

PC 構造物の維持保全について

— PC 橋の更なる予防保全に向けて —

藤原 保久*¹・徳光 卓*²・北野 勇一*³・毛利 忠弘*⁴

PC 構造物は高強度コンクリートを使用し、PC 鋼材によってプレストレスを導入してひび割れを抑制するため、耐久性に優れた構造物である。しかしながら、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによって、PC 鋼材が腐食・破断すると耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。したがって、既設 PC 構造物の維持保全においては、PC 鋼材の腐食に至る前に対策を実施する予防保全が重要である。ここでは、PC 鋼材に着目した維持保全の基本的な考え方や計画、対策事例などについて記述した。

キーワード：PC 鋼材、予防保全、塩害、グラウト、外ケーブル

1. はじめに

わが国の社会インフラは高度成長期に大量に建設され、近年急速に老朽化が進行している。重要な交通インフラを支える橋梁構造物の老朽化対策は喫緊の課題であり、すでに橋梁長寿命化修繕計画や高速道路の大規模更新・修繕計画が策定され事業が進められている。プレストレスト・コンクリート建設業協会（以下 PC 建協と略す）では、このような社会情勢にいち早く対応し 1995 年より専門部会を立ち上げてプレストレストコンクリート（以下 PC と略す）構造物の維持管理に取り組んできた。

PC 橋は、高強度コンクリートを使用し、PC 鋼材の緊張力によってプレストレスを導入してひび割れを抑制するため、耐久性に優れた構造物である。しかし、飛来塩分や大量の凍結防止剤散布による塩害環境下において、PC 鋼材が腐食する事例も報告されている。PC 橋の耐荷力は PC 鋼材によるプレストレスによって支えられているため、PC 鋼材の腐食・損傷は橋梁全体の耐荷性能の低下を招くことになり、十分な注意が必要である。したがって、PC 橋の維持管理においては、PC 鋼材の腐食に至る前に対策を実施する予防保全を基本とすることが重要である。

このような観点のもと、PC 建協保全補修部会では 2010 年 3 月に PC 橋の維持管理の基本を示した「PC 構造物の

維持保全－PC 橋の予防保全に向けて－」を発刊し、2015 年 3 月には改訂版「PC 構造物の維持保全－PC 橋の更なる予防保全に向けて－」を発刊した¹⁾。

本稿では、これらの資料に基づいて、PC 構造物の維持管理の全体的な考え方と PC 鋼材に着目した維持管理の計画、対策事例などを紹介する。

2. PC 構造物の維持保全の基本

2.1 PC 構造の特徴と維持保全の考え方

PC 構造物は、供用時に作用する引張応力を打ち消すような圧縮応力をあらかじめコンクリートに与える（これをプレストレスと呼ぶ）ことで、圧縮強度は大きい引張強度が小さいというコンクリートの欠点を補った構造物である。図 - 1 に RC 梁と PC 梁の荷重たわみ曲線の概念図を示す。鉄筋コンクリート（以下 RC と略す）梁の場合、コンクリートの引張強度に期待せず引張力を鉄筋に負担させるため、載荷の初期からひび割れを生じ、荷重増加によるひび割れ本数や幅の拡大を伴いながら鉄筋の引張応力が増加し、降伏したのち、最終的には梁上縁のコンクリートの圧縮破壊や鉄筋の破断により破壊する。そのため荷重とたわみの関係は比較的なだらかな曲線となる。

一方、PC 梁は荷重載荷に伴う引張応力がプレストレスとして与えた圧縮応力を超えるまで梁の下縁には引張応力を



*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(㈱ 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 Tadahiro MOURI

プレストレスト・コンクリート建設業協会 保全補修部会 (ドービー建設工業(株))

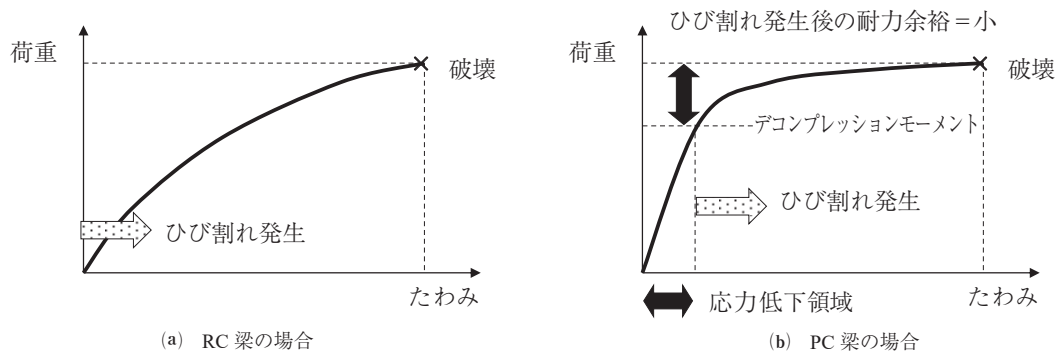


図 - 1 RC 梁と PC 梁の荷重たわみ曲線の概念図



写真 - 1 床版の水しみ



写真 - 2 桁端部の塩害劣化



写真 - 3 排水管損傷による主桁の劣化

生じない。荷重に伴う引張応力とプレストレスによる圧縮応力が釣り合うようなモーメントをデコンプレッションモーメントと呼ぶ。デコンプレッションモーメントを超えて荷重を続けると、RC 梁と同様にひび割れ本数や幅の拡大を伴いながら PC 鋼材の引張応力が増加し、降伏したのち、最終的には梁上縁のコンクリートが圧縮破壊して終局に至る。

通常、PC 構造物は設計荷重作用時においてひび割れを生じさせないよう設計されている。橋梁点検にあてはめると、橋梁点検時に死荷重状態でプレストレス作用方向に直行するひび割れが認められたならば、その構造物はすでに活荷重に対する抵抗性が失われていることになる。言い換えると、PC 構造物の場合、ひび割れが認められないからといって、耐荷性能が低下していないとはいえないことになり、曲げひび割れを耐荷性能の指標とすることは構造上危険となる場合がある。そのため PC 構造物の維持保全は予防保全を基本とし、予防的な補修や補強によって耐荷性能をできるだけ低下させないように維持することが重要である。

2.2 PC 橋の劣化事例からみた注意事項

PC 構造物は高強度コンクリートを用い、ひび割れの発生を抑制するため、RC 構造物に比べて外部からの劣化因子の侵入に対して高い耐久性を有している。これまでに建設された多くの PC 構造物の大半はほぼ健全な状態に保たれている。一方で、早期劣化により落橋した PC 橋もある。英国の Ynys-y-Gwas 橋はセグメント PC 桁であり、継目部の防水が悪く、凍結防止剤や建設時の混和剤・細骨材の塩分が漏水に溶け込んだ結果、継目部付近の PC 鋼材が腐食し、破断を生じたものと考えられている^{2, 3)}。また、米国

の Lowe's Moter Speedway の歩道橋はグラウトに塩化カルシウムを含む混和剤を大量に使用しており、後埋め部から浸透した水に溶出することで PC 鋼材が腐食し、破断を生じたものと報告されている⁴⁾。日本の暮坪陸橋は日本海沿岸の飛沫帯に架橋されていたため、飛来塩分の浸透により多くの PC 鋼材が腐食、破断したと報告されている⁵⁾。

これらの劣化事例に共通するのは、PC 鋼材に「塩」と「水」が作用したことであり、維持管理において重要なことは PC 鋼材にこれらが作用しないようにすること、さらに作用の兆候が現れたら早急に対処することである。

道路橋の塩害対策指針（案）・同解説⁶⁾が発刊された 1984 年 2 月以降に建設された PC 橋は飛来塩分に対して配慮されているが、それ以前の PC 橋は十分な対策が行われていない。また、1990 年にスパイクタイヤが禁止された以降、凍結防止剤が多量に散布されるようになり、建設当時には想定していなかった塩害環境にさらされる PC 橋も増加している。とくに、これらの PC 橋では注意が必要となる。

飛来塩分による塩害に対してはすでに補修が行われている場合も多いが、断面修復と保護塗装による補修は再劣化を生じやすいことに留意が必要である。凍結防止剤による塩害では、床版上面からの塩分の浸透（写真 - 1）による鉄筋や横締め PC 鋼材の腐食、PC 鋼材上縁定着部からの水の浸入について留意する必要がある。また、伸縮継手部からの漏水による主桁端部の劣化（写真 - 2）、鋼製支承の腐食に注意が必要である。さらに、排水管の損傷部から塩水が漏れ、局所的な塩害を生じさせることにも注意が必要である（写真 - 3）。プラスチック製排水管では割れ、接続部やキャップの外れ、鋼製排水管では腐食による排水

管の破れに注意が必要である。このほかにも注意すべき事項は多いが、詳しくは資料¹⁾を参照されたい。

3. PC 鋼材に着目した PC 構造物の維持保全計画

3.1 PC 鋼材の歴史と性能

1950 年頃に始まったわが国の PC 構造物の歴史において、PC 技術はめざましい進歩を遂げ、その時代に要求される性能と技術水準により時代とともに変遷してきた。したがって、PC 構造物の維持保全計画にあたっては、PC 構造物の歴史と性能の関係を理解することが大事である。

図 - 2 に PC 橋における PC 鋼材の用途別変遷を示す。

主鋼材：1970 年代までの PC 橋には、主に PC 鋼線が使われた。当時、ポストテンション桁の定着工法はフレシネー工法が大半であり、1 ケーブルあたり 12 本の PC 鋼線を配置したマルチワイヤーシステム 12φ5mm や 12φ7mm が数多く採用された(写真 - 4)。また、1959 年嵐山橋で初採用されたディビダーク鋼棒工法は、張出し架設 PC 橋の主鋼材(主にφ32mm)として 1990 年代まで多用された。PC 鋼より線を複数本束ねたマルチストランドシステムは、わが国では 1961 年に 12S12.4mm が初導入された。これにより緊張力は 12φ7mm の 2.5 倍となり、支間の長大化や構造・施工の合理化が可能になり、1980 年代以降、主鋼材の主流になった。

横締め鋼材：古くは PC 鋼棒や PC 鋼線が使用された。1980 年代以降は太径の PC 鋼より線が主流になった。

せん断鋼棒：PC 箱桁橋のようにウェブの少ない橋梁形式では、かつてウェブのせん断補強としてせん断鋼棒φ32mm などが用いられた。1996 年あたりからウェブを多少厚くしてせん断鋼棒を配置しない設計法が採用された。

図 - 3 に 1990 年頃までに建設された PC 鋼材シース内の模式を示す。この頃にみられるグラウト充填不足の原因はブリーディングが生じる旧タイプの PC グラウト使用やグラウトの先流れ現象を考慮した注入・排出口および連続ケーブルにおける中間排気口の設置がなされていないなど材料・施工の未熟さに加え、シース内の空隙面積が小さくグラウト充填性に劣る PC 鋼棒や PC 鋼線が選定される仕様規定型の設計規準であったこともあげられる。

なお、今日では用途や要求の多様化に応じてさまざまな PC 鋼材が適用されている。詳細は文献⁷⁾を参照されたい。

3.2 PC 鋼材に着目した点検

PC 構造物の多くは長期にわたり高耐久であることが実証されつつあるものの、PC 構造物の生命線である PC 鋼材の腐食・破断を見逃し適切な対策を講じないまま耐荷性が損なわれ、最悪のケースとして落橋に至った事例があることも周知のとおりである。したがって、PC 構造物の維持保全計画は、PC 鋼材の劣化が顕在化する前に対策を講じる予防保全を目標にすることが大事である。

図 - 4 に RC 構造物と PC 構造物の劣化シナリオの例を示す。PC 構造物は、RC 構造物に比べ、構造性能の低下に伴うひび割れの発生が遅れる傾向にあり、ひび割れが発生した段階ではすでに耐荷性能が低下しているおそれがある。

PC 橋にみられる変状のうち漏水や水しみあるいはエフロレッセンスの多くは橋面の滞水や排水装置の不具合などによって生じ、目地やひび割れなどの弱点部に「水」が浸透したことが原因である。また、コンクリートの剥離や鉄筋露出、錆汁などは、「水」の浸透による劣化がさらに進行し変状として現れたものである。したがって、PC 構造物の点検では「水」に関する変状を捉えることが大事である。

■用途別変遷		西暦 1950 年号 S25	1960 S35	1970 S45	1980 S55	1990 H2	2000 H12	2010 H22
主鋼材 T 桁 合成桁 場所打ち	PC 鋼線 (マルチワイヤーシステム)							
	定着具の廃止						2005▲	
主鋼材 張出し架設	PC 鋼より線 (マルチストランドシステム)							
	PC 鋼棒 (ディビダーク鋼棒工法)							
横締め 鋼材	PC 鋼棒 (幅員 8m 以下)							
	PC 鋼線 (幅員 8m 以上)							
せん断 鋼棒	PC 鋼より線 (マルチストランド)							
	PC 鋼より線 (シングルストランド)							
せん断 鋼棒	PC 鋼棒							

図 - 2 PC 鋼材の用途別変遷 (PC 橋)

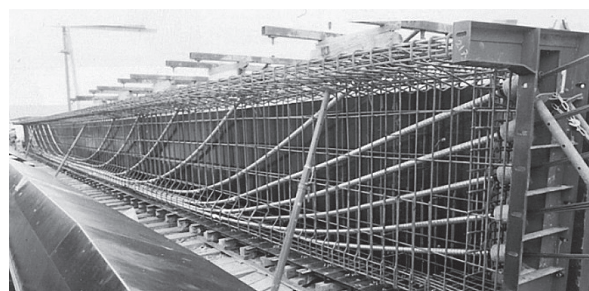


写真 - 4 マルチワイヤーシステムを用いた PC 桁の例

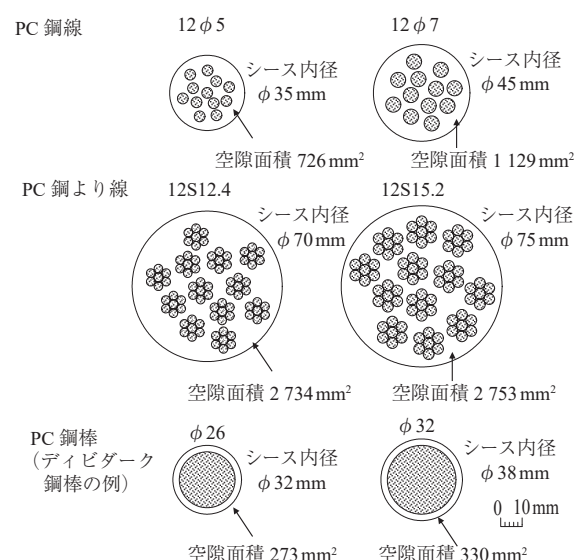


図 - 3 1990 年頃までに建設された PC 橋シース内の模式

図 - 5 に水の浸入経路に着目した点検例を示す。水の浸入経路としては次のような例が想定される。

・桁端部の漏水が主鋼材定着部の後埋め部に侵入する。

- ・橋面上の滞水が主桁上縁定着切欠き部に浸入する。
- ・連続合成桁の一次・二次床版の継目あるいはプレキャスト桁床版間詰部から水が浸入する。
- ・床版上面を伝わって地覆との境界部に水が浸入する。
- ・作業用開口部や打設用開口部、ワーゲンアンカー孔、そのほかの箱抜きに水が浸入する。

とくに注意すべきは、水の浸入経路に PC 鋼材が配置され、かつ、グラウト充填不足により生じた空洞部に水と塩が多く供給される場合であり、PC 鋼材の劣化進行を防止するためにも、できるだけ早い段階で「水」に関する変状を発見し、予防保全対策につなげることが大事である。

3.3 PC 鋼材に着目した予防保全対策

PC 構造物の予防保全対策は、劣化原因となる「水」と「塩」を PC 鋼材に作用させないことに尽きる。そのためには、橋面の滞水や排水装置の不具合あるいはグラウト充填不足など水の浸入に対する対策が優先されるべきである。中でも、グラウト充填不足を抱えた PC 構造物では PC 鋼材の耐久

性が不足することに加え、コンクリートと PC 鋼材の付着一体性が不足し供用荷重に対しては問題とならなくても終局耐力が不足することも想定されるため、PC 鋼材の防食と付着一体性の確保を主目的としたグラウト再注入などの対策を予防的に行うことが望まれる。また、ひび割れは水を容易に浸入させる要因となるため、とくに PC 部材のひび割れ抑制対策は早い段階で講じられるべきである。とりわけ、今日の PC 技術に比べ耐久性上の弱点を生じ得る技術水準であった 1990 年代以前に建設された PC 構造物をより長く使うためには、PC の弱点をなくす、あるいは、PC の弱点を弱点にさせないように予防的に対策を講じることが大事であると考えられる。

なお、資料¹⁾には PC 建協保全補修部会が実施した現地調査を踏まえ、標準的な PC 橋を対象に、目視による外観状況から健全性の評価および対策との対応を「付録－1 目視点検による PC 構造物の性能診断（参考）」として整理されている。

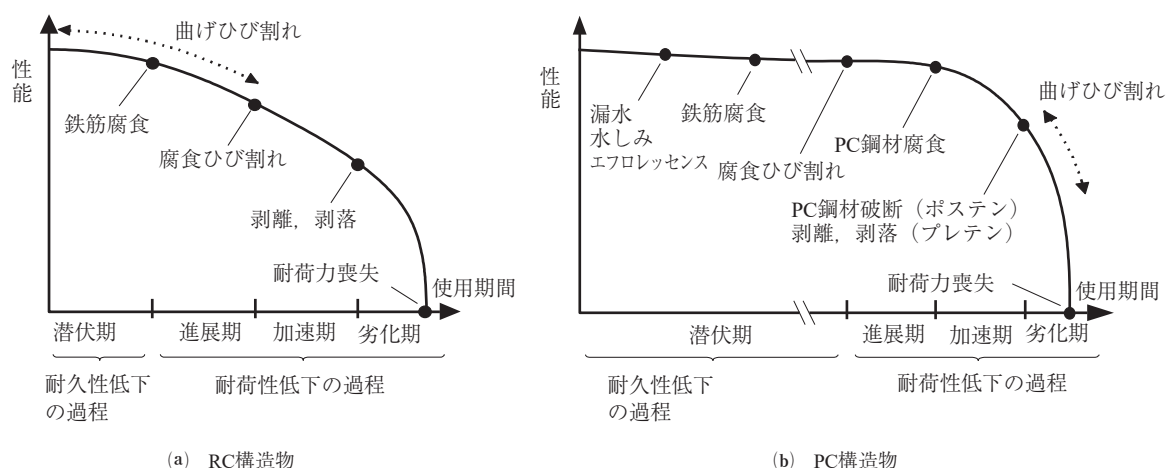


図 - 4 RC 構造物と PC 構造物の劣化シナリオの例

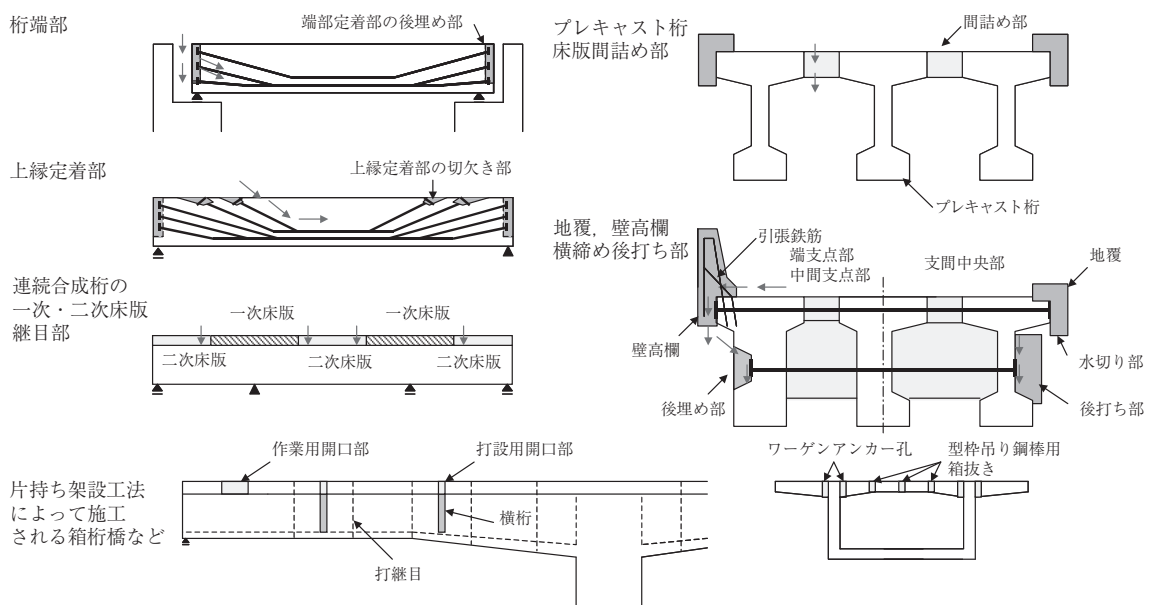


図 - 5 水の浸入経路に着目した点検例

4. PC 鋼材に着目した対策事例

4.1 PC グラウト再注入による主鋼材の予防保全事例⁸⁾

1990 年頃に供用が開始され 15 ～ 17 年経過した PC 3 ～ 4 径間連続箱桁橋に対し健全度調査が実施され、主鋼材に PC グラウト充填不足が確認された。対策としては PC グラウト再注入工法が採用され、下記のとおりにより工事が実施された。

材料選定： CCD 内視鏡を用いた削孔目視調査によると、連続ケーブルの約半数にグラウト充填不足による空洞が確認された。しかし、PC 鋼材の状態は表面錆がみられる程度であった（写真 - 5）。主鋼材は比較的健全であり、シー空隙面積の大きい 12S15.2B が用いられていたことから、汎用の高粘性型 PC グラウト材が選定された。

空洞区間の推定： 連続ケーブルの両端から中央径間に向かって順次削孔（ $\phi 16$ ）し、目視検査後、隣接する孔間に空気を送り、通気のある場合が空洞区間であると推定された。削孔数は各径間 3 箇所を基本とし、目視検査で空洞が見つかり、隣孔との通気がない場合は、その近傍に削孔し通気の有無が調べられた。その一例を図 - 6 に示す。既存グラウトは、図の右から左に向かって注入したと推測され、中間支点の左側（曲げ下げ部）において空洞が確認された。この傾向はグラウト充填不足が発見されたすべてのシーに共通し、建設当時のグラウト技術では曲げ下げ部を完全に施工するのは困難であったと考えられる。

注入方法： 隣孔との通気を確認された場合は 2 孔式、そうでない場合は 1 孔式とし、いずれもグラウトポンプと真空ポンプを併用したグラウト再注入がなされた（写真 - 6）。

グラウト充填確認： すべての注入箇所において、推定注入量と実注入量の比較により、間接的にグラウト充填状況の確認が行われた。推定注入量は、シー内の空隙面積（ 2753 mm^2 ）に空洞区間を乗じて求められた。また、一部のシーに対し X 線透過法による検査を後日行い、硬化した再注入グラウトに空洞がないことが確認された。

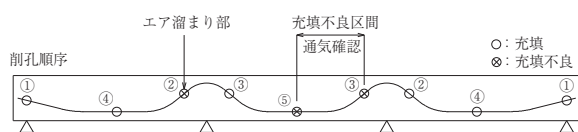


図 - 6 削孔検査による空洞区間の推定例

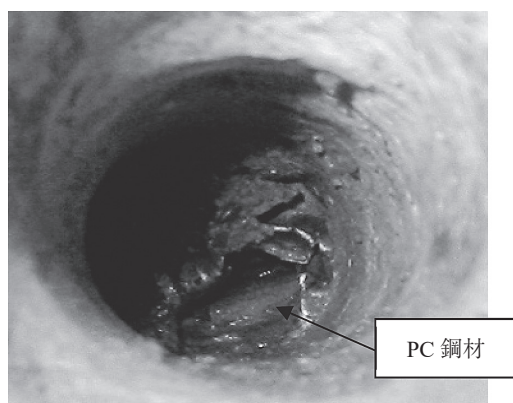


写真 - 5 PC 鋼材の状況（主鋼材）

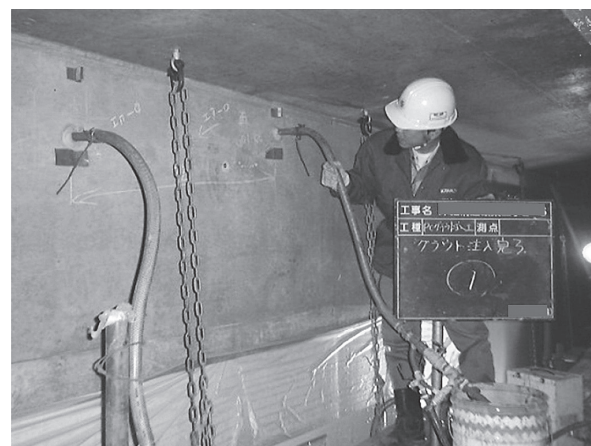


写真 - 6 グラウト再注入状況（2孔式）

4.2 炭素繊維プレート緊張材を用いたプレストレス導入事例

炭素繊維プレート緊張材を用いた補強方法は、構造部材に緊張力を与えるため外ケーブル補強と同様に既設構造物の耐荷力を向上させる効果がある。炭素繊維シート接着工法は付加荷重に対して補強効果があるのに比べ、本工法は既存応力度を改善させることで自重など既荷重に対しても補強効果を与えられる点に特徴がある⁹⁾。以下、2 事例を示す。

主鋼材の補強事例： 写真 - 7 は旧基準で建設された PC 道路橋について交通荷重を旧基準の TL-20（1 等橋）から現行基準の B 活荷重に対応させるために補強が実施された事例である。本橋は添架物が桁間に設置されており、外ケーブル工法では定着突起が設置できないため、炭素繊維プレート緊張材を主桁下面に設置できる本工法が採用された。補強の実施により、現行基準の交通荷重に対しても主桁の曲げひび割れ発生を予防した。



写真 - 7 炭素繊維プレート緊張材による主鋼材の補強

横締め鋼材の補強事例： 床版防水などが実施されていない古い PC 橋で、プレキャスト桁の桁間から横締め PC 鋼材へ水分や塩化物が侵入し、一部の PC 鋼材に破断が確認された。対応としては中間横桁部の上面および下面の橋軸直角方向に炭素繊維プレート緊張材を配置し、破断した

PC 鋼材と同等のプレストレスが導入された。横桁上面の補強では、緊張端および固定端に金属製の定着体を設置する必要があるため、歩道部の均しコンクリートを一部撤去し、均しコンクリート内に炭素繊維プレート緊張材が配置された（写真 - 8）。また、横桁下面の補強は、桁間間詰めコンクリート部にアンカーを設け、長方形の金属プレートを用いて炭素繊維プレート緊張材が定着された（写真 - 9）。当該橋梁はプレテンション桁のため、主桁 PC 鋼材の配置間隔が狭く、アンカー設置時に PC 鋼材へ損傷を与えるおそれがあるため、無筋コンクリートの桁間間詰め部にアンカーを配置した。



写真 - 8 横桁上面の炭素繊維プレート緊張材配置

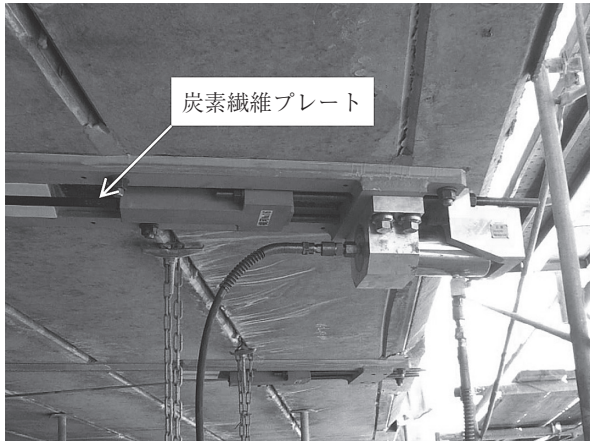


写真 - 9 横桁下面の炭素繊維プレート緊張材配置

4.3 PC 橋の構造改修による予防保全事例¹⁰⁾

本橋は1978年に建設された7径間連続PC箱桁橋であり、中央部の支間 1/4 点に1箇所ゲルバーヒンジを有する構造である（写真 - 10）。ゲルバーヒンジ部の伸縮装置からの水分浸入によって、アルカリ骨材反応が進行し多数のひび割れが観察された（写真 - 11）。調査の結果、橋梁全体にアルカリ骨材反応の懸念はあるものの、ひび割れなどの劣化現象はほとんど見られず、ゲルバーヒンジ部のみに顕著な劣化現象が観察された。この部分には多数の PC 鋼材が配置されているものの、コンクリート断面の部材厚が大きいので、PC 鋼材の調査や補修対策が困難であった。

これらの条件を踏まえて補修方法を検討した結果、抜本的対策として、ゲルバーヒンジ部付近の主桁を切断し、コンクリートを打ち替え、外ケーブルにより連続化する方法が採用された。これらの対策によって、伸縮装置をなくし水分浸入を防止でき、PC 鋼材の維持管理も可能になったことから将来にわたる耐久性が確保できたと考えられる。本工事の特徴を以下に記す。

主桁の切断、コンクリート打替え：ゲルバーヒンジ部は支間 1/4 点に設けられているため、受桁側には鉛直下向き、吊桁側には鉛直上向きに 3 000 KN の反力が作用している。この部分の主桁を撤去すると釣り合っていた反力がなくなり、構造安定性が損なわれる。そこで、図 - 7 に示すように吊桁側、受け桁側的主桁直下に仮支柱を設置し主桁を支えとともに、受け桁側が上方に跳ね上がらないように固定用 PC 鋼材で地盤と連結した。これによって施工時の構造安定性を確保した。

主桁の連続化：切断撤去したゲルバーヒンジ部を打替えて連続構造とするために、箱桁内に外ケーブル 19S15.2 を 10 本配置してプレストレスを与えた。外ケーブルの防錆は内部充填型エポキシ樹脂被覆とし、将来の緊張力管理用に EM センサーを配置した。外ケーブルの定着は剛性の高い柱頭部横桁を補強して定着装置を設置して行った。外ケーブルの配置は写真 - 12 に示すように目視点検が容易にできる状況である。

既設 PC 鋼材の維持管理：ゲルバーヒンジ部の切断に伴って、この部分に配置されている既設 PC 鋼材も切断されることになる。そこで、設計において、これらの緊張力が失われても主桁応力度が許容値を満足するように外ケーブルの配置本数を決定した。また、既設 PC 鋼材の切断時に PC 鋼材が破断・突出することも懸念されたため、切断前にグラウト調査を行い、未充填部にはグラウト再注入を行い、PC 鋼材の付着を確保した。さらに将来既設 PC 鋼材の付着が劣化することを想定して、切断 PC 鋼材の端部をはつり出し、新たに開発した定着具により再定着を行った（写真 - 13）。これにより既設 PC 鋼材の耐久性も確保されたと考えられる。

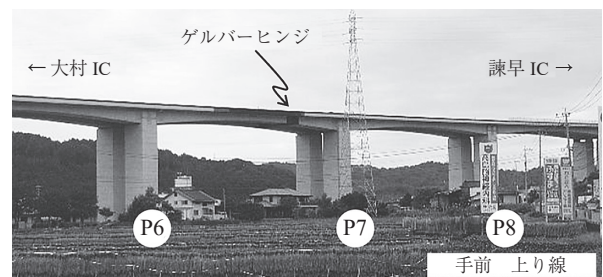


写真 - 10 橋梁全景（ゲルバーヒンジ部）



写真 - 11 ゲルバーヒンジ部の劣化状況

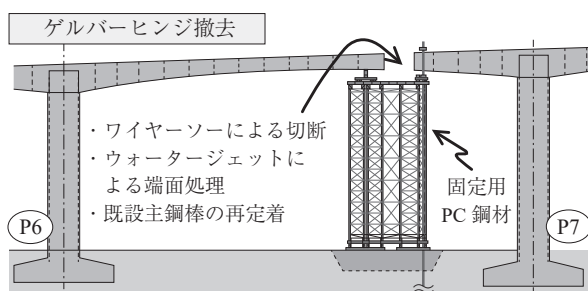


図 - 7 ゲルバーヒンジ部撤去要領

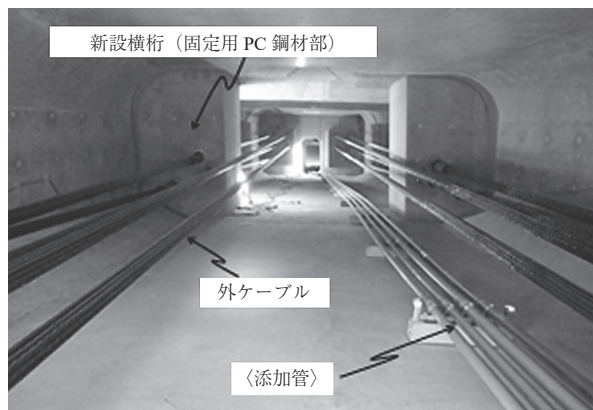


写真 - 12 外ケーブル配置状況

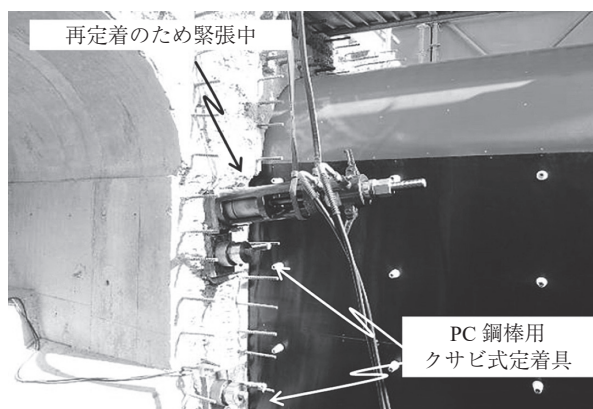


写真 - 13 既設 PC 鋼材の再定着

5. おわりに

PC 構造物は耐久性に優れた構造物であるが、PC 構造物の生命線である PC 鋼材の腐食・破断を見逃し適切な対策を講じない場合には、急速に耐荷性が損なわれ、重大事故に至る可能性もある。したがって、PC 構造物の維持保全計画は、PC 鋼材の劣化が顕在化する前に対策を講じる予防保全を目標にすることが大事である。

本稿では PC 鋼材に着目した予防保全対策の考え方や点検のポイントを示し、実際の対策事例を紹介した。今後、PC 構造物を適切に維持管理し、長期間にわたって重要な社会インフラとして機能をさせるためにこれらの情報が役に立てば幸いである。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全－PC 橋の更なる予防保全に向けて－〔2015 年版〕，2015.3
- 2) Woodward, R., Williams, F. : "Collapse of Ynys-y-Gwas Bridge, West Glamorgan", Proc. Instn. Civ. Engrs., Part 1, 635-669, 1988.8.
- 3) Woodward, R.J. : "Collapse of a Segmental Post-Tensioned Concrete Bridge", Transportation Research Record, Vol. 1211, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. pp.38-59, 1989.
- 4) Final Report "Bridging the Gap: How to Prevent Disasters such as the Collapse of the Lowe's Motor Speedway Pedestrian Bridge", Office of Senator Elizabeth Dole, 2006.11
- 5) 国土交通省道路局国道課，他：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究－コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査－，土木研究所資料第 3811 号，平成 13 年 3 月
- 6) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説，1984.2
- 7) 松原喜之：知っておきたい PC 材料第 6 回 PC 鋼材，プレストレストコンクリート，Vol.59, No.4, pp.102-108, 2017.7
- 8) 佐々木一哉，下西 勝，竹淵敏郎，山岸俊一，渡辺智史，渡部寛文：首都高速川口線 PC 高架橋の健全度調査と補修・補強，橋梁と基礎 2004-7, pp.27-33, 2004.7
- 9) 安森 浩，濱田 譲，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
- 10) 尾道良一，駒谷大三，熊谷裕司，安藤直文：PC 橋のゲルバーヒンジ部補修における設計・施工－長崎自動車道鈴田橋補修工事－，プレストレストコンクリート，Vol.53, No.6, pp51-56, 2013

【2018 年 8 月 26 日受付】