

炭素繊維プレート緊張材を用いた補強事例と補強後の現況

田中 邦夫*

高度成長期に建造された既存構造物の多くが老朽化しつつある。現在の交通量や載荷荷重は、設計当時と比べて大きく増大し、耐荷力が不足しているものも少なくない。既存の構造物をリニューアルすることによって構造物を延命化することや耐荷力を向上させることが望まれている。そのなかで、非金属製の新素材による補修・補強技術の進歩は目覚ましい。本稿では、耐腐食性に優れ耐久性が高い材料である炭素繊維をプレート状に加工し、緊張材として用いた補強工法についての概要と事例、ならびに実用化されてからの経過年数が8年と浅いながら、現状を目視調査した結果を併せて述べる。

キーワード：炭素繊維プレート、緊張材、耐荷力向上、リニューアル

1. はじめに

炭素繊維プレートを用いた緊張工法は、非金属のため耐腐食性に優れており、重量も鉄に比べて1/4程度とたいへん軽量で取扱いやすい材料である。本工法の特徴は、炭素繊維シートを貼り付ける工法と比べて緊張力を与える点である。炭素繊維シート貼付け工法が付加荷重へ抵抗するのに対して、本工法は外ケーブル補強と同様に既設構造物の応力度改善や耐荷力の向上やひび割れ幅の軽減、たわみの回復効果や固有振動数の改善効果があげられる。本報告では、これらの特徴を生かして補強を行った事例や施工上の工夫、補強後の現況について紹介する。

2. 炭素繊維プレート緊張工法について

2.1 炭素繊維プレート緊張工法の構成

炭素繊維プレート緊張工法の構成は、図-1に示すように、①炭素繊維プレート緊張材、②定着体固定プレート、③中間定着体の主に3種類の部品から構成される。それぞれの構成部品について詳述する。

炭素繊維プレート緊張材は、定着体の金属部材と炭素繊維プレートをあらかじめ工場にて一体化して出荷される。金属製の定着体と炭素繊維プレートとの接合は膨張モルタルを定着体に充てんすることにより、膨張圧でプレートを接合している。現在、緊張材は標準容量のタイプ(240kN型)と1.5倍容量のタイプ(360kN型)の2種類があり、炭素繊維プレートの品質補強としてガラス繊維を全面に貼

り付けている(表-1)。

表-1 炭素繊維プレート緊張材諸元

緊張材の呼称(引張強度)	240kN型:標準容量	360kN型:1.5倍容量
弾性係数(N/mm ²)	1.20 × 10 ⁵	1.20 × 10 ⁵
幅(mm)	50	75
厚み(mm)	2.0 + 1.0(ガラス繊維)	2.0 + 1.0(ガラス繊維)
断面積(mm ²)	150	225
許容引張 応力度	プレストレスング中(0.8σ _{pu})	1280
	プレストレスング直後(0.7σ _{pu})	1120
	設計荷重時(0.6σ _{pu})	960(144kN/本)
		960(216kN/本)

このガラス繊維補強により、ねじれや擦れに対して使用性が向上し、現場作業時のプレートへの損傷リスクが発生しなくなった。1本の緊張材で緊張力が不足する場合には、先行して施工した緊張材の上に2層目の緊張材を重ねて接着する2層緊張接着工法も採用されている(写真-1)。

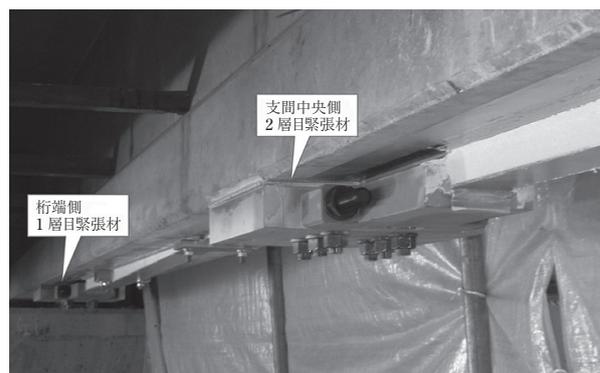


写真-1 緊張材2層配置例

定着体固定プレートは、溶接構造用圧延鋼材(SM490)を使用している。炭素繊維プレート緊張材の定着体は、クロームモリブデン鋼製の定着ボルト(M22またはM24)を介してネジ式定着される。定着体固定プレートの躯体への取付けは、定着ネジ棒と同じ材質の鋼材を用いて樹脂ア



* Kunio TANAKA

ドービー建設工業(株)
執行役員 工事統括部長

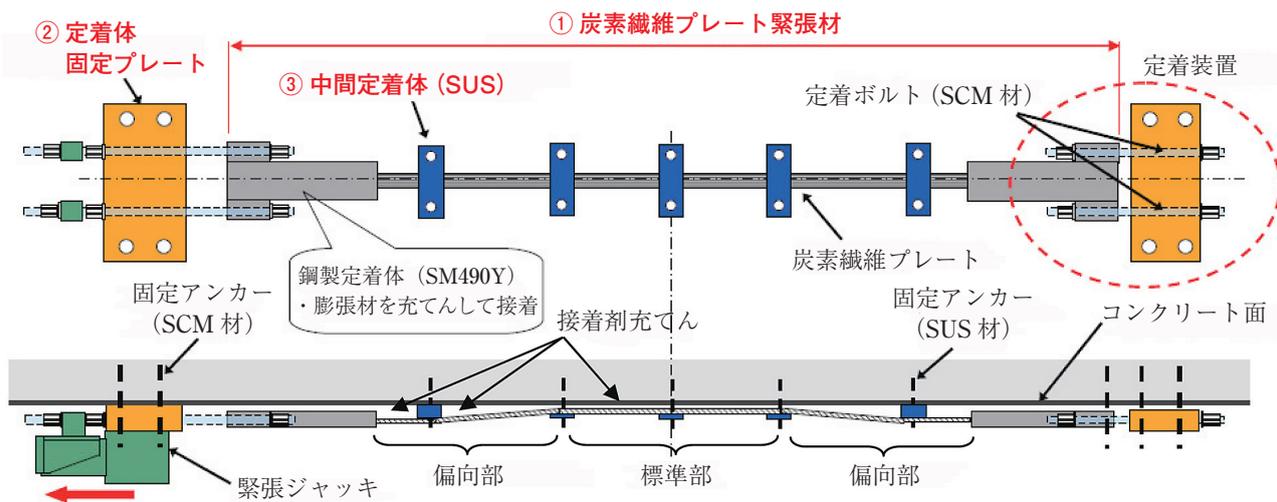


図 - 1 炭素繊維プレート緊張工法部品構成

ンカーで固定する。各種試験により、固定アンカーへ作用する引抜き力はほとんど発生せず、水平力に対して抵抗していることが確認されている。実用化された当初は、躯体をはつり出して箱抜きし、定着体固定プレートの一部を箱抜き部へ埋め込むことで炭素繊維プレート緊張材を躯体に密着させていた（はつりタイプ）。しかし、構造物によっては、かぶりが不足しているものもあり、定着体固定プレートを設置できない場合がある。そこで、躯体のかぶりをはつらず、炭素繊維プレート緊張材を偏向させて配置することができる定着体固定プレートが開発された。現在では、主にはつりを必要としない偏向定着タイプが採用されている（図 - 2）。

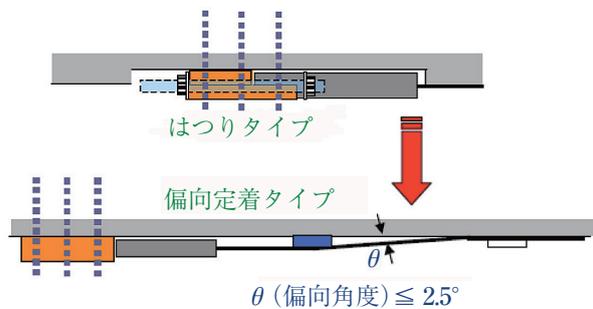


図 - 2 定着体固定プレートの配置方法

中間定着体は、ステンレス鋼（SUS304）のプレートが主に使用されている。中間定着体の役割は2種類あり、炭素繊維プレート緊張材を偏向させて配置する場合に、緊張材を押さえ込んで偏向させる役割、もう一点は、主桁のそりに対して一定間隔で中間定着体を配置することによって躯体と緊張材を密着させる役割がある。性能確認試験では、中間定着体を設置した場合と設置しない場合で、炭素繊維プレート緊張材の剥離抵抗耐力が1.5倍に向上することが確認された。この剥離抵抗耐力の向上によって、曲げ破壊耐力が増加することも確認されている。

2.2 炭素繊維プレートの緊張および接着

炭素繊維プレートの緊張は、爪付き型の専用ジャッキを用いて緊張を行う。ジャッキは、施工性を向上させるためにジャッキ本体と緊張時の反力を受け持つ反力台に分割している。材質はジャッキ本体をチタン、反力台および爪部分のジャッキヘッドをアルミ合金とし、重量の軽減を図っている（写真 - 2）。



写真 - 2 爪付きジャッキ

反力台は、定着体固定プレートに設けられた反力台固定用のネジ穴を利用して取り付けジャッキ本体をセットする。爪付きジャッキにより緊張端部側に取り付けたナットを介して緊張し、定着体固定プレート側のナットで緊張力を定着する（写真 - 3）。

緊張材の接着はエポキシ樹脂系の接着剤を使用している。実用化当初は1種類のエポキシ樹脂接着剤（現在、標準部で使用しているもの）のみを使用していた。しかし、偏向定着タイプの緊張方法の施工実績を重ねていくうちに、今まで使用していた接着剤を偏向部に使用した場合、柔らかすぎて硬化前に垂れてしまい、仕上げ完了までの時

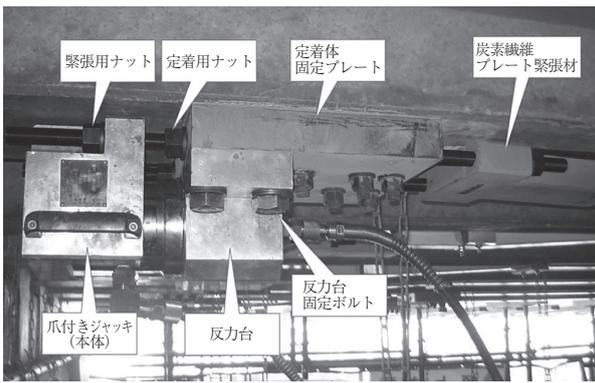


写真 - 3 緊張システム

間がかかることで施工性が向上しないことが分かった。そこで、偏向部では粘性が高く垂れにくい接着剤を用いて多量の接着剤をプレートと躯体の隙間に充てんし、躯体と緊張材の隙間が小さい標準部では粘性の低い柔らかいものを使用し施工性を向上させ、より確実な接着ができるように改良した。

接着剤の塗布方法は、炭素繊維プレート緊張材を定着体固定プレートにセットしたのち、緊張材が垂れ下がった状態で接着剤をコテで接着面に載せる。その後、接着剤をなるべく落とさないように中間定着体を仮組みして緊張作業に入る。緊張完了後、不陸などにより接着剤が十分に充てんされていない場合には、その部分にあとから接着剤を充てんする。

接着剤の硬化時間や可使用時間は気温によって異なるが、気温 20℃～25℃で完全硬化まで 24 時間、可使用時間は 60～80 分程度である。

3. 施工上の留意点

本工法の部品構成は前章でも述べたとおり、簡素化された構成となっており、短期間で施工が可能である。その反面、定着部などにおいては太径 (M22) の固定アンカーを使用していることから、アンカー用の削孔をする作業においては細心の注意を払う必要がある。鉄筋や PC 鋼材の配置を想定する際の非破壊検査 (RC レーダーなど) の精度に熟練を要する。

過去の施工事例では、径の細いドリルで試削孔を行い、接触する鉄筋や鋼材などが無いことを確認してから本削孔を行った事例、金属探知センサー付きコードリールを使用して削孔を行い、鉄筋や PC 鋼材と削孔先端が触れた瞬間に削孔機械が停止させるといった機構を設けて施工を行った事例など、構造物の生命線となる鉄筋や PC 鋼材に損傷を与えない工夫がなされてきた。

また、炭素繊維プレート緊張材においては、炭素繊維という材料の特性上、引張りには強いが、ねじれやせん断方向の力 (傷など) や急激な曲げに対して弱いという点があり、設置時における緊張材の取扱いに留意しなくてはならない。とくに足場設置時のチェーンや単管クランプ、鋼製足場板などの突起部分で緊張材に傷を与えないように注意

すること、緊張材を急激に曲げないために、ある程度の間隔で緊張材を保持することなど、緊張材設置時の取扱いに配慮する必要がある。

さらに、緊張材を接着する際に使用するエポキシ樹脂接着剤は、緊張材と躯体との隙間を埋めるために十分な量を塗布して緊張する。そのため、緊張直後は接着剤が溢れ落ちるため、河川上での施工や高架橋での施工の場合には、足場下への落下に対する十分な養生が必要である。

4. 施工事例

4.1 PC 単純 T 桁橋への適用事例¹⁾

橋長 30.600 m (支間 29.740 m)、全幅員 13.800 m で両側に歩道を有し、7 主桁で構成されたポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋である。平成 14 年に本工法が初めて道路橋へ適用された施工事例である。供用開始から 23 年が経過し、設計当時の適用荷重 TL-20 を現況の交通量にに応じて B 活荷重へ対応させるために補強工事および耐震補強工事が行われた。本橋は市街地や主要駅への重要なアクセス道路としての役割があること、近隣に大手電機メーカーの工場や運送業のデポターミナルなどがあることにより、設計当時に想定していた交通量から大きく変化し、大型車両の通行が増加していた。当初の設計段階においては、外ケーブル補強との比較も行われたが、主桁間と耳桁側面に添架物があるため、外ケーブルの定着部や偏向部を施工することができず、桁下のみでの対応が可能な本工法が採用されることとなった。

補強は 240 kN 型の緊張材を各主桁に 1 本配置しており、設計荷重時 (B 活荷重) の支間中央下縁の合成応力度で -2.1 N/mm^2 を -1.4 N/mm^2 (許容引張応力度 -1.5 N/mm^2) に改善している (写真 - 4)。



写真 - 4 桁間添架物と緊張材の配置

本橋で使用した炭素繊維プレート緊張材は現行型の緊張材と異なりガラス繊維による補強がなされていなかった。そのため、施工時のねじれや折れに対する配慮、緊張材へ傷をつけないための配慮など、現在の施工方法を確立するための礎となった事例である。たとえば、足場上で緊張材を引き出すために使用しているターンテーブルは、パレッ

トに巻いて梱包された緊張材をスムーズに引き出すために考案され、作業がとても円滑に進んだため、以後の現場でも使用されるようになった(写真 - 5)。

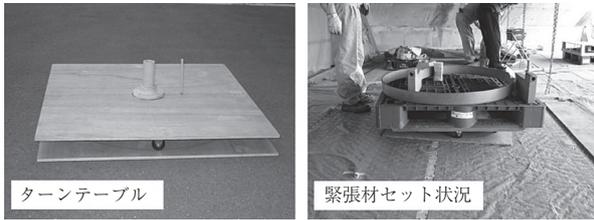


写真 - 5 ターンテーブルと緊張材セット状況

4.2 4 径間連続 RC 中空床版橋への適用事例²⁾

橋長 72.500 m (支間 = 3 @ 17.400 m + 16.400 m)、幅員は車道 8.00 m、歩道 3.00 m の 4 径間連続 RC 中空床版橋であり、本工法が初めて RC 中空床版へ適用された事例である。本橋は、東海地震や東南海沖地震などの大規模地震が発生した際に国道網を結ぶ連絡道路として、第一次緊急輸送路の指定を受けた。そのため、設計当時の荷重 (TL-20) を B 活荷重に対応させる補強工事および耐震装置を追加する工事が行われた(写真 - 6)。



写真 - 6 中空床版橋補強状況

中空床版橋の補強工事では、過去に主版側面へ外ケーブルを配置して耐荷力を増加させた例や、付加荷重に対して抵抗する鋼板接着または炭素繊維シート接着などによる補強事例が大半であった。本工法の実用化により、適切なプレストレス力を主版下面から主版に均一に与えることが可能となった。しかし、RC 橋の場合は、主鉄筋が密に配置されているため、定着体固定プレート用のアンカー施工には大変な労力を要した。とくに、鉄筋配置によって固定アンカーの位置が異なるため、定着体固定プレートの大きさやボルト穴の位置がすべて異なり、計測精度のみならず製作精度においても細心の注意を払う必要があった。

本橋は主版幅 9.500 m に対して 240 kN 型の緊張材を各径間に 7 本配置しており、設計荷重時 (B 活荷重) の鉄筋応力度を 190.6 N/mm² から 179.3 N/mm² (許容引張応力度

180.0 N/mm²)、コンクリート応力度を 7.4 N/mm² から 7.1 N/mm² に改善している。

4.3 横締め PC 鋼材への補強適用事例

プレテンション方式 PC 2 径間単純中空床版橋の片側の径間において横締め PC 鋼棒が損傷し、PC 鋼棒が突出する事故が発生したことから、炭素繊維プレート緊張材を用いて補強を行った事例である。中間横桁部の主桁上面および下面に炭素繊維プレート緊張材を配置して補強を行った。補強量は、横桁 PC 鋼材の損傷度合いに応じて上下 1 本配置の箇所と上下 2 本配置の箇所があった(写真 - 7, 8)。



写真 - 7 主桁上面 緊張材配置 (1 本配置)



写真 - 8 主桁下面 緊張材配置 (1 本配置)

主方向 (橋軸方向) と異なり、横方向 (橋軸直角方向) は横桁の上縁と下縁の曲げモーメントが最大時と最小時で反転するため、作用応力に対して上縁と下縁おのおのの導入緊張力を調整することで対応した。

横桁上面の緊張材を施工する際、交通量が多いため片側交互通行として施工した。幅員片側の舗装および調整コンクリートを撤去後、舗装下を通過する緊張材を保護するために鋼製の保護カバー(写真 - 9)を設けて緊張材を配置し、歩道部に定着体固定プレートを設置した。緊張後は、

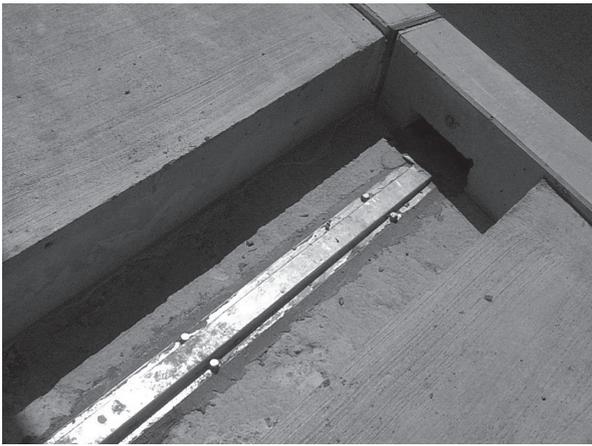


写真 - 9 鋼製保護カバー設置 (歩道部)

保護カバー内にグラウトを充てんした。舗装撤去後の凹凸部分において、緊張材と躯体とが接する面の損傷を防ぐために不陸調整を行っている。

下面の緊張材は耳桁の主桁下面に設置し、中間定着体は間詰め部にアンカーを配置した(写真 - 10)。桁下から70 mmの部分は間詰めコンクリートが詰まっていないため、中間定着体のアンカー削孔前に樹脂モルタルを充てんしている。



写真 - 10 主桁下面 中間定着体配置

補強は、主桁の上下面に240 kN型緊張材を2本ずつ配置しているもっとも条件の厳しい横桁において、最大曲げモーメント発生時の下縁合成応力度が -0.35 N/mm^2 から 0.04 N/mm^2 、最小曲げモーメント発生時の上縁合成応力度が -0.34 N/mm^2 から 0.03 N/mm^2 に改善している(許容応力度 0.0 N/mm^2)。

4.4 3径間鋼単純合成I桁橋への適用事例

本橋は、橋長100.000 m(桁長3 @ 33.200 m)の3径間単純合成I桁橋で、車道幅員を拡幅するために歩道部分を既設橋の脇に歩道橋としてべつに設け、既設橋は車道単独で利用する計画となった。これにより、活荷重の増大および舗装や地覆の打ち換えなどによる死荷重の増加に伴って

既設橋の耐力が不足した。下フランジ鋼板の添接による補強も検討されたが、死荷重のさらなる増大や溶接による作業の煩雑さが懸念され、本工法が採用された。本工法が鋼桁橋へ適用された初の事例となることから、施工に先立って性能確認試験を行った³⁾。

前述の性能確認試験を受け、緊張力によって作用する水平力を下フランジへ局部的に与えないためにトルシアボルトを用いた摩擦接合方法で定着した(写真 - 11)。これは、本橋の下フランジの厚さが15 ~ 20 mmと薄かったために行った対策である。

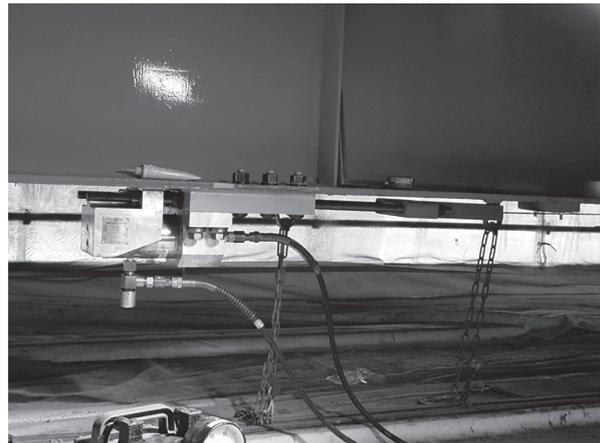


写真 - 11 定着体固定プレート設置状況

また、定着体保護カバーによる防錆処理については、グラウトによる重量増を避けるため、カバープレートを取り付けたのち、グラウトの代わりに定着部の隙間に発泡エポキシ樹脂を充てんして防錆した(写真 - 12, 13)。定着体固定プレートや中間定着体の施工は、コンクリート橋と比べて鉄筋などの配置が無いいため、設計図面どおりの施工が可能となり施工性は大変良好であった。

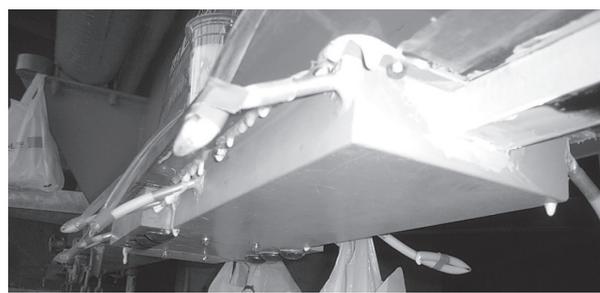


写真 - 12 定着部防錆 (発泡エポキシ樹脂注入)

補強は、主桁の下フランジ下面に240 kN型緊張材を2本重ねて接着した2層緊張接着工法を採用している。補強前の下フランジ引張応力度は、 208 N/mm^2 (許容引張応力度 185.0 N/mm^2)であったが、補強後の下フランジ引張応力度は、 184 N/mm^2 に改善されている。

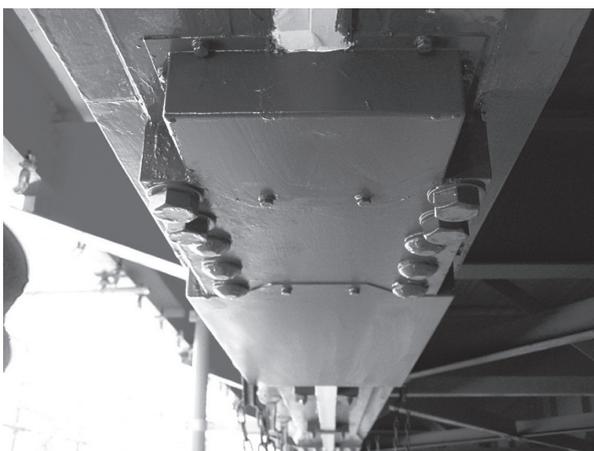


写真 - 13 保護カバー，塗装完了

5. 補強後の現況

本工法において、道路橋へ適用した最初の施工案件となった4.1節の橋梁は、平成14年に施工されてから8年が経過している。平成22年に橋梁下より目視点検による現地調査を行ったところ、炭素繊維プレート緊張材、定着部、中間定着体など、全体的に施工完了時からの変状はまったくなく健全であった。埃は付着しているものの、保護塗装は光沢もしっかりと残っていた(写真-14)。本工法の場合、桁下に貼り付けて補強を行うため、直射日光による紫外線の経年劣化速度は非常に遅い。直射日光に比べて河川からの反射による紫外線のみのためである。



写真 - 14 近接目視状況

また、4.2節で紹介した橋梁は、平成16年に施工されて6年が経過している。本橋においても平成22年に目視点

検による現地調査を行った。補強を行った径間の橋梁下が護岸となっており、近接目視点検が可能であった。前述の橋梁と同様、炭素繊維プレート緊張材本体は大変きれいな状態であった。また、FRP製の定着体保護カバーも光沢を保っており、補強後の状況は健全であった(写真-15)。



写真 - 15 定着体保護カバー 近接目視点検

6. おわりに

今後増え続ける構造物の耐荷力や耐久性の向上に対して、炭素繊維プレート緊張材を用いた補強工法は有効な効果を発揮できると思われる。とくに床版橋や桁間に添架物を持つ橋梁において本工法の長所を活かすことができる。

実用化されてから8年程度と日は浅いものの、現時点で不具合はなく、今後も耐久性に対して実績を積んでいくことが望まれている。そのため、これからも数年間隔で目視点検などによる追跡調査を行っていき、より信頼性の高い補強工法にしたいと考えている。本報告が今後の補強工事の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) 阿長谷川剛, 濱口竜雅, 江本正樹, 小林朗: 炭素繊維プレート緊張材を用いた「平和橋」の補強: 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp349-352, 2003
- 2) 江本正樹, 大藪武志, 川口純二, 高橋輝光: 炭素繊維プレート緊張材を用いた「曾根橋」の補強: 第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp583-586, 2005
- 3) 村上秀樹, 安森浩, 小林朗, 立石晶洋: 鋼部材に対する炭素繊維プレートを用いた緊張力導入に関する実験的研究: 第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp359-362, 2006

【2011年1月17日受付】