とほぼ一致する。
- 鋼材素地に接着した U3 に比べて、塗膜上に接着した U1, U2 は、補強効果が減少する。

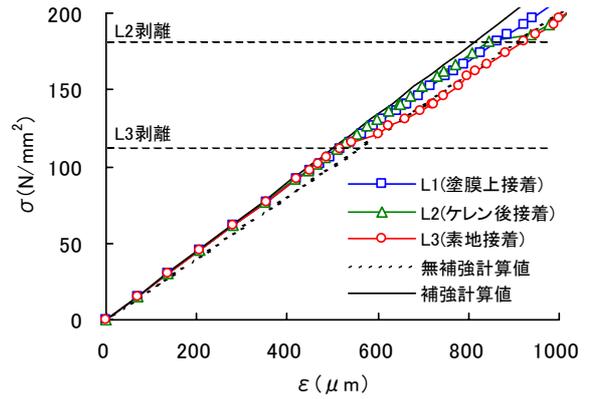


図-9 鋼材の応力-ひずみ関係（引張側）

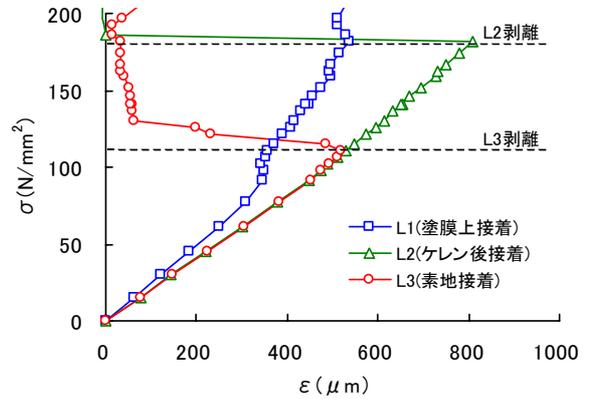


図-10 CFRP 上の応力-ひずみ関係（引張側）

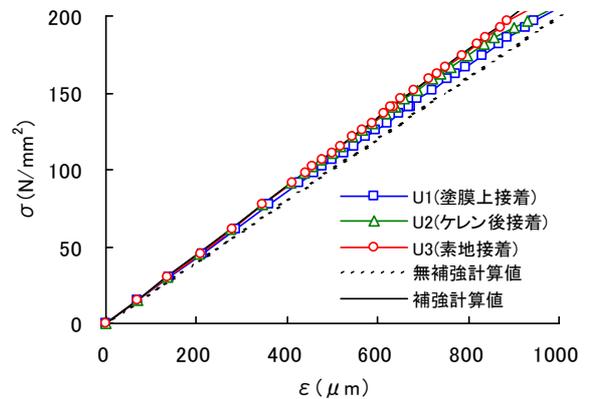


図-11 鋼材の応力-ひずみ関係（圧縮側）

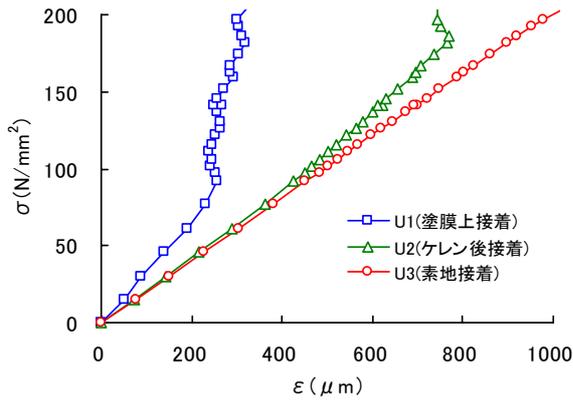


図-12 CFRP 上の応力-ひずみ関係 (圧縮側)

c) 実験結果のまとめ

- 炭素繊維シートが剥離するまでは、応力状態 (引張・圧縮) によらず、鋼材の応力-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計算値とほぼ一致する。
- 引張側では、塗膜上に接着することで剥離発生荷重が高くなった。
- 応力状態によらず、塗膜上に接着することで補強効果が減少し、塗膜が厚いほど、その減少量大きい。

以上より、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。ただし、塗膜上に接着することで、シートの剥離発生荷重が高くなっている。これは、塗膜の層によって、接着樹脂界面に生じるせん断力を緩和しているためと考えられる。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。

AN EXPERIMENTAL STUDY ON REPAIRING METHOD FOR CORRODED STEEL MEMBERS BY CARBON FIBER SHEETS

Hiroshi SUGIURA, Kazuo OHGAKI, Masatsugu NAGAI and Akira KOBAYASHI

The steel structure is corroded by various mechanisms, and the performance decreases. In the restriction condition under use, an effective repair method to the corroding steel structure is demanded. It is paid attention to use carbon fiber (CF) sheets as a repair material for steel structure, 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 structure and confirmed the applicability by the experiment.

5. まとめ

以上、本文では、鋼構造物の腐食部へ炭素繊維シートを用いる工法を提案し、鋼板を添接する従来工法に比べて、優れた特長を有していることを紹介した。

また、実構造物への適用に向けた課題として、部分補修を想定した塗膜の影響に着目し、その適用性について実験的に検討した。検討の結果、所要の補強効果を得るためには、適切な下地処理が必要であることを示した。

謝辞：本研究を遂行するに際して、長岡技術科学大学大学院生の木村氏、竹内氏に協力いただいた。ここに感謝いたします。

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) 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
- 3) 石井, 小林, 吉川, 北城：炭素繊維プレートを用いた既設桁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.
- 4) 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.
- 5) 大蔵, 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.
- 6) 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.