

トルコ第1, 第2 ボスポラス橋における大規模補修工事

LARGE SCALE REHABILITATION PROJECT OF FIRST AND SECOND BOSPHORUS BRIDGE

社浦潤一* , 杉村誠** , 北山暢彦*** , 井谷達哉****

Junichi SHAURA, Makoto SUGIMURA, Nobuhiko KITAYAMA and Tatsuya IDANI

ABSTRACT This paper is a construction report of “LARGE SCALE REHABILITATION PROJECT OF FIRST AND SECOND BOSPHORUS BRIDGE”. This project has some kinds of work items. In this paper, we focus the work item of replacement of existing hanger ropes, cable inspection to reinforcement of main cable and installing dehumidification system. At first, we didn't plan to do reinforcement of main cable, but in the result of cable inspection, it turns out to be necessary to maintain the main cable.

KEYWORDS: ハンガー取り替え, 主ケーブル開放調査, 主ケーブル送気乾燥システム

Replacement of existing hanger rope, cable inspection, dehumidification

1. まえがき

第1, 第2 ボスポラス橋は, トルコのイスタンブール県に建設されたボスポラス海峡に架かる吊り橋である。第1 ボスポラス橋 (2016年のクーデター未遂事件後に, 「7月15日殉教者橋」と改名されている。)は1973年に完成し, 建設後すでに50年近く経過している。また, 第2 ボスポラス橋は1988年に完成し, 30年以上が経過している。この2つの吊り橋はイスタンブールのヨーロッパ側とアジア側を結ぶ主要幹線道路上に位置し, 2橋合計で1日40万台の自動車が往来している。2013年に橋梁管理者であるトルコ道路庁は, このような状況下で老朽化した橋梁の補修と長寿命化を目的とした大規模補修工事を行うことを決定した。本工事には第1 ボスポラス橋の斜めハンガーを鉛直ハンガーに取り替えるという特徴的な工種が含まれている。世界の長大吊橋の中で, 斜めハンガーを有する吊橋は, 1966年にイギリスで建設されたセバーン橋, 1981年に同じくイギリスで建設されたハンバー橋の2橋が挙げられる。これらの橋については, 過去にハンガーケーブルが取り替えられたことはあるが, 斜めハンガーから垂直ハンガーに取り替えられた工事としては, 本工事が初めてである。

* (株) IHI インフラシステム 海外プロジェクト室 ブレイラPJグループ 部長
(〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12 吾妻ビル)

** (株) IHI インフラシステム 海外プロジェクト室 欧州エンジニアリングセンター 部長
(〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12 吾妻ビル)

*** (株) IHI インフラシステム 橋梁技術室 設計部 部長
(〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町3番地)

**** (株) IHI インフラシステム 海外プロジェクト室 ブレイラPJグループ 課長代理
(〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12 吾妻ビル)

2. 工事概要

2012年、トルコ道路庁主導のもと PARSONS（米国コンサルタント）によって第1、第2ボスポラス橋の健全度調査が実施され、第1ボスポラス橋のハンガー取り替え工事をはじめ、鋼床版のき裂補修や、主ケーブル送気乾燥システム設置等の長寿命化を目的とした補修が行われることになった。斜めハンガーを有する長大吊り橋は世界に数橋しか存在しないため、第1ボスポラス橋の斜めハンガー形式を鉛直ハンガー形式へ取り替える工事は世界でも例のない試みとなった。2013年、IHI インフラシステムは MAKYOL（トルコの大手ゼネコン）とのJVで本工事を受注した。図-1に本工事の組織図を示す。

本工事は2014年4月から着手し、2年後の2016年3月に完了した。図-2に第1、第2ボスポラス橋の一般図および補修工事箇所、写真-1に全景写真を示す。ただし当初予定されていた主ケーブルの開放検査により、第1ボスポラス橋の塔頂部において多くの素線が腐食により破断していることが判明した。そこで追加工事としてその後、主ケーブルの補強を行うこととなった。本稿では「ハンガー取り替え工」、「主ケーブル開放調査工」から「主ケーブル補強工」および「主ケーブル送気乾燥システム設置工」について報告する。

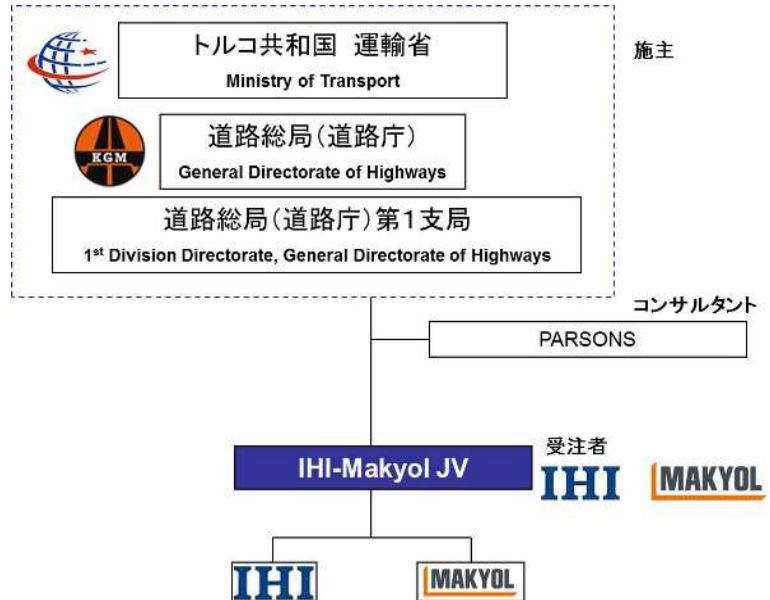


図-1 組織図

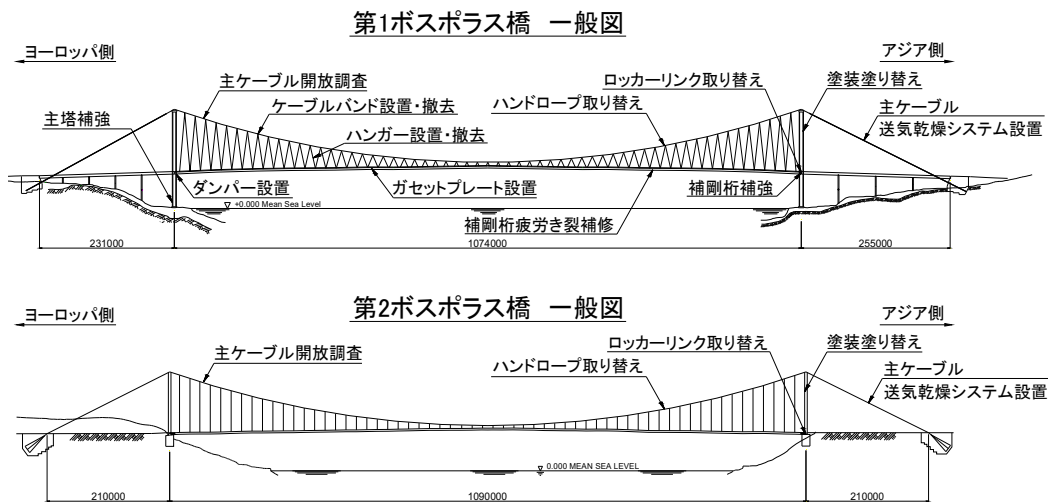


図-2 一般図および補修工事箇所

3. ハンガー取り替え工

3.1 ガセットプレート設置

(1) 概要

ガセットプレートはハンガーを補剛桁に定着するための部材である。写真-2、図-3にガセットプレートの概略図を示す。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」



第1 ボスポラス橋



第2 ボスポラス橋

写真-1 全景写真

および「内部補強材」によって構成されている。ピンプレートには球状ベアリングが取り付けられ、ハンガーの定着部が完全にピン結合として機能し、補剛桁の動きにより生じる曲げモーメントがケーブルに伝達されないようになっている。新ガセットプレートは、既設ダイヤフラムから1m離れた個所に設置された。桁内のダイヤフラムや補強材の位置を桁外に正確に投影し、サイドプレートと内部補強材が同じ位置に設置できるように配慮した。図-4に内部補強材の配置を示す。内部補強材を設置する部位の寸法は、図面上ではすべて同じであるが、実際には設置場所によって補剛桁の製作精度により生じるわずかな寸法の違いがある。そのため、全設置個所の現地計測を行った後、補強材形状を4種類にグルーピングした。内部補強材は最寄りのマンホールから搬入できるサイズとした。

(2) 溶接手順

最初に、アメリカ溶接協会の規定に則り、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る。ピンプレートの溶接は構造上の狭隘部であるため、片側から大熱量の溶接を行わなければならないが、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予め推定し、溶接前のピンプレートのセット方法を決めた。

3.2 ケーブルバンド設置

(1) 概要

新鉛直ハンガーの設置位置は、既設斜めハンガーとは



写真-2 新旧ガセットプレート

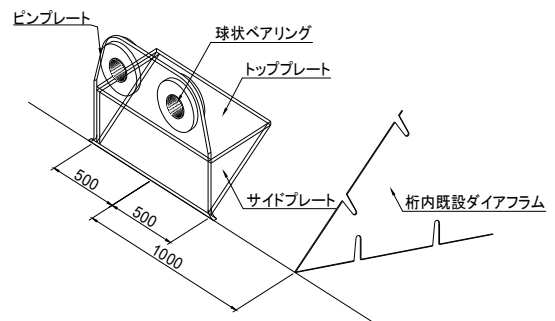


図-3 ガセットプレート概略図

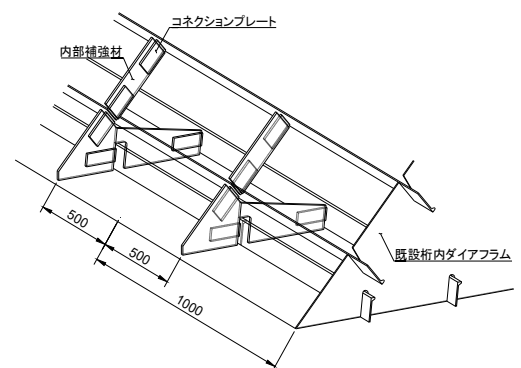


図-4 内部補強材配置

異なるため、主ケーブルとハンガーを定着するケーブルバンドも新しく設置された。主ケーブルの鉛直面に対する角度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。第1ボスポラスの側径間はハンガーで吊られていない形式の吊り橋であるため、側径間のケーブルバンドを取り替える必要はないが、本工事にはハンドロープの取り替えも含まれており、それに伴い側径間のケーブルバンドも新たに取り替えを行った。図-5にケーブルバンドの概略図を示す。

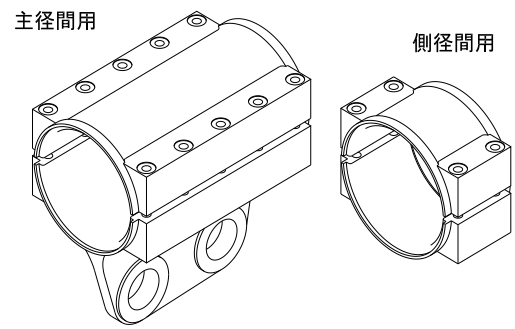


図-5 ケーブルバンド概略図

(2) 主ケーブル径の計測

新ケーブルバンドを製作するにあたり、主ケーブル径の計測を行った。本来であればラッピングワイヤを取り外した状態で計測しなければならないが、工程上の理由で足場設置の前に計測と製作を始める必要があったため、ラッピングワイヤの上からケーブル径を計測した。そのため、路面付近の主ケーブルのラッピングワイヤを足場無しで撤去し、その位置での撤去前後の主ケーブル径を比較することで計測結果の補正を行うことにした。計測の結果、主ケーブル径は縦径より横径の方が若干大きいことが分かった。また、既設ケーブルバンド近傍の径は、新ケーブルバンドが設置される位置より4mm程度小さいことが分かった。そのため、空隙率等も考慮し、新ケーブルバンドの径は既設ケーブルバンド近傍の計測値を採用した。

(3) 新ケーブルバンド設置位置

新ケーブルバンドは、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。そのため、新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、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。

(4) ケーブルバンド設置

ケーブルバンド設置に先行し、ラッピングワイヤの撤去および主ケーブルのコンパクションを行い、その後、ケーブルバンドの吊り上げを行った。写真-3にコンパクションの状況を示す。



写真-3 コンパクション設備

ケーブルバンドを設置した後にケーブルバンドボルトの軸力計測を行った。中央径間のケーブルバンドには10本のボルトがあり、ボルトテンショナーを使用して同時に締め付けた。写真-4に締め付け時の状況を示す。



写真-4 バンドボルト締め付け状況

ケーブルバンドを設置した後もボルトの導入軸力は主ケーブルの状態によって変化する可能性があるため、ボルト軸力の計測は3回行った。1回目はケーブルバンド設置後、2回目はラッピングワイヤの設置前、3回目は新ハンガー設置後である。軸力計測には、温度の影響を考慮できる超音波軸力計を使用した。予め工場製作時に標準温度状態で全

てのボルトの無応力長を計測・記録して、温度補正された締め付け後の張力を測定した。写真-5に超音波軸力計によるボルトの無応力長計測を示す。計測の結果、導入軸力に変化があり軸力が要求値を満足できていない場合は、再度締め付けを行った。

3.3 ハンガー設置・撤去

(1) 新ハンガー概要

新ハンガーには直径 55mm のスパイラルロープを使用した。図-6の概略図に示すように、ハンガーは①ソケット、②ブリッジボール、③テイクアップアッセンブリーで構成されており、下端はケーブル長および張力が調整できるようになっている。

まずハンガー下端のテイクアップアッセンブリーのみを設置した。次に夜間交通規制を行い、路面から近いハンガーはクレーンを使用し、高所のハンガーはウィンチを使用して吊り上げた。鉛直ハンガーと斜めハンガーが混在する状態では、新旧ハンガーが同じ面にあるため、交差する部分に損傷が生じないように写真-6に示すようなプロテクターを設置した。その後ケーブルバンド側のソケットを設置し、ピンの挿入を行った。

(2) 新ハンガー張力導入

1 格点は 2 本のハンガーで構成されているため、その 2 本のハンガーに同じ張力が導入されるよう、1 格点あたり 4 台の連動ジャッキを同期させて、支間中央から主塔に向かって順次 8 格点 (計 32 台のジャッキを使用) の張力を同時に導入していった (全 120 格点を 15 ステップで張力導入)。写真-7に張力導入設備、図-7に張力導入ステップを示す。

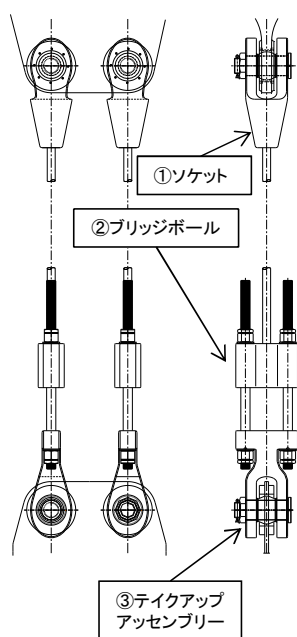


図-6 新ハンガー概略図

導入張力は各ハンガーとも約 500kN で、解析によって新設ハンガーに張力を導入することによって既設ハンガー張力が解放されることを確認した。実際にハンガーに設計張力を導入することで、既設の斜めハンガーの張力がほぼ抜けていることが確認できたので、全てのハンガーへの設計張力導入後に、既設の斜めハンガー・ケーブルバンドの撤去を行った。写真-8に新設ハンガ



写真-5 ボルトの無応力長計測

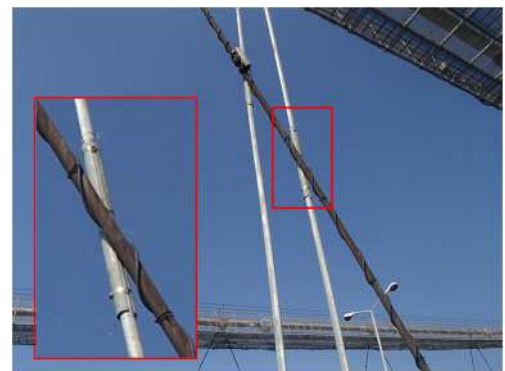


写真-6 ハンガープロテクター



写真-7 張力導入設備



写真-8 張力導入直後の既設ハンガー

一張力導入直後に張力が解放された斜めハンガーの状況を示す。既設ハンガー撤去後に再度張力測定を行い、設計張力±5%の許容値を超える格点については張力調整を行った。また調整を行った場合は、その両隣の格点のハンガー張力も再計測し、それらが許容値以内に収まっていることを確認した。

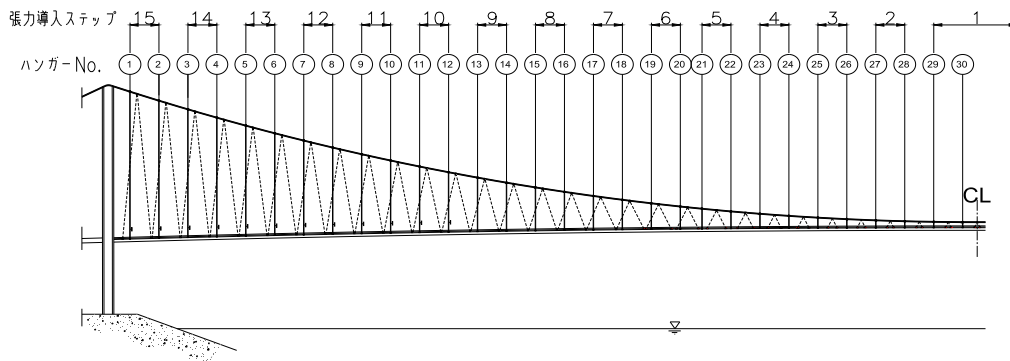


図-7 張力導入ステップ

4. 主ケーブル開放調査工および補強工

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-9に主ケ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50年近く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ルールを使用して、張力導入のうえ再接続した。写真-10に素線接続作業状況、および写真-11にターンバックル付きフェルールを示す。

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-12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ルールを用いて素線を接続し、腐食の除去を行った。写真-13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。



< 上側 >



< 下側 >

写真-9 主ケーブル開放調査状況



写真-10 新旧素線接続状況



写真-11 ターンバックル付きフェルール



写真-12 塔頂の主ケーブル素線損傷状況



写真-13 素線修復後の状況

4.1 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-8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-14にサドルブロックを示す。

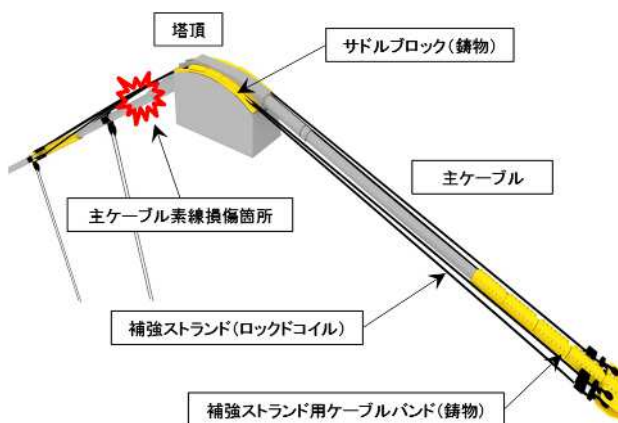


図-8 主ケーブル補強

4.2 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작성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) を持っ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、10 m 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-9 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 つの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。

- ・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-10 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。

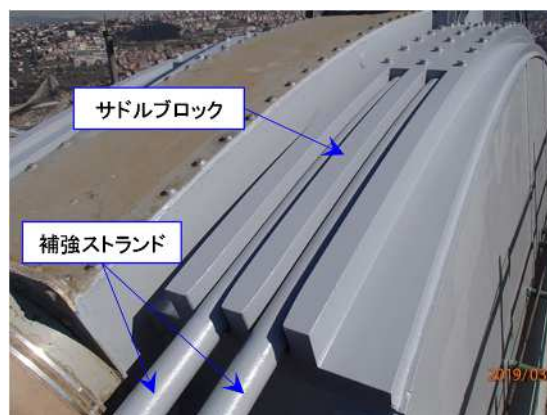


写真-14 サドルブロック

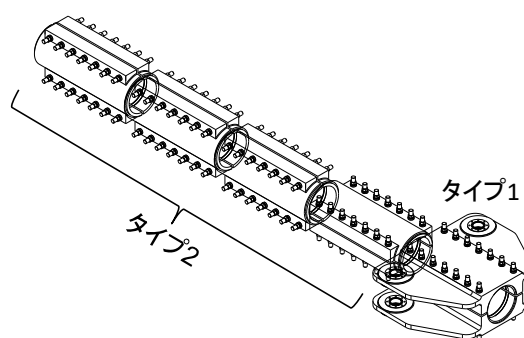


図-9 補強ストランド用ケーブルバンド

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。

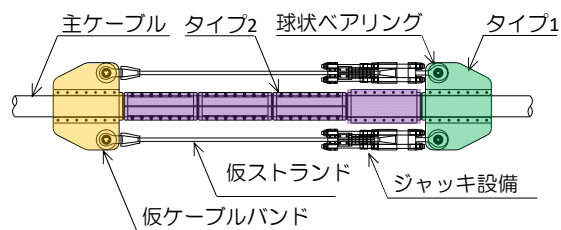


図-10 仮ストランドおよびジャッキ設備

5. 主ケーブル送気乾燥システム設置工

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-11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。

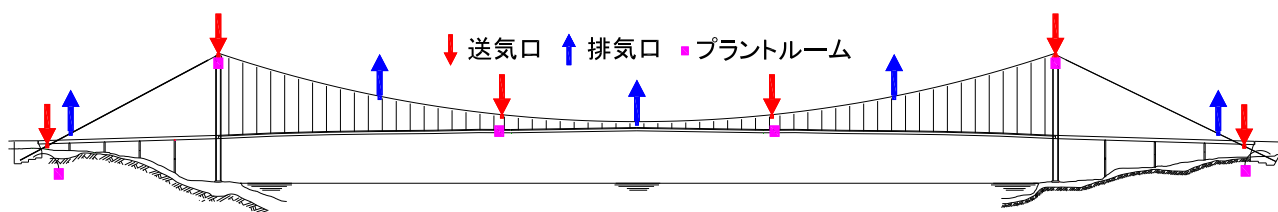


図-11 主ケーブル送気乾燥システム配置図

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-15 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。

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、材料の接着性を高めている。

アンカレッジ部の送気乾燥については、アンカレッ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



写真-15 エラストメリックラッピング作業

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-16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-17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-12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。

6. おわりに

本報告では第1ボスポラス橋で行われたハンガー取り替え、主ケーブル開放調査からの補強工事およ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-18に工事完成写真を示す。

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。

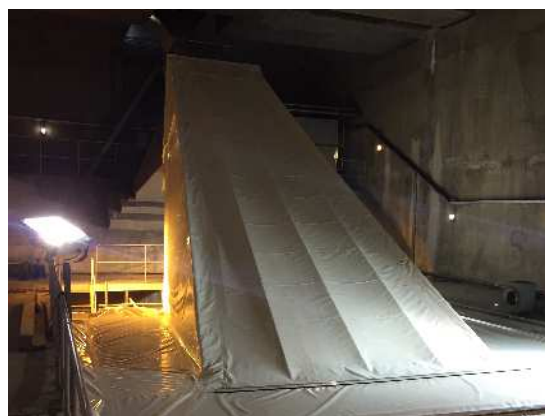


写真-16 スプレー部のテント

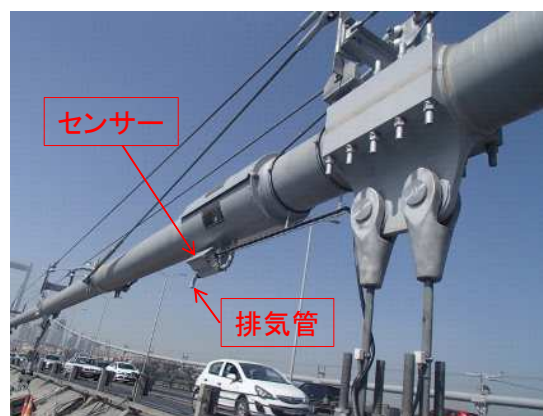


写真-17 排気ロスリーブ

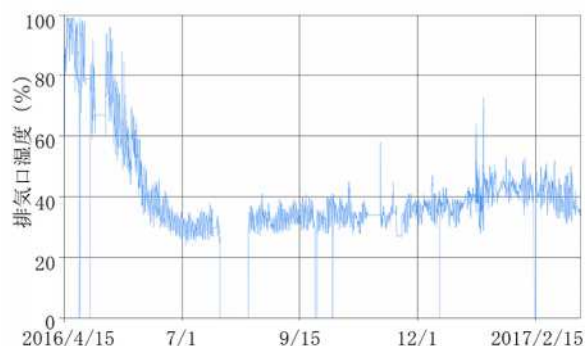


図-12 主ケーブル相対湿度の経過



写真-18 工事完成写真