

PC 橋における PC 鋼材の維持管理技術

睦好 宏史*¹・細居 清剛*²・及川 雅司*³

近年、PC 橋の経年劣化が問題となってきている。劣化の主な原因は、グラウトの充填不足および塩害による PC 鋼材の腐食である。本稿では、PC 橋における PC 鋼材の腐食の現状、PC 鋼材の健全性評価手法、腐食により損傷した PC 鋼材の防食・補修技術の現状、防食 PC 鋼材とシースの現状について述べたものである。

キーワード：PC 鋼材，非破壊検査，グラウト再注入，防食 PC 鋼材

1. はじめに

近年、わが国をはじめ、世界各国において社会基盤の老朽化が大きな問題となってきている。PC 橋においても、経年劣化による PC 鋼材の腐食あるいは破断が生じ、最悪の場合には落橋に至る事例が報告されている。PC 鋼材の腐食に影響を及ぼす要因は主にグラウトの充填不足と塩害が考えられる。図 - 1 は国道、県・市道、高速道路会社管理下の PC 橋梁の全 4 777 箇所におけるグラウトの調査結果を示したものである。ここに示す充填不足とは、一部不充填も含んだものである。図から、全体の約 3 割が何らかのグラウト充填不足であることが明らかとなった。このようなグラウトの充填不足箇所に塩化物イオン、酸素、水が浸入すれば、PC 鋼材は容易に腐食し、破断が生じるのである。写真 - 1 は上述したように、グラウト不良により PC 鋼線が腐食して破断した事例を示している。このような状況になる前に、適切な検査により、グラウトの充填状況、および PC 鋼材の健全度が精度よく検査することが望まれている。また、一旦グラウトの充填不良が発見された場合、速やかにグラウトを再注入する事が必要である。

本稿では、PC 橋における PC 鋼材の腐食の現状、PC 鋼材の健全性評価手法、腐食により損傷した PC 鋼材の防食・補修技術の現状、防食 PC 鋼材とシースの現状について述べたものである。

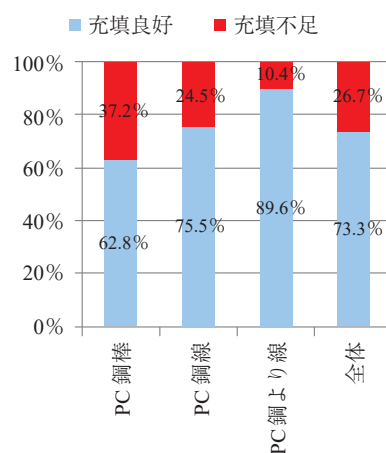


図 - 1 PC グラウトの充填状況調査結果¹⁾

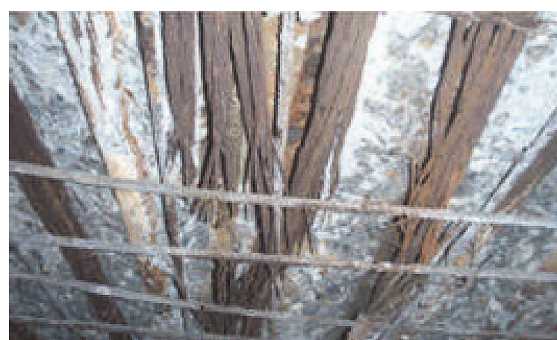


写真 - 1 PC 鋼材の腐食による破断 (妙高大橋)



*¹ Hiroshi Mutsuyoshi

埼玉大学レジリエント社会研究センター長・教授



*² Kiyotaka Hosoi

神鋼鋼線工業(株) 尼崎事業所 技術部 PC 技術室



*³ Masashi Oikawa

住友電工スチールワイヤー(株) PC グローバルマーケティング室

2. PC 橋梁における PC 鋼材の健全性評価手法

PC 橋梁全体の構造性能を評価するにあたっては、まず主要部材である PC 鋼材の健全性を評価する必要がある。

これまで PC 鋼材には単線、鋼棒、より線、撚りより線などさまざまな材料、サイズが使用されており、その防錆方法、配置状況、導入プレストレス量なども異なる。したがってこれらの初期データを事前に調査し、現状保有する性能と比較することが重要である。

PC 鋼材に関する検査手法は徐々に確立されつつあるが、内ケーブルと外ケーブルではその目的や適用条件が大きく異なるため、下記に分けて紹介する。

2.1 内ケーブル

PC 橋梁に対して、目視や打音検査による部材外観変状調査を行った際、PC 鋼材に沿ったひび割れやエフロレッセンス、豆板、漏水、錆汁などが発見された場合、それらが PC 鋼材の変状に関連している可能性がある。しかし一般的な内ケーブルの場合、構造物との一体化、プレストレス力の伝達、PC 鋼材の防食のため、PC 鋼材の外側はコンクリートもしくはセメントグラウト、ダクトなどで覆われているため、直接目視や触診などによる検査は困難であり、非破壊検査手法を用いて調査を行う必要がある。たとえば、ポストテンション工法の場合には、広帯域超音波法、インパクトエコー法、放射線透過法などを使用してダクト内のグラウト充填状況を確認する。広帯域超音波法は図 - 2 に示すように、シース直上のコンクリート面に一対の探触子を配置して広帯域超音波を發受信し、シースからの反射波の周波数特性を分析することでグラウトの充填性が判定できる。

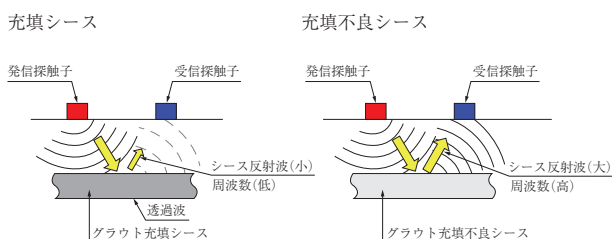


図 - 2 広域超音波法

インパクトエコー法は入力した弾性波をコニカル型広帯域変位振動子により受信し、受信波の周波数解析結果からシース内部の欠陥評価等を行う。



図 - 3 インパクトエコー法
(株)国際建設技術研究所 HP より)

放射線透過法では X 線をコンクリート構造物の断面方向に透過させ、撮影された透過画像から内部の様子を確認する。これらの方法により未充填部分が確認された場合には、コンクリートを削孔し、CCD カメラやファイバースコープにより未充填部分の目視検査を行うことを検討する。また、コンクリート表面から PC 鋼材の破断を検知する方法として、漏洩磁束法が実用化されている。

これらの検査結果より、ケーブルの腐食状況、断面減少量、残存本数などを確認して構造的な検討を行い、適切な対策を講じる必要がある。



図 - 4 腐食度判定基準

PC 鋼材が破断している場合には、プレストレスの消失範囲を明確にする必要がある。PC グラウトが十分に充填されていれば、消失範囲は限定的となり、局部的に耐荷力が低下する可能性がある。また断面欠損がある PC 鋼材は、プレストレスがすべて消失したとして推定することが推奨されるが、過小評価して外ケーブルによる補強等を実施するとコンクリート応力度が圧縮限界値を超える場合があるので注意する必要がある。

いずれにしても、PC 鋼材が保有する性能を正確に評価し、適切な補修・補強方法を選定する事が肝要である。

2.2 外ケーブル

一般的な外ケーブルは防錆や保護のためポリエチレンなどのプラスチックカバーで鋼材が覆われており、また最近ではエポキシ樹脂で塗装されたケーブルも多く採用されている。外ケーブルはコンクリート部材外に配置されており、ケーブルに直接アプローチすることが可能であるため、プラスチックカバーやエポキシ樹脂などのケーブル防錆層の劣化状況を近接目視にて確認することができ、場合によっては防錆層を一部撤去するなどして、内部 PC 鋼材の状況を確認することも可能である。

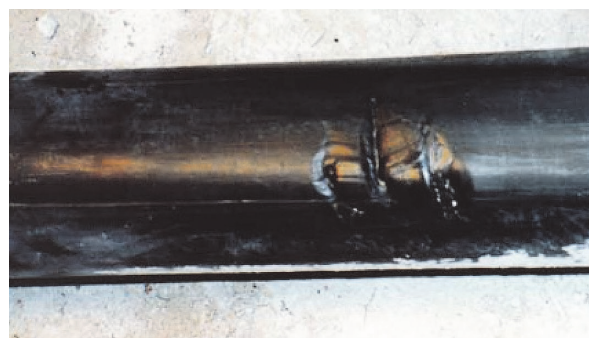


写真 - 2 ケーブルカバーの損傷例

なお、非破壊で内部 PC 鋼材の状況を確認する場合は、過流探傷法や全磁束法などが用いられる場合がある。

また外ケーブルの場合、自由長部にセンサーや測定機器を直接セットできるため、高次振動法やEM (Elasto-Magnetic) センサーなどを使用してケーブル張力を測定することが可能である。前者はケーブル長とケーブル単位質量が既知であれば、複数の高次固有振動数とモード次数の関係を用いることにより、ケーブル張力と曲げ剛性を同時に求めることができる。後者は2種類のコイル（1次コイル、2次コイル）と温度素子および鋼製保護カバーで構成され、これらをシースに取付けることでPC鋼材の張力を測定することができる。いずれも比較的簡易に、かつ高精度で測定することができる。



写真 - 3 高次振動法による張力測定

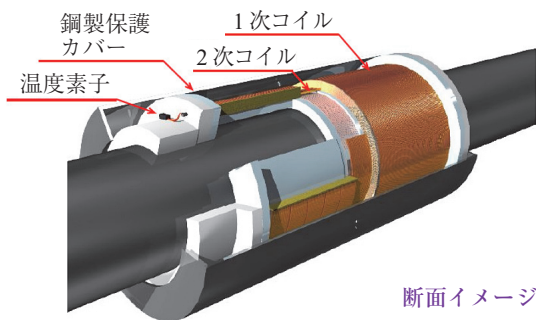


図 - 5 EM (Elasto-Magnetic) センサー

3. 腐食により損傷した PC 鋼材の防食、補修技術

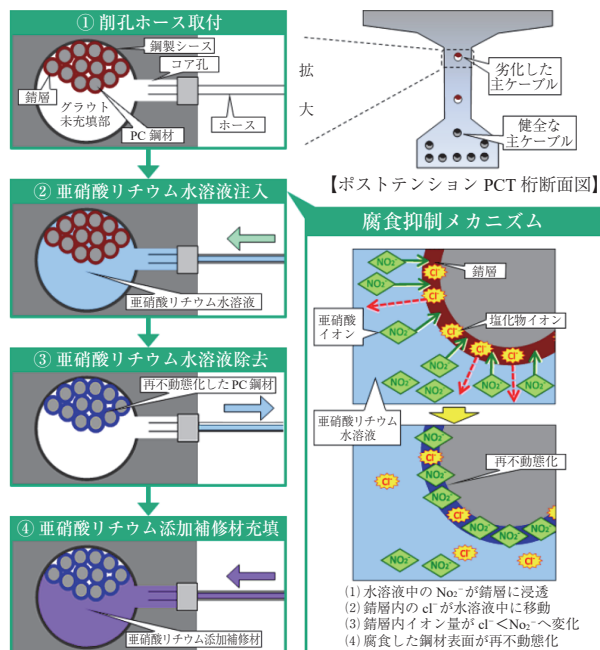
3.1 グラウト再注入工法

PC グラウトの未充填箇所が発見された場合、PC 鋼材の防錆、コンクリート部材との一体性を確保するため、グラウト材の再注入が必要な場合がある。再注入を計画するにあたっては、未充填区間、PC 鋼材の状況、立地条件等を調査する必要があるが、再注入孔を削孔する場合は内部の PC 鋼材を損傷させないように注意しなければならない。また、グラウト材料には部位、シースの空隙率、ケーブルのタイプなどを総合的に判断して適切なものを選定する。

3.2 リパッシブ工法

グラウト未充填箇所に凍結防止材等に起因する塩化物イオンが浸入し、PC 鋼材の著しい腐食あるいは破断が発生

している場合には、グラウト再注入工法では十分な補修効果が得られない場合がある。そのような場合でも、亜硝酸リチウム水溶液注入と亜硝酸リチウム添加補修材充填を行うことにより、再不動態化と腐食抑制が可能なりパッシブ工法が実用化されている。



(株) ピーエス三菱 HP より

図 - 6 リパッシブ工法

3.3 電気化学防食工法

塩害を受けたコンクリート中に含まれる塩化物イオンを除去する電気化学的手法として、デサリネーション（脱塩工法）が実用化されている。デサリネーションは常時通電の必要がある通常の電気防食と異なり、通電は一定期間のみで良いという長所がある。一方、通常の電気防食に比べて通電量が多いため、鋼材の近傍に水素が発生する可能性があり、PC 鋼材の水素脆化の懸念があった。しかし、断続的な通電処理により水素脆化の影響が軽減され、塩害による PC 鋼材の劣化対策として有効であることが確認されている。

4. 防食 PC 鋼材とシースの現状

4.1 概要

PC 鋼材の防食には、PC 鋼材そのものを防食処理する方法（以下、防食 PC 鋼材という）と、シースに PC 鋼材を配置して PC グラウトを充填する方法がある。

本稿では、これら防食 PC 鋼材とシースについての国内、海外の動向について概説する。



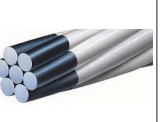
4.2 防食 PC 鋼材の現状

(1) 日本における防食 PC 鋼材

わが国の防食 PC 鋼材は、その一つには PC 鋼より線に防錆および潤滑剤としてグリスを塗布し、ポリエチレン被覆（以降、PE 被覆という）加工したアンボンド PC 鋼より線がある。また、PC 鋼材そのものを防食するタイプの防食 PC 鋼材は、1990 年代以降に現場での省力化や急速施

工といった社会的な要求や、斜張橋・エクストラドーズド橋などの新しい構造形式の登場、箱桁の外ケーブルが増加したことで多用され始めた。2012年にプレストレストコンクリート工学会より発刊された外ケーブル用の防食PC鋼材に関する指針「PC箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆PC鋼材の性能照査指針」²⁾において、外ケーブル用防食PC鋼材にはその構成から3種類あるとされている。



① PC鋼より線を構成する個々の鋼より線に単一層の被覆を施したもの（一重被覆鋼材）

代表例			
特徴	表面および素線間の隙間部にエポキシ樹脂を静電粉体塗装により被覆かつ充填したPC鋼材	押出成型法を用いて、熱可塑性樹脂を内部空隙に充填し、同時に外面を被覆したPC鋼材	PC鋼より線の全素線それぞれに単独のエポキシ樹脂塗膜を形成したPC鋼材

② PC鋼より線を構成する個々の鋼より線に複数層の被覆を施したもの（多重被覆鋼材）

代表例			
特徴	エポキシ樹脂被覆鋼材の外側にポリエチレン樹脂を押し出し成型したPC鋼材	PC鋼より線の周りにグリスを塗布し、その周りにポリエチレン樹脂を押し出し成型したPC鋼材	PC鋼より線の全素線それぞれに単独のエポキシ樹脂塗膜を形成し、さらにその外周にグリス等の充填剤を塗布して最外周にPE被覆を施したPC鋼材

③ 複数の鋼より線を所定の本数束ねあわせたのち、被覆材で一体化したもの（マルチケーブル）

代表例		
特徴	アンボンドPC鋼より線を複数束ね、その外側をポリエチレン樹脂で押し出し成型した多重被覆PCケーブル	一重被覆鋼材を複数本束ね、その外側をポリエチレン樹脂で押し出し成型した多重被覆PCケーブル

同指針の対象は、広く適用されている点から一重被覆鋼材としており、もっとも適用例の多い内部充填型エポキシ樹脂被覆PC鋼より線（以降、ECFストランド（Epoxy Coated & Filled ストランド）という）はエポキシ樹脂で鋼材表面に厚膜の静電粉体塗装を行い、より線を構成する素線の隙間にも同じ樹脂を充填したものである。より線内部での水や腐食性物質の移動をもブロックすることから高い耐食性を有すること、曲げ配置部の腹圧力が高い領域でも塗膜が緩衝材として機能し、ストランド同士の金属接触を防ぐことから耐フレッチング（微動摩擦腐食）特性に優れること

が特長である。また、土木学会の品質規格 JSCE-E 141-2013 に規準化され、「エポキシ樹脂を用いた高性能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案）、コンクリートライブラリー 133；土木学会」³⁾に設計耐用年数 100 年と定められている。

これ以外の防食PC鋼材としては、亜鉛めっきPC鋼より線や亜鉛めっきPC鋼より線 1本1本にグリス状防錆材を封入し表面に高密度ポリエチレンを被覆（以降、PE被覆）したものがある。PC鋼材用途の亜鉛めっきの方法としては、水素脆性の懸念から旧FIP（現fib）は溶融亜鉛めっきが望ましいとしている^{4,5)}。

ノンメタルの防食緊張材としては、連続繊維補強材がある。連続繊維補強材には写真-4に示すような炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維にエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂などの繊維結合材を含浸させ硬化させて成形した複合材料などがある。これら連続繊維補強材は鋼材と比較して軽量、高耐食、高強度、低磁性という特長を有し、実用化が図られつつある。



写真 - 4 連続繊維補強材

(2) 海外における防食PC鋼材

海外における防食PC鋼材は、その一つは、建築スラブのポストテンション用にグリスとPE被覆で保護されたアンボンドPC鋼材が数十年間にわたって使用され、米国の Post-Tensioning Institute (PTI)⁶⁾に規格化されている。また、PC鋼材がグラウトやコンクリートに埋まらずに使用されるような、たとえば斜ケーブルの場合には、PC鋼材がPE被覆に対して相対的に移動しないようにPE被覆がPC鋼材に対してタイトに施され、グリスをWAXに置き換えたものも用いられている（写真-5）。

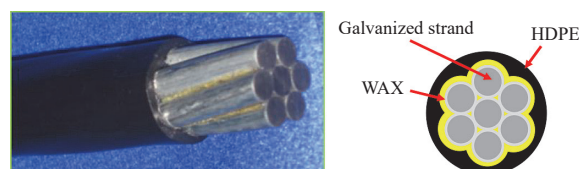


写真 - 5 亜鉛めっきPC鋼より線

米国においても1990年代以降ポストテンション橋が広まる中、ポストテンションの技術課題である、グラウトによる完全な防錆が困難であること、PC鋼材に発生した腐食の発見が困難であることから、PC鋼材の耐久性向上への要求が高まり、J.E.Breenらによりポストテンション橋向け防食PC鋼材の性能比較⁷⁾が行われている。比較対象

は亜鉛めっき、ECF ストランド、銅被覆、ステンレス被覆、ステンレス鋼材の 6 種類である。5%塩水による乾湿繰返し試験後の重量測定比較および直流分極抵抗測定の結果から、ECF ストランドの優れた耐食性が報告されている。なお、ECF ストランドは国際標準化機構 (ISO)、米国試験材料協会 (ASTM) において規格化されている。

近年は、高耐久に対する要求から、原材料をステンレス鋼としたステンレス PC 鋼より線 (写真 - 6) も米国で実用化されているが、定着具との異種金属接触腐食の観点からプレテン用途のみに使用されている。

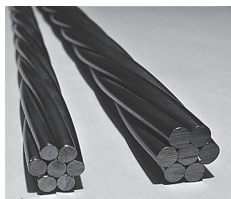


写真 - 6 ステンレス PC 鋼より線

4.3 シースの現状

(1) 日本におけるシース

わが国におけるシースは、1953年にわが国で初めてポストテンション方式の道路橋が架設されて以降、薄鉄板を丸めて溶接した鋼製シースが使用されてきたが、1955年頃には帯鉄板を螺旋状に配置して管を作る技術を応用して、現在の鋼製シースの原形が開発された。その後、鋼製シースの改善や新材料によるシースの開発が進められ、1994年にはポリエチレン製シース (以降、PE シース) が開発された。PE シースは 1998年に東北地方の日本海沿岸に位置する橋梁に適用され、近年では塩害地域や高耐久が要求される場合や樹脂被覆された防食 PC 鋼材を用いる場合に適用されている⁸⁾。

わが国の示方書・指針類には従来より PE シースに関する記述が認められたが、使用時の留意点を詳細に示すものではなかったことから、2015年8月に PE シースの使用環境の整備を目的として、プレストレストコンクリート工学会より PE シースに関する指針となる「PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)」⁹⁾ が発刊されている。同指針には、PE シースそのものが腐食せず、鋼製シースと比較して塩化物イオンや水、酸素、二酸化炭素などの腐食促進物質の遮蔽効果が高い、一方で温度の影響を受けやすいこと、高温時は損傷に対して敏感であること、クリープ変形があること、シース外径が大きいこと等の留意点も示されている。

(2) 海外におけるシース

海外における内ケーブル用の鋼製シースは帯鋼板を螺旋巻きしたものが適用され、国際基準 European Norm (EN) 523 に規定されている。

プラスチック製シースは 1960年代より内ケーブル、外ケーブル、斜ケーブルなどに適用されてきた。1968～1974年にはスイスの Chillon 高架橋の内ケーブルに全長合計約 300 km の黒色プラスチック製コルゲートシースが適

用されている。結局同橋は取り壊して修復されることとなったが、30年間コルゲートシースの劣化は認められず、シースに損傷がなければ、PC 鋼材の防食環境が維持されることも確認されている。

1990年初頭より肉厚のコルゲートシースが内ケーブル用に使用され、欧州、米国、インドと、一部アジアに広まった。fib が 1990年末に内ケーブル用のプラスチック製シースの試験と性能についての Technical Report を、2014年に Recommendation を発刊している。現在、プラスチック製シースとその関連製品は市場で広く入手可能となり、典型的な断面形状は円であるが、主に建築構造物の床や橋梁の床板に使用される楕円形のものもある。コルゲート形状は、独立タイプ (ドーナツ型)、スパイラルなどがある。同 Recommendation には、わが国の指針に示されるような利点等が示されることに加えて、シース接続部を適切にシーリングすることにより tendon を完全にカプセルとして覆うことが可能であり、ケーブル防食層の電気的モニタリングの可能性についても言及されている¹⁰⁾。

5. おわりに

これまでに建設された PC 橋梁において、グラウト不良あるいは PC 鋼材の腐食が考えられる場合、本稿で述べたようにさまざまな検査技術が開発されているが、簡易で、精度よい検査手法は未だ開発途上であるといつてよい。また、グラウトの再注入技術も確立されていない。さらに、PC 鋼材の腐食による破断などが発見された場合、その橋梁の安全性あるいは耐荷性状等を評価する手法も明らかにされていない。今後、既設 PC 橋梁は益々老朽化していくことを考えれば、上述した問題点を早急に解決することが必要である。また、今後の新設、架替えでは、耐久性設計および質の高い施工を行うことはもちろん、環境条件によっては、防食 PC 鋼材あるいは FRP 等のような錆びない補強材を積極的に適用していくことが必要である。

参考文献

- 1) 青木圭一：プレストレストコンクリート橋における PC 鋼材破断とその調査および性能評価に関する研究 (埼玉大学提出博士論文)、2016.3
- 2) PC 箱桁外ケーブルに用いる防錆被覆 PC 鋼材の性能照査指針、PC 工学会、2012.4
- 3) エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針 (案)、コンクリートライブラリー 第 133 号、土木学会、2010
- 4) 山田真人：PC 橋の PC 鋼材の変遷、橋梁と基礎、pp.69-72、2014
- 5) アンカー工法によるダム堤体の補強方法に関する研究、ダム技術研究所報告 第 201001 号、(財)ダム技術センター、2009.9
- 6) PTI : Post-Tensioning Manual 6th Edition、2006
- 7) R. D. Kalina, S. Mac Lean, and J.E. Breen : Comparative Study of Mechanical and Corrosion Resistance Properties of Bridge Post-Tensioning Strands, FHWA/TX-11/0-4562-3、2011.8
- 8) 天谷公彦：PC グラウトとシース、プレストレストコンクリート Vol.59、No.6、Nov.2017
- 9) PE シースを用いた PC 橋の設計施工指針 (案)、PC 工学会、2015
- 10) Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning, fib Nulletin No.75、2014

【2018年9月11日受付】