

## 第4回 PC橋の補強

講師：濱田 譲\*1, 小林 朗\*2

## 1. まえがき

1960年代から始まった高度経済成長期以来、社会資本としてとくに道路網の整備は重点的に行われ、プレストレストコンクリート技術の発展とともに、多数のPC橋が建設されています。しかし、わが国の経済情勢などを考えると、今後建設後50年を経過する既設PC橋等のコンクリート構造物を延命し、有効に長期間供用していくことが重要な課題となっています。そのためには、維持管理を行う専門技術者の育成等も含め、コンクリート構造物の維持管理システムを体系的に構築していく必要があります。

このような状況の中、2001年に土木学会よりコンクリート標準示方書〔維持管理編〕が発刊され、設計、施工から維持管理に至るまで、コンクリート構造物を一貫した考え方の下に取り扱うための枠組みが示されました。その中で、補強は、部材もしくは構造物の耐荷性や剛性などの力学的な性能（以下では、耐荷性能と総称する）を回復あるいは向上させることを目的とした重要な維持管理対策と位置づけられています。しかし、補強工法の選定手法や各補強工法の設計手法は必ずしも確立されているわけではありません。これは、各補強事例の補強理由や対象構造物の施工条件が多様で、それに対応するための補強工法も多様にならざるをえないためであると考えられます。

本文では、PC橋の損傷事例や各補強工法の設計・施工の現状の技術レベルに基づいて、PC橋（上部構造）の補強の現状について概説するものです。

## 2. PC橋の補強理由

コンクリート構造物の補強は、図-1に示すように、一般には①耐荷性能が経時的に低下した場合、および②耐荷性能に関する要求が変更された場合に実施されます<sup>2)</sup>。

## 2.1 耐荷性能の経時的な低下

荷重作用・環境作用による構造物の耐荷性能の経時的な低下のために、検討時点において構造物に要求される性能を満足しなくなっている場合は、補強を実施する必要があります。また、要求される性能を将来満足しなくなることが予想される場合は、予防保全対策として補強を実施することが推奨されます。目標とする補強レベルには、当初設計よりも高い性能を付与する場合、同じレベルに回復させ

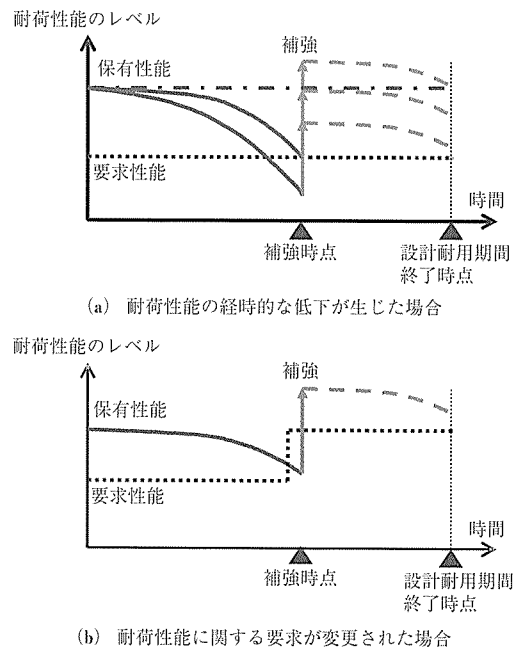


図-1 補強による耐荷性能向上の概念

る場合、当初設計よりも低い要求される性能を満足するレベルの性能を付与する場合の3レベルがあります。

荷重作用による耐荷性能の低下の具体例として、橋梁上部構造を対象とした場合には、RC床版の疲労による劣化を挙げることができます。RC床版の疲労劣化の主要因は、過積載車両の走行であると考えられるが、表-1に示す要因が複合して劣化は急激に進行します。疲労劣化が進行すると、ひび割れが極度に発達して床版が局部的に陥没することが予想されるので、これを防止するために補強を実施する必要があります。鋼橋のRC床版の疲労劣化事例と比較して、PC橋のRC床版またはPC床版の劣化事例は、比較的少ないように思われます。しかし、変動の激しい輪荷重が直接作用することによって生じる床版の疲労劣化は、今後PC橋において増加する補強理由の一つであると考えられます。なお、PC橋では、斜張橋の斜材や外ケーブルなどにおいて疲労劣化が生じ耐荷性能が低下することも予想されるので注意する必要があります。

一方、環境作用による耐荷性能の低下の代表例として、塩害による劣化を挙げることができます。塩害とは、コン

\*1 Yuzuru HAMADA：ドービー建設工業(株) 技術センター長 博士(工学)

\*2 Akira KOBAYASHI：日鉄コンボジット(株) 技術部 担当部長

表 - 1 陥没に至った道路橋の鉄筋コンクリート床版の疲労劣化の要因<sup>1)</sup>

床版疲労の原因		解 説
供用条件	過積載車両の走行	昭和30年代の高度経済成長に伴う交通量の飛躍的な増大と、積載制限を超過する車両の影響を受けた。
設計	薄い床版厚	昭和39年以前の道路橋示方書により設計施工された鉄筋コンクリート床版は、床版厚が180mm程度と薄く、このため大型車両の走行により曲げひび割れが発生しやすかった。
	主桁拘束の影響	鉄筋コンクリート床版は、合成桁はジベルにより、非合成桁はスラブ止めにより固定され主桁と拘束され、乾燥収縮によるひび割れが潜在的に発生しやすかった
	主鉄筋に比べて少ない配力筋	昭和39年以前の道路橋示方書により設計施工された鉄筋コンクリート床版は、配力筋が主鉄筋の25%程度であり、主筋方向（橋軸直角方向）の曲げひび割れが発生しやすかった。
施工	コンクリートの品質	疲労損傷した床版の施工は、コンクリート用の粗骨材が砂利から碎石へ移行した時期に一致し、ワーカビリティを得るために練混ぜ水の割増しとセメントの増量を必要としたことから、結果としてモルタル分の多いコンクリートとなり、乾燥収縮によるひび割れを生じやすかった。
環境	雨水の浸透	乾燥収縮荷重作用により発生したひび割れが貫通すると、路面からの浸透水によりひび割れ面の摩耗が促進するとともに、鉄筋コンクリート床版上縁の圧縮側コンクリートを分離させる骨材化現象をもたらすことから、さらに疲労が促進された。

表 - 2 構造物の塩害劣化過程と標準的な工法<sup>1)</sup>

構造物の塩害劣化過程	点検強化	補 修	補 強	修 景	使用性回復	機能性向上	供用制限	解体・撤去
潜伏期	○	(○)						
進展期	○	○						
加速期前期	◎	◎		◎				
加速期後期	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	
劣化期		○	◎	○	◎	◎	◎	◎

◎：推奨される標準的な対策，○：場合によっては考えられる対策，(○)：予防的に実施される対策

クリート中の鋼材の腐食が塩化物イオンの存在により促進され、構造物の耐荷性能などが低下する現象です。コンクリート構造物の劣化機構には、塩害のほかにも、中性化、凍害およびアルカリ骨材反応等があります。しかし、「道路橋塩害対策指針(案)・同解説」(日本道路協会)が1984年に制定される前に建設された沿岸部のPC橋で飛来塩分による塩害劣化が顕在化していることが知られており、塩害は最も留意すべき劣化機構であるといえます。

塩害による劣化が顕在化しているPC橋では、点検等を実施して、PC鋼材の腐食状況を確認することが重要となります。これは、PC鋼材の腐食状況と構造物の諸性能の関係を定量的に把握できていない現状においては、どのような劣化機構であっても、PC鋼材の腐食発生限界状態を規準として維持管理対策を選定することになるためです。具体的には、腐食しているのはコンクリート表面部の鉄筋のみでPC鋼材は健全であることが確認された場合、この時点で塩化物イオンの除去および再侵入を防止するための補修や腐食した鉄筋に対する軽微な補強等を実施すれば、PC橋の耐荷性能は維持できると考えられます<sup>3)</sup>。しかし、PC鋼材が既に腐食している場合や、PC鋼材位置のコンクリートの塩化物イオン濃度が鋼材の腐食発生限界塩化物イオン濃度(1.2 kg/m<sup>3</sup>)以上である場合は、腐食が進行して将来PC鋼材が破断し耐荷性能が低下することが予想されます。したがって、腐食ひび割れが発生しPC鋼材の腐食速度が増大する加速期まで塩害劣化が進展しているPC橋では、表-2に示すように、腐食の進行を制御するための補修を実施するとともに、補強を実施して所定の耐荷性能を確保することが推奨されます。なお、劣化機構がどのようなものであってもすでにPC鋼材が破断しているPC橋では、残存耐力

を適切に評価し、速やかに供用制限や補強等の対策を実施しなければなりません。

## 2.2 耐荷性能に関する要求が変更された場合

設計荷重が変更されるなど、当初よりも高いレベルの耐荷性能を有していることが求められる場合は、補強を実施する必要があります。耐荷性能に関する要求が変更された場合の代表例として、車両総重量規制緩和および道路構造令による設計自動車荷重の変更や、死荷重の増加を挙げることができます。前者は、一般に「B活荷重補強」といわれるものです。また、後者の具体例としては、床版に増厚工法を適用した場合の主桁補強や、周辺環境に及ぼす騒音の影響を軽減するために既設PC橋に遮音壁を新たに設置した場合の床版もしくは主桁補強などがあります。

一方、橋梁全体を対象とした場合の具体例として、耐震補強を挙げることができます。一般には下部構造が対象となりますが、建設当時に比べて考慮すべき地震力が大きくなった場合は、補強を実施する必要があります。本文ではPC橋を対象としているため、耐震補強の現状に関しては他の文献を参照願います。

## 3. 補強工法


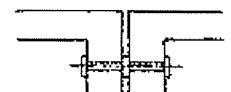
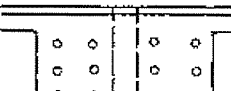
### 3.1 PC橋に適用される補強工法

PC橋に適用されている補強工法を分類すると、表-3のようになります。補強工法を選定する場合は、補強効果、施工性、補強工事の際に周辺環境に与える影響および補強後の維持管理の容易さなどとともに、経済性を考慮する必要があります。ここでは、表-3の内、部材の補強と構造体としての補強について説明します。一般的なコンクリート部材の補強には、①コンクリート部材の交換、②コンク

表 - 3 PC 橋に適用される補強工法の分類<sup>3)</sup>

補強目的	分類	対策の概要	工法名
部材の補強	接着	・既設の床板や主桁の鋼材または連続繊維シートを配置し、既設部材との一体化を図り合成構造とすることにより耐荷力を向上させる工法	・鋼板接着工法 ・連続繊維シート接着工法
	増厚	・既設部材の上面、下面、に鉄筋などを配置し、コンクリートやモルタルを打設することによって抵抗断面を増加させ、耐荷力を確保する方法	・上面増厚工法 ・下面増厚工法
	プレストレス導入	・既設部材の外側に PC 鋼材を配置して、プレストレスを導入することにより、耐荷力を向上させる工法	・外ケーブル工法
構造体としての補強	主桁の連結	・隣接する主桁、端支点部の床板や横桁部を連結することで、外力を分散・減少させ、必要な耐荷力確保したり、耐震性の向上を図る工法	・主桁連続化工法
	支持	・既設支点の他に支持点を増設することによって、外力を分散、減少させ、必要な耐荷力を確保する工法	・支持点増設工法
支承の補強	支承取り替え	・主桁を仮受けし、既設支承を撤去した後に、新設支承を設置することによって、支承の機能や耐震性を向上させる工法	・支承取り換え工法
	支承の補強	・既設支承部材の補強や交換、あるいは落橋防止装置を増設することによって耐震性を向上させる工法	・支承補強工法
橋脚の補強	プレストレス導入	・既設橋脚を PC 鋼線で巻立てて、プレストレスを導入したり、壁式橋脚の壁厚方向にプレストレスを導入することによって、既設の橋脚の耐震性を向上させる工法	・PC 巻立て工法 ・壁式橋脚プレストレス導入工法

表 - 4 主桁連続化工法の連結構造

	連結概要	検討項目	摘要
タイプ I	連結部を RC 床板のみで接続 	・床板自重および活荷重による床板としたの曲げモーメント ・主桁のタワミ回転より派生する曲げモーメント ・ゴム支承の圧縮変形より派生する曲げモーメント	主桁の断面はすべての荷重に対して単純桁として設計 合成桁のように主桁が剛な断面の橋梁に適する。
タイプ II	支点横桁相互を PC 鋼材により接続 	・径間連結水平力 ・主桁のタワミ回転変位に対する連結ゴム支承の設計	主桁の断面力はすべての荷重に対して単純桁として設計
連結桁方式	RC 構造の連結横桁により剛結 	・連結部における連続桁としての中間支点上の曲げモーメント	主桁の断面力は連結後は連続桁として設計

リート断面の増加、③部材の追加、④支持点の増加、⑤補強部材の追加および⑥プレストレスの導入などが適用されているが、PC 橋の主桁補強には、やはりプレストレス導入工法がよく用いられています。また、床版補強には、接着工法などが頻繁に適用されているようです。次項では、PC 橋に比較的頻繁に適用されているプレストレス導入工法および鋼板接着工法、連続繊維シート接着工法について、解説することとします。

一方、PC 橋では主桁連続化工法などの構造体としての補強、すなわち PC 橋の機能を向上させる方法も適用されています。主桁連続化工法とは、PC 単純 T 桁などの主桁・端部横桁あるいは床版を連結し、隣接する主桁の相対変位を部分的に拘束がすることにより伸縮装置を撤去して、路面の連続化を図る工法です。伸縮装置の撤去にともない、車両走行時の騒音問題の軽減および車両走行性の改善を図ることができ、伸縮装置の維持管理費を削除することもできます。また、下部構造の耐震補強を平行して実施すると、橋梁全体の耐震性を向上させることができます。表 - 4 に、

連結構造の例を示します。最近では、外ケーブルを連結部に配置して、主桁連結部を PC 構造として連続化を図る工法も適用されています。

### 3.2 プレストレス導入工法

プレストレス導入工法は、既設コンクリート部材にプレストレスを導入し、部材の応力状態を改善するとともに、耐荷性能の回復もしくは向上を図る工法です。内ケーブルを用いてプレストレスを導入した補強事例もあるが、一般には、外ケーブル工法が用いられています。

外ケーブル工法では、写真 - 1 に示すように、既設コンクリート部材に定着部材および偏向部材を設置して外ケーブルを新たに配置し、補強を行います。補強の場合、限られた空間に外ケーブルを配置する必要があるため、比較的容量の大きい PC ケーブルを用いることが多いです。定着部材は、一般には緊結用 PC 鋼材を用いて既設部材と一体化されますが、外ケーブルの緊張力を既設部材に伝達する非常に重要な部材です。したがって、外ケーブルの定着に伴う支圧、割裂、背面引張等の局部応力や局部的な曲げ・

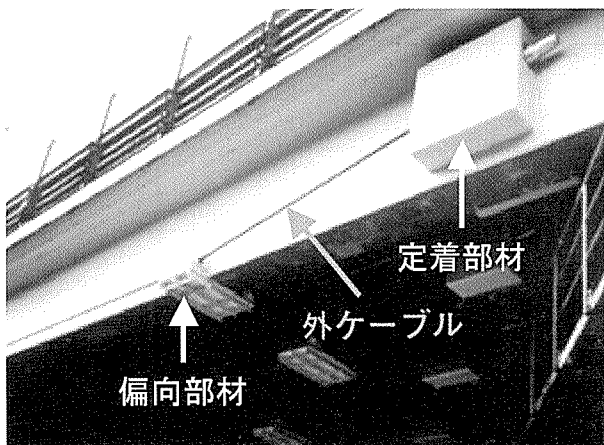


写真-1 外ケーブル補強

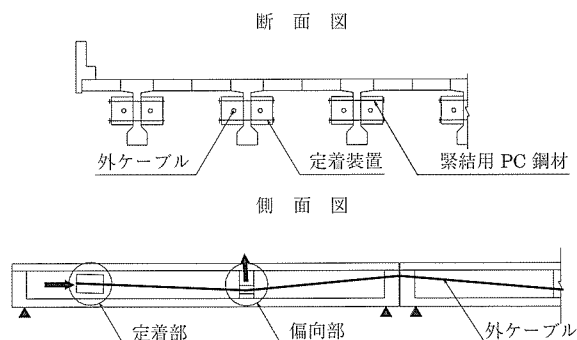


図-2 PC単純T桁の連続化に適用された例

せん断に対し、安全でなければなりません。また、既設部材には内ケーブルや鉄筋が多数配置されているので、それらに留意して定着部材の配置位置を決定する必要があります。一方、偏向部材は、プレストレスの偏向力（鉛直分力）を既設部材に伝達するとともに、外ケーブルの配置形状を維持することのできる構造でなければなりません。したがって、隔壁や横桁など、既設部材の剛性の大きい位置に配置するのが望ましいです。

図-2に、PC単純T桁の連続化に外ケーブル工法が適用された例を示します。この例からも分かるように、外ケーブル工法は、部材の局所的な補強よりも、構造全体を対象とした補強または機能性向上対策に適しているといえます。加えて、プレストレスの導入によって生じる不静定断面力を有効に利用することにより、活荷重のみならず死荷重によって生じる断面力を改変することができます。また、RC橋に適用した場合は、死荷重によって生じているひび割れを抑制することもでき、耐久性を向上することができます。外ケーブル工法の特徴をまとめると、以下のようになります。

・設計上

- ① 補強効果が力学的に明確。
- ② 外ケーブルの鉛直分力を考慮することにより、曲げ補強だけでなく、せん断補強を行うこともできる。
- ③ コンクリート強度が不足している場合には、適用できない場合がある。

・施工上

- ① 路面高さを変更する必要がない。
- ② 一般には、桁下空間の作業で施工を行うことができるので、交通規制を必要としない。
- ③ 補強後の維持管理が比較的容易。

最近では外ケーブル工法の設計・施工マニュアルが整備されているので、実際の設計・施工計画にあたっては、たとえば「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）」（プレストレスト・コンクリート建設業協会）<sup>4)</sup>を参考にすると良いと思います。また、同協会から発行されている「外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強実例図集」<sup>5)</sup>には、多数の補強事例が掲載されているので、参考にして下さい。

なお、外ケーブル工法以外のプレストレス導入工法が最近開発されています。その一例として、ブルトレーション法で製造された炭素繊維プレートを緊張・定着してポストテンションT桁を補強した例を写真-2に示します<sup>6)</sup>。この工法は、外ケーブル工法とは異なり定着部材を設置する必要がないので、比較的簡単に施工を行うことができます。また、フラットなコンクリート面に適用することにより、補強後の景観に与える影響を軽減することができます。



写真-2 炭素繊維プレートを用いてプレストレスを導入した補強例

3.3 鋼板接着工法

鋼板接着工法は、鋼板をコンクリート構造物の引張応力作用面に接着剤を用いて一体化させて補強する工法です。橋脚などの柱部材の外周に鋼板を巻き立てて、せん断耐力やじん性を向上させる鋼板巻立て工法も広く用いられていますが、ここでは曲げ補強を目的とした鋼板接着工法について記述します。

鋼板接着工法の標準的な断面を図-3に示します。鋼板を床版コンクリート下面からスペーサーを介して5mm程度の間を空けてアンカーボルトで固定し、鋼板の外周部およびアンカーボルトの取り付け部を樹脂でシールした後、この空隙にエポキシ樹脂を低圧注入して鋼板とコンクリートを一体化させます。既設コンクリート部材と一体化した鋼板は、曲げモーメントに対して最外縁で引張力を負担するので高い曲げ補強効果を発揮します。また、注入された

樹脂がひび割れ面に浸透してコンクリートを一体化するので、ひび割れの動きを抑制する効果も期待できます。橋梁の下面からの補強工法であり、施工中も橋面上の交通を遮断する必要がありません。

一方この工法は、コンクリートと鋼板が接着剤を介して一体化して初めて補強効果が期待できる工法であり、既設コンクリートの接着面が劣化していたり、コンクリート強度が著しく不足している場合には適用することは適切ではありません。接着面のレイトランスの除去や過度のひび割れに対してはひび割れ注入を行うなど、適切な事前処理を行った上で適用する必要があります。また、橋面から浸透した水が床版下面で滞水し、床版コンクリートの劣化を促進したり、鋼板の接着面が腐食し、はく離の原因となることもあるため、橋面防水などを併用するのがよいでしょう。鋼板の表面は、定期的な塗装の塗替えが必要です。

鋼板は、作業性を考慮して分割して現場に搬入され、躯体コンクリートに取り付けられた後、継手により接続されます。鋼板の継手には、添接板を用いた接着継手が広く用いられています。鋼板が厚い場合には、現場溶接継手が用

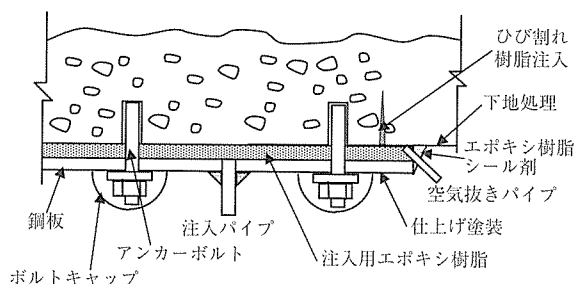


図 - 3 鋼板接着工法概念図

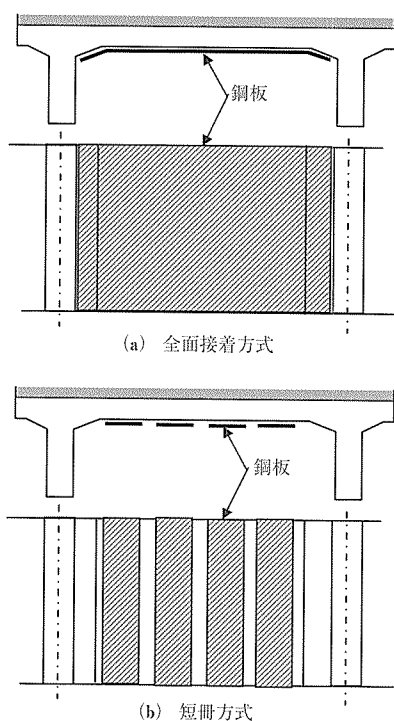


図 - 4 鋼板の接着範囲

いられることもあります。樹脂の注入時の施工性を考慮し最小厚として 4.5 mm 以上の鋼板が用いられるのが一般的です。桁の補強などでは設計計算により必要に応じて厚さ 6 mm や 9 mm などの鋼板が用いられることもありますが、最大厚さは作業性を考慮して 12 mm 程度となります。

床版の補強では、図 - 4 に示すように床版全面を覆う方法と、配力筋不足に対応して橋軸方向に広幅鋼板を短冊状に接着する工法もありますが、近年は前者の全面鋼板接着工法が採用されることが多いようです。なお全面鋼板接着工法は、ハンチ角部での応力集中による損傷を避けるため、鋼板をハンチ部まで伸ばして接着することが推奨されています。

鋼板接着工法による補強の設計では、まず補強前にすでに作用している死荷重に対しては、鋼板剛性を考慮しない状態でコンクリートおよび鉄筋の応力度を算出します。つぎに、補強後に作用する活荷重に対しては、既設コンクリート断面と鋼板が一体化した断面で鋼板を鉄筋換算してコンクリート、鉄筋、鋼板の応力度を算出し、死荷重による応力度と合計して許容応力度以下となるようにします。鋼板は、SS 400 材を使用し、許容応力度を 80 N/mm<sup>2</sup> とすることが一般的です。標準的な鉄筋コンクリート床版に対しては、最小厚さである 4.5 mm の鋼板を接着すれば十分な応力度の低減が見込めることから、応力度の照査を省略して鋼板厚を 4.5 mm とすることもあります<sup>7)</sup>。

### 3.4 連続繊維シート接着工法

連続繊維シート接着工法は、現場で連続繊維シートに樹脂を含浸させながらコンクリート表面に貼り付け、連続繊維シートと樹脂で形成された FRP をコンクリート部材と一体化して補強する工法です。連続繊維シートは、腐食の生じない材料で耐久性に優れ、鋼材のように定期的な塗装塗替えの必要がなく維持管理性に優れていること、使用材料が軽量で柔軟である、施工に重機を必要としないなど施工性に優れていることから、近年橋梁の補強にも広く利用されるようになってきました。

#### (1) 使用材料

連続繊維シートには、連続繊維を一方向に配列した一方向シートと二方向シートがありますが、補強用には一般に一方向シートが用いられています。

現在市販されている一方向性連続繊維シートには、炭素繊維シートとアラミド繊維シートがあり、その代表例を表 - 5 に示します。連続繊維シートの試験方法は、「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」(土木学会)にまとめられています<sup>8)</sup>。炭素繊維シートは、高強度型、中弾性型、高弾性型の 3 種類に分類されます。高強度型炭素繊維シートは、引張強度が現在市販されている連続繊維シートの中でもっとも高いのが特徴です。その高い強度を生かして RC 橋脚の耐震補強にもっとも多く使われておりますが、床版やトンネル覆工コンクリートの補強や補修などにも広く使われるほか、梁部材の終局曲げ耐力の向上やせん断補強にも適しています。高弾性型炭素繊維シートは、ヤング係数が高く、強度が高強度型より小さいのが特徴です。中弾性型炭素繊維シートは高強度型と高弾

性型の中間の性質をもっています。これら高弾性型、中弾性型の炭素繊維シートは、鋼材よりも高いヤング係数をもつことから、繰り返し荷重によるコンクリートのひび割れ開閉の拘束、疲労限界状態での既設鋼材およびコンクリートの応力度低減など小さなひずみに対しても補強効果が高く、道路橋のRC床版や、桁の曲げ補強などに広く利用されています。アラミド繊維シートは、繊維の種類によって単重合型アラミド繊維シート(アラミド1繊維シート)と共重合型アラミド繊維シート(アラミド2繊維シート)の二種類に大別できます。アラミド繊維シートは、炭素繊維シートに比べるとヤング係数が低く使用限界状態や疲労限界状態に対する補強では、必要な繊維目付量や積層数が多くなるため橋梁上部工での適用例は、炭素繊維シートにくらべて少ないようです。

連続繊維シート接着工法の断面構造の一例を図-5に示します。本工法におけるコンクリート躯体表面処理は、基本的に鋼板接着工法と同様ですが、加えて、表面の凹凸をパテ材で平坦にする必要があります。また、含浸接着剤や

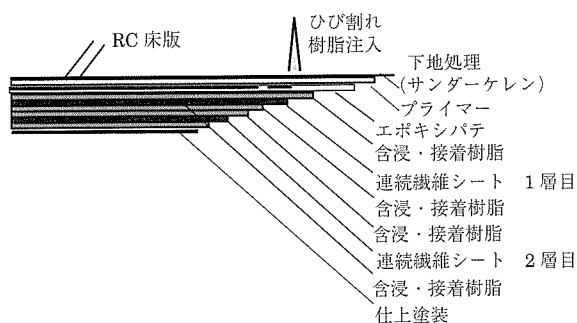


図-5 連続繊維シート接着工法の標準断面図

プライマー、エポキシ樹脂などは、連続繊維シート専用のものを用いる必要があります。これらの樹脂材料は、2液混合常温硬化型のエポキシ樹脂が一般的です。寒冷地での冬季施工や急速施工用に、低温硬化が可能で硬化時間の短いMMA(メチルメタクリレート)樹脂などアクリル系の連続繊維シート用樹脂材料も開発されている。現場の環境、施工条件、気候に応じて適切な樹脂材料を選定する必要があります。なお、鋼板接着工法と同様に橋面上の交通を遮断することなく施工することができます。

(2) PC 桁の補強設計

PC 桁の補強設計法に関しては、「炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計施工指針(案)」<sup>9)</sup>にまとめられているので参照願います。曲げ補強に関しては、鋼板接着と同様に炭素繊維シートが引張縁で既設コンクリート断面と完全合成されているものとして、平面保持を仮定して応力度および耐力を算定することができます。炭素繊維シートが鋼材のように降伏点をもたず、弾性的に変形した後、脆性的に破断すること、桁の破壊モードとして、通常の鋼材の降伏後のコンクリートの曲げ圧壊以外に、炭素繊維シートの破断、炭素繊維シートとコンクリート界面のはく離破壊があり、破壊モードを特定する必要があることに留意しなければなりません。所要の耐力を得られるように、桁下面の軸方向に接着する炭素繊維シートの種類と積層数を設計計算により算出し、はく離破壊の生じないように十分な定着長をとって補強範囲を決定します。図-6に示すように部材軸方向の曲げ補強炭素繊維シートの外側に部材軸直角方向に定着用炭素繊維シートをU字型に巻きつけます。また炭素繊維シートの継手を設ける場合は、200mm以上の継手長を確保します。

表-5 一方向連続繊維シートの代表例

種類	繊維目付量	設計厚さ	引張強度	ヤング係数	引張耐力	引張剛性
	g/m <sup>2</sup>	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/m	kN/mm
高強度型炭素繊維シート	200	0.111	3 400	245 000	380	27
	300	0.167	3 400	245 000	570	41
	400	0.222	3 400	245 000	760	55
	450	0.250	3 400	245 000	850	61
	600	0.333	3 400	245 000	1 130	82
中弾性型炭素繊維シート	300	0.165	2 900	390 000	480	64
	300	0.163	2 400	440 000	390	71
高弾性型炭素繊維シート	300	0.143	1 900	540 000	270	77
	300	0.143	1 900	640 000	270	92
床版補強用炭素繊維シート	380	0.209	2 900	390 000	610	82
	340	0.185	2 400	440 000	440	82
	270	0.128	1 900	640 000	240	82
床版格子補強用中弾性型炭素繊維シート	450	0.247	2 900	390 000	720	96
	400	0.217	2 400	440 000	520	96
アラミド1繊維シート	280	0.193	2 060	118 000	390	23
	415	0.286	2 060	118 000	590	34
	623	0.430	2 060	118 000	880	51
	830	0.572	2 060	118 000	1 180	68
アラミド2繊維シート	235	0.169	2 350	78 400	390	13
	350	0.252	2 350	78 400	590	20
	525	0.378	2 350	78 400	880	30
	700	0.504	2 350	78 400	1 180	40

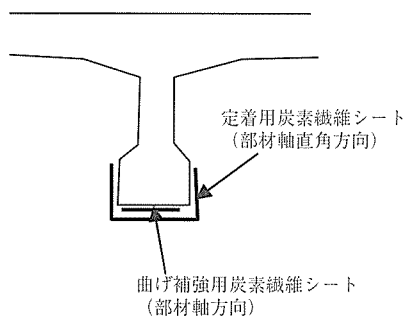


図 - 6 曲げおよび定着用炭素繊維シートの貼り付け方<sup>9)</sup>

桁のせん断補強では、設計せん断力に対してコンクリートとせん断補強鋼材が受けもつせん断力で不足するせん断力を炭素繊維シートが受けもつことができるように、炭素繊維シートの種類、積層数を算定します。せん断補強には、高強度型炭素繊維シートが用いられるのが一般的です。桁上部が床版に接続されているので橋脚の柱などのように炭素繊維シートを部材全周に閉鎖型に巻きつけることができません。そこで、ウェブ面からはく離を防止するために、図 - 7 に示すように原則として鋼板とアンカーボルトを使用した機械的定着を併用します。桁下端の角部は、半径 30 mm 以上の面取りを設けます。

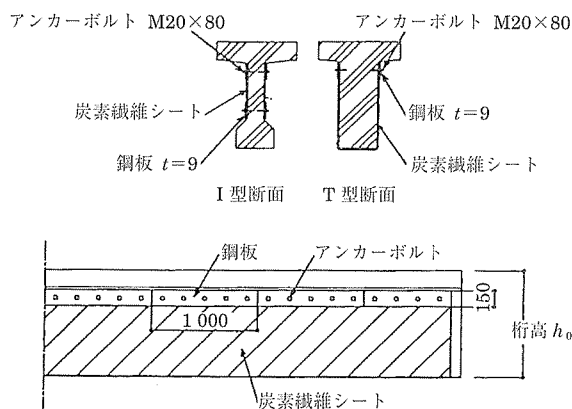


図 - 7 炭素繊維シートの機械的定着の例<sup>9)</sup>

### (3) RC 床版の補強設計

RC 床版の補強の設計では、許容応力度法に準じた設計計算を行う場合と輪荷重走行試験に基づき補強仕様を決定する方法があります。許容応力度法に準じた設計計算では、設計荷重に対して炭素繊維シートと既設床版の完全合成断面としてコンクリートと鉄筋の応力度を算定し、それぞれ許容応力度以下となるように炭素繊維シートの種類と積層数を決定します。この場合、死荷重に対しては補強前の断面で、活荷重に対しては補強後の炭素繊維シートを考慮した断面で応力度を算定するのは鋼板接着と同様です。応力度の超過が大きい場合には、ヤング係数の高い炭素繊維シートを使用の方が必要積層数が少なくなることもあるので、設計計算により経済性も考慮して適切なシートを選定します。

RC 床版は、繰返し作用する輪荷重により、一方向ひび

割れの発生、二方向ひび割れへの進展、ひび割れの細密化、貫通ひび割れの発生、ひび割れのすり磨きという過程を経て最終的に押抜きせん断破壊に至ります。このような複雑な劣化プロセスをたどるので単純な曲げに対する応力度の照査のみでは、RC 床版の疲労耐久性を評価することはできません。そこで、この床版の劣化損傷メカニズムを再現できる輪荷重走行試験機が開発され、床版の疲労耐久性が評価されるようになりました。炭素繊維シート接着工法による補強に対しても、損傷状況や床版の構造諸元に応じて、床版の損傷メカニズムを考慮して輪荷重走行などの適切な方法によりその補強効果を評価することが望ましいです。「炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計施工指針(案)」<sup>9)</sup>では、土木研究所で行われた輪荷重走行試験結果をもとに、昭和 31 年道示以降の設計基準に準拠して TL - 20 荷重で設計製作された RC 床版に対して標準補強量を示しています。繊維目付量 300 g/m<sup>2</sup> の高強度型炭素繊維シートを主筋方向、配力筋方向各 2 層接着することで、補強後の床版は十分な疲労耐久性を確保することが可能であるとして、標準補強量としています。また、中高弾性型炭素繊維シートなど他の種類の炭素繊維シートを使用する場合は、炭素繊維シートの単位幅あたりの引張剛性(厚さ×ヤング係数)が標準補強量と同等となるように、すなわち炭素繊維シートの引張剛性が 82 kN/mm 程度となるように主筋方向、配力筋方向に炭素繊維シートを貼り付けるのが良いとしています。近年では、表 - 5 に示すように 1 層で炭素繊維シートの単位幅あたりの引張剛性が 82 kN/mm となる床版補強用シートが開発され市販されています。また炭素繊維シート接着工法は、基本的に曲げに対して補強効果があるが、炭素繊維シートが薄く、ほとんど面外せん断剛性をもたないために、床版コンクリートがブロック化して連続性を失いせん断抵抗を失った段階(建設省土木研究所資料 橋梁点検要領(案)<sup>10)</sup>に示される損傷度Ⅱの後期)では補強効果が得られないと考えられます。このため、このような損傷度に達する前の床版に適用するのを原則とします。過度に損傷が進行した床版に対しては、上面増厚工法など他の補強工法あるいは、上面増厚工法との併用などを検討する必要があります。床版上面からの浸透水は、コンクリートのひび割れ面のすり磨きや床版上面のコンクリートの砂利化など床版の損傷を著しく促進するので橋面防水工を併せて行うのがよいと考えます。

炭素繊維シート接着工法による補強では、鋼板接着工法と同様に床版下面全面に炭素繊維シートを接着するのが一般的でありました。全面接着工法では、床版下面からコンクリートの劣化状況を観察することができない、橋面からの浸透水が床版下面に滞水するなどの課題がありました。そこで図 - 8 に示すように炭素繊維シートを間隔を空けて格子状に接着し、格子の窓部(炭素繊維シートの接着されていない部分)を観察窓および排水部とする方法が考案され、近年、炭素繊維シートを格子接着した RC 床版の輪荷重走行試験が行われました<sup>11)</sup>。その結果、格子接着した場合でも全面接着と同等の補強効果が得られることが確認さ

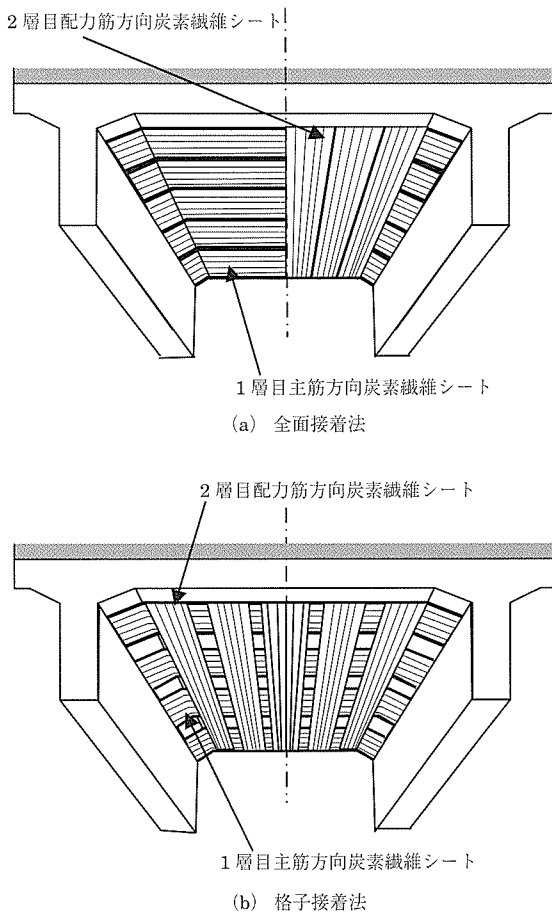


図 - 8 炭素繊維シートの接着方法

れ、幅 25 cm の中弾性型炭素繊維シートを 10 cm または 15 cm の間隔を空けて接着する格子接着法が実用化されています。

#### 4. あとがき

本文は、阪神タイガースが 18 年ぶりにセ・リーグの覇者となった歴史に残る一日、すなわち 9 月 15 日に執筆しています。パソコンの画面に向かいつつ横目でテレビを見てみると、阪神タイガースが優勝したことをなんとか記録したいという衝動に駆られてしまい、強引であるとは思いましたが、阪神タイガースの優勝と補強を関連付けてあとがきを書くことにしました。少しお付き合い頂ければ幸いです。

今回阪神タイガースが優勝できた要因の一つに、星野監督の戦略に基づいて補強された選手が、予定どおり活躍したことを挙げるができます。今シーズンより縦縞のユニホームを着ることになった伊良部選手や金本選手が、多少の波はあったとしてもシーズンを通して投打の軸となっ

て活躍しなければ、阪神タイガースは優勝していなかったかもしれません。すなわち、「適切な戦略」、「それに基づいた補強」、そして「補強された選手の維持管理（体調管理）」の 3 つの要素が上手くかみ合わないと、優勝という大きな目標は達成されなかったといっても過言ではないです。

これと同様に、コンクリート構造物を長期間供用するという目標を達成するためには、上記の 3 つの要素を上手くかみ合わせる事が重要となります。本来、コンクリート構造物は、適切な戦略に基づいて維持管理されるべきです<sup>12)</sup>。そのためには、適切な戦略、言い換えれば構造物の時間的なシナリオに基づいて戦略的に補強を実施しなければなりません。また、ライフサイクルコストを一つの指標として補強工法を選定することが重要であり、それらの評価技術を成熟させていく必要があります。さらには、すでに補強された構造物を継続的に検査し、選定された補強工法が所定の性能を発揮していることを確認するとともに、各工法の維持管理のポイントを明らかにしていくことが今後の課題となる。本文は、PC 橋の補強の現状を概説したものである。今後も、維持管理の分野において、活発に技術開発が行われることを期待するものです。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2001 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2001.
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針(案)，コンクリートライブラリー 95，1999.
- 3) プレストレストコンクリート技術協会：PC 橋の耐久性向上マニュアル，第二部 維持管理編，2000.
- 4) 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)，1998.
- 5) 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実例図集，2001.
- 6) 長谷川剛，濱口竜雅，江本雅樹，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（登載決定），2003.
- 7) 日本道路公団：設計要領第 2 集，1997
- 8) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.
- 9) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室，炭素繊維補修・補強工法技術研究会：コンクリート構造物の補修・補強に関する共同研究報告書（Ⅲ）－炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)－，1999
- 10) 建設省土木研究所：橋梁点検要領(案)，土木研究所資料第 2651，1988
- 11) 岡田昌澄，大西弘志，松井繁之，小林 朗：格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果，第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2003.
- 12) 宮川豊章：土木コンクリート構造物のためのシナリオ，セメント・コンクリート，No.632，pp.20～26，1999.

【2003 年 10 月 14 日受付】