鋼構造物腐食部の炭素繊維シート補修に関する一検討

川崎重工業　　正会員　○杉浦 江　川口喜史　大垣賀津雄
日鉄コンポジット　正会員　　小林 朗　毎熊宏則

１．はじめに

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，供用中のいろいろな制約条件の下で効果的な工法が，強く求められている．かつては鋼構造物への補修・補強には鋼材を用いるのが一般的であったが，近年の新素材に関する技術進歩は著しく，あらゆる機械・装置製品における材料の鋼材比率は低くなっている．また，コンクリート構造物において，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いる．鋼橋でも，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)]．このような中，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当て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，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上回らない範囲もしくは現状維持を目的としての‘補修’を念頭においている．本文は，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を用いる工法を提案するものである．

２．ＣＦＲＰ（Carbon Fiber Reinforced Polymer）の特性

ＣＦＲＰ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．

１）炭素繊維シートの特性

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 μm 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は，繊維目付け量の違い(200～600g/m^2)との材料特性の違い(高強度型～高弾性型)がある（**表１**参照）．

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の複合効果と耐久性

炭素繊維シートを鋼板表面に接着した試験片の引張試験では，鋼材が降伏するまで炭素繊維シートの剥離は発生しない．この荷重－ひずみ関係は，炭素繊維シートと鋼材の完全剛性断面を仮定した計算値とほぼ一致する(**図１**参照)．高強度型ＣＦＲＰは，鋼材の降伏ひずみ程度の範囲では，引張側も圧縮側もほぼ同じヤング係数を持っており，座屈の生じない範囲では圧縮強度も鋼材に比べて高い．

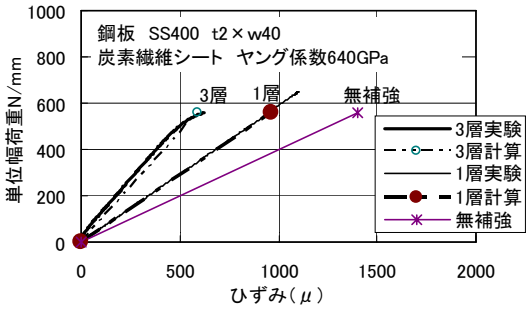

図１　炭素繊維シート補剛鋼板の荷重－ひずみ関係

３）ＣＦＲＰの温度変化への耐性

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～数 10^{-6}/K 程度であり，鋼材の線膨張係数に比べてほぼ一桁小さい．鋼材に炭素繊維シートを接着した後,温度サイクル(20℃⇔60℃)を 100 回負荷した．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

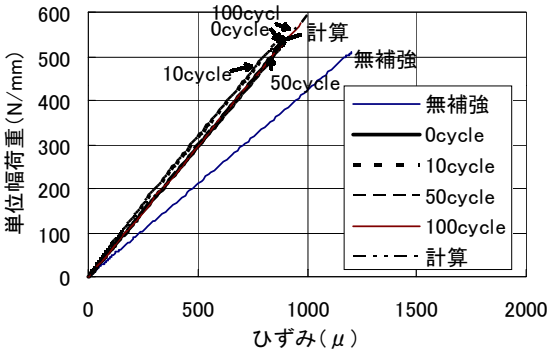

図２　温度サイクル試験結果

キーワード：　腐食補修，炭素繊維シート，CFRP，鋼構造
連　絡　先：　〒105-6116 東京都港区浜松町 2-4-1　川崎重工業　TEL:03-3435-2257　FAX:03-3435-9704

発生せず，温度サイクル後の引張試験結果は温度サイクル前の結果と変わりない（**図２**参照）.

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 10000 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である．

３．鋼橋の腐食損傷部への補修工法

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特に効果的であるトラス橋の弦材を例に，補修工法を検討した．

施工は次の①から⑥の手順で行う（**図３**参照）.

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個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．

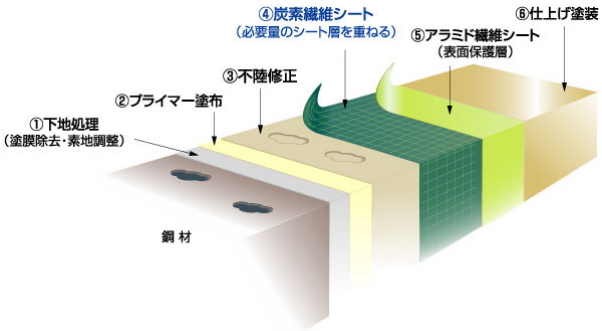

図３　炭素繊維シート補修の施工手順

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，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．

４．本工法の特徴と今後の課題

上記の検討による鋼構造物腐食部の炭素繊維シートによる補修工法は，次のような特徴を有する．

・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．

・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，施工スペースの制約がある供用中の補修に適する．

・薄く軽量な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．

今後この工法を実橋へ適用するにあたり以下のような課題があり，技術的解決に取り組む予定である．

・既設構造物塗膜の完全除去や不陸修正材による腐食部の母材減肉による凹凸除去の限界も考えられる．

・既存の炭素繊維シートと鋼材との確認実験では，塗膜や不陸の影響についてほとんど検討されていない．

そこで，補修個所において所用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である．塗膜の影響に因る性能評価について，確認実験を通じて検証中である．その他，炭素繊維シートの積層数と部材強度との関係性も明確化することも必要である．

【参考文献】　１）(財)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)，2002.7　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 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，土木学会第 58 回年次講演会Ｉ-454，2003　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，2002 年 11 月