

第10回 補修・補強材料 (その2)

講師：藤原 保久*1・徳光 卓*2・北野 勇一*3・岡田 繁之*4

1. はじめに

PC 構造物は、比較的耐久性に優れた構造物ですが、厳しい劣化環境や過酷な使用条件下では損傷や劣化が生じます。その場合、維持管理対策として補修・補強が必要になります。前回第9回の講座では主にPC構造物の耐久性向上を目的とした補修工法・材料について説明しました。

今回の講座では、PC構造物の耐荷性能が低下した場合や新たな作用荷重に対応する場合など、耐荷性能を向上させることを目的とした補強工法・材料について説明します。

2. 補強工法と材料

2.1 概要

補強とは「構造物の耐荷性能や剛性などの力学的な性能を回復、もしくは向上させることを目的とした対策」とされています¹⁾。この定義に従い、PC構造物に用いられる、あるいはPC構造を用いる代表的な補強工法には、プレストレス導入工法、連続繊維シート接着工法、鋼板接着工法、上面増厚工法、下面増厚工法、床版取替え工法などがあります。

2.2 プレストレス導入工法

本工法は、緊張材を既設コンクリート部材の外部に配置し、定着部あるいは偏向部を介して部材にプレストレスを導入することにより、コンクリート部材の応力状態を改善し、耐力を回復もしくは向上させることを目的とした補強工法です²⁾。緊張材はPC鋼材を用いた外ケーブルが一般的ですが、近年になりFRP緊張材も利用されています。

(1) 外ケーブルを用いたプレストレス導入工法

外ケーブルは、耐久性の観点から、あらかじめ防錆材で被覆されたPC鋼材が一般に用いられます。PC鋼材の定着方法には主にくさび式定着とねじ式定着があり、新設のPC構造物では緊張容量が大きく経済性に優れたくさび式定着が多用されますが、既設構造物の補強に際しては施工上の制約や維持管理の容易性を考慮して外ケーブルの種類とその定着方法の種類を選定する必要があります。とりわけ中小規模の橋梁の場合は、外ケーブル設置時の空間的な

制約が大きく、補強後の再緊張あるいは取替えの観点から、ねじ式定着のプレファブケーブルが広く用いられています。

外ケーブルの定着装置および偏向装置はコンクリート製と鋼製の2種類がありますが、塩害地域などの環境条件が厳しい地域では鋼製のものは耐久性の観点からその使用を避けます。また、ねじ式定着の外ケーブルは緊張容量が比較的小さいことからブラケット方式の定着装置(写真-1)、くさび式定着の外ケーブルは緊張容量が大きいことから横桁や隔壁を利用した定着装置が一般に採用されます。特に、外ケーブルが大容量となる場合は、図-1に示すように定着部寸法が増すことから既設部材への設置の



写真-1 外ケーブルによるB活荷重対策事例

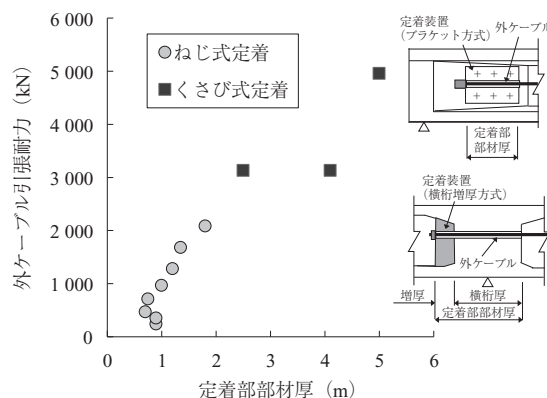


図-1 外ケーブル容量と定着部寸法の関係

*1 Yasuhisa FUJIWARA：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 部会長（三井住友建設(株)）

*2 Suguru TOKUMITSU：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 副部会長（(株)富士ピー・エス）

*3 Yuichi KITANO：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 副部会長（川田建設(株)）

*4 Shigeyuki OKADA：プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会（極東興和(株)）

可否を確かめるとともに、既設コンクリート部への負担も大きくなるためFEM解析などを用いて安全性を照査する必要があります。

外ケーブルを用いたプレストレス導入工法の適用事例としては、B活荷重対策や経年劣化対策、ノージョイント化や耐震性向上を目的とした主桁連結、ゲルバーヒンジ橋の連続化、垂れ下がり生じた有ヒンジラーメン橋のたわみ抑制対策（写真-2）などがあげられます³⁾。



写真-2 外ケーブルによるたわみ抑制対策事例

(2) FRP 緊張材を用いたプレストレス導入工法

FRP 緊張材は、炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維を樹脂で成形した繊維強化プラスチック（FRP：Fiber Reinforced Plastics）を緊張材として用いるものであり、腐食の心配がなく耐久性に優れるという特長があります。このうち、炭素繊維プレートを緊張材に用いたプレストレス導入工法は、外ケーブルと比べ容量が小さい（引張耐力が240 kNと360 kNの2タイプがある）ものの、緊張材が薄く、構造物にじかに接着する工法のため、建築限界に制約がある中小規模の橋梁を中心に適用されています（写真-3）⁴⁾。



写真-3 炭素繊維プレートを緊張材に使用した事例

2.3 連続繊維シート接着工法

連続繊維シート接着工法は、コンクリート部材の表面に高強度の連続繊維シートを接着剤により含浸・硬化させながら必要層数を貼り付けて既設部材と一体化させることによって、耐荷性能の回復もしくは向上を図る工法です。図-2に工法概要図を示します。本工法には以下の特徴があります⁵⁾。

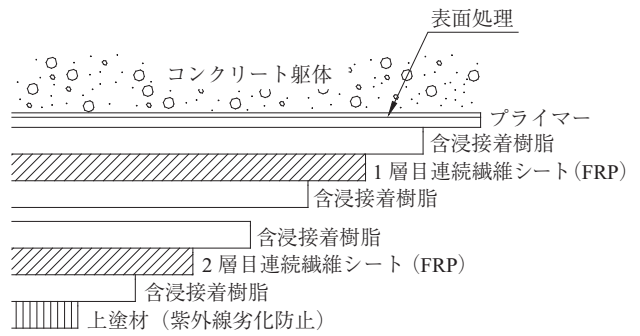


図-2 連続繊維シート接着工法概要図

- 1) 連続繊維シートは軽量で現場成形が容易であるため、作業空間に制約がある場合でも作業が容易です。
- 2) 連続繊維シートは腐食の心配がなく耐久性が高いため、塩害地域などの腐食環境下での適用も可能です。
- 3) 補強効果としては、作用荷重による既設鉄筋の応力度低減、ひび割れ進行の抑制が期待できます。
- 4) 必要とする補強量に対して積層枚数で調節できるため、合理的な補強ができます。
- 5) 床版部材に格子状に貼り付けることで施工後の変状観察が可能で、滞水処理もできます。
- 6) 補強による断面増加や形状変化がほとんどなく、部材剛性も変化しません。

使用される連続繊維の種類には、表-1に示すように炭素繊維、アラミド繊維などがあり、それぞれ引張強度や弾性係数、破断伸度などの力学特性が異なります。同じ連続繊維の中にも、比較的引張強度や破断伸度の大きいものの弾性係数の小さい高強度型と引張強度や破断伸度は小さいものの弾性係数の大きい高弾性型があり補強目的によって使い分けられます。含浸接着剤は一般的にエポキシ樹脂やアクリル樹脂が用いられますが、あらかじめ連続繊維との適合性を確認して使用する必要があります。また樹脂材料は紫外線劣化が懸念されるため、表面塗装として耐候性に優れたものを使用する必要があります。

表-1 連続繊維の力学特性の一例

連続繊維の種類	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	破断伸度 %	密度 g/cm ³
高強度型炭素繊維	4 900	230	2.1	1.80
中弾性型炭素繊維	4 020	436	0.9	1.82
高弾性型炭素繊維	3 530	590	0.6	2.10
高強度型アラミド繊維	3 450	73	4.6	1.39
高弾性型アラミド繊維	3 000	112	2.4	1.44

連続繊維シート接着工法の適用事例としては、コンクリート主桁の曲げ補強やせん断補強および床版の曲げ補強に適用されます。写真-4はPC箱桁橋のせん断補強として適用された例で、鋼板とボルトにより連続繊維シートの端部が定着されています。写真-5はRC床版の曲げ補強と疲労耐久性向上対策として使用された例で、連続繊維シートを格子状に貼り付けて施工後の経過観察を可能にしています。写真-6はPC斜張橋の橋脚耐震補強に適用された



写真 - 4 PC 箱桁のせん断補強



写真 - 5 RC 床版の疲労耐久性向上対策

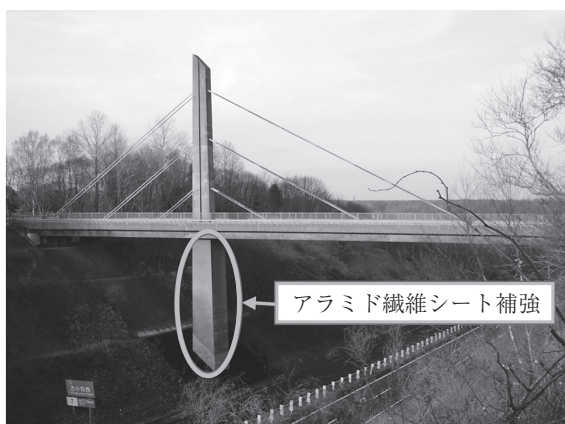


写真 - 6 PC 斜張橋の橋脚耐震補強

事例で、補強後の橋脚形状や全体剛性の変化を少なくするためにアラミド繊維シート補強が採用されたものです⁶⁾。

2.4 鋼板接着工法⁵⁾

鋼板接着工法は、既設コンクリート部材の主として引張縁に鋼板を取り付け、接着剤により既設部材と一体化させることによって曲げ耐力やせん断耐力の向上を図る工法です。本工法の補強効果としては連続繊維シート接着工法と同様に、作用荷重による既設鉄筋の応力度低減、ひび割れ進行の抑制が期待できます。また床版部材のように薄い部材では押抜きせん断耐力の向上も期待できます。ただし、鋼板は腐食するため、表面被覆などの防食対策が必要です。

本工法では図 - 3 に示すようにコンクリート面の下地

処理をした後、5 mm 程度の間隙を確保しながらアンカーボルトで鋼板を固定し接着樹脂を注入します。鋼板は一般的な構造用鋼材 SS 400 が使用され、接着剤はエポキシ系樹脂が使用されます。鋼板厚は設計計算から求められますが、接着樹脂を注入する際の圧力や腐食による断面減少の影響を考慮して最小鋼板厚は 4.5 mm 程度とし、最大鋼板厚は施工性を考慮して 12 mm 程度としています。

写真 - 7 は RC 床版の下面に接着することにより、曲げ補強ならびに押抜きせん断耐力の向上を図った事例です。

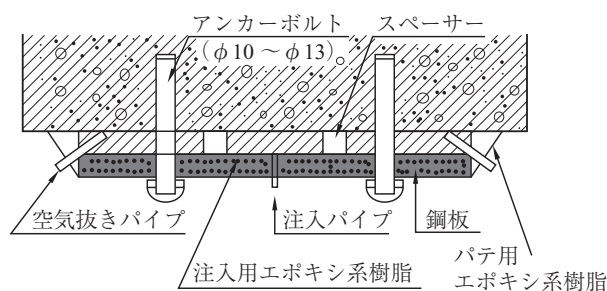


図 - 3 鋼板接着工法概要図



写真 - 7 鋼板接着工法による床版補強

2.5 上面増厚工法⁵⁾

上面増厚工法は、既設床版コンクリートの上面を切削、研掃後、鋼繊維補強コンクリートを打設し新旧コンクリートを一体化させて床版厚を厚くし、曲げ剛性とせん断剛性の向上を図る工法です。増厚コンクリート内に補強鉄筋を配置して補強効果を高めた鉄筋補強上面増厚工法も含まれます。本工法の概要図を図 - 4 に示します。

本工法の適用により RC 床版の厚さが増すため、疲労損傷の進行に伴う押抜きせん断に対する耐荷性能を向上させることができます。また増厚することで断面中立軸が上方に移動し曲げ耐力の向上や橋全体の剛性が高まり主桁のたわみが減少する効果も期待できます。増厚部に補強鉄筋を配置する場合には、連続桁の主桁中間支点部や張出し床版などの負の曲げモーメントに対する耐荷性能を向上させることができます。

本工法の施工は、既設舗装と床版コンクリート上面を 10 mm 程度切削して鋼繊維補強コンクリートを打設するため、交通規制が必要となります。鋼繊維補強コンクリートに使用するセメントの種類は、規制時間の制約により選

〔 現 況 〕 〔 床版上面増厚工法 〕 〔 鉄筋補強上面増厚工法 〕

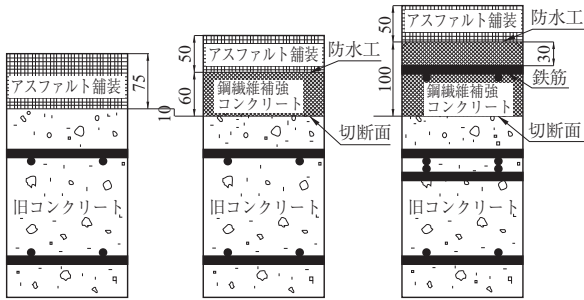


図 - 4 上面増厚工法概要図

定され、早期の交通解放が必要な場合は超速硬セメントが、7日間以上の連続規制が可能な場合は早強セメントが用いられます。また、材齢24時間で所定の圧縮強度となる超早強セメントが使用された例もあります。

コンクリートの打設は写真 - 8に示すように、締固め能力の確認された増厚専用コンクリートフィニッシャにより行われます。コンクリートフィニッシャの締固めエネルギーにより既設床版と増厚コンクリートを付着させる接合方法が標準となっています。しかし、施工10年程度の既設床版と増厚コンクリートの界面にはく離損傷が生じた事例もあり、最近では界面に高耐久型エポキシ樹脂系接着剤を塗布して接着効果を高めた方法も開発されています⁷⁾。

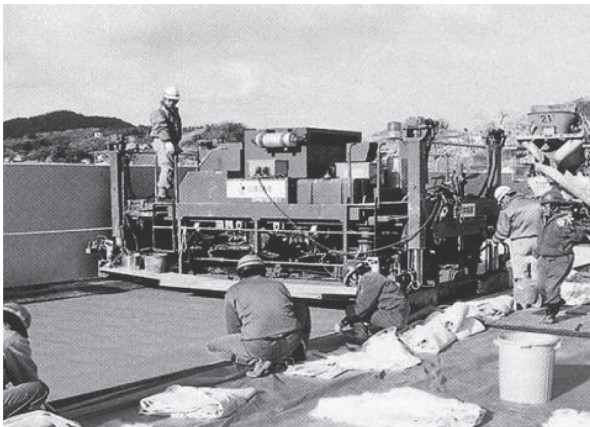


写真 - 8 鋼繊維補強コンクリート施工状況

2.6 下面増厚工法¹⁾

下面増厚工法は既設床版下面に所定量の補強筋を配置し、付着性の高いモルタルを左官仕上げもしくは吹付け施工することにより一体化し曲げ耐力の向上を図る工法です。本工法はモルタルの高い付着性能により既設床版と下面増厚部に合成機能を発揮させる工法で、床版の鉄筋応力度やたわみ量を低減させ疲労耐久性を向上させることができます。本工法の概要図を図 - 5に示します。

本工法は主に床版の曲げ補強を目的としており、増厚材料には付着性に優れたポリマーセメントモルタルあるいは超速硬セメントモルタルが用いられます。ポリマーセメントモルタルは中性化進行速度が一般のコンクリートと比較して遅く、凍結融解作用などの外的環境に対して耐久性が

高いことから、補強鋼材のかぶり厚さは耐久性から定まる値として10mm以上もしくは鉄筋径以上とし、一般のコンクリートのかぶり厚さより薄い構造となっています。

ポリマーセメントモルタルによる下面増厚工法は、左官仕上げによる人力施工が中心でしたが、近年では圧縮空気によってセメントモルタルを既設コンクリート面に施工する吹付け工法の開発が進み、施工性・経済性ともに改善されています。吹付け工法には乾式吹付け工法と湿式吹付け工法があり、それぞれの工法を比較したものを表 - 2に示します。乾式吹付け工法は、施工面積が大きく、施工空間が広く、断面厚さが厚い場合に適用され、湿式吹付け工法は、比較的施工面積が小さく、吹付け厚さが薄い場合に適用されます。可使時間、仕上げ可能時間、粉塵およびはねかえりなどの施工性も考慮して、適切な工法を選定する必要があります。

補強材は、鉄筋またはFRPグリッドが使用されます。鉄筋は「JIS G 3112 鉄筋コンクリート用棒鋼」に適合するものが用いられ、過去の使用実績では、D6～D19の異形鉄筋が使用されています。FRPグリッドは、炭素繊維を樹脂系接着剤を含浸させながら連続的に格子などの形状に成形されたものが使用されます。

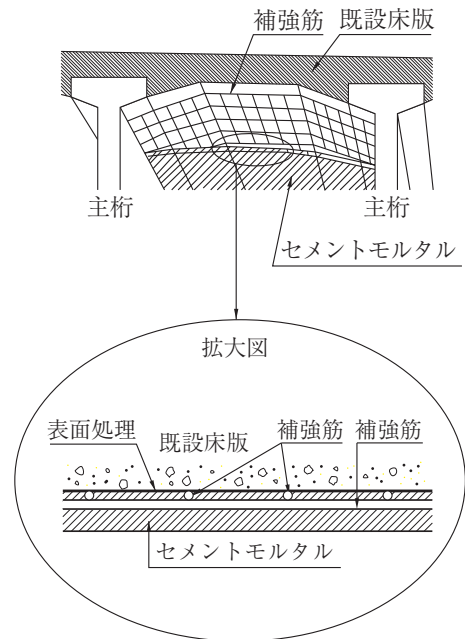


図 - 5 下面増厚工法概要図

表 - 2 吹付け工法の比較

吹付け方式	乾式吹付け	湿式吹付け
吹付け能力	1.0 m ³ /h 程度	0.5 m ³ /h 程度
1層の施工厚	2～10 cm 程度	2～3 cm 程度
使用セメント	超速硬セメント	ポルトランドセメント
水量管理	ノズル	練混ぜ時
積層時間間隔	数分～1日	3h～1日
繊維の混入	鋼・有機系	6～12 mmの有機系
圧送距離	～500 m	～50 m
粉塵、はねかえり	比較的多い	比較的少ない
中性化・塩分浸透・凍結融解	普通モルタルと同程度	普通モルタルより優れている

写真 - 9 にポリマーセメントモルタルの吹付け状況を示します。



写真 - 9 ポリマーセメントモルタル吹付け状況

2.7 床版取替え工法

床版取替え工法は、既設鋼道路橋の老朽化した RC 床版を撤去し、プレキャスト PC 床版に更新する工法です。長年重交通下で供用されてきた高速道路や主要道路の既設 RC 床版は輪荷重の繰返し作用によりひび割れや陥没が生じる疲労損傷が生じています。これに加えて、近年の凍結防止剤散布量の増加や水分浸入の影響により劣化が促進され抜本的な対策が必要になっています。この対策として、耐久性・耐荷性に優れた PC 床版に更新する本方法が採用されています。

本工法の施工は、老朽化した RC 床版を橋軸方向に 2 m 程度に切断分割し撤去したのちに、プレキャスト PC 床版を架設し既設鋼桁と接合します。既設 RC 床版の撤去状況を写真 - 10 に、プレキャスト PC 床版の架設状況を写真 - 11 に示します。

プレキャスト PC 床版は PC 工場で製造される PC 部材で、設計基準強度 50 N/mm² の高強度コンクリートが使用されることが多く、塩害地域や寒冷地に適用される場合は高炉スラグ微粉末やフライアッシュが混入されることもあります。床版横締め鋼材には PC 鋼より線が用いられ、プレテンション方式でプレストレスが導入されます。プレキャスト PC 床版の橋軸方向継手は、一般にループ継手などの RC 構造が多く採用されていますが、橋軸方向に PC 鋼材を配置してポストテンション方式でプレストレスを導入する事例もあります。

3. おわりに

コンクリート構造物は耐久性が高く施工性も良いため、高度経済成長期以降、多くの社会資本に採用されてきました。しかし、近年ではこれまでにストックされたコンクリート構造物の劣化や老朽化に伴い補修・補強対策が必要になっています。こうした補修・補強対策の実施に当たっては、劣化要因や要求性能、施工条件などを考慮して、適切な対策を選定する必要があります。

第 10 回講座では最新の情報も含めてコンクリート構造物の補強工法に用いられる材料を中心に概説しました。そ



写真 - 10 既設 RC 床版の撤去状況



写真 - 11 プレキャスト PC 床版の架設状況

それぞれの補強工法の適用にあたっては、工法・材料の特徴や性能をよく理解するとともに、施工時間、期間や施工空間、気象条件などの制約条件も考慮して、もっとも効果の高い工法・材料を選定することが必要です。本稿が今後の実務の参考になれば幸いです。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会:コンクリート構造診断技術, 2017.4
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会:外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル(案)[改訂版], 2007.4
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会:外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強事例図集[第2版], 2007.4
- 4) 安森 浩, 濱田 謙, 小林 朗, 葛目和弘:コンクリート構造物の炭素繊維プレート緊張材による補強と適用, コンクリート工学, Vol.44, No.10, 2006.10
- 5) 山海堂:現場技術者のための道路橋維持管理の実際(コンクリート橋), 2005.1
- 6) 熊谷祐司, 澤口勇人, 坪田和也, 坪田和也:アラミド繊維シートを用いた PC 斜張橋の耐震補強工事, 第 25 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, 2016.10
- 7) 伊藤清志, 児玉孝喜, 山下雄史, 一瀬八洋, 阿部 忠, SFRC 上面増厚補強工法の現状と長寿命化対策, 第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 2012.6

[2017年10月30日受付]