

トルコ共和国 第1ボスポラス橋の工事報告

－ 長大吊橋の大規模保全 －

海外事業委員会

杉村誠 北山暢彦

1. はじめに

トルコ共和国イスタンブールのボスポラス海峡に架かる第1ボスポラス橋(2016年のクーデター未遂後に「7月15日殉教者橋」と改名)は、1973年に建設され、供用開始から45年以上が経過している。トルコ共和国の経済発展に伴い交通量も増加し、現在の日平均交通量は約20万台である。

橋梁管理者であるトルコ道路庁は2012年に第1ボスポラス橋の健全度調査を実施し、その結果として長寿命化を目的とした大規模補修工事の実施を決定した。この工事にはさまざまな工種が含まれているが、本報告では特徴的な3つの工種であるハンガー取り替え、主ケーブル補強及び送気乾燥システムの導入について述べる。図-1に工事実施前後の一般図を示す。

2. ハンガー取り替え

第1ボスポラス橋のハンガーは当初図-1に示すような斜めハンガー形式が採用されていた。しかし、斜めハンガーは疲労耐久性に問題があるという報告もあ

り、鉛直ハンガーへの取り替えが推奨されていた。そのことから2012年、トルコ道路庁は吊橋の健全度調査を実施した。その結果、構造照査によりハンガーの応力超過が判明し、また多くのハンガーに腐食が確認されたため、全ハンガーが取り替えられることとなった。取り替えにあたり2つの案が検討された。第1案は斜めハンガーを再度斜めハンガーへ取り替える案、第2案は斜めハンガーから鉛直ハンガーへ構造変更する案である。検討の結果、鉛直ハンガーへ構造変更する第2案の方が工程が短く経済的であると試算された。理由としては、第1案の場合は、ハンガーを取り替えるための鉛直仮ハンガーの設置と、新設斜めハンガー設置後に仮ハンガーの撤去が必要となり、その分工期が長くなるためである。景観等についても考慮を行い、総合的な判断としてトルコ道路庁はすべての斜めハンガーを鉛直ハンガーに取り替えることを決定した。

世界には斜めハンガー形式の長大吊橋があと2橋ある。イギリスに現存するセバーン橋とハンバー橋である。セバーン橋でも過去にハンガー取り替え工事が行

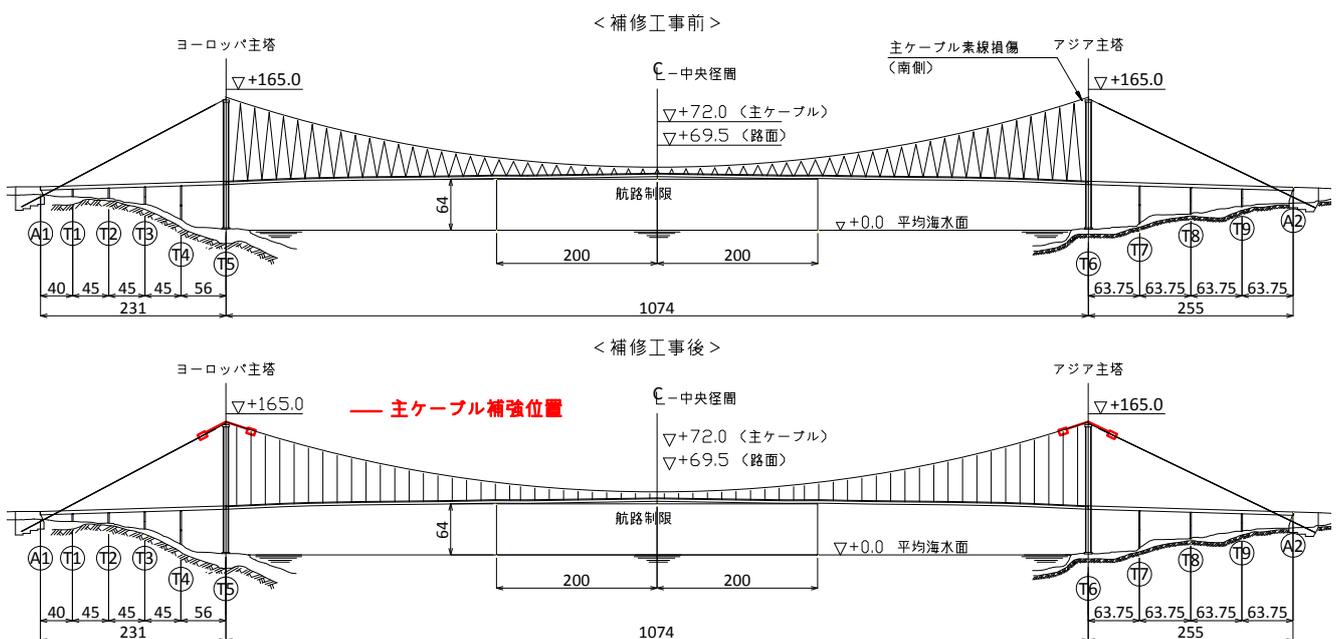


図-1 一般図

われたが、斜めハンガーから斜めハンガーへの取り替えであった。そのことから本工事は世界で初めて長大吊橋の斜めハンガーを鉛直ハンガーに取り替えた事例といえる。

2. 1 取り替え手順

ハンガー取り替え手順を以下に示す。

- 補剛桁と主ケーブルに新設鉛直ハンガー定着部材を設置
- 新設鉛直ハンガーを設置
- 張力導入により吊橋の死荷重を既設斜めハンガーから新設鉛直ハンガーへ移行
- 既設斜めハンガーを撤去
- 鉛直ハンガー張力の調整

図-2 にハンガー取り替えの概略図を示す。

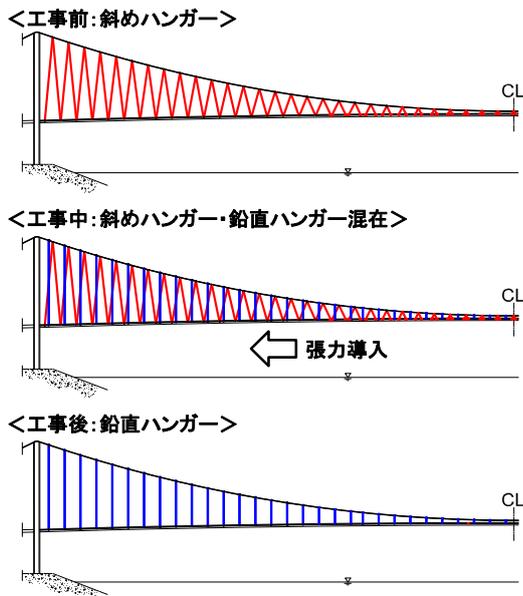


図-2 ハンガー取り替え手順

鉛直ハンガーの定着点は、既設斜めハンガーの定着点とは異なる。そのため、まず鉛直ハンガーの定着部材（補剛桁側：ガセットプレート、主ケーブル側：ケーブルバンド）を設置する必要があった。次に、新設ハンガーを設置し、鉛直ハンガーに張力を導入することで既設ハンガーの張力を抜くこととした。ハンガーの基部は写真-1 に示すように、ジャッキでロッドの長さを調整することで張力調整ができる構造になっている。その後斜めハンガーを撤去し、新設ハンガーの



写真-1 ハンガー張力調整機構



写真-2 張力調整後のハンガー基部

張力確認を行い、必要に応じて張力調整を行った。写真-2 に張力調整後のハンガー基部の状況を示す。

2. 2 現場作業

(1) ガセットプレート

ガセットプレートは図-3 に示すような、ハンガーを補剛桁に定着するための部材である。ガセットプレートはピンプレート、サイドプレート、トッププレート及び補剛桁内の補強部材で構成されている。新設ガセットプレートの設置位置は補剛桁ダイヤフラムから1m離れた位置である。ガセットプレートは補剛桁に溶接で接合されているため、施工前に溶接施工要領書を

作成し、それに適合した溶接施工試験を行った。溶接施工試験には実寸大模型を用い、施工手順の確認および改良を行った。ピンプレートの溶接で最も難しかった点は、溶接後の鉛直度の確保であった。ピンプレート基部は構造上狭隘部になるため、片側から大熱量の溶接を行わなければならない、熱収縮により傾いてしまうことは避けられなかった。溶接前にピンプレートを鉛直に据え付けて治具で拘束した場合、溶接部には大きな残留応力が発生することになる。そこで溶接後に鉛直度が確保できるように、溶接による変形量を溶接施工試験結果より推定し、溶接前のピンプレートの設置角度および溶接手順を決定した。

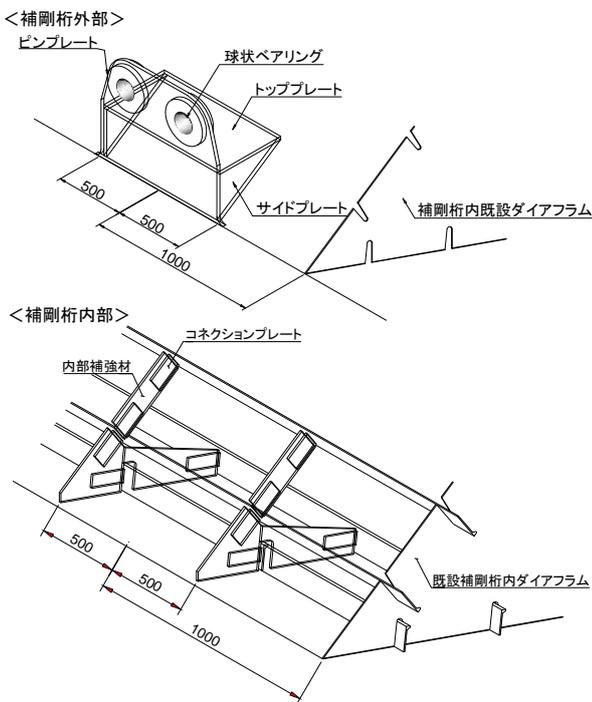


図-3 ガセットプレート配置

(2) ケーブルバンド

ケーブルバンドは写真-3 に示すように、ハンガーを主ケーブルに定着するための部材である。

主ケーブルと鉛直ハンガーの交角は場所により異なるため、設置場所の主ケーブルと鉛直ハンガーの角度に応じて、ケーブルバンドを6種類のタイプにグルーピングして製作を行った。

新設ケーブルバンドは、基準温度(20℃)でハンガーが鉛直となる位置に設置しなければならなかった。



写真-3 ケーブルバンド

そのため、補剛桁の新設ガセットプレート設置後、その位置を基準としてトータルステーションを使用し、主ケーブル上に投影した位置にマーキングを行った。主ケーブルは活荷重及び温度の影響によって常に動いている状態にあるので、活荷重の影響をできるだけ小さくするために計測は深夜に行った。また、温度の影響を考慮するため、解析によって温度差による補剛桁と主ケーブルの相対変位量を算出し、計測値の補正を行った。解析には全橋モデルを作成し、主塔塔頂と主ケーブルのサグ点の測量を行い解析値と比較を行うことで、解析精度の妥当性を評価した。ケーブルバンドの設置前に、コンパクションマシンで主ケーブル断面形状の整形を行い、その後、ケーブルバンドを設置した。ケーブルバンドボルトの設計軸力は375 kNであったが、初期軸力として435 kNを導入した。一般的にケーブルバンドボルトの軸力は時間の経過と共に徐々に減少することが知られている。特にボルト軸力導入直後は急激に軸力が低下する。そのため、軸力が将来最終的には設置時から15%低下することを想定して初期導入軸力(435 kN)を決定した。ケーブルバンドボルト軸力を確認するために施工期間中に、ケーブルバンド設置後、ラッピングワイヤ設置後、ハンガー取り替え後の合計3回軸力計測を実施した。ケーブルバンドボ

ルト軸力計測には超音波軸力計を使用した。以前はマイクロメータを使用したケーブルバンドボルト軸力計測が一般的であったが、超音波軸力計は持ち運びに優れ、かつ操作が容易であるため作業員と検査員の負担を軽減することができた。

(3) ハンガー

新設ハンガーには、直径 55 mm のスパイラルロープを使用した。ハンガーは 1 カ所あたり 2 本のスパイラルロープで構成されている。連結部を確実にピンとして機能させるために、球状ベアリングをハンガーのピン部に組み込みこんだ。

すべてのハンガー設置後、中央径間の中央から主塔に向かって段階的に新設ハンガーに張力を導入していった。新設ハンガーに張力を導入することにより死荷重が既設ハンガーから鉛直ハンガーへ移行し、既設ハンガー張力が解放されるよう導入張力を決定した。写真-4 に新設ハンガー張力導入によって、斜めハンガーが緩んでいる状況を示す。

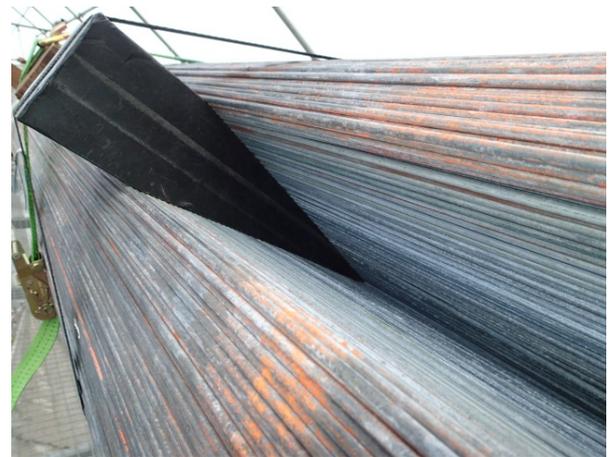


写真-4 新設ハンガー張力導入状況

その後既設ハンガーを撤去、および新設ハンガーの張力計測を実施し、ハンガー張力が許容値を超過している箇所は張力調整を行った。調整は隣接するハンガーへの影響も考慮しながら行い、最終的にすべてのハンガー張力が設計張力の 5%以内であることを確認した。

3. 主ケーブル補強

本工事には主ケーブルのラッピングワイヤの取り替えも含まれており、ラッピングワイヤ撤去後に主ケーブル内部の腐食状況確認を行った。写真-5 に主ケ



＜ 上側 ＞



＜ 下側 ＞

写真-5 主ケーブル開放調査状況

ーブル内部の状況写真を示す。

全体をとおして主ケーブル上部は軽い白錆、主ケーブル下部は赤錆の発錆が確認された。建設後 45 年が経過していることを考慮すると、損傷があるのは主に表面で、全体的には概ね健全であるといえる。

破断している素線が見つかった場合は、損傷部位を切除し、新しい素線を専用のターンバックル付きのフェールールを使用して、張力導入のうえ再接続した。写真-6 に素線接続作業状況、および写真-7 にターンバックル付きフェールールを示す。

主塔塔頂付近の主ケーブル腐食状況確認を行った際に写真-8 に示すような大規模な腐食と 67 本の素線破断が発見された。破断素線が数本であれば再接合し復旧することも容易であるが、破断本数が多数であったため、これらを完全に修復することは困難であった。そのため暫定処置として張力導入をしないでフェール

ルを用い素線を接続し、腐食の除去を行った。写真-9に素線修復後の状況を示す。

当初設計では主ケーブルの安全率は2.4であったが、この腐食・破断により1.93まで減少していることが判明した。そのためトルコ道路庁は安全率を当初の数値

まで復旧させるために、追加工事として主ケーブル補強を全ての塔頂付近で行うことを決定した。



写真-6 新旧素線接続状況



写真-9 素線修復後の状況



写真-7 ターンバックル付きフェルール

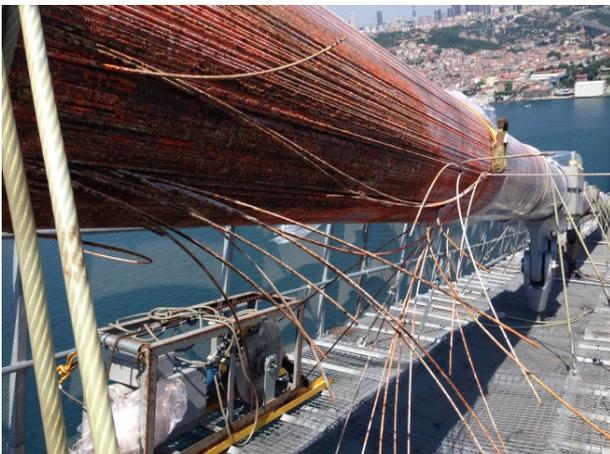


写真-8 塔頂の主ケーブル素線損傷状況

3. 1 補強方法

主ケーブル補強方法として、腐食・破断による断面欠損分を補うために、追加のストランドを主塔付近に設置することにした。図-4に示すように、4本の補強ストランドが主ケーブルの両側に配置され、新たに設置する補強ストランド用ケーブルバンド(以下、「補強用バンド」と示す)によって主ケーブルに定着される構造になっている。

補強用バンドは塔頂から約30m離れた位置に設置し、ストランド張力は補強用バンドと主ケーブル間の摩擦によって主ケーブルに伝達されるようにした。補強ストランドの両端には新設鉛直ハンガーの下端と同様の張力調整機構が備わっている。ストランドに張力を導入することで主ケーブルに作用する応力を低減す

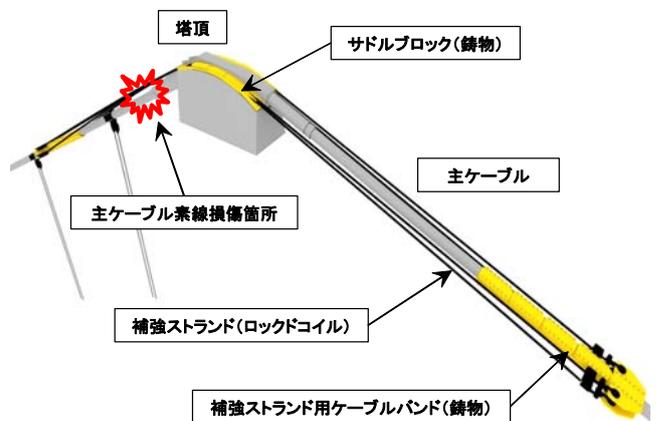


図-4 主ケーブル補強

ることが出来る。補強ストランドは、補強用バンド部では上下2段配置であるが、配列が塔頂に向かって徐々に変化し、塔頂付近では水平2列の配置となっている。塔頂にはストランドを支持するサドルブロックと呼ばれる部材を設置した。サドルブロックには溝があり、その溝に沿ってストランドが設置できるようになっている。写真-10 にサドルブロックを示す。

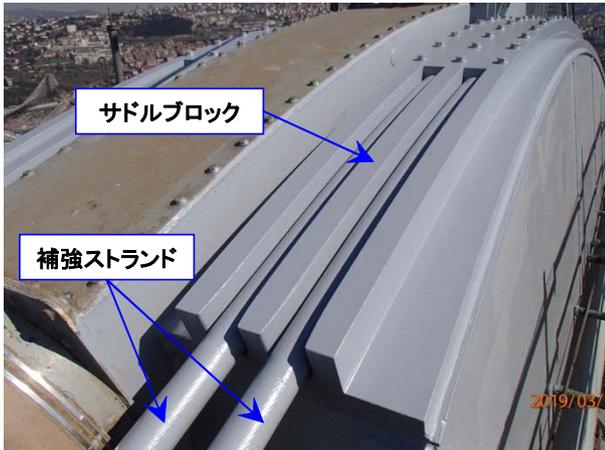


写真-10 サドルブロック

3. 2 現場作業

各新設部材の特徴を以下に述べる。

(1) 補強ストランド

補強ストランドには、直径92 mmのロックドコイルロープを使用し、ハンガー同様、ピン部に球状ベアリングを組み込みピンとして機能させた。

補強ストランドは交通量が少なく橋全体の温度が均一となる午前4時頃に張力導入・測定を行った。ロックドコイルはクリープの影響が大きく、張力低下が起きるため、数週間にわたり数回かけて張力導入を行った。

(2) サドルブロック

サドルブロックは補強ストランドを塔頂で支持する部材である。補強ストランドの鉛直力は塔頂サドルに支圧として伝達されるため、サドルブロックは塔頂サドルの円弧形状と同じ形状にしなければならなかった。工場での製作性と現場での施工性を考慮し、1部材あたり2m程度の長さのブロックに分割することとしたが、既設塔頂サドルには凹凸があり、サドルブロックと塔頂サドルの接触面の間に隙間が生じることが想定された。そのため、十分な圧縮強度(13 MPa)を持つ

たゲル状の材料を隙間に充填することでサドルブロックと塔頂サドルを密着させた。

サドルブロックは塔頂サドルに溶接で接合することとした。しかしながら、塔頂サドルに使われている材料の情報が不明確であったため、既設材料は軟鋼であると仮定し、適切な溶接方法を確立するためにモックアップ試験を実施した。また、塔頂サドルへの溶接量が比較的大きく、主ケーブル素線への熱影響が懸念されたため、モックアップ試験により主ケーブル素線に接する部材の温度が300℃を超えないように溶接方法を決定した。

(3) 補強ストランド用ケーブルバンド

補強用バンドは補強ストランドを主ケーブルに定着するための部材である。補強用バンドと主ケーブル間の摩擦によってストランド張力に抵抗するためには、10mの長さの補強用バンドが必要であった。しかしながら、主ケーブルの曲線形状に合わせた10mの長さの補強用バンドを製作し摩擦を確保することは極めて困難であった。また、1部材の重量が12ton程度となるため、現場での施工性が懸念された。そのため、図-5に示すように補強用バンドを5分割(タイプ1:1セット、タイプ2:4セット)することとした。5つ補強用バンドを一体として機能させるために、それぞれの補強用バンド同士を密着させた状態で据え付ける必要があった。そのため、以下のような対策を行った。

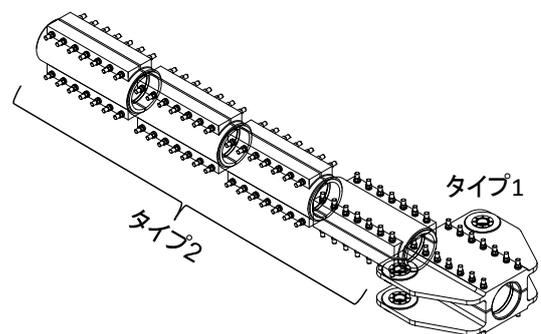


図-5 補強ストランド用ケーブルバンド

- 主ケーブル形状を現地計測し、その結果を反映しそれぞれの補強用バンド端面の角度を決定
- 工場にて仮組立てを行い、補強用バンド形状および密着状態を確認し、精度を確保した

- 現場において補強用バンド設置後、**図-6** に示す仮ストランドおよびジャッキ設備にて補強用バンド全体にプレテンションを与え、それぞれの部材を完全密着させた状態で補強用バンドボルトを固定した。

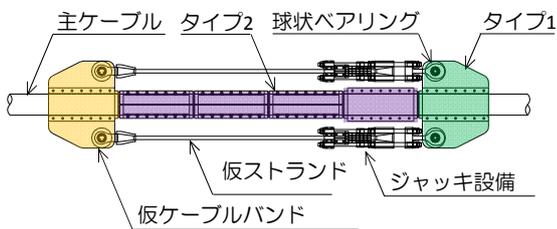


図-6 仮ストランドおよびジャッキ設備

また主ケーブルと補強用バンド間の摩擦係数が設計値を確保しているか確認するために、実物の補強用バンド(タイプ 1)を用いて現場で試験を行った。試験の結果、設計値を上回る、摩擦係数が 0.5 以上であることが確認された。

補強用バンドボルトの設計軸力は 751 kN であったため、新設鉛直ハンガーの補強用バンドと同様、軸力低下を考慮して 834 kN を初期軸力として導入した。

4. 送気乾燥システム

主ケーブルの長寿命化を目的に、主ケーブルに送気乾燥システムを設置した。送気乾燥システムとは乾燥空気を送気口から主ケーブル内に送気し、ケーブル内を低湿度に保つ装置である。**図-7** の送気乾燥システムの配置図に示すように、大気除塵、除湿を行うプラントルームを補剛桁・主塔・アンカレッジ内に設置し、主ケーブルに送気口 12 箇所、排気口 10 箇所を設けた。

主ケーブルの表面は空気漏れを防ぐため、エラストメリックラッピングによって気密性を高めた。エラス

トメリックラッピングには Cable Guard という厚さ 2.3 mm の柔軟性に富み、主ケーブルの被覆に適したポリエチレン系の弾性材を使用した。Cable Guard の色は指定することができ、吊橋本体と同じ色を選択した。Cable Guard はラッピング用の治具を使い、総幅の 50% がオーバーラップするように主ケーブルに巻いていき、どの部分にもラップした層がある状態になっている。均一で気密な層を形成するために、ラッピング作業の後に電気式のブランケットで加熱を行った。Cable Guard の熔融温度は約 132℃ であり、この作業によりラップ層が一体化する。**写真-11** にエラストメリックラッピングの作業状況を示す。加熱プロセスが完了すると、主ケーブル全長にわたりエラストメリックラッピング上面に幅 400mm の滑り止めを施工した。滑り止めにはエラストメリックラッピングと同じ色の塗料にアルミナ質の砂を混ぜたものを使用した。



写真-11 エラストメリックラッピング作業

ケーブルバンドの両端および側面にある上下バンドの隙間は、コーキングすることで気密性を確保した。側面の隙間は深いので、コーキング材を 2 回に分けて注入し、1 回目に注入したコーキング材がある程度硬化してから 2 回目を注入することで、材料の接着性を

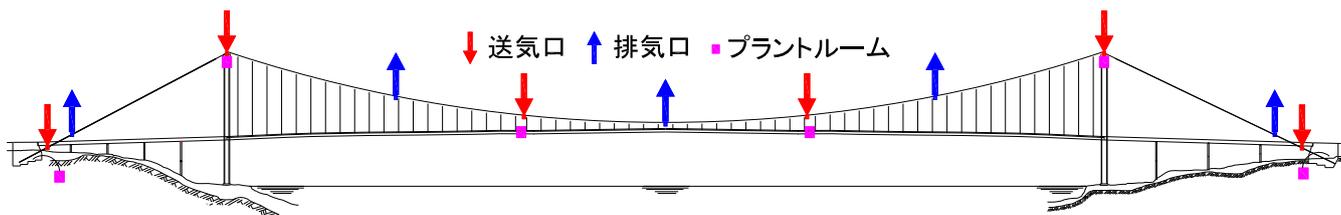


図-7 主ケーブル送気乾燥システム 配置図

高めている。

アンカレイジ部の送気乾燥については、アンカレイジ全体を除湿するには空間が大きすぎて不経済になるため、主ケーブルのスプレー部分のみをテントで覆い、その内部を送気乾燥させるようにした。アンカレイジ内の空気は循環させて、乾燥効率を高める工夫がなされている。**写真-12**にアンカレイジ内スプレー部のテントの状況を示す。

主ケーブル送気乾燥システムは、**写真-13**に示すように常時プラントルーム及び送排気口の状況を監視し、相対湿度が40%以下になるよう自動制御されている。これらのデータは光ファイバーで道路管理事務所に送信され、モニタリング出来るようになっている。**図-8**に送気乾燥システム稼働開始からの主ケーブル湿度の経過を示す。2016年4月13日にシステムは稼働開始し、稼働直後は主ケーブル内には水分が残っているため湿度は90%近い値を示したが、それらは徐々に排出され2か月後には40%以下となり、その後は安定した

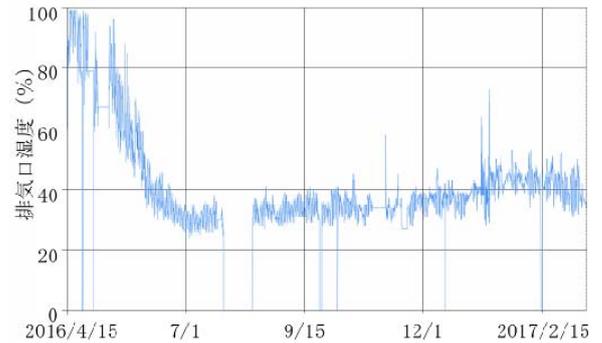


図-8 主ケーブル相対湿度の経過

湿度が保たれていることが分かる。このことから、本送気乾燥システムは効果的に稼働していると言える。

5. おわりに

本報告では第1ボスプラス橋で行われたハンガー取り替え、主ケーブル補強及び送気乾燥システムの導入について紹介した。これらの手法は吊橋の保全としては希少であり、本工事を通じて貴重なデータを得ることができた。これらの経験が将来同種の工事を実施する際の参考となれば幸いである。**写真-14**に工事完成写真を示す。

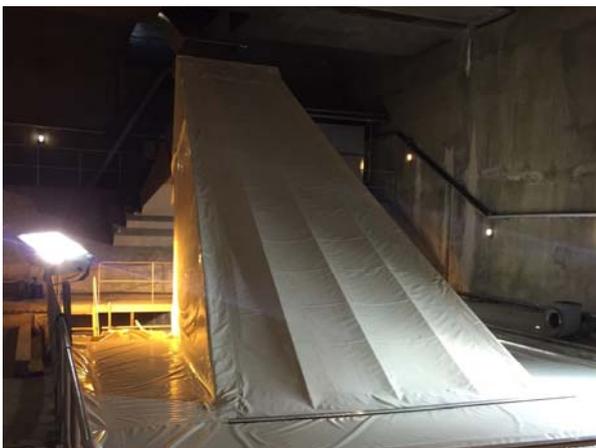


写真-12 スプレー部のテント

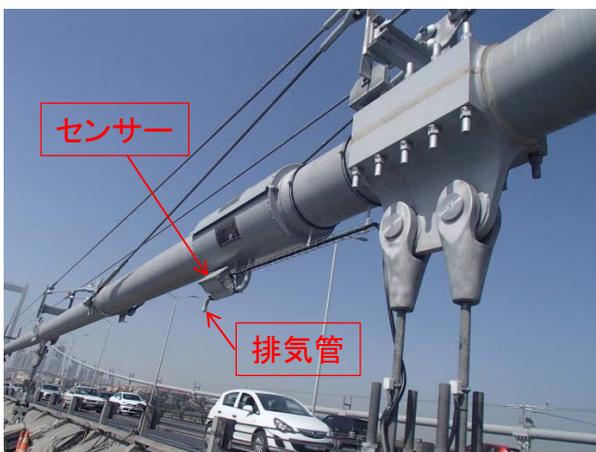


写真-13 排気口スリーブ



写真-14 工事完成写真

最後に、本工事の施工に多大な協力をいただいたトルコ道路庁様、ならびに工事関係各位とトルコの現地スタッフの皆様のご協力に対し、ここに深く感謝の意を表します。