

# 斜材システムの維持管理に関する 現状と今後の課題

酒井 秀昭\*1・白濱 昭二\*2・細居 清剛\*3

近年、インフラの老朽化にともなう橋梁の維持管理が急務になっているが、高度経済成長期に多く建設された橋梁に比べて比較的新しい構造形式であり、歴史も浅い斜張橋やエクストラードズド橋に関しても、その状況は同じである。主桁、塔、斜材から構成される斜張橋やエクストラードズド橋では、斜材は重要な構成要素であり、とくに桁に比べて斜材がより多くの鉛直荷重を分担する斜張橋においては、その重要度は大きい。斜材の維持管理を適切に行うことが、斜張橋やエクストラードズド橋の長寿命化や安全性の確保には必要であるが、桁や塔などのコンクリートや鋼部材の維持管理手法が一般に認知されているのに対し、斜材システムの維持管理手法は十分周知されているとはいえない状況である。

このような状況を踏まえ、本解説では、斜材システムのタイプやタイプごとの特徴および点検方法やその対策を整理し、斜材システムの維持管理に関する現状と今後の課題について解説する。

キーワード：斜張橋、エクストラードズド橋、斜材システム、維持管理

## 1. はじめに

近年、インフラの老朽化にともなう橋梁の維持管理が急務になっているが、高度経済成長期に多く建設された橋梁に比べて比較的新しい構造形式であり、歴史も浅い斜張橋やエクストラードズド橋に関しても、その状況は同じである。主桁、塔、斜材から構成される斜張橋やエクストラードズド橋では斜材は重要な構成要素であるため、斜材の維持管理を適切に行うことが、斜張橋やエクストラードズド橋の長寿命化や安全性の確保には必要である。また、鉛直荷重を桁がより多く分担するエクストラードズド橋に対して、斜材がより多く分担する斜張橋においては、その重要度はとくに大きい。

このように、斜張橋やエクストラードズド橋の維持管理を行ううえで重要な構成要素である斜材であるが、その保護と防錆のために斜ケーブルは保護管に覆われていることが一般的であり、通常の目視点検を主とした検査が困難であるのが現状である。このような状況で、斜材の検査がどのように行われているか、どのような問題点があるかを把握しておくことが重要である。

本解説では、斜材システムのタイプやタイプごとの特徴および維持管理方法の違いなどを整理し、斜材システムの維持管理に関する現状と今後の課題について解説する。

## 2. 斜材システム

斜材システムは、斜材および斜材定着具で構成され、さらに斜材は斜ケーブル、保護管、充填材などで構成されている。主な斜材システムを表-1に示す。本章では、これらの斜材システムを構成する各要素に関して述べる。

### 2.1 斜ケーブル

斜ケーブルには、一般に以下に示すような特性が要求されている<sup>1)</sup>。

- 1) 有効単位断面積あたりの引張強さが大きいこと
- 2) 断面密度が大きいこと
- 3) 弾性係数が大きいこと
- 4) 伸び特性が明確なこと
- 5) クリープが小さいこと
- 6) ケーブルの架設作業が容易であること
- 7) 防食が容易なこと
- 8) 曲がりやすいこと

以上の特性を満足する、これまで実績のある斜ケーブルとそれらの特徴を以下に述べる。

#### (1) ワイヤロープ

ワイヤロープは吊橋に多く使用されてきたケーブルであり、その技術が斜張橋へ応用されたものである。斜ケーブルとしてはスパイラルロープとロックドコイルロープが一般的であるが、平行線ケーブルに比べて強度とヤング係数が低下する。

#### (2) 平行線ケーブル

素線をほぼ平行に束ねた状態で使用するため、より（撓り）による強度低下がなく、ケーブルの引張荷重は個々の素線の引張強度を総合したものが得られる。また、ヤング係数も素線と同様で、設計荷重下でのクリープも小さい。

#### (3) PC鋼より線

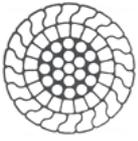
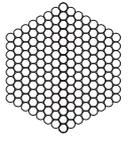
主にプレストレストコンクリート用の緊張材に使用されるケーブルで、シングルジャッキを使用して1本ずつ緊張を行うことが可能である。なお、近年では耐食性を向上させるために、より線に亜鉛めっきを施したもののほかに、

\*1 Hideaki SAKAI：中日本高速道路(株) 技術・建設本部

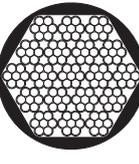
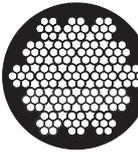
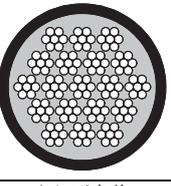
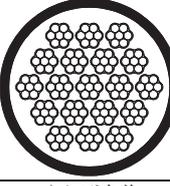
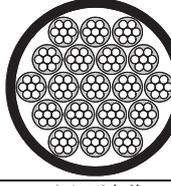
\*2 Shoji SHIRAHAMA：神鋼鋼線工業(株) エンジニアリング事業部

\*3 Kiyotaka HOSOI：神鋼鋼線工業(株) 技術部 PC鋼線技術室

表 - 1 主な斜材システム

斜ケーブル種類	ワイヤロープ		平行線ケーブル		
鋼材防食方法	亜鉛めっき	亜鉛めっき	亜鉛めっき	亜鉛めっき、裸線	亜鉛めっき
ケーブル防食方法	無塗装（塗装もあり）	無塗装（塗装もあり）	ラッピング+塗装、プラスチックカバリング	保護管+充填材	一括押し PE 被覆
斜材断面					
主な適用定着方法	亜鉛合金鑄込み定着	亜鉛合金鑄込み定着	亜鉛合金鑄込み定着	亜鉛合金鑄込み定着 平行線新定着	平行線新定着
製作システム	工場製作斜材システム	工場製作斜材システム	工場製作斜材システム	工場製作斜材システム	工場製作斜材システム

斜ケーブル種類	PC 鋼より線				
鋼材防食方法	亜鉛めっき、エポキシ樹脂被覆、PE 充填密着被覆	防錆油	裸線	エポキシ樹脂被覆、PE 充填密着被覆	亜鉛めっき+防錆剤+PE 被覆
ケーブル防食方法	一括押し PE 被覆	一括押し PE 被覆	保護管+充填材	保護管	保護管
斜材断面					
主な適用定着方法	くさび定着	圧着定着	くさび定着	くさび定着	くさび定着
製作システム	セミプレファブシステム	工場製作斜材システム	現場製作斜材システム	現場製作斜材システム	現場製作斜材システム

エポキシ樹脂被覆やポリエチレン塗装を施したものが用いられることが多い。

(4) PC 鋼棒

ワイヤロープやケーブルと違い、長尺で製造されず長さに制限があるので、鋼棒システムにはカップラーによる接続が必要になる。

斜ケーブルに PC 鋼棒を使用した例は少なく、海外でもフロリダの Dame Point 橋とカルガリーの 4 橋の歩道橋のほかに、マレーシア、ドイツおよびチリに各 1 橋ずつの 3 つの斜張橋があるだけであるとされている<sup>2)</sup>。

2.2 定着方法

(1) 亜鉛合金鑄込み定着

ケーブルの定着方法としてもっとも一般的な方法で、実績も多い。内面がテーパ形状のソケットに素線を広げたケーブルを挿入し、鑄込み材を充填して定着する。鑄込み材としては、亜鉛 98%、銅 2% の亜鉛合金を使用することが多い。

(2) 平行線新定着法

亜鉛合金鑄込み定着に使用される亜鉛合金の代わりに、エポキシ樹脂+鋼球を使用し、ワイヤ先端部にボタンヘッド加工を行ったものや、ソケット先端部のケーブルに作用する応力集中を緩和させるために、先端部近傍にエポキシ樹脂を充填したものなどがある。疲労強度が高く、大型斜張橋での実績が多い。

(3) 圧着定着

円筒形のスリーブに PC 鋼より線束を挿入し、冷間圧着加工を行う定着方法である。日本独自の定着方法であり、海外での実施例はない。

(4) くさび定着

くさびを用いて PC 鋼より線をアンカーヘッドに定着する方法である。一般の PC 用くさび定着具はほかの定着具に比べて疲労強度が劣るが、くさびの形状やケーブルに作用する応力緩和などの改良により斜材への適用が可能になった。

2.3 防食方法

斜張橋の斜材の防食方法として、かつてはワイヤラッピング+塗装が一般的であったが、そのうち、保護管+充填材が使用されるようになった。現在では、工程上不利なグラウト注入作業を省略できる一括押し PE 被覆や被覆 PC 鋼より線を用いた現場製作斜材システムなどの、ノングラウトタイプの斜材が主流となっている。

防食方法として、裸の鋼材表面に亜鉛めっきを施すのみという一重防食の場合もあるが、一般には鋼材表面の防食に加えて、被覆や保護管によるケーブル全体の防食を行う多重防食とすることが多い。以下に、単独の裸鋼材および鋼材の集合体としてのケーブルに対する主な防食方法を示す。

2.3.1 鋼材防食方法

(1) 亜鉛めっき

亜鉛めっき（溶融亜鉛めっき）は、もっとも一般的な鋼材の防食方法であり、亜鉛の犠牲陽極作用によって防食効果を実現する方法である。したがって時間の経過とともに亜鉛が消耗していくため永久的な防食効果はなく、腐食環境にある場合は亜鉛の消耗が激しくなるので、ポリエチレン被覆や保護管などと組み合わせて使用するのがよい。

**(2) エポキシ樹脂被覆**

エポキシ樹脂の遮蔽性を利用した鋼材の防食方法である。斜ケーブルとしては、PC 鋼より線の表面にエポキシ樹脂を被覆し、かつ各素線の隙間部にも充填する内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（ECF ストランド）がある。ECF ストランドは、エポキシ樹脂によって十分な防食性能が確保され、1990 年代から国内で使用され始めて以来、約 20 数年にわたって多くの使用実績があり、すでに PC 構造物において一般的に使用される材料となっている<sup>3)</sup>。

**(3) ポリエチレン充填密着被覆（PE 充填密着被覆）**

PC 鋼より線の内部空隙に熱可塑性樹脂を充填し、かつ外面を高密度ポリエチレンで被覆する防食方法である。前述の ECF が、PC 鋼より線のよりをほどいて素線の隙間にエポキシ樹脂を充填するのに対し、PE 充填密着被覆では、よりをほどくことなく樹脂の充填を行う。

**(4) 亜鉛めっき+防錆剤+PE 被覆**

亜鉛めっき PC 鋼より線に防錆剤としてグリースやワックスまたは防錆油を塗布し、その上にポリエチレンの押し出し被覆を行う、三重防食構造の防食方法である。

**2.3.2 ケーブル防食方法****(1) 塗 装**

塗装は、かつてはもっとも一般的なワイヤロープの防食方法であり、斜張橋のケーブルにおいても使用実績が多かったが、現在ではほとんど用いられていない。ロープを束ねた形式のケーブルでは、ロープ間の凹凸を埋めるのにシール材を使用した事例が多い<sup>2)</sup>。

**(2) ラッピング+防錆ペースト+塗装**

ケーブル架設後、ケーブルを外界の腐食環境から遮断するために、亜鉛めっきされたケーブル表面に防錆ペーストを塗布し、その上を亜鉛めっきした軟鋼線でラッピングし、さらに防食塗装を行うものである。

防錆ペーストは、合成顔料と乾性油を混合したペースト状の防錆材料で、結露しやすいケーブル表面の凹凸を埋めてケーブル内部への水の浸入を防止することを目的としている。高性能な防食材料へと変遷しているものの、基本的な防食方法は 100 年以上前に建設されたブルックリン橋からは大きく変わっていない<sup>4)</sup>。

**(3) プラスチックカバリング**

ラッピング+塗装に代わる防食方法で、FRP でケーブルをカバーする方法である。繊維としてはガラス繊維が用いられ、現場でケーブルに FRP 層を形成する方法と、工場で作成した FRP 製のカバーを現場で取り付ける方法がある。

**(4) 保護管+充填材**

斜ケーブルと保護管の空隙に充填材を注入する防食方法である。保護管としては主に PE 管が使用されるが、そのほかに FRP 管や鋼管も使用されている。充填材としてはセメントグラウトが一般的であるが、櫃石島橋、岩黒島橋ではポリブタジエンが充填されている<sup>1)</sup>。

亜鉛めっき鋼材を使用した斜ケーブルには、通常セメントグラウトは使用されない。これは、セメントによる強アルカリ環境に置かれた亜鉛から、水素ぜい性の原因となる水素が発生するためである。なお PTI では「鋼が最新の

ASTM A416、BS 5896 または EN 10138 にしたがって製造されていれば、亜鉛めっきストランドをセメントグラウトと接触させて使用しても良い。経験的に、これらの規準で製造されたストランドは水素ぜい性感受性がないことが示されている<sup>5)</sup>。」と述べられている。また、亜鉛めっき鋼線の亜鉛とセメントとの反応によって発生した水素の一部は亜鉛に吸収され、冷間加工によってめっき層にクラックが生じていなければ、鋼中に浸入しないという報告もある<sup>6)</sup>。

**(5) 一括押し出し PE 被覆**

斜ケーブルの表面に、製造工場一括してポリエチレンの押し出し被覆を行う防食方法で、耐食性に優れ、実績も多い。

斜ケーブルとして、亜鉛めっき鋼線や亜鉛めっきストランドおよび PE 被覆ストランド、エポキシ樹脂被覆ストランドなどが使用される。

**(6) 保護管**

ケーブルとしての防食方法が保護管のみである場合は、斜ケーブルとして防食性能の高い ECF や PE 充填密着被覆などの被覆ケーブルが使用される。

**2.4 工場製作斜材システムと現場製作斜材システム**

斜材システムは、製作方法や架設方法によって、工場製作斜材システムと現場製作斜材システムの 2 種類に大きく分類することができる。さらに、その両方の特徴をもったセミプレファブケーブルもある。

工場製作斜材システムは、製造工場で斜ケーブルに定着体の取付けを行った斜材システムであり、斜ケーブルとしてワイヤロープおよび平行線ケーブルを使用した場合は、すべて工場製作斜材システムとなる。架設は一般に、ケーブル本体をクレーンにより直接吊込むか、ガイドワイヤとウインチを用いて引き込む方法が用いられる<sup>7)</sup>。

現場製作斜材システムは、保護管と斜ケーブルが分割された斜材システムである。斜ケーブルとしては PC 鋼より線が使用され、ECF や PE 充填密着被覆された PC 鋼より線を用いたノングラウトタイプや、裸 PC 鋼より線+保護管を用いたグラウトタイプのものがある。架設方法は、保護管を架設後に斜ケーブルを 1 本ずつ保護管内へ挿入する場合と、橋上で接続された保護管内にあらかじめ PC 鋼より線をすべて挿入し、定着体をセットする方法がある<sup>7)</sup>。

セミプレファブケーブルは、亜鉛めっき PC 鋼より線および PE 被覆 PC 鋼より線を用いた斜ケーブルに、製造工場一括押し出し PE 被覆を行ったものである。防食処理を施された斜材として現場に搬入され、定着具は現場でセットされる。

**3. 点検と調査**

斜張橋およびエクストラドーズド橋の診断は、点検、劣化機構の推定、劣化予測、橋梁あるいは部位・部材の性能評価および対策の要否判定から構成される<sup>8)</sup>。本章では、点検を効率的に実施するための点検ポイントと調査方法に関して述べる。

**3.1 点検ポイント**

点検は維持管理計画にしたがって実施されるが、斜材シ

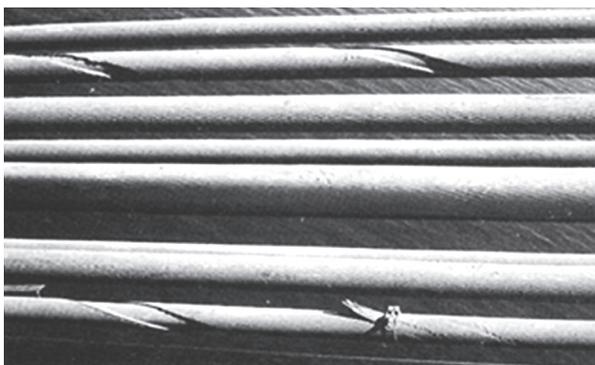
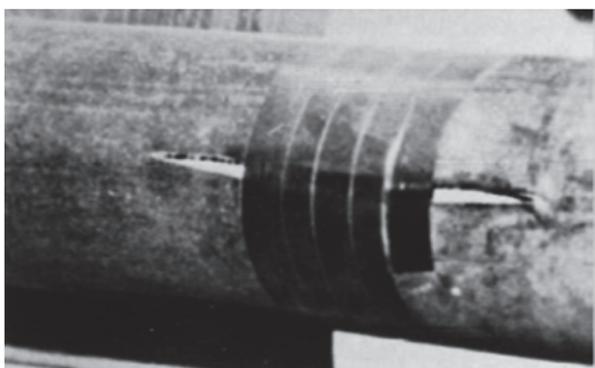
写真 - 1 Maracaibo bridge の破断したケーブル<sup>9)</sup>写真 - 2 Zarate-Brazo Largo 橋の保護管の亀裂<sup>11)</sup>

写真 - 3 充填材注入口の割れ

システムの点検を行う場合、各構成要素に変状がみられる可能性の高い箇所点検ポイントを設定し、重点的に点検を行うことが重要である。以下に、代表的な各点検ポイントにおける損傷・劣化事例を示す。

#### (1) 塗 装

ケーブルに塗装を行った場合、塗膜にはケーブルの振動や伸び、変形などに伴う繰返しひずみが生じる。また、塗膜は一般に高分子化合物で構成されているため、化学的劣化と紫外線、酸素、熱などが複合的に作用して劣化する。これらの要因によって塗膜に割れが発生し、割れがケーブル表面に達すると、大気中の水分や酸素がケーブル表面に浸入していく場合もある。

写真 - 1 は、ベネズエラの Maracaibo bridge の斜材として使用されていたロックドコイルロープが、腐食によって破断した状況である。Maracaibo bridge は、1962年に建設

された長大斜張橋の先駆けとなった主径間 235 m の 5 径間連続斜張橋である。1978 年の詳細調査で 500 本以上の断線が検出され、1979 年には 3 本のロープが完全に破断した。ケーブルは亜鉛めっきされたロープ素線に塗装を行っていたが、不適切な保守、暑い海洋性気候での塗装、点検時に取り外したゴムブーツを取り外したままにしたため、湿潤雰囲気になったことが原因とされている<sup>9)</sup>。

#### (2) ラッピング+防錆ペースト+塗装

亜鉛めっき鋼線を基本に、「防錆ペースト+ワイヤラッピング+塗装」によりケーブル内に水が入らないよう「水を遮断する」方法であるが、供用後 7 年を経過した既存吊橋の因島大橋のケーブル開放調査で、ケーブル内部に水分と腐食が確認されている。さらに、模擬ケーブルによる腐食・暴露試験、防錆ペーストの性能確認など徹底的な原因調査を行ったところ、ケーブル内には工事中あるいは供用後の塗膜の割れから侵入した水が存在し、ケーブル内の水は外気温の変化に伴い蒸気化や結露を繰り返し、ケーブル内部の素線が腐食することが判明している<sup>10)</sup>。

#### (3) 保護管・被覆

保護管や被覆材の材料として主に使用される高密度ポリエチレンは、クリープ特性と耐ストレスクラッキング性に優れており、またカーボンブラックと紫外線吸収剤を添加することによって耐候性が向上している。したがって、通常の使用では耐久性に優れた材料であるが、架設時の損傷や供用中の温度応力、振動、車両の衝突などの外的作用によって、保護管・被覆のひび割れ、圧痕、えぐれや鋼線の露出が発生する場合がある。

写真 - 2 は、アルゼンチンの Zarate-Brazo Largo 橋で保護管が損傷した事例である。斜ケーブルとして平行線ケーブルを使用し、PE 保護管にグラウト注入を行っているが、グラウト注入後、保護管に縦方向の亀裂が発生した。その原因は高温のグラウトにより保護管に大きなひずみが生じ、グラウト硬化後に保護管が冷却され、保護管に大きな応力が生じた結果だとされている<sup>11)</sup>。

#### (4) 保護管接続部

現場製作斜材システムでは、保護管を架設する前に橋上で短尺の PE 管を溶接して組み立てられる。また、工場製作型斜材システムの保護管は、現在では一括押出成形が主流であるが、かつては工場短尺の PE 管が溶接されている場合もあった。このように、接続部を有する保護管では溶接部などに亀裂が入っている場合があるので、点検時には注意が必要である。

保護管の溶接部が破損した例として、アメリカの Luling 橋の事例がある。Luling 橋では工場製作型斜材システムが使用されたが、短尺の PE 保護管どうしの溶接部がケーブル巻取りおよび展開中に破損した。このケーブルはリールに 3 か月間巻かれていただけであったが、リール上での破損は溶接の不具合であり、展開中の破損は低気温が原因であった<sup>9)</sup>。

#### (5) 充填材注入口 (排気口)

保護管に充填するタイプの斜材では、充填材の注入は斜材の下部から上部に向かって行われるため、通常、斜材の

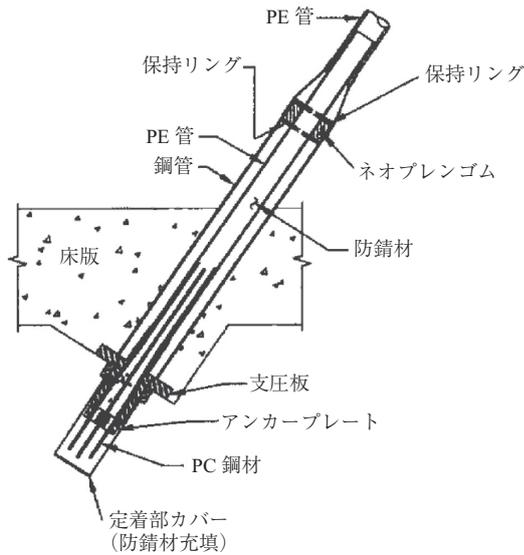


図 - 1 斜材定着部の構成例<sup>8)</sup>

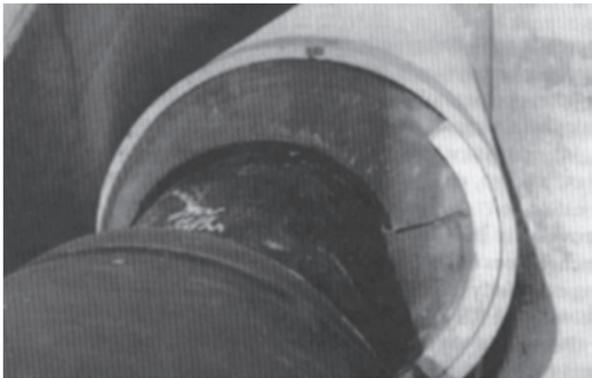


写真 - 4 ケーブルとネオプレンゴムの隙間<sup>2)</sup>



写真 - 5 保持リングの破損とネオプレンゴムのずれ<sup>2)</sup>

中間部にいくつかの充填材注入口（排気口）を設けて分割注入が行われる。この注入口は、充填材注入後、ポリエチレン溶接などによって封止されるが、写真 - 3 に示すように経年による溶接部の割れが発生する事例が多く見られるため、注入口の溶接部は注意して点検を行う必要がある。

#### (6) 充填材

充填材としては主にセメント系グラウトが用いられるが、不完全な施工により保護管中に空隙が生じたり、ブリージング水が滞留したりすることがある。また、供用中のケーブルの振動やグラウトの乾燥収縮によりグラウトにク

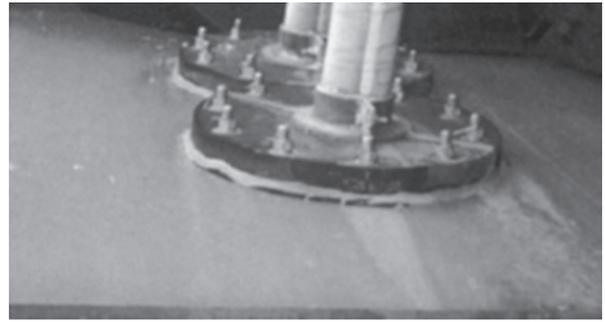


写真 - 6 Luling 橋のスチールボックスのケーブル出口にあるネオプレンゴム<sup>12)</sup>

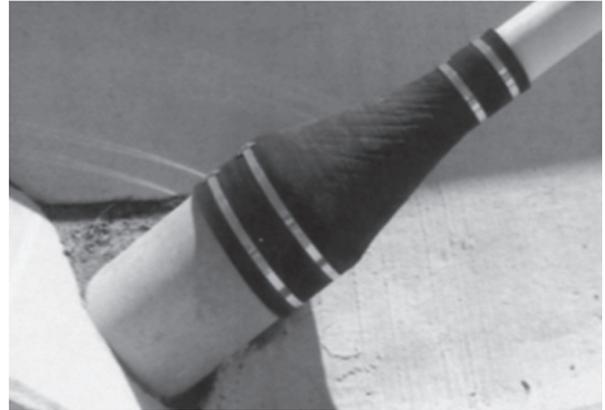


写真 - 7 ネオプレブーツ<sup>2)</sup>

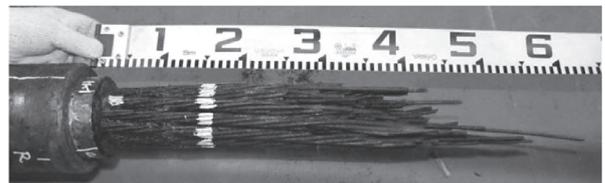


写真 - 8 破断したエクストラドーズドケーブル<sup>14)</sup>

ラックが発生し<sup>2)</sup>、それが鋼線のフレッチング腐食につながる可能性もある<sup>13)</sup>。

これらの変状は、保護管や被覆材が外見上健全であっても、その内部で生じるものであるから、点検の際には注意が必要である。

#### (7) 定着部周辺

図 - 1 は、斜材定着部の構成例である。このように、多くの斜張橋では斜材の両端部に発生する曲げ応力を緩和するため、「ワッシャー」や「リング」と呼ばれるネオプレンゴムがケーブル端部近くのガイドパイプ内にある PE 管の周囲に取り付けられている。また、ネオプレンゴムは曲げ応力を緩和するだけでなく、斜材の振動減衰にも寄与する。

斜材はガイドパイプの中央に配置されているわけではないので、PE 管の周りのネオプレンゴムの厚さが変化していたり、写真 - 4 に示すようにネオプレンゴムと斜材の間に隙間ができていたりすることがある。また、ネオプレンゴムを所定の位置に保つ鋼製の保持リングが破損し、その結果、写真 - 5 に示すようにネオプレンゴムが外れて



写真 - 9 自走式点検ロボットの一例

いることもある<sup>2)</sup>。このような状況は、斜材の曲げ応力緩和や振動減衰の効果を損なうばかりではなく、桁内への水分の浸入を許すことにもなる。

写真 - 6 は、Luling 橋のスチールボックスのケーブル出口にあるネオプレンゴムである。ネオプレンゴムは鋼桁の上部でシースを囲み、隙間にはコーキングが施されているが、コーキングは劣化してひび割れが入り、場所によってはなくなっていた。ネオプレンゴムを取り外してボックスの中に光ファイバーを挿入して検査したところ、ボックス内にケーブルを囲んでいる滞留水が見つかった。さらに、ボタンヘディングしたワイヤ端面を調査するためにソケットのエンドキャップを緩めたところ、エンドキャップから水が流れ出てきた。なお、ケーブルにはさまざまな程度の腐食が見られた<sup>12)</sup>。

ネオプレンブーツは、一般にネオプレンリング近くのケーブルシースとガイドパイプの隙間を覆うために使用される。写真 - 7 は、正常に設置されているネオプレンブーツである。ブーツとシースをガイドパイプに締め付けるために一般にホースクランプが使用されるが、クランプが外れて雨水がガイドパイプに入り込む状態が観測されている<sup>2)</sup>。

写真 - 8 は、破断したエクストラドーズド橋のケーブルである。桁側定着部近傍から浸入した水分が、防食層内部の PC 鋼より線に到達したことが原因だと考えられる。問題の防食層にある熱収縮チューブには、ケーブル架設完了前からすでにあつたとみられる損傷（裂傷や穴）が見つかったが、その損傷が工場での製作時なのか現場での施工時なのかは特定できていない。現場で施工したあとでは目視で熱収縮チューブの健全度を確認できないため、検査方法に注意する必要がある<sup>14)</sup>。

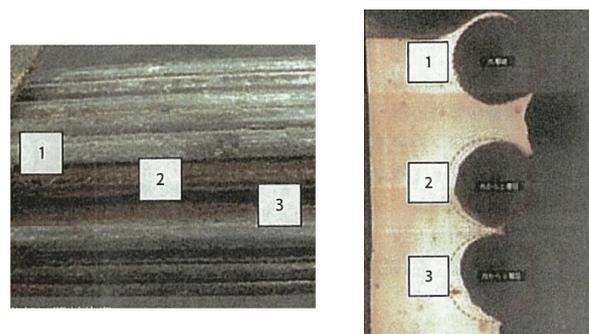
桁側の定着部は斜材システムの最下部にあるため、斜材一般部やネオプレンゴムなどの防食層の欠陥を通じて浸入した雨水などが滞水しやすい。さらに、斜材システムにとって構造的に非常に重要な構成要素であるため、定着部周辺は重要な点検ポイントである。

### 3.2 調査方法

斜材システムの代表的な調査方法を以下に示す。なお、



写真 - 10 渦流探傷法



(a) 腐食鋼材

(b) 採取したレプリカの断面

写真 - 11 レプリカ法<sup>15)</sup>

点検のためにケーブルの被覆あるいは保護管などを除去した場合、点検後、防食機能が損なわれないように現状復帰あるいは新たな防食処理を行うことが重要である。

#### (1) 目 視

最も一般的な調査方法であり、下記の3種類に分類できる<sup>8)</sup>。

車上目視：構造物の状況を車上から目視あるいは車上感覚で点検する方法。

遠望目視：構造物の状況を降車し遠方から目視により点検する方法。

近接目視：構造物の状況を検査路や足場などを利用して、構造物に接近または双眼鏡にて目視により点検する方法。必要に応じて簡易な機械、器具などを使用する。

このうち、ケーブルの場合は点検対象に近づいて目視を行う近接目視が基本であるが、アクセスの制限などにより近接が困難である場合は、ポールカメラ、工業用ビデオスコープ、ケーブル検査車、自走式点検ロボット、マルチコプターなどの機器の使用や、ロープアクセス工法によって撮影した動画や静止画を用いて調査を行うこともできる。

写真 - 9 に示す装置は自走式点検ロボットの一例で、保護管の変状をイメージスキャナで点検するとともに、保護管内部の鋼材の表層部の変状を渦流探傷（後述）する機能を有している。

#### (2) 非破壊検査

ケーブルの腐食や断線を調査する非破壊検査として代表的なものが、渦流探傷法と全磁束法であり、ケーブル一般部が対象である。また、定着体近傍を対象とした非破壊検査法として、超音波探傷法がある。



写真 - 12 損傷した Binh 橋の斜ケーブル 17)



(a) 施工前

(b) 施工後

写真 - 13 酸化重合型防食テープ巻き

渦流探傷法は、コイルに交流電流を流して磁界を発生させ、そのコイルを検査対象である導電性物質に近づけて移動させ、腐食状況に応じた信号の変化を検知することにより腐食の発生位置や腐食量を評価する方法である。評価対象は鉄や亜鉛の断面減少である。一般に腐食量の定量的な推定は困難であるが、装置が軽量で取り扱いが簡便である(写真 - 10)。

全磁束法は、ケーブルを軸方法に飽和磁化させたときにケーブル内部に流れる磁束(全磁束)を測定することによって、腐食などによるケーブルの断面欠損を定量的に評価する方法である。ケーブルに飽和に近い磁束を流さないとい計測精度が上がらないため、検出部の軽量化が困難で、取扱性が悪い。

超音波探傷法は、定着体端のワイヤ端部が露出した部分より超音波を送り、その反射波を検知することで断線を検出する方法である。ボタンヘッド加工を施す平行線新定着法で海外の2～3件の橋梁に適用された例がある<sup>1)</sup>。

### (3) レプリカ法

ケーブル表面の錆をワイヤブラシなどを用いて除去したのち、シリコン印象材を用いて外層素線表面腐食形態のレプリカを採取し、断面マクロ観察や拡大観察を行うことによって素線の断面状況を評価する方法で、外層素線の腐食減量を定量評価することができる。写真 - 11 に腐食した鋼材とその表面から型を取ったシリコン印象材の断面を示す<sup>15)</sup>。

### (4) 振動法

ケーブルの曲げ振動方程式から導いた振動法によるケー

ブル張力の測定は従来から多くの実績があるが、この手法ではケーブルの曲げ剛性値を事前に対象ケーブルの実大試験などで測定しておく必要がある。現地でのケーブル張力測定時のすべての状況を想定して事前試験を行うことは困難であり、事前試験と現地試験とで条件が異なることに起因する張力算定誤差が生じる可能性がある。この問題を解決するために、複数の高次の固有振動数とモード次数の関係式から直接、張力と曲げ剛性を同時に求める新しい高次振動法が実用化されており、吊橋や斜張橋などの吊構造物では十分な精度を有していることが確認されている<sup>16)</sup>。

## 4. 劣化・損傷時の対策

点検結果から劣化状態の推定、劣化予測ならびに橋梁あるいは部位・部材の性能評価を行い、その結果、対策が必要と判定された場合には、適切な対策を行う必要がある。ここでは代表的な対策方法に関して述べる。

### 4.1 斜ケーブル

#### (1) 斜ケーブルの取替え

深刻な腐食や断線による断面減少や、被覆の損傷によりケーブル内部への雨水の浸入が大規模で、さらに影響範囲が不明な場合は、斜ケーブルの取替えを行うことも検討する必要がある。

斜張橋のケーブル取替えは世界的にもまだ実績は少ないが、2010年にベトナムの Binh 橋に台風で流された3隻の貨物船が衝突して損傷を与えるという事故が発生し、斜ケーブルを取り替えた例がある。斜ケーブルはポリエチレン被覆が完全に剥ぎ取られ、素線表面のめっきも損傷が確認されており、さらに塩分を含んだ風雨によってすでに白さびも発生し、内部まで塩分を含んだ水が浸透していると推測された。損傷したケーブルの正確な耐久性評価は難しく、また将来にわたり品質保証することはできないため、新しいケーブルに取り替えることになったものである<sup>17)</sup>。損傷したケーブルを写真 - 12 に示す。

#### (2) 酸化重合型防食テープ巻

腐食による劣化が激しいケーブルは取替えがもっとも望ましいが、腐食が軽度で取替えが困難な場合は、ケーブルの延命策を図るケースが多くある。亜鉛めっきケーブルのめっきが減少している場合、酸化重合型防食テープ巻きにより腐食進行を抑制する補修工法が実用化されている。これは、特殊配合乾性油を主成分としたコンパウンドをプラスチック系の布に含浸させたテープを用いるもので、防食性・耐候性・耐熱性・密着性および変位追随性に優れる。施工後は酸化重合反応によって表面が硬化して硬化膜が形成されるが、内部は柔軟性を維持しているため、定期点検時のテープの開封・復旧が容易で、摩耶大橋やかかもめ大橋での実施例がある。写真 - 13 に、テープ巻施工前後のケーブルを示す。

### 4.2 ポリエチレン被覆

ポリエチレン被覆の補修は損傷程度に応じて行う必要がある。表面の損傷が浅い場合は、切欠き底部をサンドペーパーなどで滑らかに仕上げ、損傷部周囲の突出部は削り取り、滑らかに仕上げる。表面の損傷が深く、ポリエチレン

被覆の厚みを確保する必要がある場合は、被覆と同一材料の溶接棒を用いて損傷部の溶接、肉盛を行う。損傷部のポリエチレン被覆の厚み、外觀および寸法を考慮して補修方法を選定する。

損傷部の被覆が大きく変形した場合、もしくは、むしりとられた場合は、損傷部を切り取り、切り取った部分に二つ割りのポリエチレン管を被せ、同一材料の溶接棒を用いて溶接、肉盛を行う。なお、溶接部の保護のために、補修箇所の上にカバーを取り付ける場合もある。

#### 4.3 定着部周辺

前述したように、桁側の定着部は一般に斜材システムの最下端部にあるため、ケーブル一般部や防水層から浸入した雨水などが集まってきやすい。したがって、点検によって定着部内への浸水や滞水が確認された場合は、定着管内の水抜きおよび乾燥後、止水ゴムカバーの更新などによって防水対策を施す必要がある。また、定着管内への浸水があった場合でも、水抜き孔などを設置することによって滞水しないようにしなければならない。なお、水抜き孔が設置されている場合でも、汚れなどによって孔が塞がれている場合があるので、そのような時は水抜き孔を清掃し、貫通させて滞水を排水する必要がある。

### 5. 斜材システムの維持管理の今後の課題

斜材システムの維持管理の今後の課題は以下のとおりである。

- 1) 斜材システムは、建設時期や設計施工条件によっていろいろな種類のもので使用されているため、当該橋梁の斜材システムの構造や特性を理解する必要がある。
- 2) 比較的古い時期に施工された橋梁は、鋼材の防錆方法などが経年劣化により変状が発生している恐れが高いため、過去の変状事例も参考に十分な点検を行う必要がある。
- 3) 斜材の維持管理にあたっては、詳細な知識が必要となるので、維持管理方法を規定した規準を早期に整備するとともに維持管理技術者の育成を図る必要がある。
- 4) 斜材システムを構成する斜ケーブルの鋼材および定着具内部は、目視することが不可能であるため、効率的な点検が可能な非破壊検査機器を開発する必要がある。

### 6. おわりに

橋梁の維持管理では、点検を確実にし、その結果を適切に評価し、効果的な対策を行うことが重要である。とくに、斜張橋やエクストラードード橋は桁橋などの、ほかの構造形式に比べて支間長が長い大規模橋梁が多く、劣化や損傷による事故の発生や、大規模修繕に伴う通行規制などによる社会的影響が大きくなるため、維持管理の重要性は高い。しかし、桁や塔などのコンクリートや鋼部材の維持管理手法が一般に認知されているのに対し、斜張橋やエクストラードード橋にとって非常に重要な構成部材である斜材システムの維持管理手法は十分周知されているとはい

ない状況である。

このような状況のなかで、本解説では斜材システムのタイプやタイプごとの特徴および点検方法やその対策を整理し、さらに斜材システムの維持管理に関する現状と今後の課題について述べてきた。

国内の斜材システムを有するコンクリート構造および鋼構造の斜張橋やエクストラードード橋は、500橋を超えるものと推定される。これらの橋梁を、効率的に維持管理して高耐久化を図ることは橋梁技術者の責務であるので、前述の課題を速やかに解決することが必要になると思われる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼斜張橋－技術とその変遷－ [2010年版]，2011
- 2) Transportation Research Board of the National Academies：Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems，2005
- 3) 土木学会：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），2010
- 4) 古家和彦，北川 信，中村俊一，鈴木恵太，聖守守雄：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究，土木学会論文集，No.637/V1-45，1999.12
- 5) PTI：Recommendations for Stay Cable Design, Testing, and Installation，2001
- 6) Yukio Yamaoka, Hideyoshi Tsubono, Makoto Kurauchi：Effect of Galvanizing on Hydrogen Embrittlement of Prestressing Wire, PCI Journal, Volume: 33, Issue: 4, pp.146-158, 1988
- 7) プレストレストコンクリート技術協会：PC斜張橋・エクストラードード橋設計施工規準，2009
- 8) プレストレストコンクリート技術協会：PC斜張橋・エクストラードード橋維持管理指針，2011
- 9) R.Saul, H.S.Svensson：On the Corrosion Protection of Stay Cables, Wire Rope News and Sling Technology, pp.14-29, 1991
- 10) 長谷川芳己：本州四国連絡橋の防食の事例，第12回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，2009.8
- 11) David G. Stafford, Stewart C. Watson：A current world-condition survey of cable elements on stayed-girder bridges, 1st Kerensky Memorial Conference, session 2, 1988
- 12) Telang, N.M., C.A. Ligozio, and A.B. Mehrabi：Luling Bridge-Phase II Structural Evaluation of Luling Bridge Stay Cable Array-Tasks 1, 2, and 3, Report to the Louisiana Department of Transportation and Development, State Project No. 700-45-0107, Construction Technology Laboratories, Skokie, Ill., July 2004
- 13) Ito Manabu：Stay Cable Technology: Overview, Proceedings of the IABSE Conference, Cable-Stayed Bridges, Past, Present, and Future, Malmo, Sweden, pp. 481-490, 1999
- 14) 日経コンストラクション：秋田県の雪沢大橋でPCケーブル破断 エクストラードード橋の定着部付近で水分が浸入して外ケーブル破断，2012/01/23号 pp26-29，2012
- 15) 鉄鋼技術：昭和の名建築を守る 船橋市中央卸売市場，2009
- 16) 河村 睦，奥村敏弘，細居清剛，堀井智紀：高次振動法によるPC外ケーブルの張力測定，プレストレストコンクリート，vol.56, No.6, 2014
- 17) 藪野真史，山本裕一，川端 諭，得地智信，井谷達哉：「Binh橋」（ベトナムの合成桁斜張橋）の補修工事報告，IHI技報 Vol.53 No.1, 2013

【2016年5月10日受付】